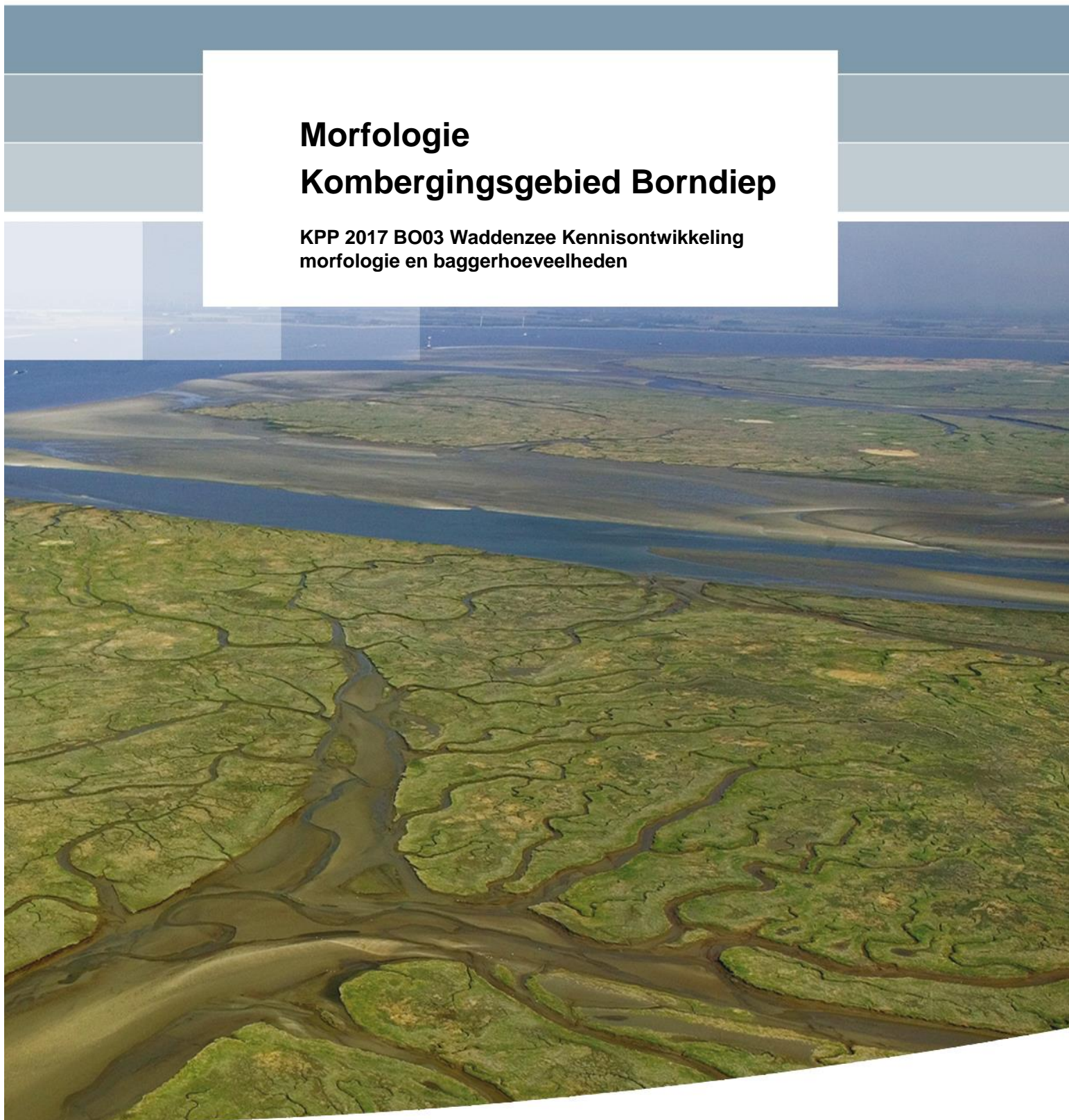


Morfologie Kombergingsgebied Borndiep

**KPP 2017 B003 Waddenzee Kennisontwikkeling
morfologie en baggerhoeveelheden**



Morfologie Kombergingsgebied Borndiep

**KPP 2017 B003 Waddenzee Kennisontwikkeling morfologie
en baggerhoeveelheden**

Oost, Albert
Cleveringa, Jelmer (Arcadis)

11200521-000

Titel
Morfologie Kombergingsgebied Borndiep

Opdrachtgever
RWS-WVL

Project
11200521-000

Kenmerk
11200521-000-ZKS-0004

Pagina's
128

Trefwoorden

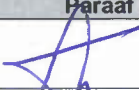





Waddenzee, morfologie, Zeegat van Ameland, Borndiep, kombergingsgebied rapportage, beheerbibliotheek

Samenvatting

Dit rapport geeft een overzicht van de actuele kennis van de morfologie van het kombergingsgebied Borndiep (ook wel Zeegat van Ameland), inclusief een overzicht van de beheer- en beleidsvraagstukken, en is bedoeld als de start van de 'beheerbibliotheek' van de kombergingsgebieden van de Waddenzee. Achtereenvolgens worden behandeld: de grootschalige ontwikkeling, beleid, beheer en gebruik, getijdegeulen, wadplaten en kwelders.

Referenties

KPP 2017 BO03 Waddenzee Kennisontwikkeling morfologie en baggerhoeveelheden

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	Okt. 2017	J. Cleveringa A. Oost		M. Taal			
2	Dec 2017	J. Cleveringa A. Oost		M. Taal		F.M.J. Hoozemans	

Status
definitief

Inhoud

Management samenvatting	1
1 Inleiding	9
1.1 Doel	9
1.2 Morfologische schaalniveaus	10
1.3 Eenheden op de mesoschaal	12
1.4 Kenmerken van het gehele kombergingsgebied	13
2 Beleid, beheer en gebruik	17
2.1 Inleiding	17
2.2 Toegankelijkheid	17
2.3 Veiligheid tegen overstromingen	21
2.4 Natuur en milieu	24
2.5 Andere functies	25
2.6 Indicatoren voor beleids- en beheervraagstukken	26
3 Grootschalige en langjarige ontwikkelingen van het kombergingsgebied Borndiep	29
3.1 Grootschalige en langjarige morfologische veranderingen	29
3.1.1 De Middellzee als voorloper van het huidige Borndiep	29
3.1.2 Verplaatsing wantijen	31
3.1.3 Erosie van de westkust van Ameland	31
3.2 Dammen	33
3.3 Sedimentatie en areaalveranderingen in het kombergingsgebied	35
3.3.1 Volumeveranderingen	35
3.3.2 Areaalveranderingen	38
3.3.3 Sedimentatie in het kombergingsgebied	39
4 Getijdegeulen	41
4.1 Inleiding	41
4.2 Basisbegrippen	41
4.3 De relatie tussen omvang van de geul en de waterbeweging	43
4.3.1 Verandering van de omvang van geulen door de veranderingen van hun getijdeprisma.	46
4.4 Kenmerkende geulvormen en -dynamiek	50
4.4.1 Het zeegat	50
4.4.2 Geulbochten of meanders	53
4.4.3 Eb- en vloedscharen	54
4.4.4 Concurrende geulen	56
4.4.5 Het opschuiven van de geulen bij het wantij	56
4.5 Korrelgroottes in geulen	58
4.6 Veranderingen in de ligging van de geulen in relatie tot gebruik en beheer	61
4.6.1 Het Borndiep en de westkust van Ameland	62
4.6.2 Getijdegeulen en vaarwegen	65
5 Wadplaten	75

5.1	Inleiding	75
5.2	Definitie(s)	76
5.2.1	A. De vloedgetijde delta	77
5.2.2	B. Hogere platen ten zuiden van Ameland	81
5.2.3	C. Wantijen	81
5.2.4	D. & E De plaatgebieden die voor de eilandkwelders en de vastelandskwelders liggen;	83
5.2.5	De overige plaatgebieden (X en Y in Figuur 5-1).	85
5.3	Korrelgrootteverdeling op de platen	85
5.4	Autonome ontwikkelingen van droogvallende platen	87
6	Kwelders	91
6.1	Inleiding	91
6.2	Definities	93
6.2.1	Morfologische ontwikkelingen	94
6.2.2	Kreken, oeverwallen en kommen	95
6.3	Vastelandskwelders	96
6.4	Eilandkwelders	104
6.5	Beleid en beheer rond kwelders en kennisvragen	109
7	Overzicht van de bevindingen voor de gebruikers	111
7.1	Inleiding	111
7.2	Welke grootschalige en langjarige ontwikkelingen van de sedimentvolumes treden op in de kombergingsgebieden en de kwelders, de buitendelta's en de kustgebieden?	112
7.3	Treedt 'verzanding' op in het kombergingsgebied van het Borndiep door de zandsuppleties op Ameland?	113
7.4	Welke erosie vindt plaats aan de oostpunt van Terschelling (Boschplaat)?	115
7.5	De vaarweg Holwerd-Ameland	115
7.5.1	Deelgebied 1: Nabij de veersteiger: VA42-VA24	116
7.5.2	Deelgebied 2 De grote bochten van VA12 tot VA24	117
7.5.3	Deelgebied 3. Nieuwe drempels op het kruispunt Scheepsgat-Zuiderspruit met de vaarweg VA12-VA4	118
7.6	Waarom vindt erosie plaats bij de zuidwest kust van Ameland en welke maatregelen worden daar tegen in gezet?	120
7.7	Het onderliggende denkmodel bij de bevindingen voor de gebruiker.	120
8	Referenties	123
	Bijlage(n)	
A	Metingen en gegevens fysica	A-1

Management samenvatting

1. Naar een beheerbibliotheek

Dit eerste 'kombergingsrapport' vat de huidige morfologische kennis samen, en biedt een basis voor beleid- en beheervraagstukken. Het rapport bevat een bloemlezing van de state of art morfologische kennis over het betreffende kombergingsgebied. Het voorliggende rapport is een pilot voor 'kombergingsrapporten' voor de hele Nederlandse Waddenzee, waaraan komende jaren verder wordt gewerkt.

De inhoudelijke doelen van het kombergingsrapport zijn:

- Overzicht geven van beheervraagstukken die het thema morfologie raken;
- Een beeld geven van de historische morfologische veranderingen en het waarom daarvan;
- Een doorkijk geven naar de verwachte ontwikkelingen
- Antwoord geven op de kennisvragen die prioriteit hebben vanwege specifieke beheervraagstukken;
- Aangeven waar de inhoudelijke kennisleemtes zijn, en welke kennislacunes er zijn in relatie tot het beheer en beleid.

In het kombergingsrapport staat rondom het thema morfologie een samenhangend gebied centraal, met daaraan gerelateerde beheer en beleidsvraagstukken. Eerdere rapporten, studies en boeken over zand en slib in het waddeengebied hebben veelal betrekking op specifieke morfologische ontwikkelingen, of op specifieke problemen. Het kombergingsrapport is gericht op de kennis van de morfologie. Daarbij komen een aantal morfologische ontwikkelingen aan de orde die gevolgen hebben voor de ecologie. Het in beeld brengen van ecologische kennis is echter geen doelstelling van het rapport.

Toekomstbeeld is een set kombergingsrapporten voor de gehele Waddenzee, met overzicht en toegang tot relevante literatuur: een Beheerbibliotheek Kombergingsgebieden. Als voorbeeld dienen de beschrijvingen die zijn opgesteld en worden onderhouden voor alle kustvakken: de Beheerbibliotheek Kust: (<https://publicwiki.deltares.nl/display/KPP/Toestand+van+de+kust#ToestvdKust-Beheerbibliotheek>). Op deze wijze wordt het voor alle beleidsmakers, beheerders, gebruikers en overige belanghebbenden van de Waddenzee mogelijk om een goed overzicht te krijgen van de bestaande informatie rondom de morfologische ontwikkeling van betreffend kombergingsgebied. Meer overzicht moet leiden tot meer begripsvorming en eenduidige communicatie over dit onderwerp. Daarnaast wordt inzichtelijk gemaakt hoe Nederland bijdraagt aan de kennisontwikkeling rond thema morfologie over het trilaterale Werelderfgoedgebied Waddenzee.

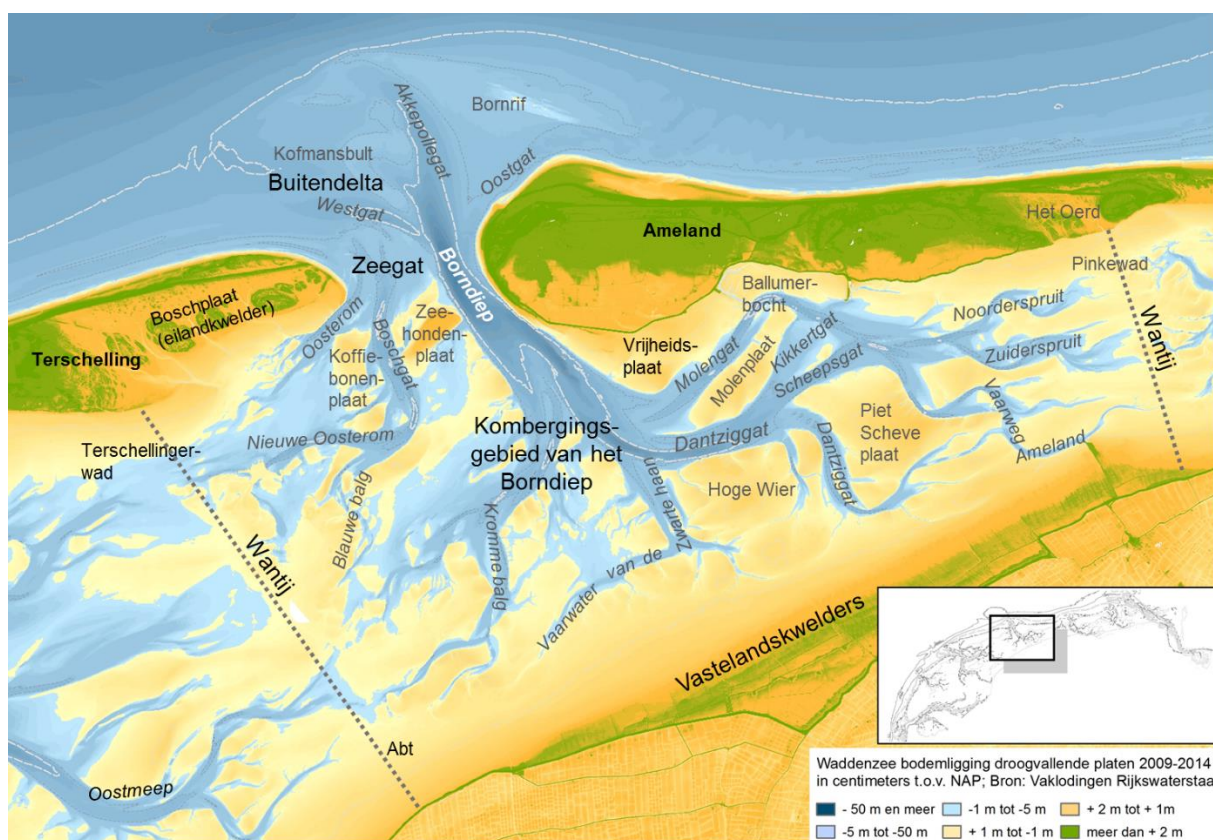
Dit pilot-kombergingsrapport moet nog worden beoordeeld op rol en vorm:

- Vaststellen of er behoefte is aan dergelijke kombergingsrapporten en daarmee aan een beheerbibliotheek;
- Uitzoeken of deze vorm de gewenste is voor de beoogde gebruikers en welke verbeteringen nodig zijn bij eventuele volgende kombergingsrapporten;
- Nagaan of naast dergelijke rapporten ook onderliggende data beschikbaar dienen te worden gesteld, naar voorbeeld van de Beheerbibliotheek Kust.

Deze samenvatting gaat in op de beheervragen en de daaruit voortvloeiende kennisvragen. Eerst wordt een overzicht gegeven van het studiegebied.

2. Overzicht kombergingsgebied Borndiep

Het kombergingsgebied van het Borndiep, of ook wel het kombergingsgebied van het Zeegat van Ameland (figuur samenvatting 1), wordt aan de Noordzeezijde begrensd door de oostzijde van het Waddeneiland Terschelling, het Zeegat van Ameland en de westelijke helft van Ameland. De west en oostgrenzen van het kombergingsgebied worden gevormd door de wantijen, dat zijn plaatgebieden waar de vloedstroom uit het ene zeegat de vloed uit het naastliggende zeegat ontmoet. Aan de vastelandszijde wordt het kombergingsgebied begrensd door de dijk.



Figuur Samenvatting 1. Kaart van het kombergingsgebied Borndiep, met de namen van de geulen en platen.

In het kombergingsgebied van het Borndiep zijn alle karakteristieke morfologische onderdelen van de Waddenzee aanwezig:

- De altijd onder water staande geulen;
- De bij laagwater droogvallende platen;
- De kwelders, die alleen tijdens zeer hoge waterstanden overstromen met zeewater.

De geulen vormen een vertakkend patroon, met de grootste geul in het zeegat en steeds kleinere aftakkingen naarmate de geulen verder in het kombergingsgebied liggen. De geulen begrenzen de droogvallende platen. De kwelders worden onderverdeeld in de eilandkwelders, die aan de zuidzijde van de Waddeneilanden liggen en de vastelandskwelders. Het overgrote deel van de eilandkwelders van het kombergingsgebied Borndiep liggen bij de Boschplaat aan de oostzijde van Terschelling. De vastelandskwelders liggen tegen het vasteland aan en worden, in tegenstelling tot de eilandkwelders, gekenmerkt

door de aanwezigheid van kwelderwerken (het rechthoekige patroon van rijshouten dammetjes en greppels) en zomerdijken.

Aan de Noordzeezijde is het kombergingsgebied Borndiep via het zeegat verbonden met de buitendelta. Op de buitendelta vertakken en verondiepen de geulen uit het zeegat. De buitendelta en zijn dynamiek zijn direct verbonden met die van het kombergingsgebied en de aangrenzende kusten. Samen vormt dit geheel een sedimentdelend systeem. In dit kombergingsrapport wordt beperkt aandacht besteedt aan de buitendelta en aangrenzende kusten, omdat de nadruk op het kombergingsgebied ligt.

3. Vraagstukken vanuit beheer, beleid en gebruik

Hier wordt een selectie van de belangrijkste actuele morfologie-gerelateerde vraagstukken vanuit beleid, beheer en gebruik nader toegelicht. Er worden daarbij vijf geprioriteerde kennisvragen genoemd, genummerd van (i) tot (v), die in het volgende gedeelte (4.) van deze samenvatting worden besproken.

3.1 Vragen over waargenomen ontwikkelingen

Wat zijn op de schaal van gehele Waddenzee (megaschaal), op de schaal van de individuele kombergingsgebieden (macroschaal) en op de schaal van de onderdelen van de kombergingsgebieden (mesoschaal) de autonome ontwikkelingen van de kwaliteit en de kwantiteit van de verschillende habitats/ecotopen?

Deze vraag is gekoppeld aan het natuurbeleid en -beheer, waarbij expliciete doelstellingen zijn vastgelegd voor de habitats vanuit het Natura 2000 regime, voor de Natura2000 gebieden Waddenzee en Duinen Waddeneilanden. Ook vanuit Kaderrichtlijn Water zijn doelstellingen geformuleerd voor arealen eilandkwelders. Indirect zijn deze vragen verbonden met alle initiatieven en maatregelen in de Waddenzee met gevolgen voor de arealen van de verschillende habitattypen, omdat deze altijd getoetst worden aan het Natura2000-kader. De bijbehorende prioritaire kennisvraag is:

- (i) Welke grootschalige en langjarige ontwikkelingen van de sedimentvolumes treden op in de kombergingsgebieden en de kwelders, de buitendelta's en de kustgebieden?**

Voor één deelgebied, namelijk de Boschplaat op de oostpunt van Terschelling, speelt een specifieke beheervraag over de ontwikkeling van de arealen. De prioritaire kennisvraag is:

- (ii) Waarom vindt erosie plaats aan de oostpunt van Terschelling (Boschplaat)?**

3.2 Vragen over zeespiegelstijging

Wat zijn de gevolgen van (versnelde) zeespiegelstijging voor de sedimenthuishouding en daarmee voor de arealen van de habitats in de Waddenzee?

Het toekomstperspectief voor de Waddenzee, de ruimte voor beleidsbeslissingen en de dimensionering van beheermaatregelen is van afhankelijk van de response van de Waddenzee op de (versnelde) stijging van de zeespiegel. Dit behelst tevens het vaststellen van, en rekening houden met, plausibele scenario's voor de toekomstige zeespiegelstijging en het bepalen van het meegroeivermogen van de kombergingsgebieden. Momenteel loopt een studie in opdracht van de Waddenacademie en PRW. De resultaten van deze studie

zullen de basis vormen voor de behandeling van dit onderwerp. De resultaten zijn nog niet beschikbaar om in het voorliggende rapport op te nemen.

3.3. Vragen over menselijke ingrepen

De vragen over menselijke ingrepen omvatten de onderwerpen kustsuppleties, de erosie nabij het zeegat en de vaargeulen.

Wat zijn de gevolgen van kustsuppleties voor de Waddenzee?

De vraag komt voort uit het beleid op het gebied van de kustlijn­zorg. Zij heeft niet alleen betrekking op de sedimentvolumes en de arealen, maar ook op de eventuele gevolgen van de kustsuppleties voor de korrelgroottes van het sediment in de Waddenzee, oftewel de eventuele invloed op de kwaliteit van de arealen. De kennisvraag die betrekking heeft op de mogelijke invloed van zandsuppleties kan als volgt worden geformuleerd:

- (iii) *Treedt ‘verzanding’ op in het kombergingsgebied van het Borndiep door de zandsuppleties op Ameland?***

Waar vindt erosie van de kust bij duinen en dijken plaats en welke beheermaatregelen en ingrepen zijn nodig om de doelstellingen voor kustlijn­zorg en de veiligheid tegen overstromingen te realiseren?

Deze vraag komt voort uit de beleids- en beheerdoelstellingen voor de waterkeringen en de kustlijn­zorg. De vraag speelt op de schaal van de individuele morfologische onderdelen in het kombergingsgebied (mesoschaal), op die plaatsen waar een waterkering of kustlijn is gedefinieerd en erosie plaatsvindt, of zal plaatsvinden, door bijvoorbeeld het verplaatsen van een getijdegeul. De vraag die hier logisch op volgt is wat de gevolgen zijn van maatregelen voor de kustlijn­zorg? (hierboven is al stil gestaan bij de gevolgen van zandsuppleties) en voor het waterkeringbeheer. In het rapport wordt specifiek stilgestaan bij twee prioritaire vragen die spelen in het kombergingsgebied:

- (iv) *Waarom vindt erosie plaats bij de zuidwest kust van Ameland en welke maatregelen worden daar tegen ingezet?***

Waar vindt sedimentatie en erosie in de vaarwegen en havens plaats en welke beheermaatregelen en ingrepen zijn nodig om de bereikbaarheid in stand te houden?

Deze vraag komt voort uit de beleids- en beheerdoelstellingen op het gebied van mobiliteit en infrastructuur. De ruimtelijke schaal van de vraag is die van de individuele geulen in het kombergingsgebied (mesoschaal). De vervolgvraag is: wat zijn de gevolgen van vaargeul- en havenonderhoud? In dit rapport wordt stilgestaan bij de prioritaire vraag rond de vaarweg Holwerd-Ameland:

- (v) *Welke morfologische ontwikkelingen vinden plaats bij de vaarweg Holwerd-Ameland en welke invloed hebben de morfologische ontwikkelingen op de bruikbaarheid en het beheer (baggeren) van de vaarweg?***

4. Kennis die dit rapport levert voor de vragen vanuit beheer en beleid

Aan de hand van de vijf hiervoor uitgelichte prioritaire kennisvragen, horend bij de beleids- en beheervragen, wordt duidelijk gemaakt welke kennis dit rapport oplevert voor het beheer en beleid.

(i) Welke grootschalige en langjarige ontwikkelingen treden op in de sedimentvolumes in de kombergingsgebieden en de kwelders, de buitendelta's en de kustgebieden?

In het kombergingsgebied heeft trendmatige netto sedimentatie plaatsgevonden. Door Elias et al (2012) zijn de veranderingen in de sedimentvolumes het kombergingsgebied en de buitendelta bepaald. Door Nederhoff et al. (2017) zijn de ontwikkelingen in het kombergingsgebied opnieuw bepaald en de trend in de sedimentatie komt overeen met de trend die door Elias et al. (2012) is bepaald. In het kombergingsgebied heeft in de periode van 1935 tot en met 2005 een netto sedimentatie plaatsgevonden van $55,6 \times 10^6 \text{ m}^3$. Het buitendeltavolume is tevens toegenomen met $33,7 \times 10^6 \text{ m}^3$. De kust en vooroever van de oostelijke helft van Terschelling en de westelijke helft van Ameland en met daarin ook de buitendelta heeft een toename in het sedimentvolume doorgemaakt van $94,2 \times 10^6$. De kwelders en de duinen vallen buiten de geanalyseerde gebieden, maar in zijn algemeenheid zijn deze gebied door opslibbing en invang van stuifzand ook gegroeid in hoogte. Van de omvang van de netto sedimentatie in de vastelandskwelders is een bepaling beschikbaar in Vermaas en Marges (2015) en deze bedraagt $15,3 \times 10^6 \text{ m}^3$. Van het sedimentatievolume op de Boschplaat zijn geen schattingen of bepalingen bekend. Het sedimentatievolume in de duinen van Ameland bedraagt $19,9 \times 10^6 \text{ m}^3$ en in de duinen van Terschelling $7,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ in de periode 1990-2012 (Vermaas en Marges, 2015). De netto sedimentatievolumes op de kwelder en in de duinen zijn dermate groot dat aanbevolen wordt om deze in toekomst ook te beschouwen in sedimentbalansen. De omvang van de zandsuppleties voor de gehele kust van Ameland bedroegen in de door Vermaas en Marges (2015) geanalyseerde periode $20 \times 10^6 \text{ m}^3$, waarbij wordt opgemerkt dat het grootste deel van het zand ten oosten van de buitendelta van het Zeegat van Ameland is gesuppleerd. Op basis van de kennis van de transportprocessen langs de kust, die een overheersend transport naar het oosten genereren, mag worden verondersteld dat dit volume geen of een beperkte bijdrage heeft geleverd aan het sedimentdelende systeem van het kombergingsgebied Borndiep.

Voor de ontwikkelingen in het kombergingsgebied Borndiep worden de waarnemingen en de trends in de ontwikkelingen beschouwd. Op basis daarvan wordt ervan uitgegaan dat ook in de nabije toekomst waarschijnlijk sprake zal zijn van een doorgaande sedimentatie in het kombergingsgebied Borndiep. Dit heeft gevolgen voor verschillende morfologische eenheden en het gebruik ervan. De toename van het sedimentvolume en de afname van het kombergingsvolume leidt in dat geval tot een verdere toename van het areaal droogvallende platen en een verdere afname van het areaal geulen. Ook de omvang van de geulen zal afnemen en de bruikbaarheid als vaarweg zal voor sommige geulen verder afnemen. Bij een toename van de snelheid van zeespiegelstijging verandert deze voorspelling, waarbij de mate van versnelling belangrijk is voor de daadwerkelijke ontwikkelingen.

(ii) Welke erosie vindt plaats aan de oostpunt van Terschelling (Boschplaat)?

De oostpunt van Terschelling is sinds het begin van de jaren '70 in de vorige eeuw met vrij grote snelheid korter (ruim 2 km) geworden, waardoor al ca. 200 ha van de kwelder verdwenen is. Deze ontwikkeling gaat nog steeds door. Aan de Noordzijde is de oriëntatie van de kustlijn landwaarts verplaatst. Zowel het duincomplex aan de Noordzeezijde als het areaal eilandkwelder op de Boschplaat zijn afgenomen. De afname en ook de groei van de 'eilandstaart' van Terschelling is direct gekoppeld aan de ontwikkelingen in het Zeegat van Ameland en op de buitendelta. De fysische processen die van dag tot dag leiden tot de erosie

zijn het transport van zand door golven en de getijstroming. Hoe de golven en de stroming het eiland raken hangt af van de ligging van de geulen in het zeegat, de Waddenzee en ondieptes op de buitendelta. De ligging van de geulen in het zeegat en de ondieptes op de buitendelta veranderen op een manier die zich in de tijd lijkt te herhalen, hoewel er wezenlijke verschillen bestaan met en tussen de eerdere situaties. De simpelste beschrijving is dat in bepaalde periodes sprake is van één geul in het zeegat, waardoor meer ruimte beschikbaar is voor Terschelling. In andere perioden, waaronder de huidige, zijn twee of meer geulen aanwezig, waardoor minder ruimte aanwezig is voor Terschelling. Het is lastig gebleken om de ontwikkeling van de oostpunt van Terschelling te voorspellen, omdat de ontwikkelingen zich niet geheel op dezelfde wijze en termijnen voordoen als in het verleden. Verkennende studies geven aan dat het niet onwaarschijnlijk is dat de achteruitgang van de oostpunt nog verder zal gaan.

(iii) Treedt 'verzanding' op in het kombergingsgebied van het Borndiep door de zandsuppleties op Ameland?

De kust van Ameland is een van de 'hot spots' voor suppleties langs de Nederlandse kust. Hier is sinds 1990 meer dan $26 \times 10^6 \text{ m}^3$ zand is gesuppleerd. De kust van Terschelling daarentegen is slechts eenmaal gesuppleerd, toen daar in 1993 bij wijze van proef een onderwatersuppletie werd aangelegd. Een vraag die vaak gesteld wordt met betrekking tot de zandsuppleties is of deze de aanvoer van zand naar de kombergingsgebieden vergroten. Op basis van de kennis van de transportprocessen en de onderlinge vergelijking van de kombergingsgebieden in relatie tot de suppletievolumes op de aangrenzende kusten blijkt het niet waarschijnlijk dat de zandsuppleties het netto transport van zand naar het kombergingsgebied merkbaar hebben vergroot.

De sedimentatie in de kombergingsgebieden loopt niet gelijk op met de gebieden waar is gesuppleerd. De meeste sedimentatie heeft plaatsgevonden in het kombergingsgebied van het Vlie, het kombergingsgebied van het Zeegat van Texel en het Friesche Zeegat. In het Eierlandse gat heeft een afname van het sedimentvolume in het kombergingsgebied plaatsgevonden. De grootste volumes zijn aangebracht bij de Kop van Noord-Holland, op Texel en bij Ameland. Van een structurele relatie tussen de omvang van de zandsuppleties in de kustdelen die grenzen aan de kombergingsgebieden is geen sprake. Ook in de tijd is geen sprake van een relatie tussen de omvang van de sedimentatie in de kombergingsgebieden en de zandsuppleties: de trend in het sedimentvolume van de kombergingsgebieden loopt langer dan het beheer door zandsuppleties.

Op grond daarvan en op basis van de kennis van de sorteringsprocessen en de sedimentsamenstelling van het suppletiezand bij Ameland lijkt het onwaarschijnlijk dat zandsuppleties invloed hebben op de korrelgrootteverdelingen in het kombergingsgebied.

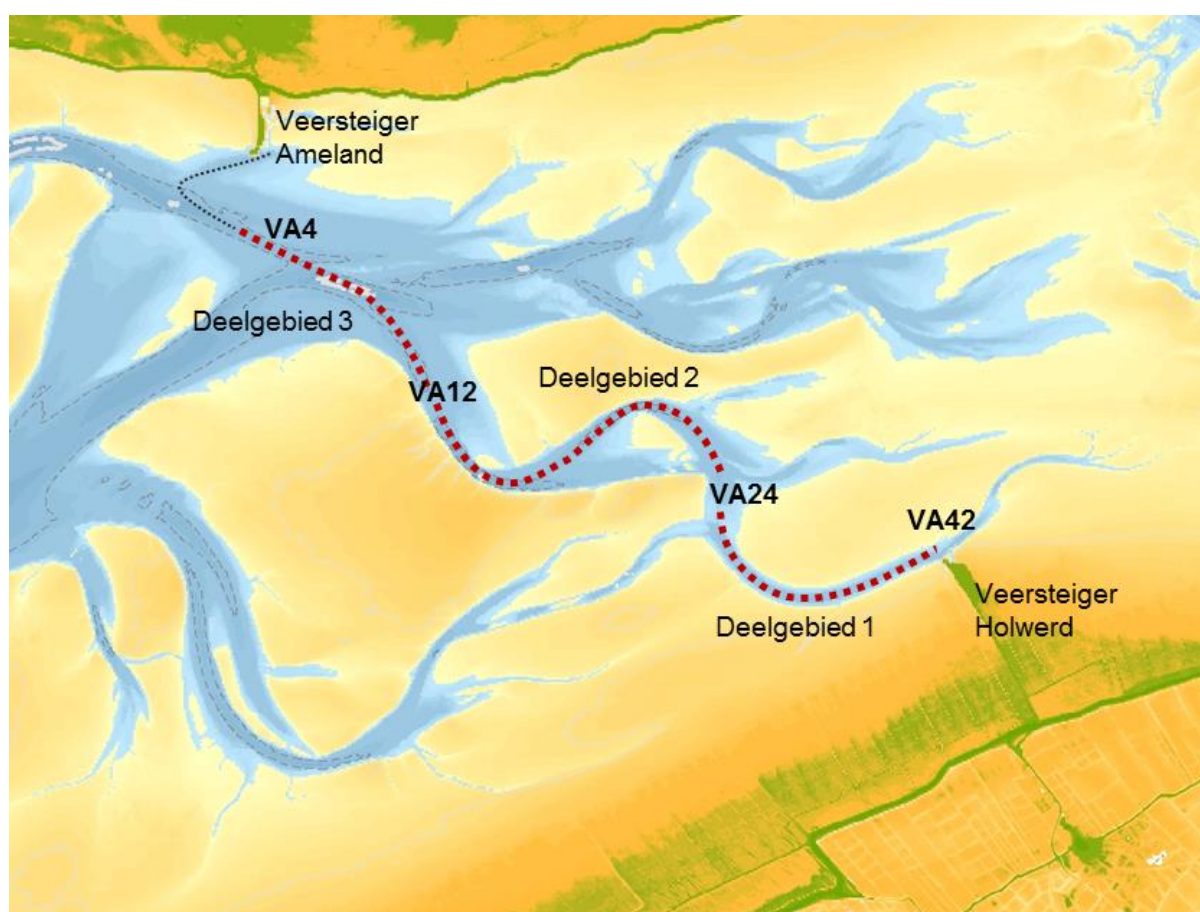
(iv) Waarom vindt erosie plaats bij de zuidwest kust van Ameland en welke maatregelen worden daar tegen ingezet?

De westkust van Ameland erodeert al enkele eeuwen. De langjarige trend van achteruitgang is het gevolg van grootschalige en langjarige veranderingen in het kombergingsgebied. Dit heeft tot de jaren '50 van de vorige eeuw geleid tot een grote achteruitgang van het kustgebied, waarbij de oorspronkelijke duingordel voor een belangrijk deel is verdwenen. In de jaren '50 zijn bij de zuidwestkust strekdammen (stroomhoofden) en onderwaterbestorting aangelegd. De meest recente ingreep is de uitvoering van een geulwandsuppletie in het gebied in 2017. Uit de waarnemingen blijkt dat de oever en de kust niet altijd en overal verplaatsen in de richting van Ameland. De tijdelijke aanvoer van zand door aanlanding van zandbanken vanaf de buitendelta zorgt lokaal en tijdelijk ook voor vooruitgang van de onderwateroever. Omgekeerd kan door ontwikkelingen in de geulen en de heroriëntatie van de geulrichtingen ook tijdelijke en lokaal een grotere erosie optreden.

Voor het beheer van de kust betekent de autonome ontwikkeling dat ook in de toekomst naar verwachting met regelmaat beheermaatregelen nodig zullen zijn, zoals het uitvoeren van bestortingen of zandsuppleties.

(v) Welke morfologische ontwikkelingen vinden plaats bij de vaarweg Holwerd-Ameland en welke invloed hebben de morfologische ontwikkelingen op de bruikbaarheid en het beheer (baggeren) van de vaarweg?

Deze vragen zijn opgedeeld over drie deelgebieden van de vaarweg (figuur samenvatting 2). Elk deelgebied heeft eigen kenmerkende morfologische ontwikkelingen en daarmee samenhangend een eigen relatie met het beheer van de vaarweg.



Figuur Samenvatting 2. Drie deelgebieden in de Vaarweg Ameland Holwerd.

Deelgebied 1: Nabij de veersteiger: VA42-VA24

In het eerste deel van de vaarweg, gerekend vanaf de veersteiger vindt een groot deel van de baggerwerkzaamheden plaats om de vaargeul op de vereiste diepte te houden. De omvang van het baggerwerk, in termen van het volume sediment dat is verplaatst en in termen van de inzet van baggerschepen is sterk toegenomen vanaf halverwege de jaren'90. De processen die zorgen voor de toename van het baggervolume in dit deel van de vaargeul worden begrepen door drie verschillende aspecten te beschouwen, namelijk: 1. De afname van het kombergingsvolume; 2. Veranderingen in de stroomsnelheden, de debietverdeling over eb- en vloed en de resulterende sedimenttransportprocessen; en 3. De verdeling van de baggerspecie over de verschillende verspreidingslocaties. In aanvulling op deze aspecten biedt de aanpassing van het vaarwegprofiel in 2010, waarbij de breedte toenam met 10 m en de diepte met 30 cm een aanvullende verklaring voor een deel van de toename van het

baggerbezwaar. Vooralsnog betekenen de morfologische ontwikkelingen dat het intensief baggeren van dit deel van de vaargeul nodig zal blijven.

Deelgebied 2 De grote bochten van VA12 tot VA24

De morfologische ontwikkelingen van de vaarweg in het deel gemarkeerd met de boeien VA12 tot VA24, hebben door het uitbochten van geul geleid tot een toename van de lengte van de geul. De bochten in de geul ontstaan door de natuurlijke processen van sedimenttransport in getijdegeulen. In de gebaggerde vaargeul kunnen de bochtvormende processen langer doorgaan, terwijl in een ongestoorde situatie een afsnijding zou hebben plaatsgevonden. Zo'n afsnijding heeft in de vaargeul niet plaatsgevonden, mogelijk omdat steeds drempels zijn weggebaggerd en het getijdewater daardoor steeds zijn weg kon zoeken door de uitbochtende vaargeul en vanwege het verspreiden van baggerspecie met als gevolg de toename in het aanbod van sediment dat in de vloed-schaar tot afzetting kon komen. De omvang van de bochten in de vaarweg is daardoor mogelijk groter dan de bochten van de niet-beïnvloede geulen. Rijkswaterstaat onderzoekt daarom of een doorsteek via de vloed-schaar haalbaar is.

Deelgebied 3. Nieuwe drempels op het kruispunt Scheepsgat-Zuiderspruit met de vaarweg VA12-VA4

Het gebied waar de vaargeul de geulen Scheepsgat-Zuiderspruit schuin overstak leverde tot enkele jaren geleden nooit problemen op met betrekking tot de waterdiepte. De afgelopen jaren is in het gebied een aantal drempels ontstaan die snel zijn verondiept en waar gebaggerd moet worden voor het beheer van de vaargeul. Hier spelen morfologische veranderingen door splitsing van eb- en vloedgeulen, . Deze processen voltrekken zich langzaam (decennia), maar leiden nu plotseling tot steeds grotere problemen. Deze trends kunnen zich komende 10 jaar nog zeker blijven voordoen, het lijkt dan ook niet uitgesloten dat er sprake blijft van een of meerdere drempels, waarop goed zal moeten worden geanticipeerd bij de keuze van het te baggeren tracé.

De morfologische ontwikkelingen in de vaargeul en de daarmee samenhangende beheervraagstukken spelen op morfologisch gezien relatief korte tijdschalen van tientallen jaren. Alleen voor de ontwikkelingen in deelgebied 1 is er een samenhang met de sedimentatie die op de schaal van het hele kombergingsgebied op de lange tijdschaal plaatsvindt. Op de termijn van jaren tot een tiental jaren domineren deze ontwikkelingen op de mesoschaal de beheervraagstukken rond de bereikbaarheid en mobiliteit. De eventuele invloed van de versnelde stijging van de zeespiegel wordt overstemd door de ontwikkelingen op de mesoschaal.

1 Inleiding

1.1 Doel

Dit 'kombergingsrapport' is het eerste in van serie rapporten die samen een 'beheerbibliotheek' zullen vormen voor alle kombergingsgebieden van de Waddenzee. Het doel van de beheerbibliotheek is om structureel het beheer te optimaliseren op basis van de gebundelde historische en actuele kennis over het morfologie, het beheer en het gebruik. Een beheerbibliotheek geeft het morfologisch kennisoverzicht voor beleid en beheer en overzicht van de beheer- en beleidsvraagstukken. Door de kombergingsrapporten uit de beheerbibliotheek met enige regelmaat bij te werken, bijvoorbeeld iedere zes jaar na het beschikbaar komen van een nieuwe bodemligging, hebben de beheerder en andere belanghebbenden up-to-date kennis en informatie beschikbaar.

De handvaten voor de betrokken beheerders, beleidsmakers en gebruikers worden gegeven door:

- De kennis van de morfologie vast te leggen;
- Inzicht te geven in de relevante grootheden en ontwikkelingen op de mesoschaal.
- Overzicht te geven van de vraagstukken voor beheer, beleid en gebruik ;
- Verbanden aan te geven tussen ontwikkelingen en beheer- en beleidsvraagstukken.

Een nevendoelstelling is om kennisleemtes op de mesoschaal te markeren, om daarmee de behoefte aan kennisontwikkeling in beeld te brengen.

Kennis van de morfologie omvat de beschrijving van de waargenomen veranderingen en inzicht in de oorzaken van deze morfologische veranderingen. Dit vormt de kennisbasis voor het beheer.

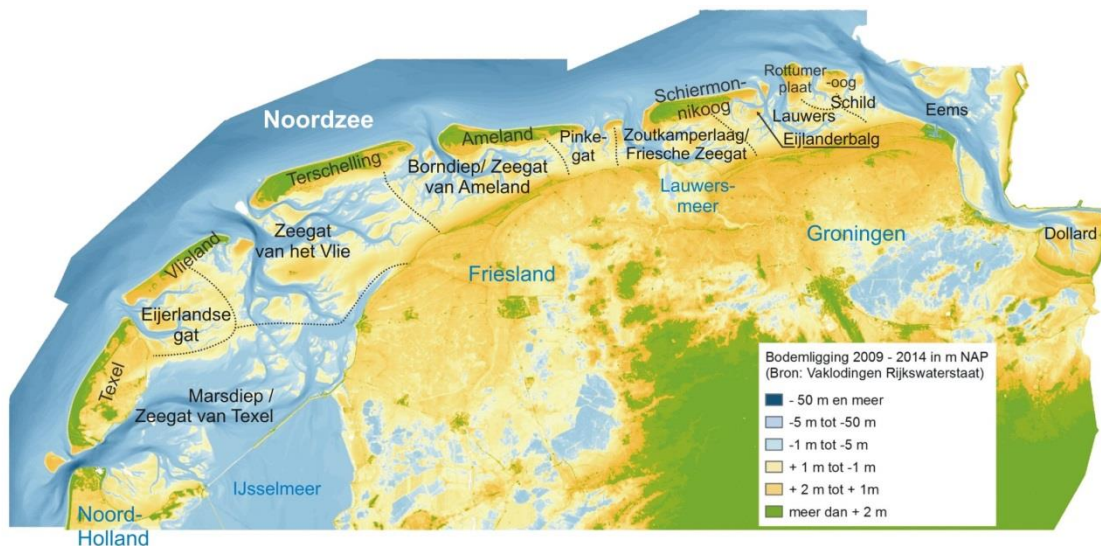
Het concept van de beheerbibliotheek is voor Rijkswaterstaat ontwikkeld binnen B&O Kust. De beheerbibliotheek geeft per kustvak of morfologische eenheid een overzicht van het actuele morfologische systeembegrip in samenhang met de spelende beheer- en beleidsvraagstukken. Een beheerbibliotheek wordt regelmatig bijgewerkt en biedt qua morfologische kennis een gezamenlijk vertrekpunt voor beheerders, beleidsmakers, gebruikers en andere geïnteresseerden. In de beheerbibliotheek worden geen concrete adviezen voor de beheerder gegeven, dit loopt via andere trajecten.

Voor de Waddenzee waren nog geen beheerbibliotheeken beschikbaar. Dit rapport is het eerste van een kombergingsgebied van de Waddenzee. Het behandelt het Borndiep¹, dat ook 'het Zeegat van Ameland' wordt genoemd. De kombergingsgebieden van de Waddenzee (waar beheerbibliotheeken voor moeten komen) staan in Figuur 1-1 en zijn van west naar oost:

- Marsdiep
- Eierlandse gat
- Vlie
- Borndiep
- Pinkegat
- Zoutkamperlaag
- Lauwers & Eilanderbalg
- Schild

¹ Het 'Borndiep' is ook de naam van de grootste geul in het kombergingsgebied.

Ten oosten van Schild ligt het Eems-Dollard estuarium. Ook hier zal een rapport worden gemaakt, als onderdeel van de beheerbibliotheek.



Figuur 1-1 De Waddenzee en haar kombergingsgebieden

1.2 Morfologische schaalniveaus

Grootschalige, samenhangende en complexe morfologische systemen, waaronder estuaria en zeegatsystemen zoals de Waddenzee, worden voor begrip van de morfologische ontwikkeling veelal beschouwd op verschillende tijd- en ruimteschalen (Figuur 1-2). Hiermee wordt het beter mogelijk morfologische processen te beschrijven. Het begrip van de morfologische ontwikkeling op de grotere schalen is randvoorwaarde voor het begrijpen van ontwikkelingen op kleinere ruimteschalen. Dit denkconcept is behulpzaam bij de vertaling van kennis naar antwoorden voor beleid, beheer en gebruik. Vraagstukken vinden bijna altijd hun zwaartepunt op een specifieke schaal van tijd en ruimte.

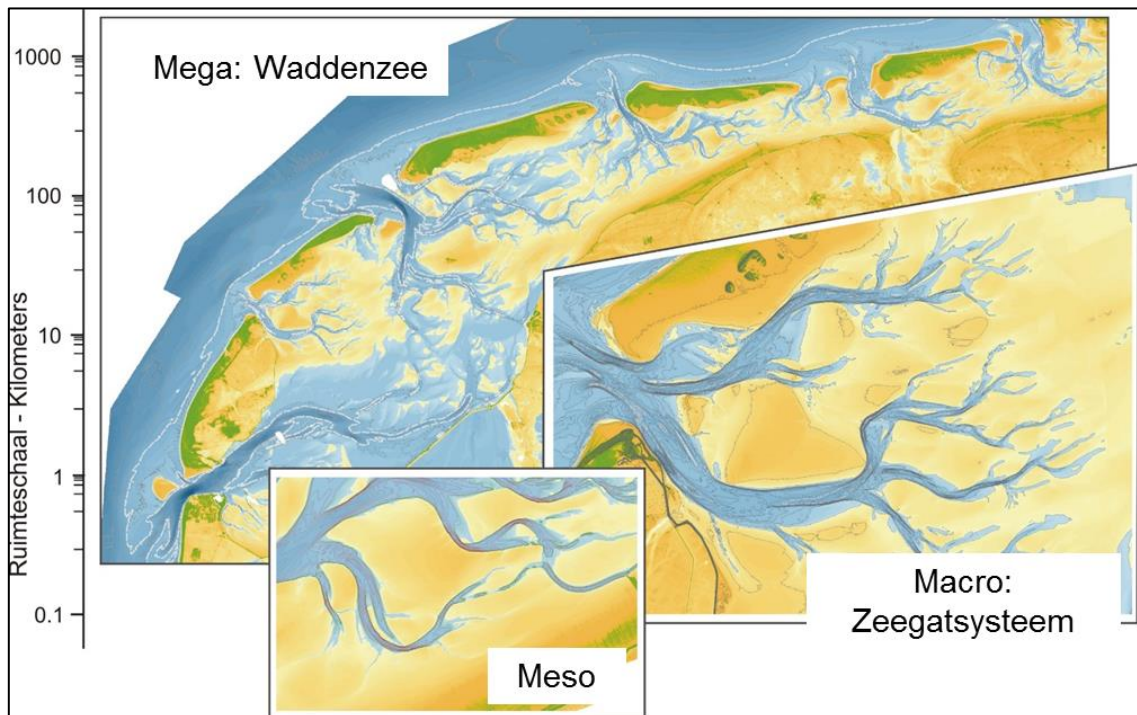
De *megaschaal* is de grootste schaal, gaat over het **hele Waddengebied** (zie Figuur 1-2), inclusief de aangrenzende kustzone en kent ontwikkelingen op een lange, veelal geologische, tijdschaal. Belangrijke aandrijvende krachten zijn de (relatieve) zeespiegelstijging, de beschikbaarheid van sediment (zand) en de veranderingen in de begrenzing van het gebied (door bijvoorbeeld bedijkingen en afsluitingen). Een belangrijke vraag voor beleid en beheer op deze schaal is bijvoorbeeld 'wordt bij de huidige klimaatverandering het Waddensysteem in haar voortbestaan bedreigd en wat kunnen we daar (nu al) tegen doen?'. Een begrip als 'meegroeivermogen' hoort hierbij, en is per zeegatsysteem apart bepaald (op de onderliggende macroschaal).

De *macroschaal* is het schaalniveau van de Waddenzee waarop de meeste vraagstukken worden beschouwd en de systeemkennis wordt besproken². Het is het schaal niveau van **het zeegatsysteem**, welke bestaat uit buitendelta, eilanden en kombergingsgebied (Figuur 1-3).

Het zeegat in enge zin (de geul) voorziet een bekken van getijdewater. De bekkens of kombergingsgebieden worden begrensd door het vasteland, de eilanden en, ten oosten en

² Een beheerbibliotheek structureren op dit schaalniveau is dus een logische keuze.

westen, de andere naastliggende bekken. De afstand waarover de getijdegolf kan doordringen in de naastliggende gebieden is bepalend voor de grens, het wantij, tussen de kombergingsgebieden van naastliggende zeegatsystemen.



Figuur 1-2 Illustratie van de drie morfologische schaalniveaus (Janssen e.a., 2017).

Aan de zeezijde van het zeegat ligt de buitendelta. Op de macroschaal is de buitendelta onlosmakelijk verbonden met het kombergingsgebied. Dat werkt door op de mesoschaal, aangezien geulen en banken vanuit de Waddenzee doorlopen tot buiten het kombergingsgebied. De omvang (het sedimentvolume) van de buitendelta correleert ook met de omvang (het getijdeprisma) van het kombergingsgebied. Er wordt zand uitgewisseld tussen de buitendelta en het kombergingsgebied, waarmee de buitendelta een onderdeel van het sedimentdelende systeem op de macroschaal.

Een beheerbibliotheek voor een kombergingsgebied richt zich op de 'binnenzijde' van een specifiek zeegatsysteem en op wat in meer detail, dus op de mesoschaal daarin speelt. Over buitendelta's wordt in andere kaders (Rijkswaterstaat kustlijnzorgprogramma, Kustgenese 2 en het Onderzoeksprogramma Seawad) gerapporteerd. De geïnteresseerde lezer kan onder andere terecht in Cleveringa et al, 2005 en Elias en Bruens, 2012.

Bij de *mesoschaal* kijken we naar **individuele morfologische eenheden**, zoals geulen en platen. Op dit schaalniveau vinden veel menselijke ingrepen plaats (bijvoorbeeld het baggeren van vaargeulen en het verspreiden van de baggerspecie op de aangewezen locaties in geulen) en worden de ecologische waarden van het waddegebied vaak beschouwd. Denk bijvoorbeeld aan het foerageren door steltlopers, of de dichtheden van bodemdieren. Een algemeen geldend morfologisch denkmodel³ voor de mesoschaal lijkt

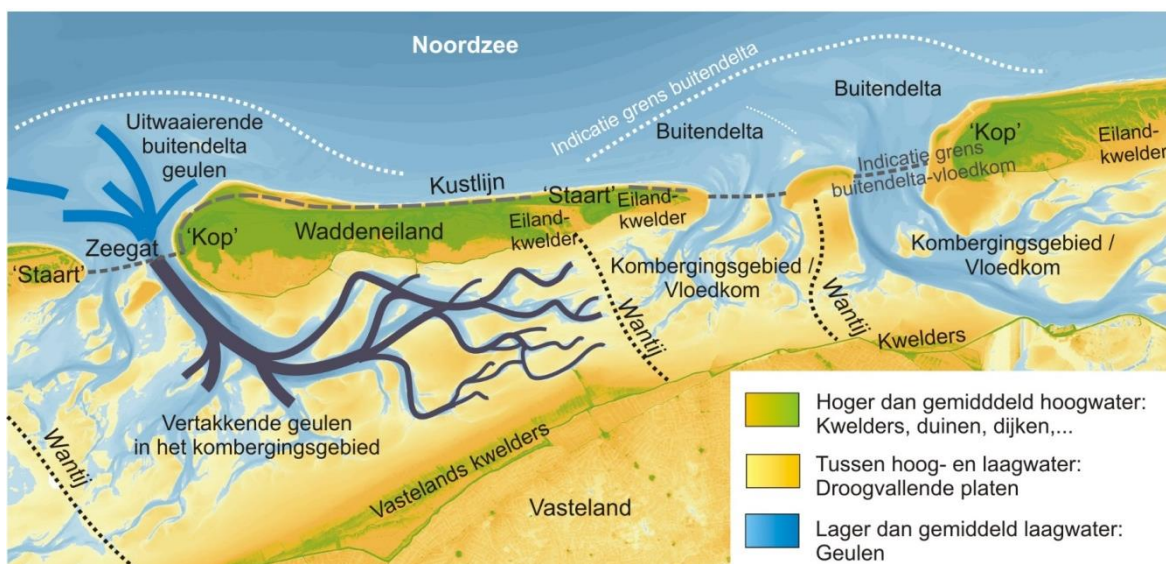
³ Een denkmodel beschrijft de autonome ontwikkeling of de response, van bijvoorbeeld een getijdegeul met drempel of ander morfologische onderdelen. Het denkmodel is bij voorkeur gebaseerd op kennis van de waterbeweging en het sedimenttransport, maar ook geheel kan zijn gebaseerd op waargenomen ontwikkelingen in vergelijkbare situaties.

(nog) niet mogelijk. Elk zeegatsysteem kent andere randvoorwaarden voor de ontwikkelingen op de mesoschaal.

Tenslotte is er de kleinste ruimtelijke schaal: de *microschaal*. Hierbij wordt de ontwikkeling van fenomenen als zandribbels bestudeerd. Voor de prioritaire vragen vanuit beleid- en beheer is een uitweiding op deze schaal nu niet van belang en daarom wordt dit schaalniveau verder in dit document buiten beschouwing gelaten.

1.3 Eenheden op de mesoschaal

Voor de structurering van dit eerste rapport van de beheerbibliotheek zijn er twee belangrijke inspiratiebronnen. Dit zijn enerzijds de rapporten waarin de morfologie op mesoschaal van de Westerschelde staat beschreven (bijvoorbeeld LTV V&T Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013a) en anderzijds het 'modeleiland'⁴ voor Waddeneilanden (Löffler et al., 2011).



Figuur 1-3 Namen van morfologische eenheden in een zeegatsysteem (uit Janssen, 2017).

Een 'modelkombergingsgebied' voor een overzicht van morfologische eenheden in de Waddenzee lijkt niet beschikbaar. In Oost en de Boer (1994) is een overzicht gepresenteerd van de morfologische onderdelen, op basis van eerder werk, evenals in Dijkema et al (1980). De morfologische eenheden (zie Figuur 1-3) laten we in deze beheerbibliotheek richtinggevend voor de inhoud:

- Grootschalige en langjarige ontwikkelingen (hoofdstuk 2)
- Beleid, beheer en gebruik (hoofdstuk 3)
- Getijdegeulen, vertakkend van groot (zeegat) naar klein (hoofdstuk 0);
- Wadplaten (hoofdstuk 0);
- Kwelders, bij het vasteland en onder de eilanden (hoofdstuk 0);

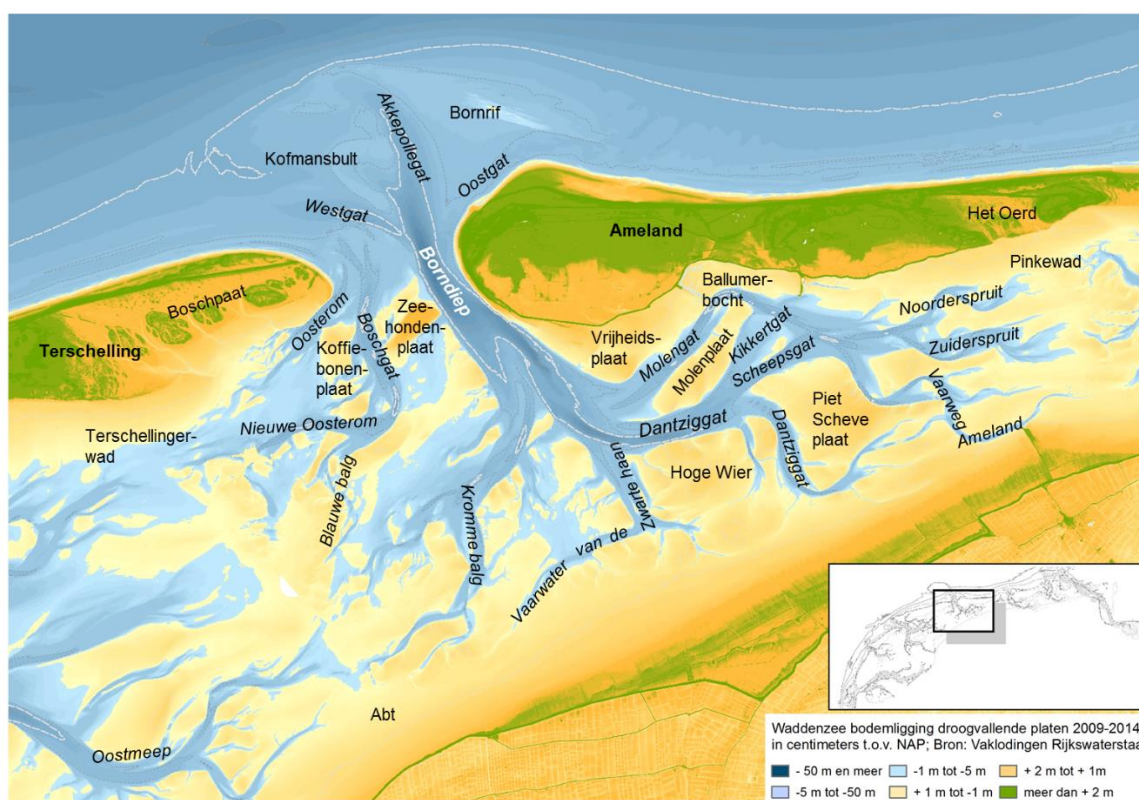
⁴ Het modeleiland beschrijft een barrière-eiland op de grens van Noordzee en Waddenzee met een vijftal hoofdelementen, te weten de eilandkop, het duinboogcomplex, het washovercomplex aan het eind van het duinboogcomplex, de eilandstaart en de verbindende Noordzeekustzone. Elk hoofdelement kan beschouwd worden als een morfo-ecologische eenheid. Het modeleiland is bruikbaar om van de mesoschaal morfologie van een eiland een doorvertaling te maken naar de verwachte ecologische waarden van het gebied.

In het rapport worden deze eenheden beschreven, met inbegrip van hun dynamiek. Dit volgt op de grootschalige ontwikkeling (hoofdstuk 2) en het vigerende beleid en beheer (hoofdstuk 3)

1.4 Kenmerken van het gehele kombergingsgebied

Het kombergingsgebied van het Borndiep (zie Tabel 1 voor een aantal karakteristieken) ligt tussen het wantij zuidelijk van Terschelling en van Ameland (Figuur 1-4). Het zeegat tussen de eilanden bestaat uit twee geulsystemen, die in de loop der tijd meer of minder van elkaar gescheiden zijn geweest (Israel, 1998; Israel & Dunsbergen, 1999).

Het eerste geulstelsel is Boschgat-Blauwe Balg⁵ en ligt in het westen. De uitlopers leiden in het kombergingsgebied naar het wantij van Terschelling en vormen momenteel tevens de vaarroute naar het Zeegat van het Vlie, Dit is een vrij dynamisch systeem met geulen die zich vaak verleggen.



Figuur 1-4 Namen in het kombergingsgebied Borndiep.

In het oosten, tussen de Zeehondenplaat en Ameland loopt het geulstelsel van het Borndiep, dat zich daarna in oostelijke richting vertakt in Molengat en Dantziggat die verder vertakken in uitlopers die leiden naar het wantij van Ameland. Naar het zuidwesten loopt de Kromme Balg die loopt naar het wantij van Terschelling. Het geulstelsel van het De grotere geulen in het Borndiep hebben zich niet of nauwelijks verlegd, uitgezonderd de uitlopers, die zich de afgelopen twee eeuwen oostwaarts hebben verlengd. De geulen bij het vasteland

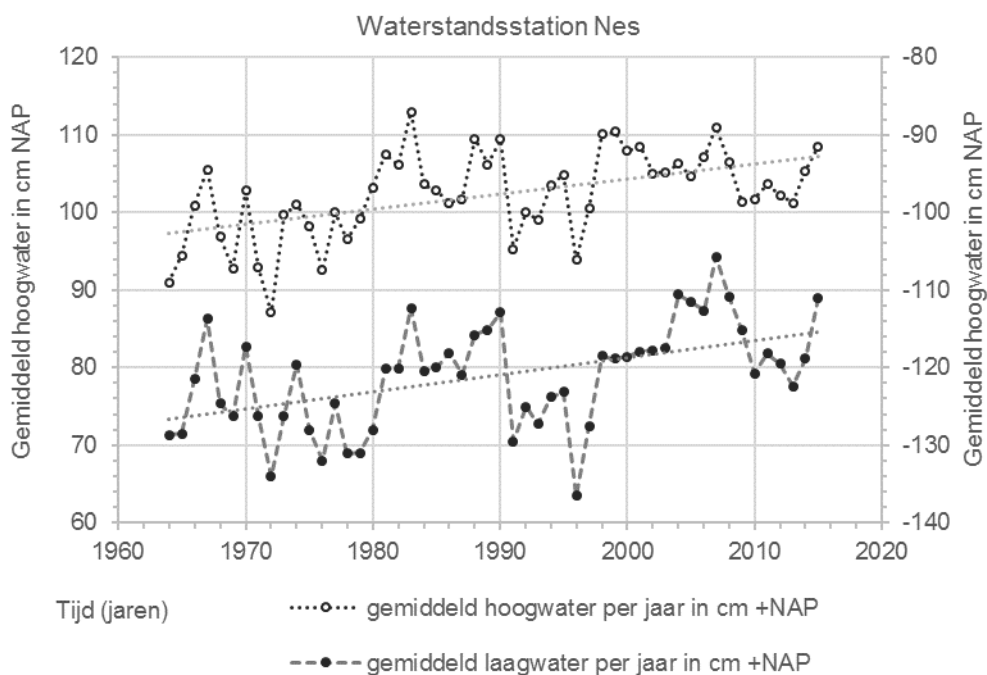
⁵ Het Boschgat-Blauwe balg systeem wordt soms aangeduid met Koggediep. Het Koggediep is de geul die is verdwenen tijdens het verhalen van de Boschplaat met het eiland Terschelling.

hebben een historie hebben van opslibbing door de afnemende getijdevolumes, onder andere door de overname van getijareaal door andere geulen, door de sterke ontwikkeling van de kwelders bij het vasteland, en door de sedimentatie op de wadplaten voor de kwelders.

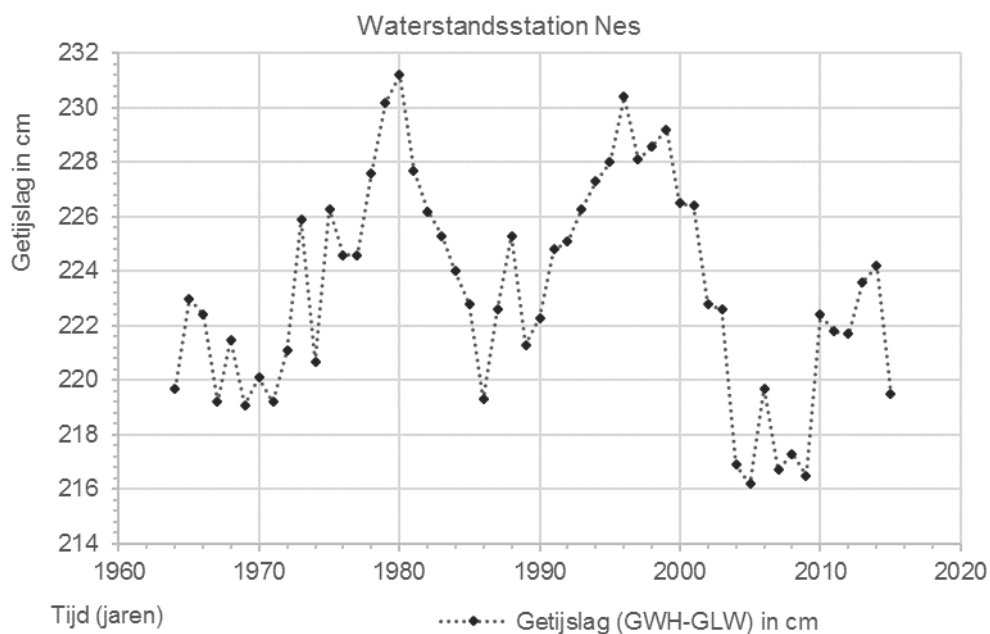
Tabel 1 Kenmerkende waarden voor de waterstanden en arealen van het kombergingsgebied Borndiep (uit Oost, 2017).

Parameter	Observatie	Jaar	Referentie
Zeespiegelstijging (mm/yr)	1,3	1890-2008	Station Harlingen; Dillingh et al., 2010 (lineaire trend)
Significante golfhoogte Hs (m) buitengaats	1,37 & 1,18	1990 - 2012	Stations Eierland Ridderinkhof, 2016
gemiddelde piekperiode Tp (s) buitengaats	6,00 & 5,77	1990 - 2012	Stations Eierland & Schiermonnikoog Ridderinkhof, 2016
GHW (m NAP)	+1,06	2011 slotgemiddelde	Station Nes Rijkswaterstaat, 2013
GLW (m NAP)	-1,33		
GHW springtij (m NAP)	1,19		
GLW springtij (m NAP)	-1,33		
GHW doortij (m NAP)	0,88		
GLW doortij(m NAP)	-0,94		
Getijslag (gemiddeld getij, springtij en doortij in m)	2,52, ,82,2,52		
Stormvloedhoogte (m NAP)	1 / 100 y: 3,90		
“Natte” oppervlakte kombergingsgebied (A _{ghw} (in m ²))	276	2011	Nederhoff et al., 2017
Getijdeprisma kombergingsgebied (10 ⁶ m ³)	383 ±74,5	2009-2010	Duran-Matute, 2014

In Tabel 1 zijn een aantal kenmerkende waarden opgenomen voor het getij in het kombergingsgebied van Ameland. Deze waarden zijn gebaseerd op waarneming van de periode 1990-2010 (Rijkswaterstaat, 2013) Het is nodig om de periode te vermelden, omdat de gemiddelde waarden in de loop van de tijd veranderen. De veranderingen vinden plaats door de stijgende zeespiegel, variaties in het getij, waaronder 18,6 jarige cyclus en veranderingen in de wijze de voortplanting van het getij in kombergingsgebied plaatsvindt. Figuur 1-5 toont de grafiek met de hoog- en laagwaterstanden bij Nes. Deze standen laten naast de jaar-op-jaar variaties een trendmatige toename zien, als gevolg van de stijgende zeespiegel. In de grafiek met de getijslag in Figuur 1-6 zijn naast de variaties ook grootschalige fluctuaties te zien die waarschijnlijk samenhangen met de 18,6 jarige cyclus in het getij.



Figuur 1-5 Grafiek van de jaargemiddelde waterstanden bij Nes (meetpaal in de Waddenzee ten zuiden van Nes, bron Rijkswaterstaat).



Figuur 1-6 Grafiek van de jaargemiddelde getijslag (het verschil tussen gemiddeld hoog- en laagwater- Figuur 1-5) bij Nes (meetpaal in de Waddenzee ten zuiden van Nes, bron Rijkswaterstaat).

2 Beleid, beheer en gebruik

2.1 Inleiding

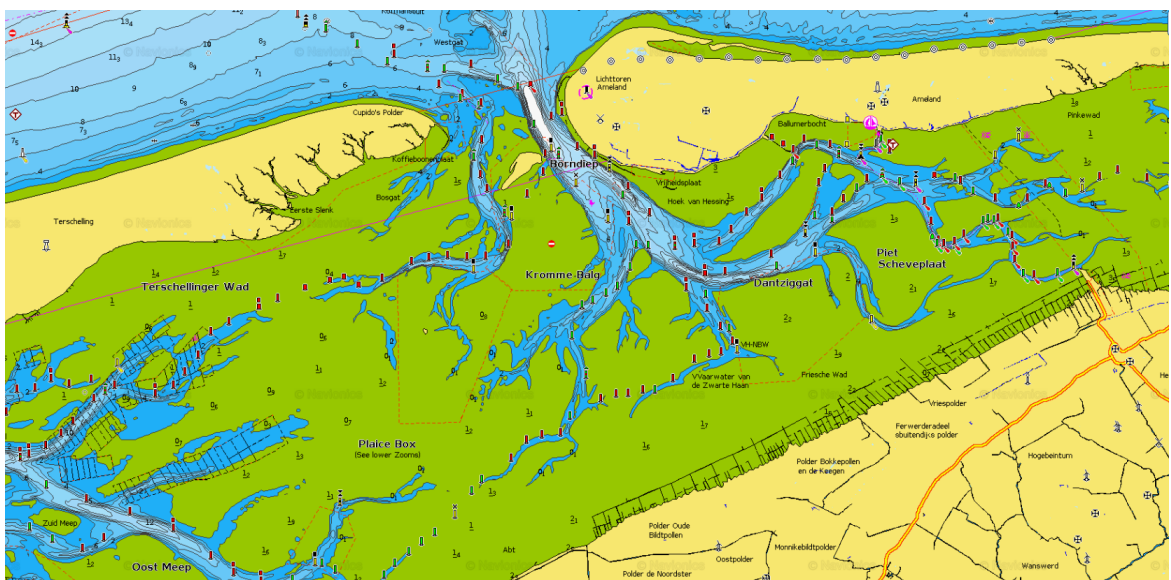
Het Borndiep heeft vele gebruiksfuncties, uiteraard inclusief de natuurfunctie. Om dit te faciliteren en te reguleren wordt beheerd. Randvoorwaarden en richtingen ervoor geeft het beleid, dat in beleidsdocumenten en wetten is vastgelegd. Dit hoofdstuk beschrijft dit in relatie tot de morfologische elementen van het kombergingsgebied Borndiep.

2.2 Toegankelijkheid

Toegankelijkheid betreft de scheepvaart in de Waddenzee. Het kombergingsgebied wordt gebruikt door verschillende soorten vaartuigen:

- Veerboten & watertaxi's
- Vissers
- Georganiseerde (robber)tochten
- Bruine vloot
- Recreatievaart
- Baggerschepen en monitoringsvaartuigen
- Toezichthouders

Het kombergingsgebied Borndiep heeft aan de Friese kust alleen een veerhaven (Figuur 2-1), die niet mag worden gebruikt door de recreatievaart, de bruine vloot of vissersschepen. Deze schepen moeten het kombergingsgebied bereiken via de wantijen, bij hoogwater, als de diepgang het toestaat of via het zeegat. De andere kombergingsgebieden hebben aan hun vastlandszijde wel een haven met een bredere functie.



Figuur 2-1 Nautische kaart van het Borndiep met de betonde geulen (de rode en groene markeringen) en een aantal andere functies (zie de tekst voor een toelichting).

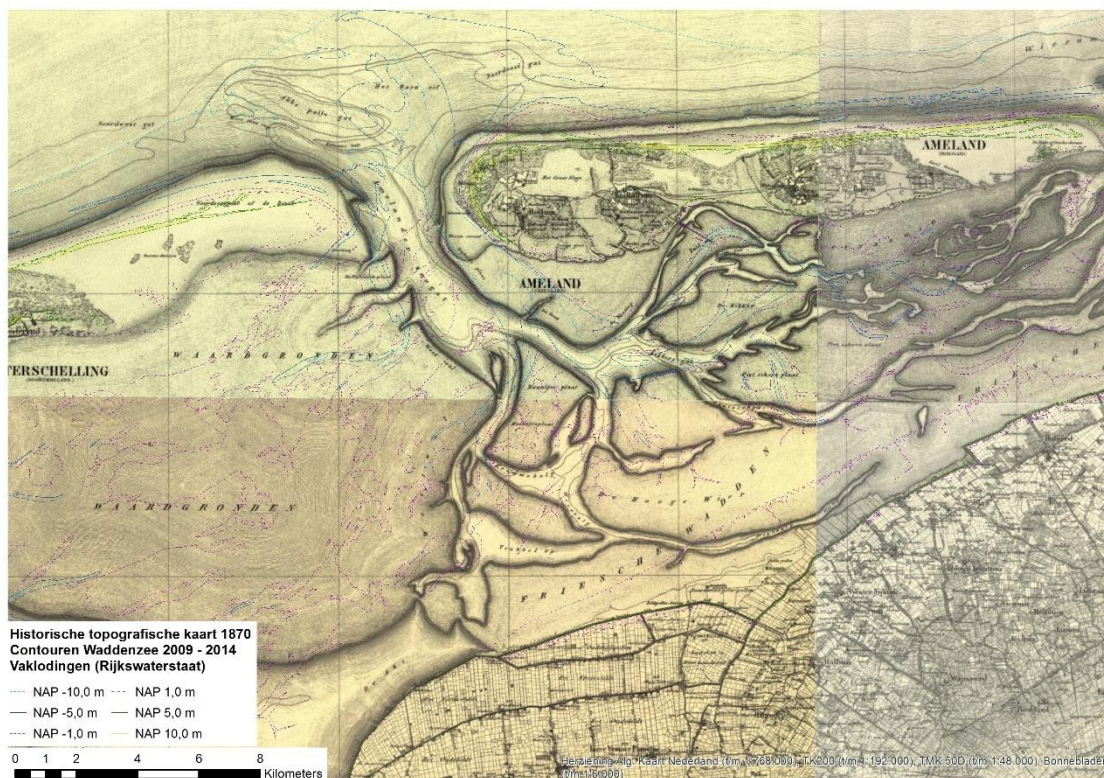
Voor Ameland is de veerverbinding Holwerd-Ameland van vitaal belang voor het functioneren van de gemeenschap. Vroeger waren er ook andere veerverbindingen, maar deze zijn door morfologische en maatschappelijke veranderingen in onbruik geraakt (zie het kader met de historische case 1). Daarnaast zijn er betonde routes die door allerlei andere schepen

worden gebruikt (Figuur 2-1). De scheepvaart heeft een directe relatie met de getijdegeulen, omdat vrijwel alle betonde vaarroutes door getijdegeulen lopen. Alleen de betonde routes over de wantijen, van het kombergingsgebied Vlie naar dat van het Borndiep en daarvan naar het kombergingsgebied Pinkegat lopen over droogvallende wadplaten. Tegenwoordig lopen immers geen geulen meer over een wantij.

Historische case 1. Het Vaarwater van de Zwarte Haan

Tot in de jaren zeventig onderhield een buurtschipper een wekelijkse verbinding tussen Harlingen en Ameland. Op basis van een recente kaart van de Waddenzee is het lastig voorstelbaar hoe deze verbinding werd onderhouden, omdat de Vlakte van Oosterbierum een groot droogvallend oppervlak heeft. Voor de jaren zeventig was de Vlakte van Oosterbierum nog aaneengesloten vlakte, maar lag deze nog deels onder water, zodat de schipper ook bij laag water de route langs het Vaarwater van de zwarte Haan kon benutten. De verondieping van de Vlakte van Oosterbierum is waarschijnlijk na de afsluiting van de Zuiderzee in 1932 begonnen en gaat nog steeds door. Eind jaren '60 en begin jaren zeventig zijn verschillende morfologische studies uitgevoerd naar de historische en verwachte ontwikkeling van de vaarweg (Ijnsen, 1979; Kool, 1980), waarbij is geconcludeerd dat het handhaven van de vaarweg redelijkerwijs niet meer mogelijk was.

Maatschappelijke ontwikkelingen (toename transport per vrachtwagen en afname buurtschippers) en de verbeteringen van de vaarweg Holwerd-Ameland (zoals het verlengen van de veerdam en het doorsteken van twee geulen) hebben waarschijnlijk ook bijgedragen aan het verdwijnen van de verbinding. Desalniettemin is het een duidelijk voorbeeld van de sturende invloed van morfologische veranderingen op de toegankelijkheid.



Figuur 2-2 Historische topografische kaarten uit de periode 1870 van het kombergingsgebied Borndiep, met

Het beheer voor de toegankelijkheid omvat het baggeren en verspreiden van de specie, de betonning, de aanwezigheid van de veerdammen (Figuur 2-3 Veerhaven bij Nes op Ameland in de jaren '70

) en de dam bij de Ballumerbocht. Invloed op droogvallende platen en vastlandskwelders is er via het op diepte houden van de belangrijkste vaargeul, het verspreiden van de specie en de aanwezigheid van de dammen.

Beleid

Het beleid rond toegankelijkheid voor de gehele Waddenzee is vastgelegd in de Structuurvisie derde nota Waddenzee (SVW) & Structuurvisie Infrastructuur en Ruimte (SVIR). Hierin is vastgelegd dat: *“De bereikbaarheid van de havens in en grenzend aan de Waddenzee is gewaarborgd.”*

In de SVW is ook een specificering opgenomen over de dieptes van de vaarwegen. De situatie van 2006 is maatgevend, waarbij wordt gerefereerd aan de omvang van vaartuigen en niet aan de vaargeul zelf. In het document is ruimte gelaten voor verdere verdiepingen van de hoofdvaargeulen. Dit lijkt te passen bij maatschappelijke wensen tot het verdiepen van de drempels in de Blauwe slenk en de Boontjes (in het kombergingsgebied van het Vlie).

De vaarweg Holwerd-Ameland heeft al lang de aandacht van de omgeving en de politiek, zowel lokaal als landelijk, onder andere vanwege de vertragingen die de veerboot oploopt. In de discussie rond de vaarweg wordt gewezen op de verschillende beleidsdoelstellingen uit de SVW. De formuleringen rond de streefdieptes/normering blijken bijvoorbeeld ruimte te bieden voor verschillende interpretaties. En dat geldt ook voor de formuleringen over het beheer, waarover hieronder meer. Voor de Vaarweg Holwerd-Ameland zijn naar aanleiding van vragen uit de tweede kamer aan de Minister van I&M verschillende studies uitgevoerd (Villars et al., 2016; Hrman et al., 2016) en is een proces ingericht met betrekking tot de korte- en lange termijn ontwikkelingen. In de brieven van de Minister van I&M aan de tweede kamer zijn geen wijzigingen in het beleid opgenomen.



Figuur 2-3 Veerhaven bij Nes op Ameland in de jaren '70

Vaargeulbeheer

Het beheer van de vaargeulen en de havens omvat de monitoring van de diepte en de locatie van de geulen, het aanbrengen, verleggen en onderhouden van de betonnen, het baggeren en het verspreiden van de baggerspecie, de inrichting en het onderhoud van de veerhavens en de scheepvaartbegeleiding. Ook wordt er in het gebied toezicht gehouden op het gebruik. De gemeente Ameland heeft de verantwoordelijkheid voor het onderhoud van de recreatiehaven bij de veerdam op Ameland en voor de werkhavens en geul bij de Ballumerbocht (dat is ook de ligplaats voor de reddingboot). Voor de veerhavens en de vaargeulen is Rijkswaterstaat verantwoordelijk.

Voor het beheer van de vaargeulen geeft de SVW specifieke aanwijzingen:

“De waterstaatswerken, waaronder het vaargeulonderhoud ten behoeve van de scheepvaart, zijn:

- *Beperkt in omvang,*
- *Volgen de natuurlijke morfologische ontwikkelingen*
- *Vinden uitsluitend plaats indien de bereikbaarheid van de havens, de Waddeneilanden of de verkeersveiligheid in het geding zijn.”*



Figuur 2-4 Verschillende aspecten van beheer en gebruik van de vaarweg, met van rechts naar links het baggerschip, de veerboot en een tonnenleger. Op de voorgrond de rijshouten dammen van de kwelderwerken.

De baggerinspanningen in de Vaarweg Holwerd-Ameland zijn sterk opgelopen na 1995. In relatie tot de omvang van het gebaggerde deel van de geul is deze fors. Mogelijk hebben de baggerinspanningen een deel van de morfologische ontwikkelingen bepaald. d. Het open plan proces (Jager & de Kleuver, 2016) en onderzoek (Villars et al., 2016; Herman et al., 2016) dat mede is uitgevoerd naar aanleiding van vragen uit de Tweede Kamer heeft geleid tot de keuze voor een bochtafsnijding (Ministerie van I&M, 2016). Dit is overigens niet de eerste keer (zie Historische Case 2).

2.3 Veiligheid tegen overstromingen

Langs de Waddenzee liggen primaire waterkeringen die de bewoonde Waddeneilanden, het vasteland en de Afsluitdijk beschermen tegen overstromingen vanuit zee. Overstromingen ontstaan door het optreden van zeer zware stormen op de Noordzee, die leiden tot verhoogde waterstanden en zeer hoge golven. De karakteristieken van de Waddenzee veranderen de bedreiging. De Waddenzee is relatief ondiep ten opzichte van de Noordzee en de optredende golven zijn daarom veel groter aan de Noordzeezijde dan aan de Waddenzeezijde, zoals blijkt uit de getallen in Tabel 2.

Tabel 2 Waterstanden en golven rond het Borndiep bij maatgevende condities uit de Hydraulische Randvoorwaarden 2006 (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007)

Ameland (normfrequentie 1/2000)		
Noordzeekust	Rekenpeil: NAP 4,6 m	Golfhoogte H_{m0} : 10,65 m
Waddenzeezijde	Toetspeil: NAP 4,4-4,6 m	Golfhoogte H_s : 1,40-1,60 m
Friesland en Groningen (normfrequentie 1/4000)		
Friese kust (vakken 20-32)	Toetspeil: 4,8-4,9 m	Golfhoogte H_s : 1,65-1,90 m

De ondiepte van de Waddenzee zorgt er dus voor dat de dijken langs het Groningse en Friese vasteland minder fors hoeven zijn in vergelijking met de kust. Evenzo geldt dat een grotere diepte van de Waddenzee de veiligheidsopgaven zou doen verhogen. De morfologie op mesoschaal heeft slechts op enkele plekken rond het kombergingsgebied Borndiep een duidelijke invloed op de veiligheid tegen overstromingen. Bij de zuidwestkust van Ameland is de migratie van het Borndiep naar het oosten medebepalend geweest voor de afname van de duinwaterkering en voor het uitvoeren van bodembescherming op de onderwateroever. Op alle plekken waar kwelders aanwezig zijn voor de dijk spelen vraagstukken over de mogelijke bijdrage van deze kwelders aan de veiligheid tegen overstromingen. Het wordt steeds duidelijker dat dergelijke vooroevers een belangrijke golfdempende factor zijn, zelfs bij maatgevende omstandigheden, zoals blijkt uit het onderzoeksproject Be-Safe en de Projectoverstijgende verkenning -POV- Waddenzeedijken).

Beleid

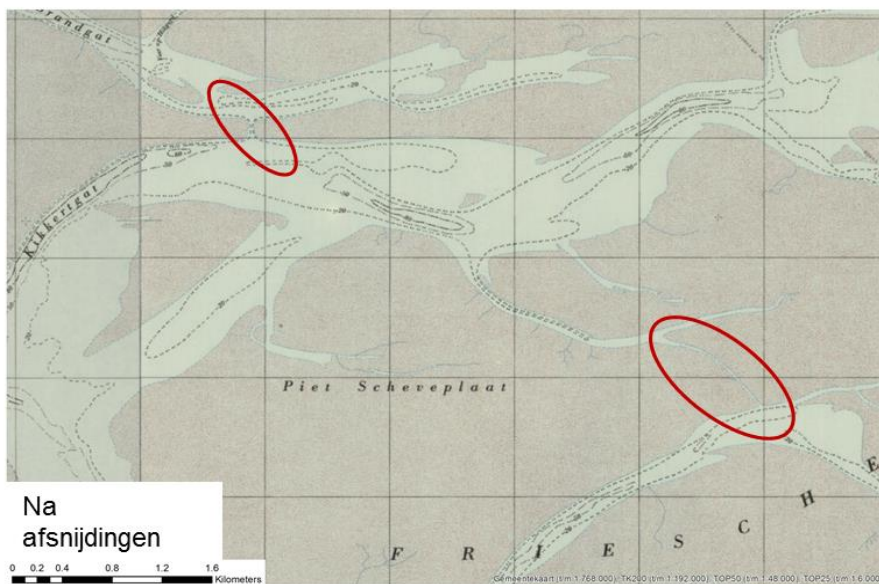
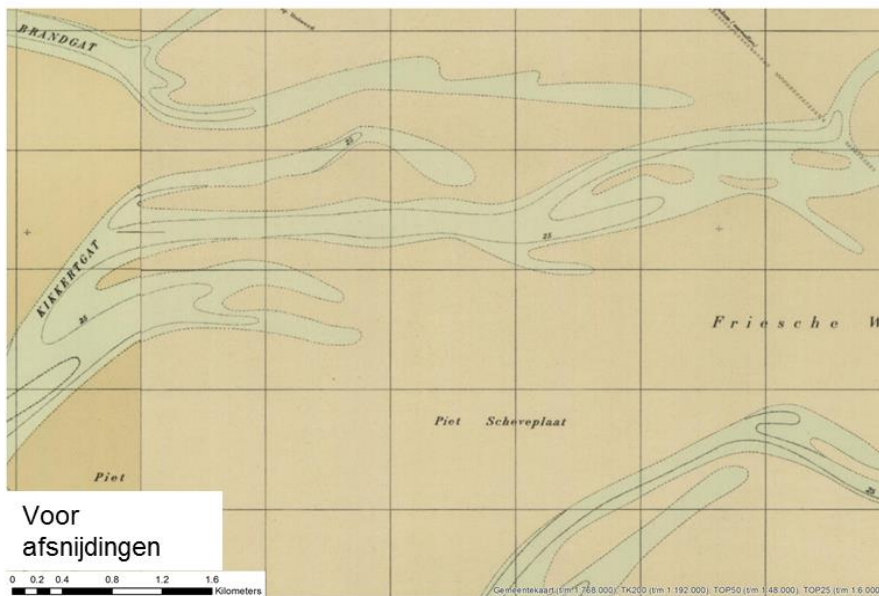
Het Nederlandse beleid voor veiligheid tegen overstromingen is vastgelegd in de Waterwet, waarin recent de nieuwe risicobenadering is opgenomen. Recente beleidsmatige ontwikkelingen vinden plaats in het Deltaprogramma en de deltabelissingen staan in het Nationale waterplan 2016-2021. In het Deltaprogramma is veel aandacht geweest voor de rol van de Waddenzee als natuurlijke buffer tegen overstromingen vanuit zee.

Belangrijk is de wettelijk vastgelegde cyclus van het toetsen van de waterkeringen, die iedere twaalf jaar plaatsvindt. Tekortkomingen bij de toetsing kunnen leiden tot het versterken van (onderdelen) van de waterkering. Nieuwe inzichten en (morfologische) ontwikkelingen worden meegenomen bij zowel de toetsing, het wettelijk instrumentarium ervoor en in de metingen die onderdeel zijn van de toetsing. De dijkversterking van Ameland en de planstudie van de

vastelandsdijk Koehoal-Lauwersmeerdijk volgden bijvoorbeeld op het afkeuren van de waterkering tijdens de voorgaande toetsronde.

Historische case 2. Meewerken met de morfologie: twee doorsteken in de jaren '50.

In de jaren '50 zijn twee doorsteken uitgevoerd om de vaarweg naar Ameland te verkorten. Beide kortsluitingen zijn in stand gebleven en hebben geleid tot verkorting van de vaarweg. Het is niet duidelijk hoeveel onderhoud er nadien heeft plaatsgevonden aan de kortsluitingen. In ieder geval hebben in het deelgebied 'Suezkanaal' in 1977 verbeteringswerkzaamheden plaatsgevonden (Rakhorst & van der Goes, 1978). Het is niet meer te achterhalen of en hoeveel onderzoek destijds ten grondslag heeft gelegen aan deze ingrepen, het lijkt niet onwaarschijnlijk dat het een kwestie van proberen is geweest. Het vigerende beleidskader rond de vaarwegen in de Waddenzee lijkt weinig ruimte te bieden voor 'proberen'.



Figuur 2-5 Historische topografische kaarten met de locatie van de doorsteken Suezkanaal en Panamakanaal

Als onderdeel van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) worden verschillende projectoverstijgende verkenningen (POV's) uitgevoerd rond onderwerpen die bij meerdere versterkingen aan de orde zijn. De POV Waddenzeedijken is gericht op vraagstukken bij de Waddenzeedijken. Voor de mesoschaal morfologie spelen de vraagstukken over geulmigratie in relatie tot de dijkstabiliteit en de rol van de kwelders als voorlanden voor de dijk. Het onderzoek naar de geulmigratie is gericht op de casus Vierhuizergat in het kombergingsgebied van het Friesche Zeegat. Voor het Borndiep speelt dit vraagstuk bij de migratie van de geul Borndiep en de bescherming van de zuidwestkust van Ameland. De rol van de kwelders als voorland is in het bijzonder van belang bij de vastelandskust.

Beheer

Het beheer van de waterkering, in de vorm van beweiding, het verwijderen van aangespoeld materiaal (veek) en de schouw heeft geen relatie met de morfologie. Het (aanvullen van) bestortingen heeft dat wel, omdat veranderingen in de bodemligging aanleiding zijn voor het uitvoeren van bestortingen. Tot bestorten wordt besloten op basis van de frequente monitoring van onderwaterbestortingen. Dit gebeurt door metingen van bodemligging, side-scan sonar opnamen en inspectie door duikers. Het aanbrengen van bestortingen kan aanleiding zijn tot het optreden van morfologische veranderingen, door het ontstaan of uitbreiden van ontgrondingskuilen

Gebruik

Waterkeringen hebben verschillende nevenfuncties, bijvoorbeeld voor de recreatie (fiets- en wandelpad), de landbouw (beweiding met schapen) en de natuur (hoogwatervluchtplaats, ruimtelijke barrière tussen wad en land). De morfologische ontwikkeling heeft geen interactie met het gebruik van de waterkeringen.



Figuur 2-6: Hoogwater bij de veerdam te Holwerd.

2.4 Natuur en milieu

Het hele kombergingsgebied is beschermde natuur. De Waddenzee is één Natura2000-gebied en dat omvat ook de vastelandskwelders. De eilandkwelders van Terschelling bij de Boschplaat vallen deels onder het Natura2000-gebied Waddenzee en deels onder het Natura2000-gebied Duinen Terschelling. De eilandkwelders van Ameland vallen deels onder het Natura2000-gebied Waddenzee en deels onder het Natura2000-gebied Duinen Ameland. Qua omvang zijn de belangrijkste Natura-2000 habitattypen in het kombergingsgebied de droogvallende platen, de geulen en de verschillende typen kwelders.

Veel morfologische ontwikkelingen hebben effect op de arealen. In het kombergingsgebied vindt een toename van het plaatareaal plaats, die ten koste gaat van het areaal geulen. Aan de oostpunt van Terschelling vindt erosie plaats, waardoor ook de omvang van de eilandkwelder bij de Boschplaat afneemt. Hiervoor is areaal geul en droogvallende plaat in de plaats gekomen. Bij zuidwest Ameland speelt de afname en migratie van de Fugelpolle en de herstel- en verbeteringsmaatregelen die daar zijn getroffen. Bij de vastelandskwelders spelen ingrepen en beheersmaatregelen die zijn gericht op het behoud of vergroten van de kwaliteit ervan.

Beleid

Het natuurbeleid is in verschillende documenten vastgelegd. In de praktijk vormen de Europese Habitat- en Vogelrichtlijn de meest dwingende kaders. Deze Europese richtlijnen zijn in Nederland geïmplementeerd via de Wet Natuurbescherming. In de daaruit voortvloeiende instellingsbesluiten en de wijzigingsbesluiten zijn de zogenaamde instandhoudingsdoelstellingen vastgelegd, in termen van habitats en soorten. Deze doelstellingen zijn geformuleerd op de schaal van het gehele Natura2000-gebied, zodat dit geen specifieke doelstellingen oplevert voor een enkel kombergingsgebied zoals Borndiep. Voor de voor de Duinen Ameland en Duinen Terschelling zijn de doelstellingen wel vastgelegd.

De morfodynamiek van de Waddenzee is een zogenaamd 'kwaliteitselement' van het Natura2000-gebied Waddenzee. Hier ligt een belangrijkste relatie met de morfologie op mesoschaal.

De zorg voor de waterkwaliteit is op Europees niveau geregeld via de Kaderrichtlijn Water en dit is in Nederland geïmplementeerd via de Waterwet. De Kaderrichtlijn Water kent ook doelstellingen voor abiotische aspecten die van invloed zijn op de natuur. Voor de eilandkwelders en de aanwezigheid van zeegras zijn in dat kader specifieke doelstellingen geformuleerd.

Beheer

Voor het beheer van de Natura2000-gebieden in Nederland zijn beheerplannen opgesteld waarin ook de relaties tussen andere activiteiten en de natuur worden beschreven.

In het Beheerplan Rijks Wateren (BPRW) zijn, naast de beheerwerkzaamheden van Rijkswaterstaat, ook de maatregelen met betrekking tot de waterkwaliteit (KRW) opgenomen.

De genoemde beheerplannen bestrijken niet hetzelfde gebied. De Natura2000 beheerplannen richten zich op de onder N2000 aangewezen gebieden. Het BPRW gebruikt de deelstroomgebieden van de KRW.

Merk op dat het N2000-beheerplan voor de Waddenzee qua omvang is gekoppeld aan de megaschaal, maar dat de meeste onderwerpen erin juist zijn gekoppeld aan geulen en platen, dus de mesoschaal.

Gebruik

In de Waddenzee wordt uit de natuur 'geogst'. Er wordt gevist, voornamelijk op garnalen en voornamelijk in de geulen. Op de platen worden lokaal kokkels geoogst, dit mag tegenwoordig alleen nog door handmatig oogsten. Delen van de kwelders worden, als onderdeel van het beheer, beweid. In dit kombergingsgebied zijn geen percelen aangewezen voor de mosselcultuur, in tegenstelling tot de kombergingsgebieden Vlie en Marsdiep.



Figuur 2-7 Tureluurs die opvliegen van hun hoogwatervluchtplaats op de Veerdam bij Holwerd.

2.5 Andere functies

Op het wad vinden ook activiteiten plaats die niet onder het voorgaande zijn te plaatsen. Wadlopen vindt plaats langs de vastelandskust, van de vastelandskust naar Ameland en vice versa en vanaf Ameland. De mogelijkheden voor het wadlopen zijn direct gekoppeld aan de mesoschaal morfologie. De aanwezigheid van, zelfs relatief kleine, geulen en prielen kan beperkingen opleveren voor de wadlopers, zodat de routes aangepast dienen te worden. Dat geldt ook voor de aanwezigheid van veel slib op de wadplaten.

Onder de wadbodem lopen verschillende kabels en leidingen naar Ameland. De diepte waarop deze zijn begraven is ingegeven door de veranderingen die kunnen optreden door het ontstaan en het verplaatsen van de geulen en prielen. Om de ingraafdiepte en de kans op

het vrijspoelen van kabels en leidingen te beperken worden deze bij voorkeur onder het wantij aangelegd.

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

Beleid

Het beleid rond andere functies is vastgelegd in de Ruimtelijke Structuurvisie (RSV, eerder PKB Waddenzee) en voor sommige activiteiten zijn afspraken gemaakt die zijn vastgelegd in convenanten. Dat laatste is bijvoorbeeld gedaan voor het varen op het wad en het droogvallen met schepen.

Beheer

Deze functies zijn opgenomen in de beheerplannen voor de Natura2000-gebieden.

2.6 Indicatoren voor beleids- en beheervraagstukken

Dit rapport geeft vooral beschrijvingen van de morfologie en de ontwikkelingen daarvan. Voor beleidmakers en beheerders is het gewenst om kwantitatieve indicatoren te hebben die de situatie en ontwikkelingen beschrijven. Tabel 3 geeft een overzicht van deze morfologische indicatoren. In Tabel 3 is ook aangegeven waar in het rapport het betreffende beleids- of beheersvraag aan de orde komt. De indicatoren zelf zijn in dit rapport nog niet opgenomen, omdat deze op een uniforme wijze voor de gehele Waddenzee moeten worden vastgesteld. Bij het verder opstellen van kombergingsrapporten voor de beheerbibliotheek zullen naar verwachting steeds meer indicatoren beschikbaar komen.

Tabel 3 Overzicht van de belangrijkste beheer- en beleidsvraagstukken en de morfologische indicatoren die daarbij passen.

Beleids- of beheervraag(stuk)	Morfologische indicatoren	In rapport ?
Mega en macroschaal (Waddenzee en kombergingen, op tijdschaal van tientallen tot honderden jaren)		
Gevolgen van zeespiegelstijging	Waterstanden Meegroeivermogen	Niet in dit rapport; zie Wang et al., et al. (2017)
Gevolgen van delfstoffenwinning	Bodemdalingsvolume Meegroeivermogen Kwelderontwikking	Niet in dit rapport, Wang et al., (2017) Hoofdstuk 6
Gevolgen van kustsuppleties voor de Waddenzee	Suppletievolume Sedimentsamenstelling bodem	Paragraaf 7.3 ; Hoofdstuk 4, 5, 6 en paragraaf 7.3
Macroschaal (gehele kombergingsgebied)		
Autonome ontwikkeling hydromorfologie	Waterstanden, getijslag Hypsometrie Erosie/sedimentatie Troebelheid	Hoofdstuk 1 Niet in dit rapport; zie Nederhoff et al., (2017) Hoofdstuk 3 Niet in dit rapport

Beleids- of behevraag(stuk)	Morfologische indicatoren	In rapport ?
Mega en macroschaal (Waddenzee en kombergingen, op tijdschaal van tientallen tot honderden jaren)		
Autonome ontwikkeling kwaliteit en kwantiteit van habitattypen	Arealen (opp.) geulen, platen en kwelders, ecotopen Droogvalduur platen Sedimentsamenstelling bodem	Hoofdstuk 3 Niet in dit rapport;
Gevolgen van kustsuppleties voor kombergingsgebied Borndiep	Suppletievolume Sedimentsamenstelling bodem	Paragraaf 7.3
Autonome ontwikkeling waterkwaliteit	Troebelheid	Niet in dit rapport
Gevolgen van bodemberoerende visserij	Troebelheid	Niet in dit rapport
Mesoschaal (morfologische onderdelen van het kombergingsgebied)		
Gevolgen van erosie voor de waterkeringen	Geuldiepte en -migratie Cyclische morfologische ontwikkelingen (geulen) Bodemdynamiek (op diverse tijdschalen; o.a. geulmigratie en drempelvorming) Stabiliteit bestortingen Verhouding getijvolume/-prisma en geulgrootte Verhouding omvang autonome geul en gebaggerde geul	Allemaal Hoofdstuk 4
Noodzaak vaargeul- en havenonderhoud		
Gevolgen van vaargeul- en havenonderhoud	Baggervolumes Geulvolume Sedimentsamenstelling bodem Troebelheid	Hoofdstuk 4 Hoofdstuk 4 Hoofdstuk 4 Niet in dit rapport
Dekking kabels en leidingen	Lokale diepte	Hoofdstuk 5
Gebruik van de kwelder	Intensiteit beweiding	Niet in dit rapport
Ingrepen gericht op behoud en verbetering	Lengte bestorte kwelderrand; lengte en areaal kwelderwerken	Niet in dit rapport

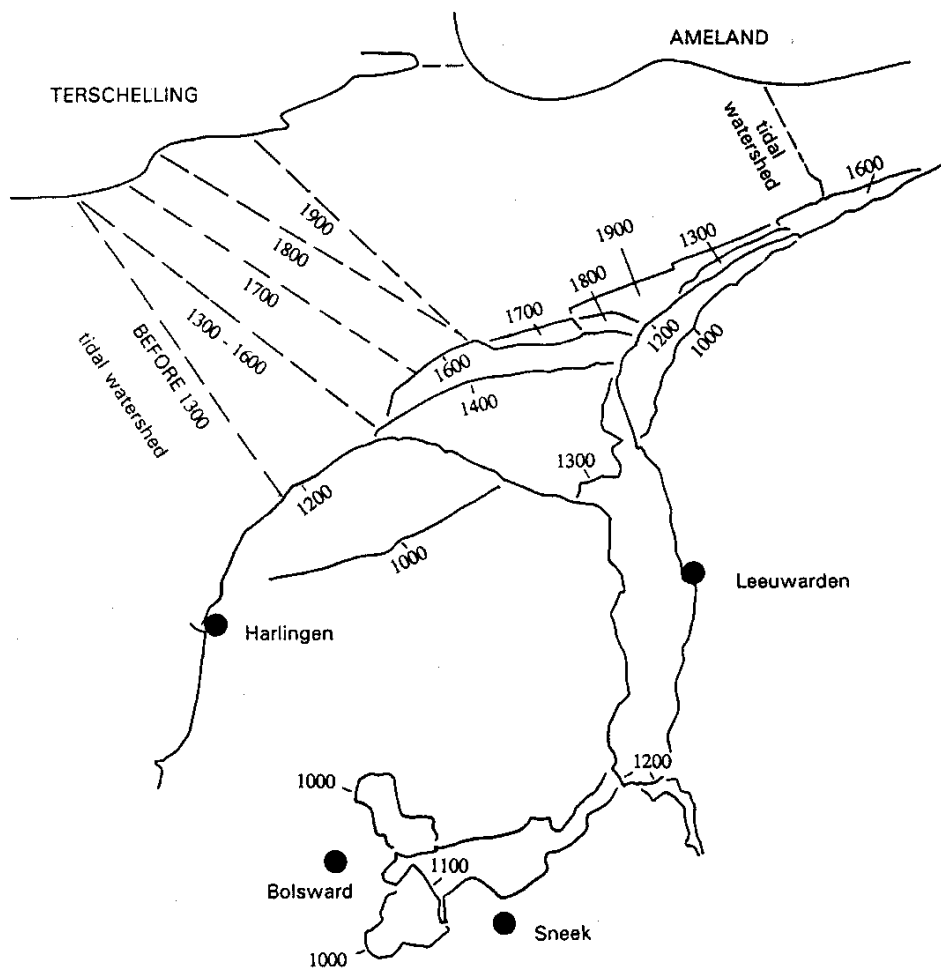
3 Grootschalige en langjarige ontwikkelingen van het kombergingsgebied Borndiep

3.1 Grootschalige en langjarige morfologische veranderingen

De beschrijving van de veranderingen in het kombergingsgebied die op de langere tijd en grotere ruimteschaal spelen is gebaseerd op sinds de jaren '30 uitgevoerde studies. Daarin zijn de grootschalige ontwikkelingen van het gehele gebied, van kombergingsgebied tot en met buitendelta beschreven en geanalyseerd, op basis van historische kaarten, lodingen en geologische studies (Beckering Vinkers, 1947, Elorche, 1983, De Boer, e.a., 1991a en 1991b, Rakhorst e.a., 1993, Huijs, 1993, Cleveringa et al., 2005).

3.1.1 De Middellzee als voorloper van het huidige Borndiep

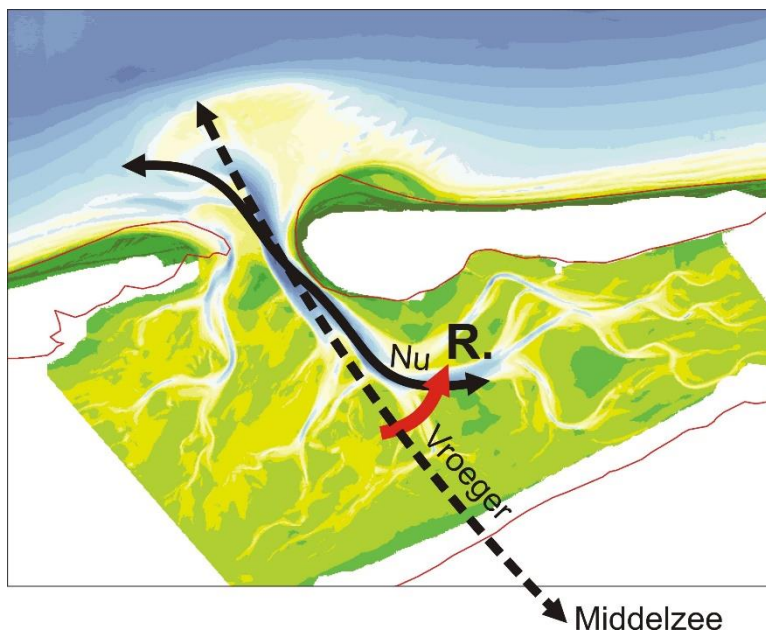
Het Zeegat van Ameland was in de middeleeuwen verbonden met de toenmalige Middellzee, die het middeleeuwse Friesland opsplijste in de Westergo en Oostergo. De Middellzee was een langgerekt getijdebekken, dat zich tot diep in Friesland uitstrekte. Vanaf de 11e eeuw zijn, vanaf de landzijde van het bekken, delen van het bekken opgeslibd en bedijkt. De vorm van het bekken veranderde door de opslibbing en bedijking van een langgerekte zeearm in het huidige 'korte' en brede bekken (Figuur 3-1).



Figuur 3-1 Bedijkingsgeschiedenis van de Middelzee en de verplaatsing van het wantij tussen het Vlie en het Borndiep, uit Van der Spek (1994).

Totdat de huidige vorm van het bekken bereikt werd, was het Borndiep verbonden met een langgerekte zeearm. Het zwaartepunt van het kombergingsgebied lag - door de eb- en vloedstroom van en naar de Middelzee - vast, zodat de verplaatsing van het zeegat slechts beperkt mogelijk was. Deze situatie duurde tot de 16e eeuw. Met de verandering van het bekken van relatief lang en smal naar kort en breed werd verplaatsing van het wantij en zeegat mogelijk.

De keel van het zeegat, die de verbinding vormt tussen buitendelta en kombergingsgebied heeft na het dichtslibben van de Middelzee een draaiing ondergaan, tegen de wijzers van de klok in (Figuur 3-2). De rotatie is met name ten koste gegaan van de westpunt van Ameland. Ten opzichte van het kombergingsgebied ligt van het Zeegat van Ameland met zijn buitendelta tegenwoordig verder naar het westen. Het draaipunt van deze beweging ongeveer van het diepste gedeelte, ruwweg op het smalste punt tussen Terschelling en Ameland.



Figuur 3-2 Schematische weergave van de morfologische ontwikkelingen op de lange termijn (eeuwen) van de rotatie (R.) van de as van het kombergingsgebied tegen richting van de wijzers van de klok in. (uit Cleveringa et al., 2005).

3.1.2 Verplaatsing wantijen

De geologische en historische analyses laten een verschuiving van het zwaartepunt van het bekken zien. De westelijke begrenzing van het kombergingsgebied, het wantij ten zuiden van Terschelling, ligt tegenwoordig vele kilometers meer naar het oosten dan aan het eind van de Middeleeuwen (Van der Spek, 1994; 1995). De oostelijke begrenzing wordt gevormd door het wantij ten zuiden van Ameland. Vanaf 1830 is het wantij ten zuiden van Ameland enkele kilometers naar het oosten verplaatst (De Boer, 1991a, Oost en de Haas, 1993, Van der Spek, 1994; 1995). De verplaatsing van de wantijen speelt dus al langer dan de afsluiting van de Zuiderzee in 1932. Het is wel mogelijk dat deze afsluiting de verplaatsing heeft bevorderd.

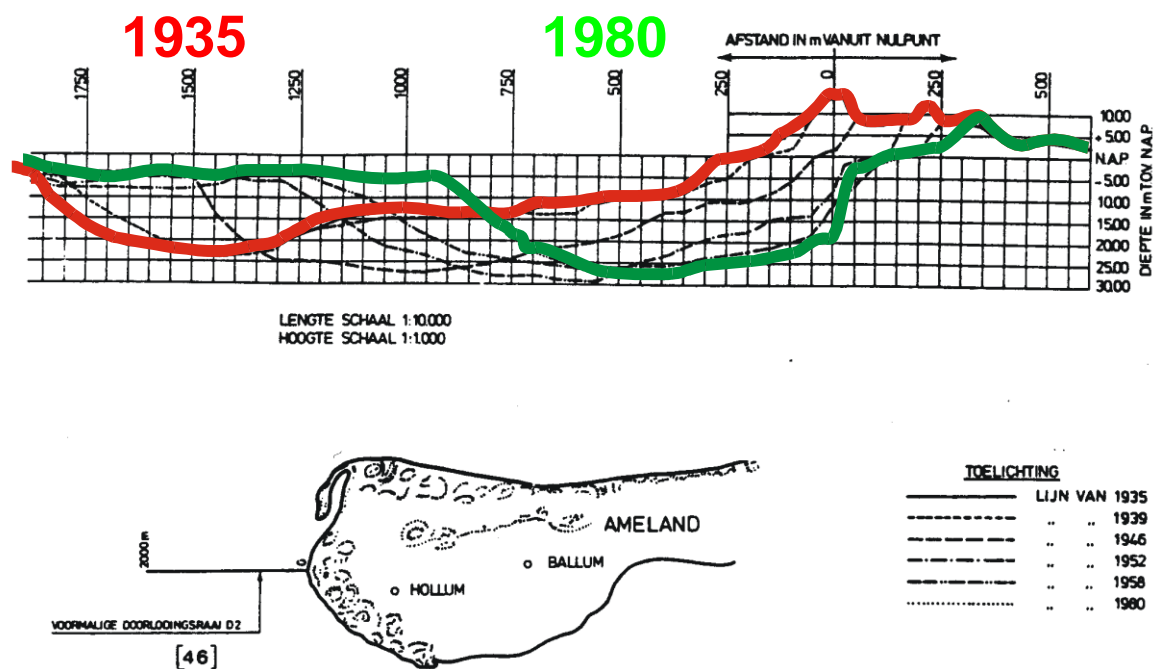
In de huidige situatie, met een relatief kort en breed bekken, kan er een doorgaande verplaatsing van zeegat en kombergingsgebied naar het oosten plaatsvinden (Wang et al., 2013). Het mechanisme voor de verplaatsing van het wantij is waarschijnlijk het getij- en windgedreven (rest)transport over het wantij. Ten zuiden van Ameland hebben uitgebreide metingen plaatsgevonden van de waterbeweging over en nabij het wantij, onder verschillende omstandigheden, van 1968 tot 1973 (een overzicht wordt gepresenteerd in De Boer e.a., 1991). Deze metingen zijn destijds uitgevoerd om de mogelijkheid van een vaste oeververbinding te onderzoeken. Zelfs onder rustige omstandigheden is er sprake van resttransport van water naar het oosten (circa 5×10^6 m³/getij) en lokaal hoge stroomsnelheden. Onder stormomstandigheden kunnen zowel het transport over het wantij, als de optredende stroomsnelheden snel oplopen.

3.1.3 Erosie van de westkust van Ameland

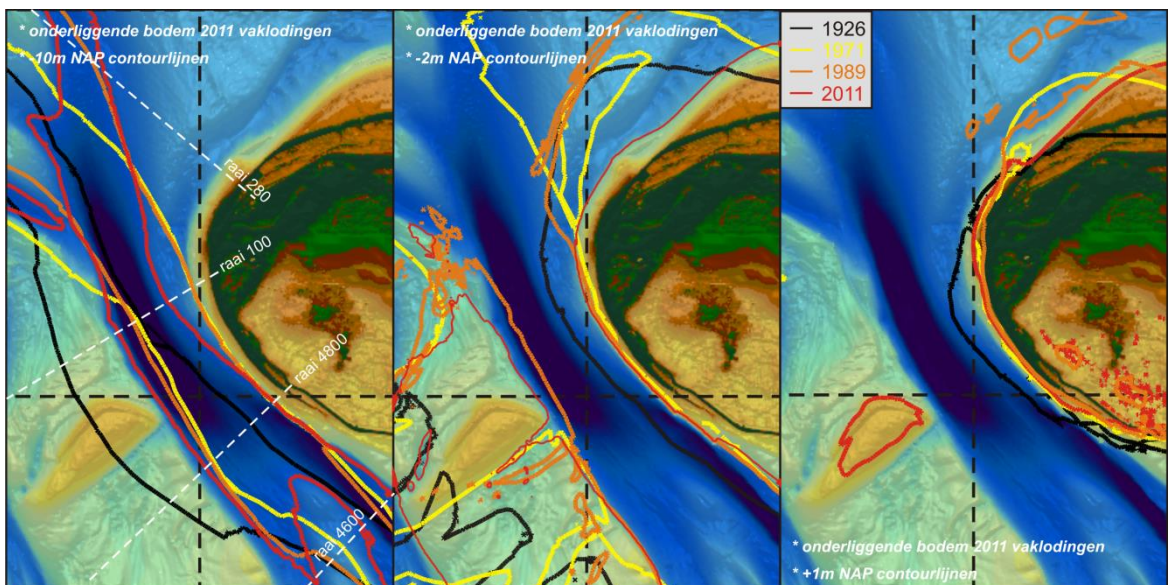
De erosie van de westkust is gerelateerd aan de oostwaartse verplaatsing van de getijdegeul Borndiep. De oostwaartse verplaatsing van het Borndiep is tenminste sinds de tweede helft van de 19e eeuw aan de gang (Beckerling Vinkers, 1947; Gerritsen, 1952). Ter hoogte van km paal 2 is het Borndiep van 1935 tot 1950 ongeveer 500 m naar het oosten verplaatst (Figuur 3-3, de Reus, 1983 en Figuur 3-4, Elias & Bruens (2013)). Deze verplaatsing is in die periode ten koste gegaan van Ameland en vormde een steeds grotere bedreiging voor de

veiligheid van het eiland. De lange termijn erosie van de westkust van Ameland gaat samen op met de twee ontwikkelingen die hierboven zijn beschreven, namelijk de verplaatsing van de keel van het zeegat naar het oosten en de rotatie van het Borndiep.

In reactie op de oostwaartse verplaatsing van de getijdegeul Borndiep zijn een aantal kustverdedigingsmaatregelen uitgevoerd. De kustverdediging van west en noordwest Ameland bestaat uit een combinatie van harde kustverdedigingsmaatregelen en het herhaald uitvoeren van zandsuppleties op het strand. De eerste harde verdedigingsmaatregelen zijn uitgevoerd in 1947, in de vorm van zinkwerk, die in 1979 zijn gevolgd door de aanleg van een stortstenen onderwaterdam en door de aanleg van stortstenen dammen dwars op de kust (figuur 2.2). In aanvulling op de harde ingrepen zijn vanaf 1979 strandsuppleties uitgevoerd in het gebied. In 1994 is de bestaande bestorting aangevuld en opgetrokken. De harde verdediging wordt onderhouden en er worden met enige regelmaat strandsuppleties uitgevoerd.



Figuur 3-3 De oostwaartse verplaatsing van de keel van het Zeegat van Ameland: dwarsdoorsnedes door Borndiep in de periode 1935 tot 1980 (uit Cleveringa et al., 2005, naar De Reus, 1983).



Figuur 3-4 Verplaatsing van het Borndiep op basis van de Vaklodingen (1927-2011). Van links naar rechts: -10 m contour (midden in de geulwand), de -2 m contour (bovenkant geul) en de +1 m contour (strand) uit Elias & Bruens (2013).

Aan de oorzaak van de structurele erosie, het verschuiven van het zwaartepunt van het kombergingsgebied, valt niets te veranderen, tenzij door extreme ingrepen met grote neveneffecten (en die zodoende tegenwoordig geen realistische optie meer zijn). De huidige maatregelen ter plaatse van de westkust van Ameland zijn daarom de meest passende ook al zijn ze niet anders dan het mitigeren van de gevolgen.

3.2 Dammen

In het kombergingsgebied zijn drie dammen aangelegd, die tegenwoordig nog aanwezig zijn en invloed uitoefenen op de morfologie. De drie dammen zijn aangegeven in Figuur 3-5:

1. De veerdam bij Holwerd, aangelegd in 1903 en uitgebreid (verlengd) in 1958.
2. De dam bij de Ballumerbocht, ten zuidoosten van het dorp Ballum op Ameland, aangelegd in de eerste helft van de 19^e eeuw.
3. De veerdam bij Nes, voor de tweede wereldoorlog aangelegd op de reeds aanwezige strekdam (Mulder, 2015).

Naast deze dammen zijn op het wad onder Ameland ook de resten te vinden van de 'dam van Teding Berkhout' (bij de x-en in Figuur 3-5). In 1871-1872 is over het toenmalige wantij een dam aangelegd voor het transport naar en van Ameland, in opdracht van de initiatiefnemer Teding Berkhout. In deze dam zijn al snel na aanleg gaten geslagen tijdens stormen.

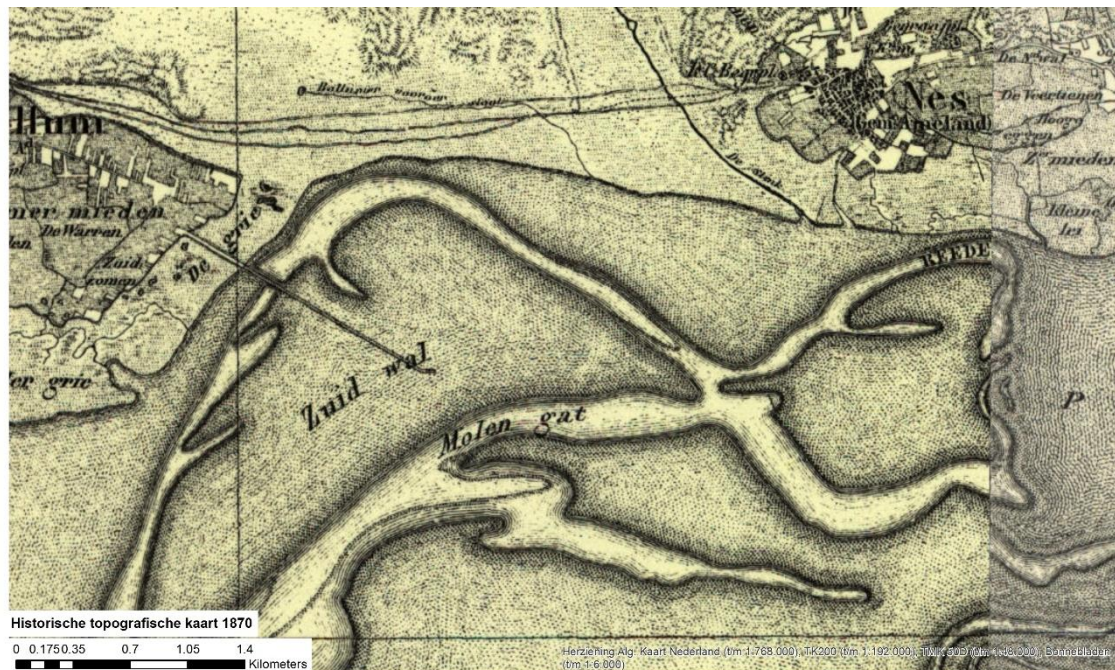


Figuur 3-5 Historische kaart (situatie 1958, voor de verlenging van de veerdam bij Holwerd).

De veerdam naar Holwerd is aangelegd op het landwaartse deel van de dam van Teding Berkhout, dus op de oude locatie van het wantij. De afstand tussen de oorspronkelijke (voor de verlenging in 1958) zeewaartse veerhaven en de eerste geul op het Waddenzee bedroeg tenminste één kilometer. Na de verlenging lag - en ligt - de veerhaven direct aan de geul.

De dam bij de Ballumerbocht is aangelegd om de ontwikkeling van de geul Ballumerbocht tegen te gaan. In Figuur 3-6 is zichtbaar dat oorspronkelijk aan beide zijden van deze dam nog een geul lag, die door de dam is 'opgeknipt'. Deze geul erodeerde de kwelder tussen Ballum en Nes. Tevens diende de dam als aanlegdam voor beurtschippers. Deze beurtschippers verzorgden het vervoer van Friesland (Oudebildtzijl, Nieuwebildtzijl, Zwarte Haan en later Harlingen) naar Ameland. Van 1932 tot aan de Tweede Wereldoorlog vertrok vanaf deze dam een veerdienst tussen Ameland en Zwarte Haan (Mulder, 2015). Tegenwoordig fungeert de dam als leidam voor de geul. Deze geul verbindt de werkhaven met het Molengat. Omdat bij de werkhaven ook de reddingsboot van de KNRM ligt, is de geul langs de dam van belang voor de veiligheid op het water rondom Ameland. De geul wordt incidenteel gebaggerd om deze op diepte te houden. Aan de waddenzeezijde ligt het Molengat tegen de kop van de dam, deze geul is hiermee op deze plek gefixeerd.

Ten zuiden van Nes is in de oudere kaarten geen dam zichtbaar (Figuur 3-6). In de topografische kaart uit de jaren dertig is een 'aanleghoofd' aangegeven, met daarop een weg. Dit hoofd was nog niet zo lang als de huidige veerdam en niet verboden met een geul. De veerdam bereikte zijn huidige lengte eind jaren '50 of begin jaren '60, in dezelfde periode als de verlenging van de veerdam bij Holwerd. Daarbij is ook de havenkom aangelegd. Na verlenging strekte de veerdam tot aan de geul en deze situatie is sindsdien vergelijkbaar gebleven.



Figuur 3-6 Historische topografische kaart van de situatie rond 1870).

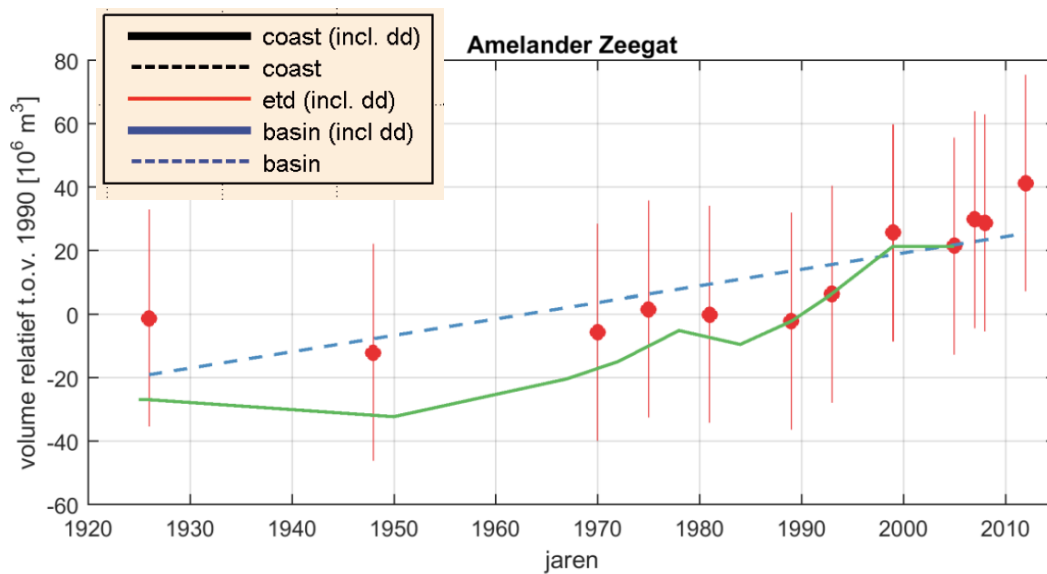
3.3 Sedimentatie en areaalveranderingen in het kombergingsgebied

3.3.1 Volumeveranderingen

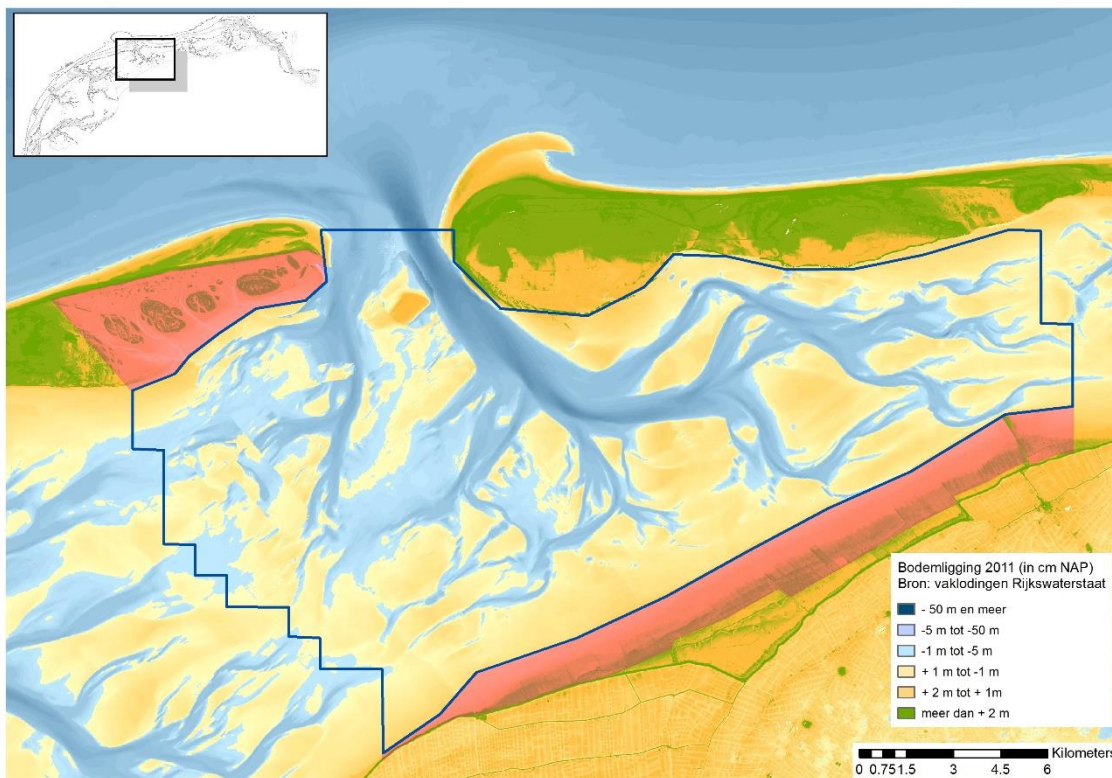
Door verschillende auteurs is de ontwikkeling van het sedimentvolume in het gehele kombergingsgebied beschouwd (Stuurgroep..., 1981; de Boer et al., 1991; Hoeksema et al., 2004; Elias et al., 2012, Nederhoff et al., 2017). De meest recente analyse is uitgevoerd door Nederhoff et al. (2017). Alle analyses laten zien dat sedimentatie heeft plaatsgevonden in het kombergingsgebied. De ontwikkeling van het sedimentvolume die is gerapporteerd door Nederhoff et al. (2017) is opgenomen in Tabel 4 en de grafiek met de ontwikkeling staat in Figuur 3-7. In het gebied dat door Elias et al. (2012) en Nederhoff et al. (2017) is gebuikt voor de analyse zijn de kwelders niet opgenomen (Figuur 3-8).

Tabel 4 Verandering van het sedimentvolume van het Amelander Zeegat per jaar t.o.v. 1990 in miljoenen kubieke meters (uit Nederhoff et al., 2017).

Jaar	1926	1948	1970	1975	1989	1993	1999	2005	2007	2008	2012
Volume	-1,2	-12	-5,6	1,6	-2,1	6,4	25,7	21,5	29,9	28,8	41,3



Figuur 3-7 Verandering t.o.v. 1990 van het sedimentvolume van het Amelander Zeegat over de tijd in 10^6 m^3 . In rood zijn de in deze data analyse berekende punten. De bollen zijn de punten zelf. De lijn geeft de onzekerheid weer. In blauw is de trend van deze lijnen. In groen is de lijn van Elias et al. (2012) weergegeven (uit Nederhoff et al., 2017).



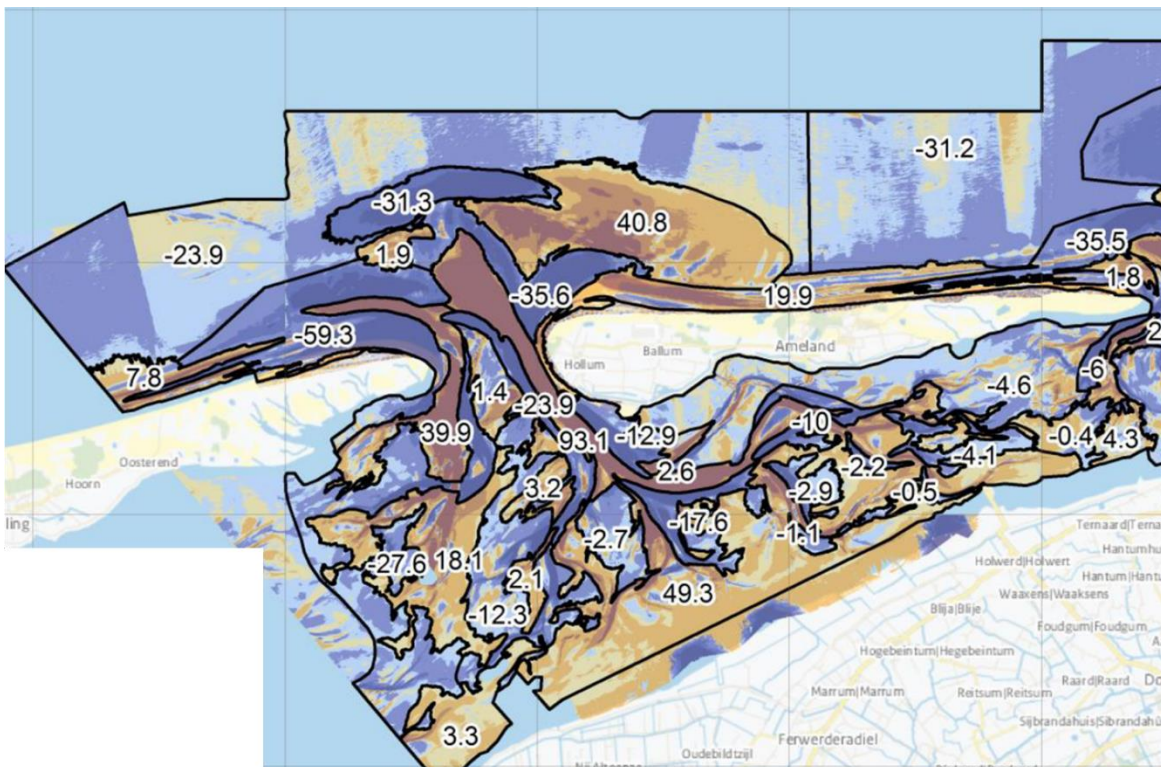
Figuur 3-8 Kombergingsgebied van het Borndiep, waarbij de blauwe lijnen het gebied markeren dat onder andere door Elias et al. (2012) en Nederhoff et al., (2017) is gebruikt voor de analyse van de volume en areaalontwikkelingen. De roze gebieden zijn de Boschplaat en de vastelandskwelders.

Vermaas en Marges (2015) hebben een analyse uitgevoerd van de volumeveranderingen in de periode 1990-2012 rondom Ameland, waarbij ook de kombergingsgebieden Borndiep en Pinkegat zijn beschouwd. De gehanteerde gebiedsindeling is opgenomen in Figuur 3-9, waarbij ook de volumeveranderingen in de periode 1990-2012 per gebied zijn opgenomen. Deze volumes illustreren de grote bruto veranderingen die optreden. De volumeveranderingen op geaggregeerd niveau zijn opgenomen in Tabel 5. De optelsom van de veranderingen in deze gebieden (inclusief de buitendelta) is dat netto sedimentatie heeft plaatsgevonden en daarmee komen de waarnemingen overeen met die van Elias et al. (2012) en Nederhoff et al. (2107).

In aanvulling op de gebieden uit de vaklodingen is door Vermaas en Marges (2012) ook een bepaling opgenomen van de sedimentatie op de vastelandskwelders. De sedimentatie bedraagt op basis van hun berekeningen $15,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ in de periode: 1990-2012. Op de totale netto sedimentatie in het gebied is de sedimentatie op deze kwelders aanzienlijk (Tabel 5). Het oppervlakte van de vastelandskwelders (zonder de zomerpolders en het proefverkwelderingsgebied) bedraagt 33 km^2 en dat van de Boschplaat 18 km^2 . Daarmee bedraagt de oppervlakte van de kwelders ongeveer 19% van het 'natte' oppervlakte van het kombergingsgebied (Tabel 1). Vanwege de aanzienlijke omvang van de kwelders in dit kombergingsgebied is het belangrijk om de sedimentatie (en indien die plaatsvindt de erosie) op de kwelders mee te nemen in beschouwingen van de sedimentbalans.

Tabel 5 Volumeveranderingen tussen 1990 en 2012 voor de grootschalige gebieden en de kwelders langs het Vasteland, uit Vermaas en Marges (2015).

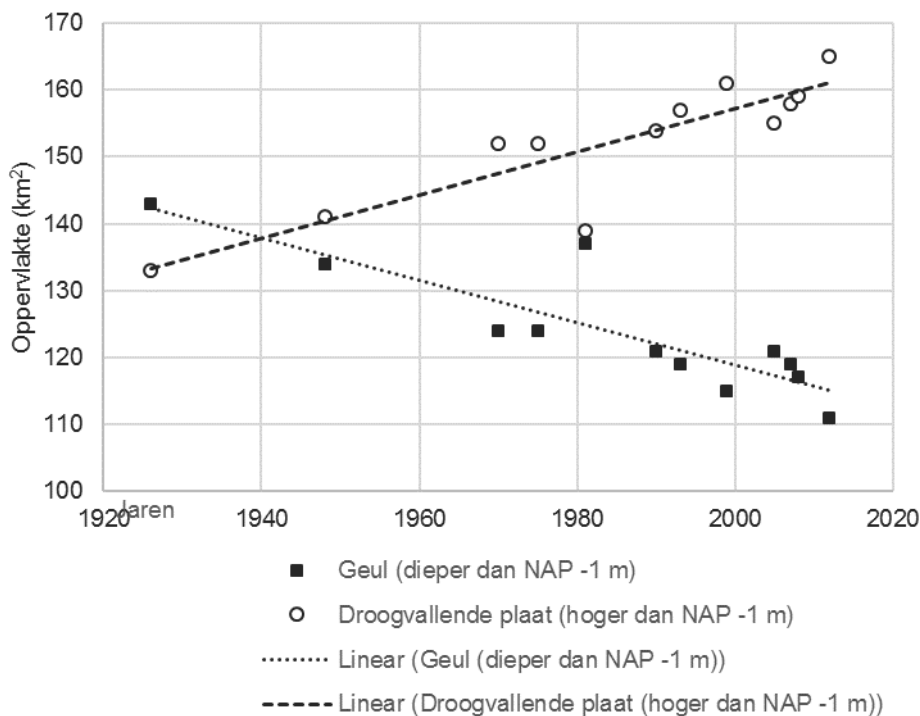
Naam grootschalig gebied (gebieden aangeven op kaart svp)	Volumeverandering 1990-2012 in 10^6 m^3
Kom West	-11.64
Kom Zuid	35.77
Kom Ameland	-4.55
Zeegat van Ameland	-23.7
Buitendelta Zeegat van Ameland	11.43
Kwelder vasteland	15.3
Totaal	+22.61



Figuur 3-9 Grootschalige gebieden met verandering in volume tussen 1990 en 2012 in miljoen m³, positieve waarden zijn sedimentatie, negatieve erosie, uit Vermaas en Marges (2015).

3.3.2 Areaalveranderingen

De sedimentatie in het kombergingsgebied heeft geresulteerd in duidelijke veranderingen in de arealen van de geulen en de platen, zoals is te zien in Figuur 3-10. Het areaal platen is toegenomen, waarbij de trend 0,32 km²/ jaar bedraagt, oftewel een toename van 32 ha per jaar. Het areaal geulen is met hetzelfde trend afgenomen. Hierbij moet worden bedacht dat bij deze analyse een vaste referentiehoogte is gehanteerd van de overgang van plaat naar geul van -1,0 m NAP. In werkelijkheid is het niveau van laagwater in de beschouwde periode hoger geworden (Figuur 1-5). De daadwerkelijke toename van het plaatareaal, dat wordt begrensd door het niveau van laagwater is kleiner.



Figuur 3-10 Grafiek met de ontwikkeling van het plaat- en geulareaal in het kombergingsgebied Borndiep (op basis van de getallen van Nederhoff et al., 2017).

3.3.3 Sedimentatie in het kombergingsgebied

In het kombergingsgebied van het Borndiep is sprake van netto sedimentatie, net als in de meeste andere kombergingsgebieden van de Waddenzee (Nederhoff et al., 2017). De netto sedimentatie betekent dat er in de beschouwde periode netto zand en slib is aangevoerd naar het kombergingsgebied. Dat netto transport is het verschil tussen veel grotere bruto transporten in en uit het zeegat. De processen die leiden tot netto transporten⁶ van zand (Z) en slib (S) zijn op hoofdlijnen beschreven in Oost en de Boer (1994).

- Asymmetriën in het getij (Z & S);
- Verschil in gemiddelde waterdiepte bij hoog- en laagwater (met name S);
- 'Scour lag' (S);
- Settling lag (S);
- Resuspensie door golven (S & Z);
- Biologische activiteit (pseudo-faeces van schelpdieren, diatomeeën matten, vegetatie) (S);
- Estuariene circulatie (S & Z).

Waar en wanneer welke processen en rol spelen in het kombergingsgebied Borndiep is niet vast te stellen zonder uitgebreid onderzoek. Voor het dagelijkse beheer is die kennis niet nodig. Voor het maken van beleidskeuzes die verband houden met de kustlijnverzorging is wel meer gedetailleerde kennis nodig van de zandtransporten vanuit de kust naar de Waddenzee. Dat is de reden voor het uitvoeren van het Kustgenese 2 onderzoek in het Zeegat van Ameland.

⁶ Eigenlijk betreft het de beschrijving van de processen die zorgen voor het transport van slib naar de kombergingsgebieden en de verdeling van slib binnen de kombergingsgebieden.

4 Getijdegeulen

4.1 Inleiding

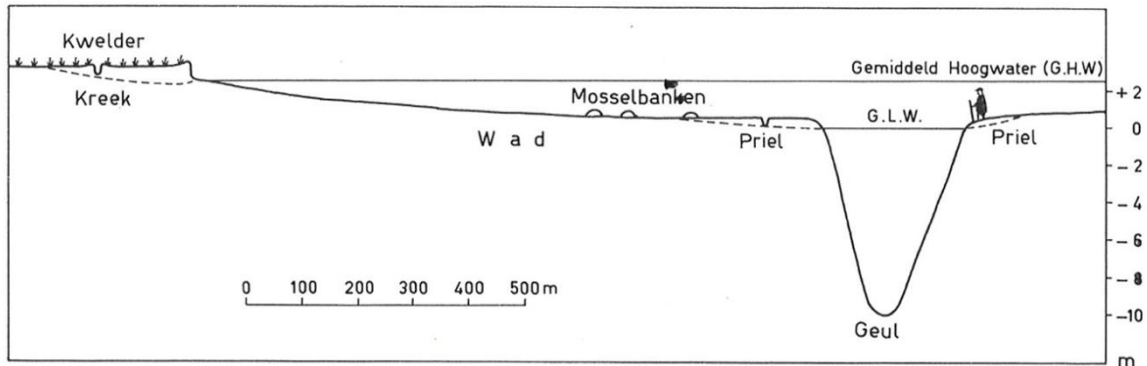
Getijdegeulen zijn van belang voor de toegankelijkheid van de Waddenzee en hebben invloed op de veiligheid (een geul nabij een dijk, duin of voorland kan de stabiliteit van de waterkering negatief beïnvloeden), ecologische waarden (dynamiek droogvallende platen en hun biotische elementen) en de ligging en het beheer van kabels en leidingen (Tabel 6).

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

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

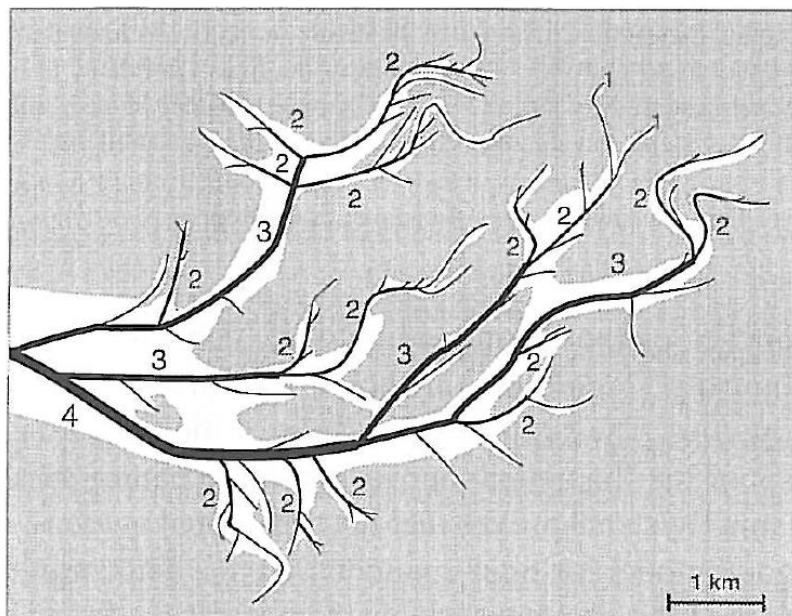
4.2 Basisbegrippen

Waar zeer veel getijdewater heen en weer stroomt en de stroming hoge snelheden bereikt schuurt de bodem uit en vormen zich geulen (Figuur 4-1). Deze getijdegeulen zijn te beschouwen als de “aders” van het kombergingsgebied: zij voeren niet alleen water aan, maar ook sediment en nutriënten. Deze geulen vertakken zich op vrij regelmatige wijze, waarbij elke zijtak en ‘zij-zijtak’ een steeds kleiner deel van het gebied van water voorziet. Samen vormen de takken en de hoofdgeul een netwerk dat wel iets lijkt op een boom (Van Veen, 1950) als ervan bovenaf op wordt gekeken: het geulstelsel (Figuur 4-2). Vastgesteld is dat dit op een regelmatige, vrij wetmatige manier gebeurt, waarbij elke tak zich weer splitst in 3-4 zijtakken en waarbij de lengte van de “takken” logaritmisch afneemt (Cleveringa & Oost, 1999). De geulsystemen kunnen daarom gezien worden als “statistisch zelfgelijkende fractale” netwerken.



Figuur 4-1 Schematische dwarsdoorsnede door de kwelder, wadplaat en getijdegeul, met in de stippellijnen de insnijding van kreek en priel, uit Van Straaten, 1964.

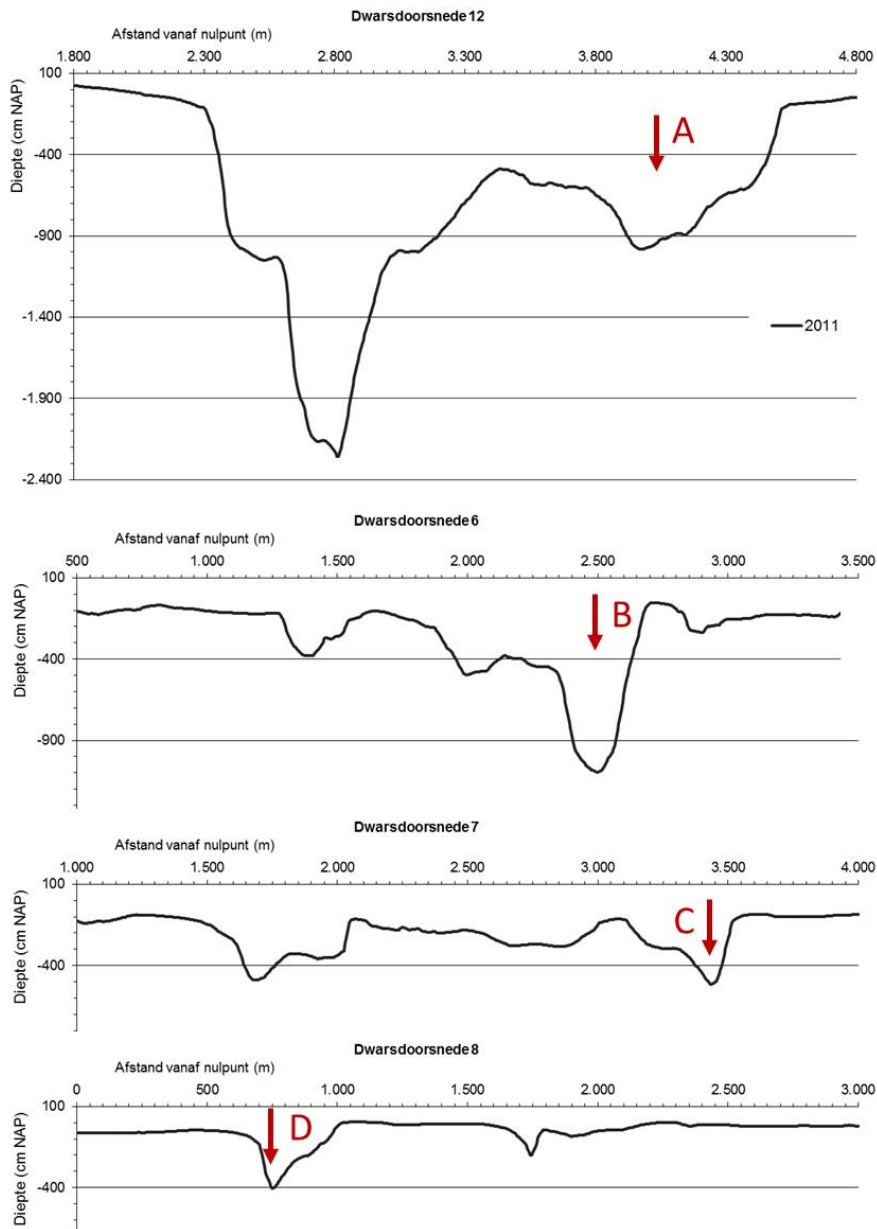
Bij steeds kleinere vertakkingen, die een steeds kleiner deel van het totale getijdenvolume vervoeren neemt de oppervlakte van de natte doorsnede af, doordat de diepte en de breedte afnemen. Deze afname van de omvang van de geulen van het zeegat naar dieper in het kombergingsgebied is geïllustreerd in Figuur 4-3. De vertakkingen van de geulen gaan niet op dezelfde wijze door onder de 500m schaal. Klaarblijkelijk verloopt het watertransport met vloed en eb dan niet via vertakkende geulen, maar via andere routes. Denk daarbij aan prielen en misschien wateruittrekking door en over het sediment van intergetijdenplaten.



Figuur 4-2 Voorbeeld van een vertakkend getijdegeulensysteem in de Waddenzee, met een hiërarchie van kleine geulen (orde 1 naar groot (orde 4), volgens de methode van Horton (uit Cleveringa & Oost, 1999).

Binnen de geulen zijn nog allerlei morfologische verschijnselen aanwezig (bochten, eb- en vloedscharen, parallelle geulen, etc.), waarvan voorbeelden in dit hoofdstuk worden getoond. Het geulensysteem wordt omgeven door platen, die worden besproken in hoofdstuk 5. Daarbij gaat het niet alleen om de intergetijdenplaten (diegene die droogvallen bij eb en overstromen tijdens de vloed), maar ook om subgetijdeplaten (onder de GLW-lijn) en supragetijdeplaten

(platen boven GHW). Verder zijn er de kwelders: begroeide gebieden die grotendeels boven het niveau van hoogwater liggen. Deze worden besproken in hoofdstuk 6.



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

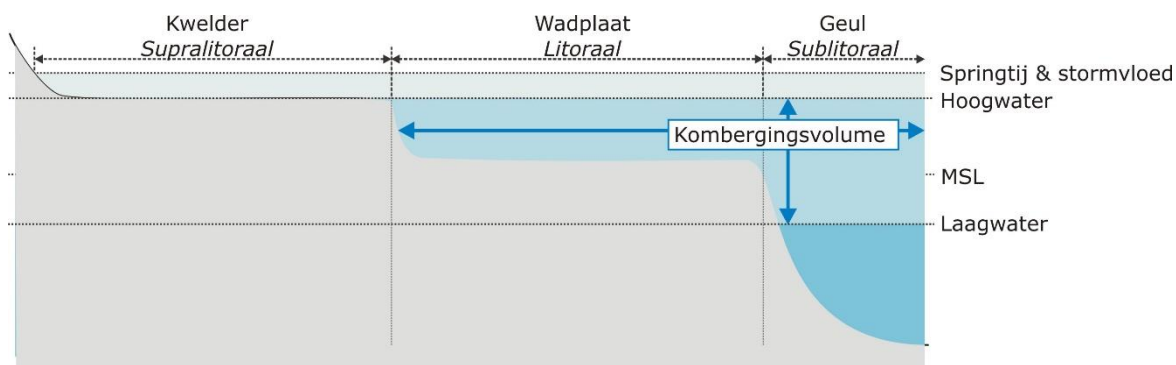
4.3 De relatie tussen omvang van de geul en de waterbeweging

De karakteristieken van de geulen verschillen per kombergingsgebied en binnen een kombergingsgebied, maar de methodiek om deze te beschrijven zou hetzelfde moeten zijn. Deze omvat een karakterisering van geuloppervlaktes, gemiddelde dieptes en de oppervlaktes van de dwarsprofielen.

Voordat we in detail treden over geulen en een aantal kenmerkende maten is het van belang om kort iets toe te lichten over de wisselwerking tussen de waterbewegingen en de ondergrond van het waddegebied. Die ondergrond bestaat grotendeels uit onverkitte

sedimenten, voornamelijk zand en nog een klein deel (zo'n 13% voor het Borndiep) slib. Bij de waterbewegingen kunnen we onderscheid maken tussen stroming en golfwerking.

De stroming wordt voornamelijk veroorzaakt door het water wat in het waddengebied heen en weer beweegt. Een belangrijk deel ervan zijn de stromingen ten gevolge van een hoeveelheid getijdewater dat naar binnen en naar buiten beweegt. Die hoeveelheid wordt ruwweg bepaald door het oppervlakte van het kombergingsgebied vermenigvuldigd met het getijverschil, minus het oppervlakte van de droogvallende platen vermenigvuldigd met de gemiddelde hoogteligging van de platen (Figuur 4-73). Helemaal correct is dat niet omdat nu eenmaal het water nog afstroomt tijdens eb terwijl de vloed alweer naar binnen komt: daardoor is het werkelijke volume dat heen en weer stroomt door een zeegat 0,9* het hierboven gegeven volume op basis van morfologie (Van Veen, 1950).



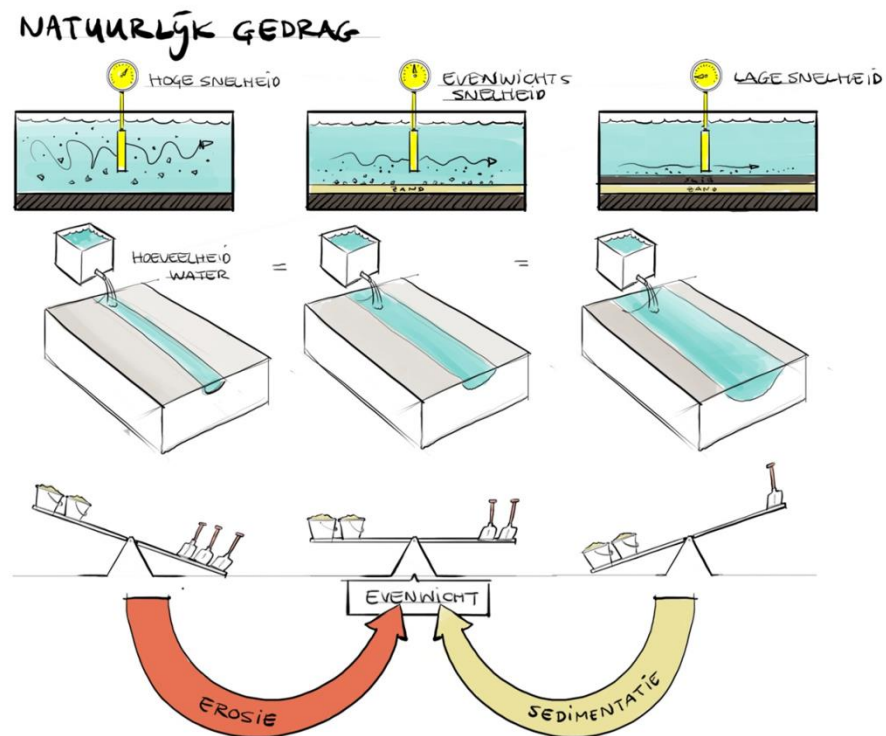
Figuur 4-4 Hoogte van geul, wadplaat en kwelder ten opzichte van de niveau van laag- en hoogwater en het kombergingsvolume (uit LTV V&T Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013b)

Dat getijvolume beweegt zich door de geulen heen en weer (Figuur 4-5). Als nu een geul een te kleine dwarsdoorsnede-oppervlak heeft, dan nemen de stroomsnelheden toe en wordt er meer zand geërodeerd, dan er wordt afgezet. Daardoor verwijdt de dwarsdoorsnede van de geul en zakken de snelheden tot er weer evenveel sediment wordt afgezet als wordt afgevoerd. Omgekeerd zal een geul zich vernauwen als deze een te grote dwarsdoorsnede heeft. Om het plastisch te zeggen: een geul beweegt zich qua dwarsdoorsnede altijd toe naar een evenwicht i.r.t. de stroming. Het is dan ook niet verwonderlijk dat er sterke verbanden zijn gevonden tussen de dwarsdoorsnede van de geulen en het getijvolume dat door een geul moet, zowel voor de hoofdgeul van een zeegatsysteem, maar ook voor nevengeulen van een getijsysteem (Eysink, 1979; Biegel, 1993; Eysink & Biegel, 1992).

Eysink & Biegel (1992) hebben een diepgaand onderzoek gedaan naar de omvang van geulen in relatie tot hun kombergingsvolume. Hieronder volgt een korte samenvatting:

- Het blijkt dat het oppervlak van de natte dwarsdoorsnede A_c sterk correleert met het vloedvolume, het ebvolume, het getijvolume, het dominante volume, dat wil zeggen degene die het grootst is van het vloedvolume of het ebvolume, en de maximum afvoer bij eb of vloed. Dit geldt zowel voor de A_c bij gemiddeld hoogwater, NAP en voor gemiddeld laagwater ($R > 0.96$; Eysink & Biegel, 1992).
- Over het algemeen waren de gevonden lineaire verbanden (van de vorm: $A_c = a + bZ$, waarbij a en b empirische constanten zijn en Z het getijvolume of de maximumafvoer) iets minder sterk dan de gevonden niet-lineaire verbanden (van de vorm: $A_c = c + dZ^e$, waarbij c , d en e empirische constanten zijn en Z het getijvolume of de

maximumafvoer), maar de verschillen zijn dermate gering dat vast kan worden gesteld dat de lineaire verbanden voldoen om de geuldwarsdoorsnede te karakteriseren. In het algemeen is het gemakkelijker om het getijvolume vast te stellen dan de maximum afvoer, zodat de eerste de voorkeur geniet om geuldoorsneden te karakteriseren.



Figuur 4-5 Schematisch overzicht hoe een geuldoorsnede afgestemd is op het getij dat zich door een geul beweegt. Bij te hoge snelheden omdat de geul te nauw is schuurt deze uit; bij te lage snelheden treedt er bezinking op en vernauwing. Dit proces gaat door tot de geul in evenwicht is qua doorsnede met de hoeveelheid water die erdoorheen stroomt (uit Herman et al. 2016).

- Ook kunnen gemiddelde snelheden en afvoeren gebruikt worden om verbanden te leggen omdat deze direct gerelateerd zijn aan getijdenvolumes; iets soortgelijks geldt voor maximale stroomsnelheden die gerelateerd zijn aan de maximale afvoeren.
- Verder blijkt dat de correlatie bij GHW over het algemeen iets lager dan bij NAP, die weer iets lager is dan GLW, wat logisch is omdat bij hogere waterniveaus in toenemende mate ook de platen betrokken raken in de dwarsdoorsnede.
- Kleinere geulen blijken in het algemeen een grotere spreiding hebben rond het gevonden verband dan de grotere geulen maar zijn binnen een gevonden verband wel goed onderling vergelijkbaar qua relatie.
- Het meenemen van golfdynamiek en bodemruwheid (tot uiting komend in de shear stress in de vergelijkingen) lijkt weliswaar recht te doen aan de werkelijkheid, maar vermindert de spreiding van de data niet.

Niet alleen het dwarsdoorsnede-oppervlak, maar ook, zij het minder sterk, de diepte (d) en de breedte van een geul (W) blijken af te hangen van de hoeveelheid getijdewater die door een geul stroomt (Eysink & Biegel, 1992). De daarbij gevonden verbanden zijn niet-lineair en veelal van de vorm:

$$d \text{ of } W = xP^y$$

waarbij x en y empirische constanten zijn, en y een waarde heeft die vaak rond de 0.5 ligt. Deze verbanden zijn sterk afhankelijk van de lokale stromings- en bodemcondities en kunnen, zo waarschuwen Eysink en Biegel (1992), dan ook niet veralgemeniseerd worden.

Er bestaan sterke verbanden tussen het volume van een geulstelsel en de grootte van het bekken en het getijdenvolume. Dit geldt zowel voor volumes onder GHW, GLW en met name de gemiddelde zeestand (MSL). Meestal hebben ook deze verbanden de vorm:

$$V = xP^y$$

Alleen voor V_{MSL} geldt een vrij eenvoudige relatie voor alle getijdeprisma's, namelijk

$$V_{\text{MSL}} = 16 \cdot 10^{-6} P^{1,55}$$

Uit dit alles volgt dat er ook een relatie is tussen het geulbovenoppervlak en het getijdenvolume (zie verder plaatareaal).

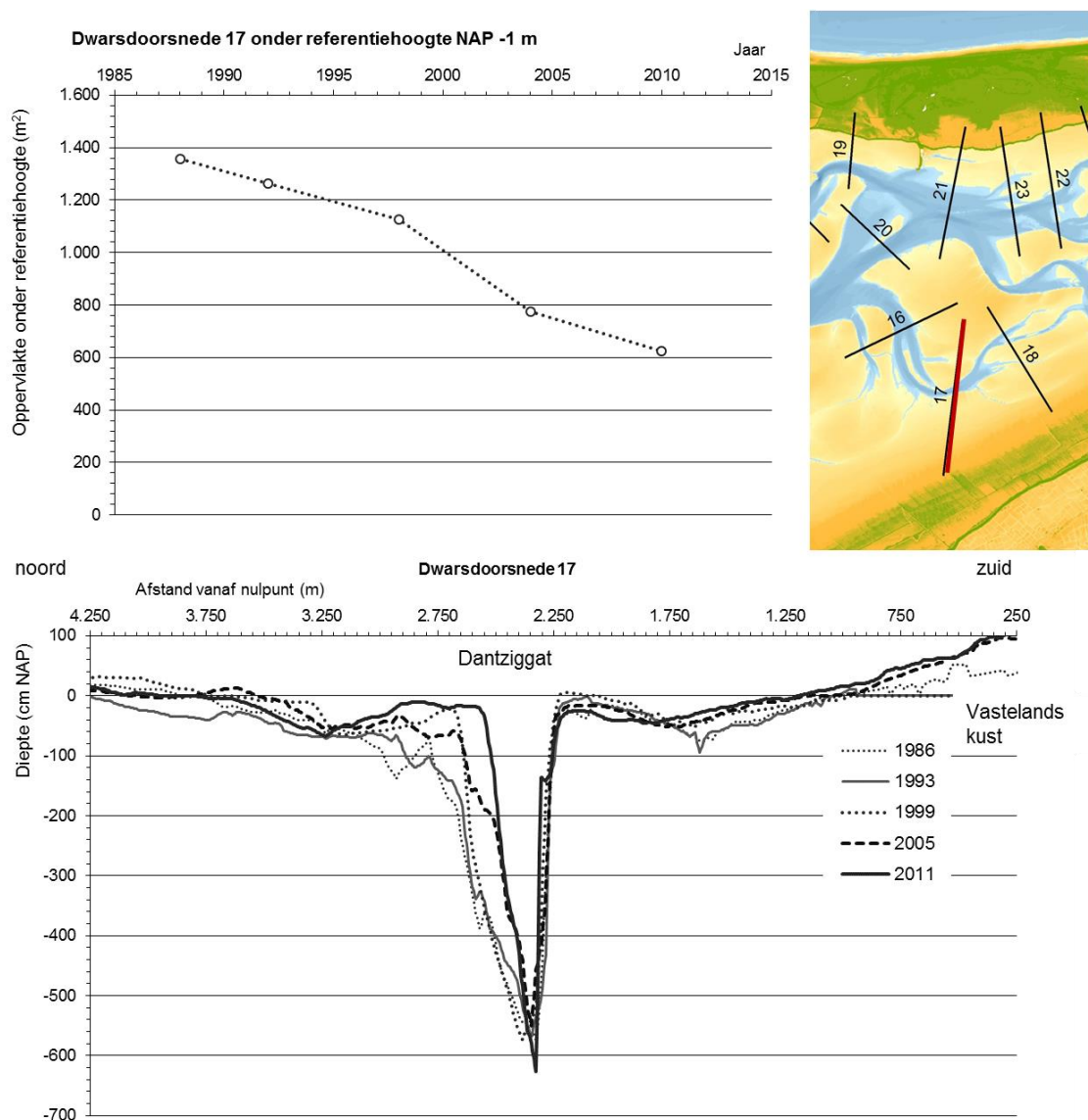
Naast getijstroming kan er ook nog sprake zijn van stroming door andere oorzaken zoals: extra verhoging van de waterstand door stormvloed en golfgedreven stromingen. Ook de uitstroom van zoetwater kan complexe stromingen opgang brengen (de zogenaamde estuariene circulatie). Vanwege de beperkte omvang van de zoetwateraanvoer naar het kombergingsgebied Borndiep wordt daarvan hooguit een lokale invloed verwacht, in de geulen waarin het zoete water wordt afgevoerd, zoals bij de Ballumerbocht. Vanwege de sterke verbanden tussen getij en geuldimensies wordt verondersteld dat andere stromingen een ondergeschikte rol spelen voor de omvang van de getijdegeulen.

4.3.1 Verandering van de omvang van geulen door de veranderingen van hun getijdeprisma.

De omvang van geulen is gekoppeld aan de hoeveelheid water die tijdens eb- en vloed door die geul stroomt. Veranderingen in de hoeveelheid water die door de geul stroomt leiden dan ook tot veranderingen in de omvang van de geul. Veranderingen in het lokale getijdeprisma kunnen optreden door verschillende processen, zoals de verplaatsing van het wantij, de concurrentie met andere geulen die een deel van de lokale komberging 'overnemen', de sedimentatie dan wel erosie op de platen of de uitbreiding, dan wel afname van het areaal kwelders. Bij afname van de hoeveelheid water die door de geul stroomt zal de omvang van de geul afnemen en vice versa. In Figuur 4-6 staat het Dantziggat als voorbeeld van een geul waarvan de doorstroomoppervlakte is afgenomen. Waarschijnlijk is deze afname gerelateerd aan de afname van het kombergingsvolume door sedimentatie op de platen voor de vastelandskwelders. Afhankelijk van de lokale condities kan de sedimentatie in de geul plaatsvinden met zand, slib of een mengsel van de twee.

Sedimentatie in de geul heeft ongewenste effecten op de doorvaarbaarheid ervan, zoals blijkt uit de problemen bij de vaarweg nabij de pier van Holwerd. In de grotere geulen bij de zeegaten zal sedimentatie veelal met zand gebeuren, tenzij er bijzonder rustige condities

worden gecreëerd, dan kan er ook slib tot afzetting komen (voorbeeld: Smeriggat tussen Rif en Engelsmanplaat, tussen de kombergingsgebieden Pinkegat en Friesche Zeegat).

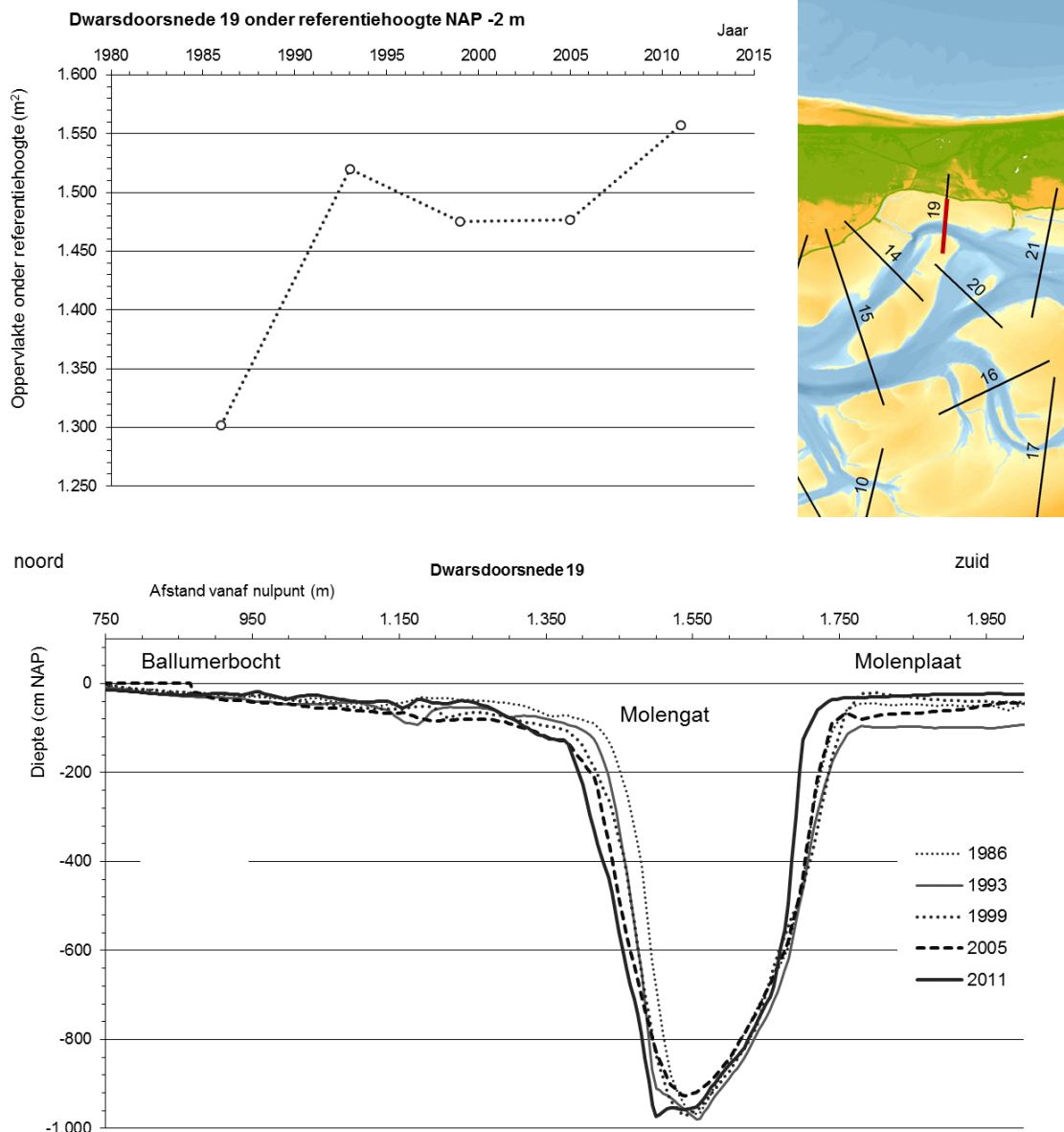


Figuur 4-6 Doorstroomoppervlakte onder NAP -1,0 m (bovenste grafiek) van dwarsdoorsnede 17 (onderste grafiek) bij het Dantziggat. (zie inzet voor locatie)

Hieronder zijn drie voorbeelden opgenomen van dwarsdoorsneden van geulen, waarvan de doorstroomoppervlakten zijn bepaald. De omvang van deze geulen en de ontwikkelingen ervan verschillen.

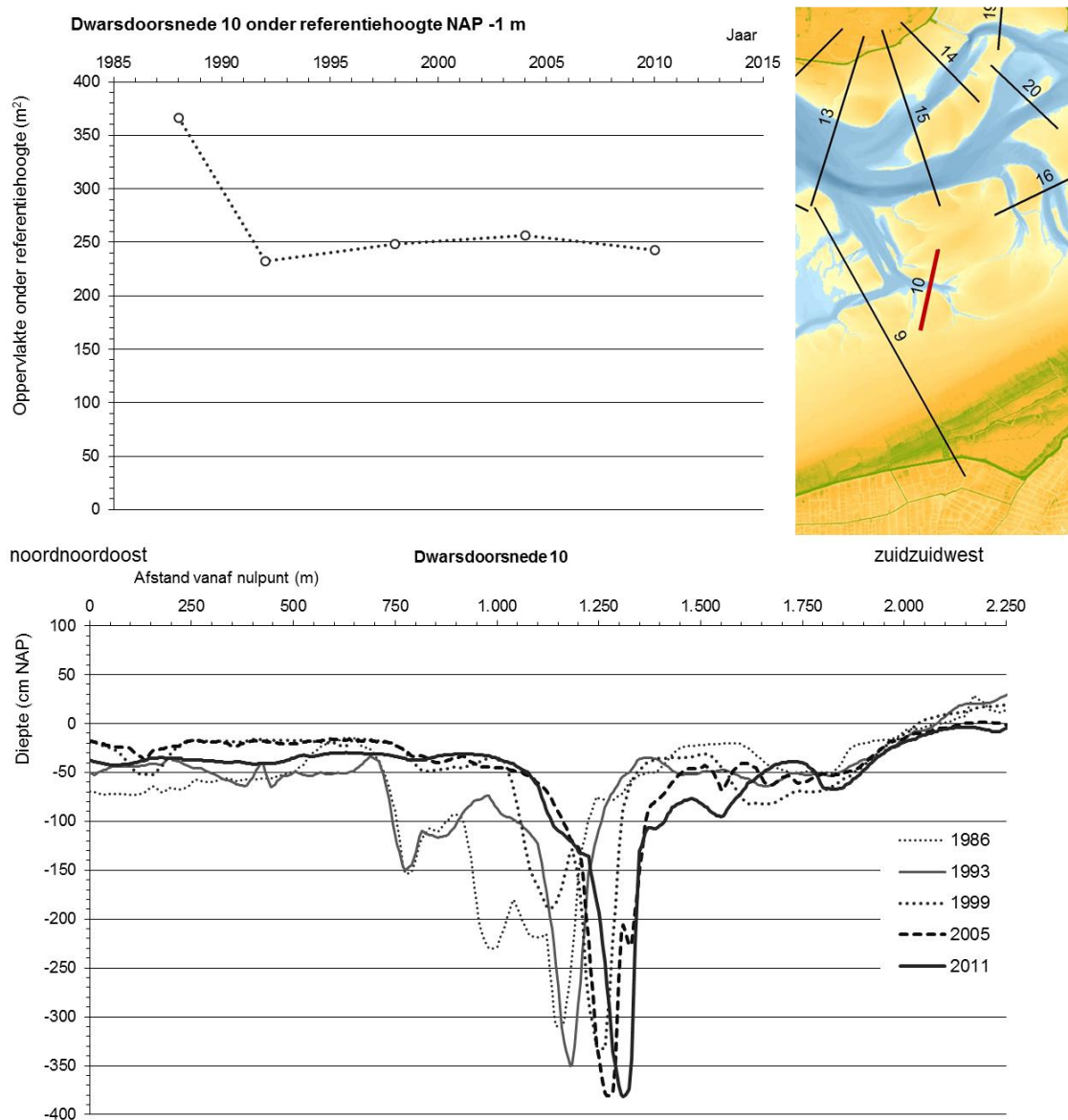
Figuur 4-7 toont een dwarsdoorsnede door het Molengat ten zuiden van Ameland bij de Ballumerbocht. Het onderste paneel laat een verplaatsing zien van de noordelijke oever van het Molengat naar het noorden. De verplaatsing van de zuidoever is minder groot. De oppervlakte van de dwarsdoorsnede is voor het bovenste paneel berekend onder een waterdiepte van NAP - 2 m. Het gebruik van een hoger niveau, zoals NAP -1 m, zou betekenen dat in de berekening ook het doorstroomoppervlakte boven de Molenplaat zou zijn beschouwd, die in 1993 en 2005 nog beduidend lager was dan tegenwoordig. De

doorstroomoppervlakte is duidelijk toegenomen ten opzichte van de situatie in 1986. De relatieve toename bedraagt zo'n 20%. Deze toename van de omvang van het Molengat is mogelijk gekoppeld aan de veranderingen die hebben plaatsgevonden bij het Kikkertgat. Het Kikkertgat is vrijwel geheel verdwenen en waarschijnlijk heeft het Molengat een deel van het debiet van deze geul overgenomen,



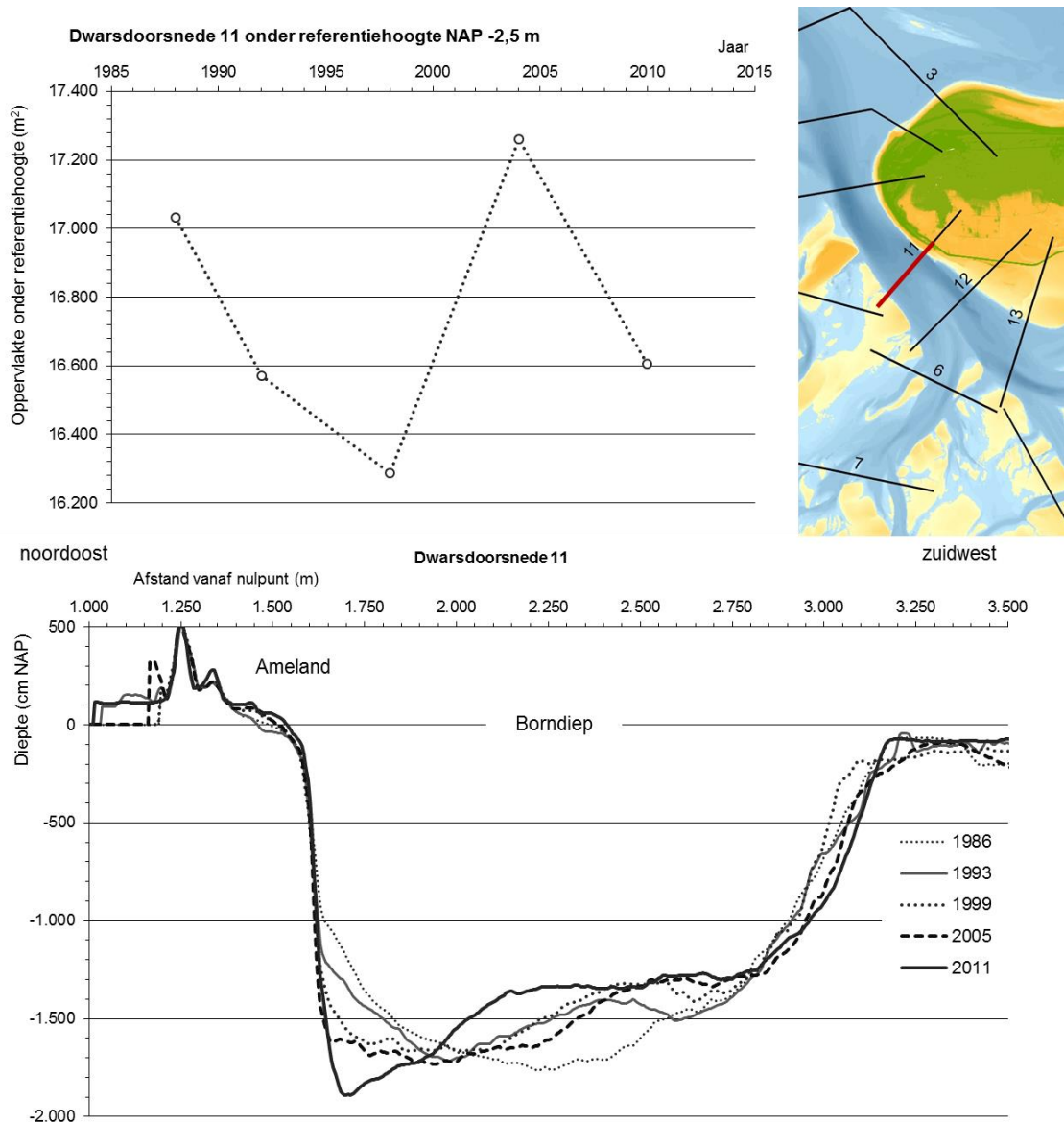
Figuur 4-7 Doorstroomoppervlakte onder NAP -2 m (bovenste grafiek) van dwarsdoorsnede 19 (onderste grafiek) van het Molengat bij de Ballumerbocht. (zie inzet voor locatie)

Figuur 4-8 toont het doorstroomoppervlakte van een kleine geul op het Friesche wad. Dit geultje is in de loop van de tijd op deze plek smaller en dieper geworden. Daarbij is de vorm van de dwarsdoorsnede gewijzigd, van breder met enkele diepere delen naar smaller en dieper ingesneden. De doorstroomoppervlakte is bepaald onder NAP -1,0 m. Na een afname van 1986 naar 1993 is het doorstroomoppervlakte van deze geul zeer stabiel.



Figuur 4-8 Doorstroomoppervlakte onder NAP -1,5 m (bovenste grafiek) van dwarsdoorsnede 10 (onderste grafiek) in het Friesche wad (zie inzet voor locatie).

De dwarsdoorsnede van het Borndiep is weergegeven in Figuur 4-9. De vorm van de dwarsdoorsnede is in de loop van de tijd duidelijk veranderd, van een geul met het diepste deel in het midden, naar een geul met het diepste deel bij de kust van Ameland. De verdieping bij de kust van de Ameland lijkt een doorgaand proces te zijn. Op basis van de (verschil-)kaarten van de bodemligging is het waarschijnlijk dat de oorzaak van deze verdieping ligt in veranderingen in de ligging van de eb- en vloedcharen binnen de geul. Voor de beheerder van de waterkering is deze verdieping een aandachtspunt, omdat deze de stabiliteit van de geulwand kan beïnvloeden. De geulwand verplaatst zich niet, waarschijnlijk vanwege de aanwezigheid van bestortingen. De doorstroomoppervlakte van de geul verandert, maar vertoont geen trendmatige ontwikkeling. In absolute zin zijn de verschillen in de doorstroomoppervlakte groot tussen de verschillende jaren, maar als de verschillen worden afgezet tegen het gemiddelde totale doorstroomoppervlakte, dan bedragen deze maximaal 3%.



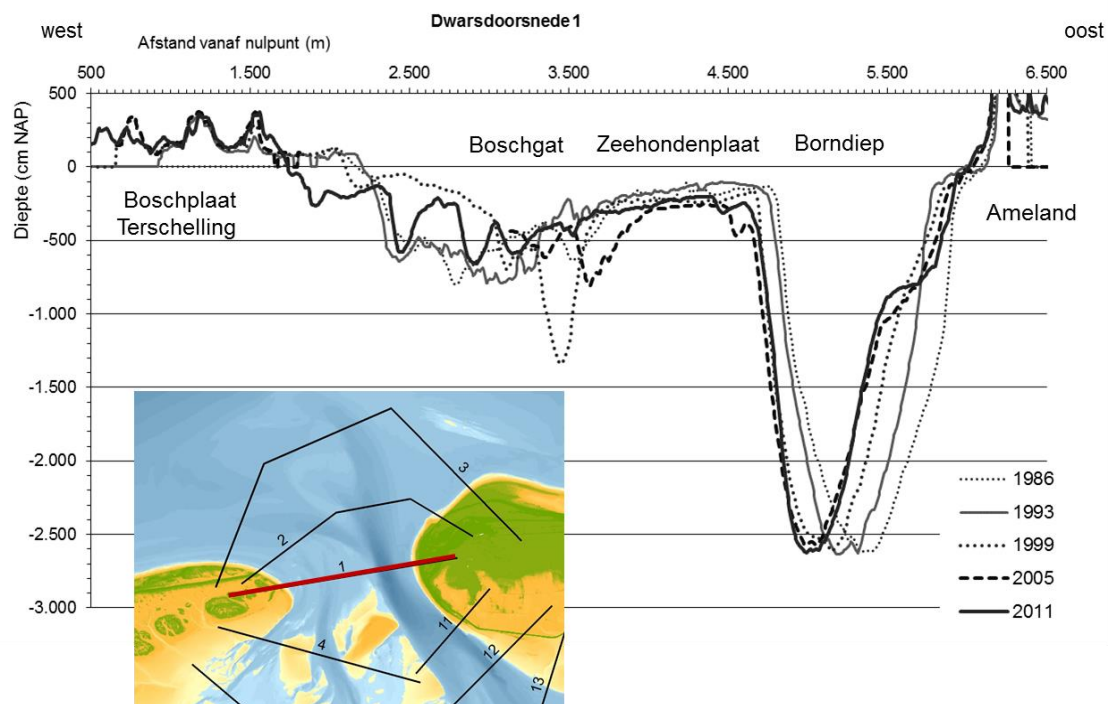
Figuur 4-9 Doorstroomoppervlakte onder NAP -2,5 m (bovenste grafiek) van dwarsdoorsnede 11 (onderste grafiek) in het Borndiep (zie inzet voor locatie).

4.4 Kenmerkende geulvormen en -dynamiek

4.4.1 Het zeegat

De situatie in het zeegat is weergegeven in Figuur 4-10. In deze figuur is zichtbaar dat sprake is van twee geulen in het Zeegat: het Boschgat aan de westzijde en het Borndiep aan de oostzijde, met daartussen de Zeehondenplaat. In het waddengebied van Nederland is deze situatie met twee geulen per zeegat meestal aanwezig, alleen het Marsdiep en het Schild hebben een zeegat dat bestaat uit één geul. Over het algemeen komen er dus twee min of meer gescheiden geulen voor tussen twee eilanden, die binnengaats uit elkaar worden gehouden door de daar aanwezige hogere platen (zie paragraaf 5.2.1). Daarbij zijn de

westelijke geulen in het zeegat vaak klein, omdat deze zijn verbonden met een kleiner deel van het kombergingsgebied. De beperkte omvang van dit deel van het kombergingsgebied heeft te maken met de ligging van de wantijen, die niet midden onder de Waddeneilanden liggen, maar een stuk naar het oosten (Van Straaten, 1964; Vroom, 2011; Wang et al. 2013.). Overigens is er in de Nederlandse Waddenzee ook een uitzondering op deze regel in het kombergingsgebied van het Eierlandse Gat, dat een groot Robbegat aan de zuidwestzijde heeft en een kleiner Engelsmangat aan de oostzijde.

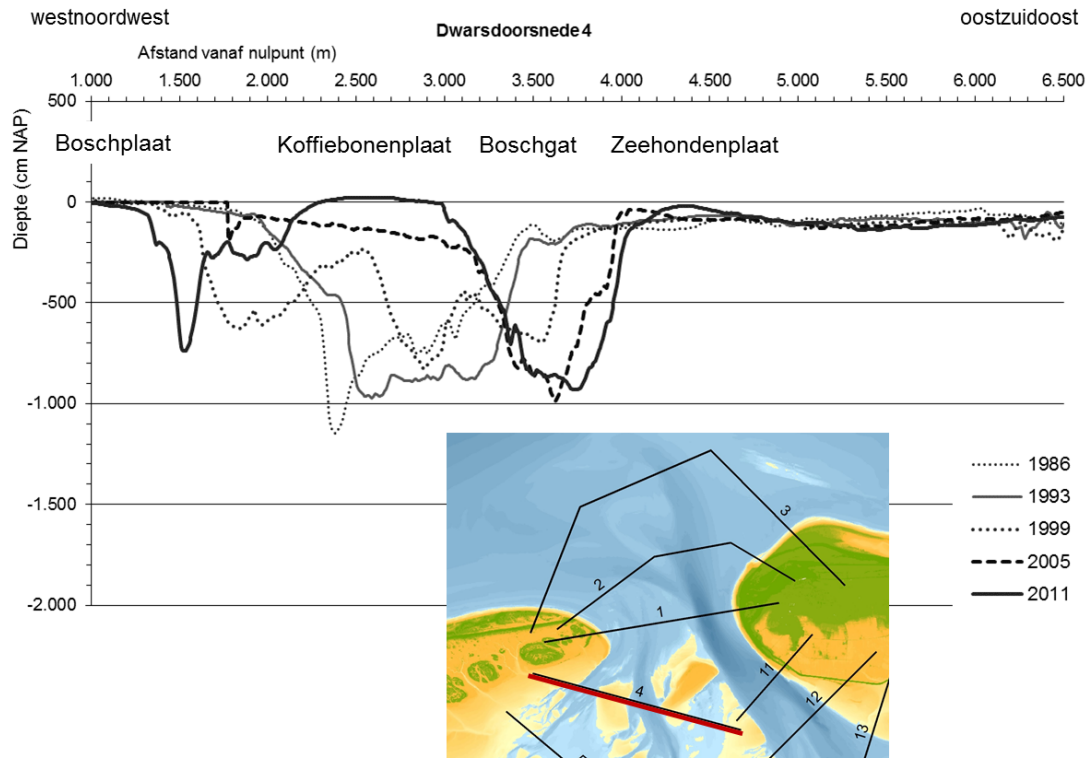


Figuur 4-10 Dwarsdoorsnede 1 door het zeegat.

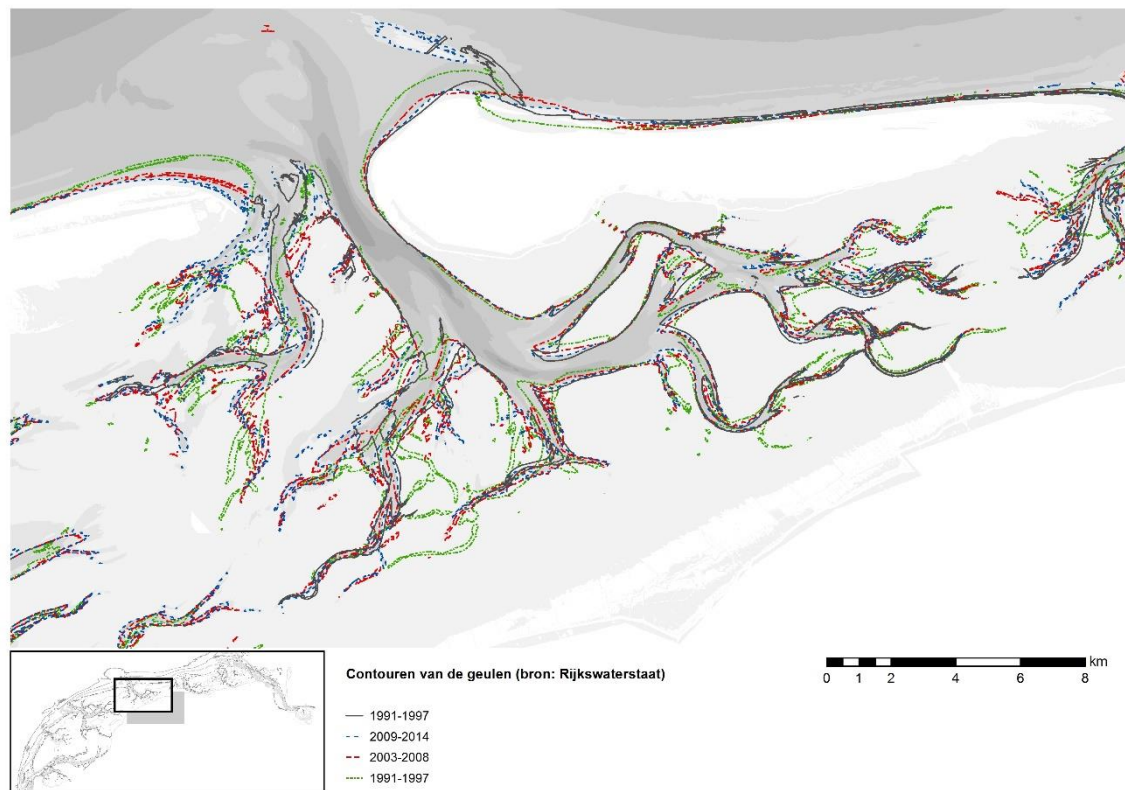
In dwarsdoorsnede 1 in Figuur 4-10 zijn verschillende ontwikkelingen herkenbaar. Het Borndiep is in de beschouwde periode tot 2005 naar het westen verplaatst. Bij het Boschgat zijn de ontwikkelingen veel minder duidelijk, met één diepere geul in 1999, één bredere geul in 1993 en meerdere geulen in 2011. In de dwarsdoorsnede is ook zichtbaar dat de oostpunt van Terschelling honderden meters naar het westen is opgeschoven. De veranderlijkheid van de geulen van de geulen in het zeegat hangt samen met verschillende zandtransportprocessen en de interactie tussen de verschillende onderdelen van het morfologische systeem op de buitendelta en in het zeegat. Naast de zandtransporten door het getij spelen ook de transporten onder invloed van golven en golf-gedreven stromingen daarbij een belangrijke rol (Elias, in concept). Voor het kombergingsgebied Borndiep blijken de geulen aan de westzijde van het zeegat veel veranderlijker dan de geul aan de oostzijde. Om dit illustreren is Figuur 4-11 opgenomen, die de geulen en platen ten zuiden van Terschelling toont. Deze dwarsdoorsnede kan worden vergeleken met dwarsdoorsnede 11 in Figuur 4-9 en demonstreert de grote variatie in de ligging van de geulen aan de westzijde.

Ook in het oostelijke geulsysteem vinden verplaatsingen plaats van de geulen, maar deze (grotere) geulen zijn stabiel van positie (zie ook paragraaf 4.6). De verschillende in de ligging van de geulcontouren in Figuur 4-12 laten deze verschillen zien. De oorzaak of oorzaken van deze waargenomen verschillen in dynamiek zijn niet duidelijk. De oorzaken

kunnen worden gezocht in de dynamiek van de geulen en ondieptes op de buitendelta en van de eilandstaart. Ook de interactie tussen het kombergingsgebied en de buitendelta kan een rol spelen. Vooral nog wordt dit als een kennisleemte beschouwd.



Figuur 4-11 Dwarsdoorsnede 4 aan de westzijde van het zeegat (zie inzet voor locatie).



Figuur 4-12 Contouren van de geulen in het Borndiep in 1999, 2005 en 2011.

4.4.2 Geulbochten of meanders

In alle geulen in het Borndiep zitten bochten, waarbij de omvang van de bocht (de bochtstraal) groter is bij grote geulen en kleiner bij kleine geulen. Het verplaatsen van de buitenbochten verder naar buiten vormt één van de kenmerkende onderdelen van de morfodynamiek. In een kaart waarin de sedimentatie en erosie is weergegeven op de morfologie, zijn een groot aantal van de uitbochtende geulen gemarkeerd (Figuur 4-13). De verplaatsing van de geulbochten is zichtbaar als een buitenbocht met erosie (blauw) en een binnenbocht met sedimentatie (rood). Het uitbochten kan niet oneindig lang doorgaan in situatie waar niet wordt gebaggerd (van Til, 2017).

Andere patronen in de kaart in Figuur 4-13 hangen samen met:

2. De ontwikkeling van eb- en vloedscharen (zie de paragraaf hierna);
3. Grootschalige vormveranderingen in de geul.
4. Het ontstaan van geheel nieuwe geulen.



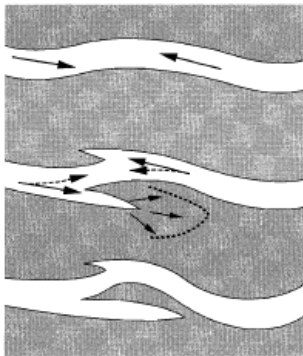
Figuur 4-13 Kaart met de erosie (blauw) en sedimentatie (rood), waarbij uitbochtende geulen zijn gemarkeerd met een pijl bij een gebogen stippellijn (1). De andere cijfers geven andere ontwikkelingen aan.

4.4.3 Eb- en vloedscharen

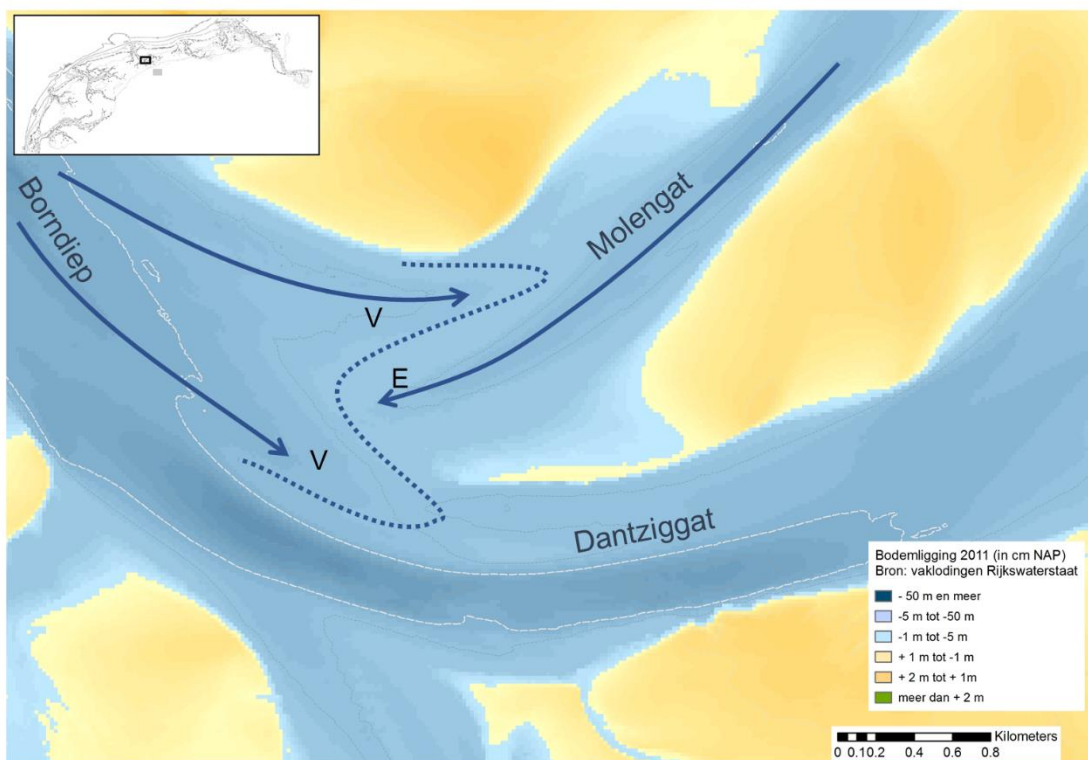
Eb- en vloedscharen zijn zeer kenmerkende geulpatronen in getijdensystemen, die in geulen van grote tot kleine omvang optreden. De scharen zijn aftakkingen van de geul, die eindigen in een verondieping. Die verondieping kan een plaat zijn, maar in sommige gevallen is het een drempel onder water. In veel gevallen vindt de aftakking plaats vanuit een bocht (ook wel meander) van de geul. Of sprake is van een eb- dan wel een vloedschaar, wordt bepaald door de oriëntatie: scharen die vanaf het zeegat naar binnen in het kombergingsgebied zijn gericht zijn vloedscharen. Ebscharen hebben de omgekeerde richting, deze zijn vanuit het kombergingsgebied naar het zeegat gericht. De naam eb- dan wel vloedschaar brengt de dominante stroomrichting (en het sedimenttransport) tot uitdrukking. In het Borndiep (en algemeen in de Waddenzee) zijn vloedscharen beduidend algemener dan ebscharen.

De vorming van eb- en vloedscharen is gerelateerd aan het verschil in stroming en sedimenttransport bij en vloed in een geul, waarbij de ebstroom een iets ander pad uitschuurt in het losse sediment dan de vloedstroom (Van Veen, 1950). De exacte aard van de waterbeweging en het sedimenttransport bij de vorming van eb- en vloedscharen is onderwerp van onderzoek (Van Til, 2017). Een mooi voorbeeld is de eb- en vloedschaar die aanwezig zijn vlak voor waar het Molengat overgaat in het Borndiep (Figuur 4-15).

Vanwege de bochten in de hoofdgeul monden sommige vloedscharen weer uit in de centrale geul. Zo'n ebschaar kan verder ontwikkelen en gaandeweg de rol van de hoofdgeul overnemen. Voorbeelden van afsnijdingen van geulen vanuit eb- of vloedscharen zijn zeldzaam.



Figuur 4-14 Vorming van eb en vloedscharen (uit Oost, 1994, naar van Straaten, 1964).



Figuur 4-15 Vloedscharen (V) en ebschaar (E) bij de splitsing van het Borndiep naar het Molengat en het Dantziggat.

Voor de beheerders van de vaargeulen zijn eb- en vloedscharen van belang, omdat de aanwezigheid en de ontwikkeling ervan de bevaarbaarheid van geul en de noodzaak tot baggeren kan beïnvloeden. Daar waar een schaar zich ontwikkelt in een geul treedt ook een drempel op. De verondieping door de drempel kan betekenen dat moet worden gebaggerd. Deze situatie doet zich tegenwoordig voor op tenminste twee drempels in de vaarweg Holwerd-Ameland.

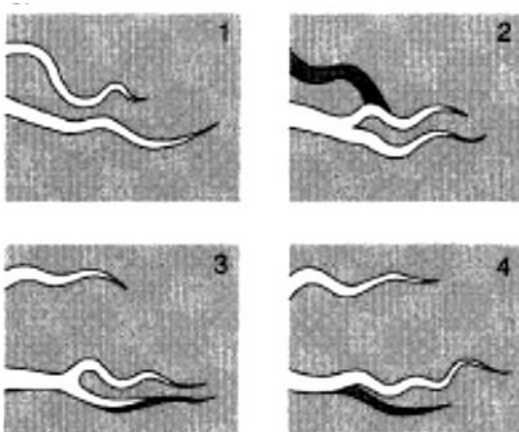
Een doorgaande ontwikkeling van een eb-en vloedschaar kan ook betekenen dat de ligging van de geul moet worden aangepast en moet worden verlengd. Omgekeerd kan het ontstaan van een afsnijding leiden tot een verkorting van de vaarweg. In de vaarweg doet de situatie zich voor dat de potentiële afsnijding van de geul via de vloedschaar zich niet verder ontwikkelt. Mogelijk bevordert het baggeren van de vaargeul de stroming door deze geul,

zodat de afsnijding niet tot ontwikkeling kan komen. Op deze plek wordt het baggeren van de afsnijding overwogen.

Op minimaal twee plekken in het Borndiep liggen geulen die deels parallel aan elkaar lopen en die van elkaar worden gescheiden door een rug. Vanaf het zeegat tot aan het Molengat is er sprake van een elkaar mijddende eb- en vloedsehaar. Een andere dubbele geul bevindt zich westelijk van de Piet Scheve Plaat.

4.4.4 Concurrerende geulen

Een van de processen waardoor veranderingen in geulpatronen optreden is de onderlinge concurrentie van geulen. Daar waar een geul in de nabijheid van een andere geul ligt, kan de ene geul de rol van de andere geul overnemen. Door een combinatie van meanderen en verlegging van geulen kan de ene geul contact maakt met de andere en daarmee een efficiëntere weg vormen voor de aan- en afvoer van water. Het gevolg kan of zijn dat de efficiëntere geul een deel van de zijtakken van de andere geul overneemt, of dat de efficiëntere geul nieuwe zijtakken vormt terwijl het andere deelsysteem (deels) verlaten wordt door getijdestroming en opvult (Figuur 4-16).



Figuur 4-16 Overname van de ene geul door de andere ten gevolge van langzame verschuiving. Voorbeeld Pinkegat gebied; wit = actieve geul; zwart = abandonment, grijs is intergetijdenplaat (uit Oost, 1995).

Voor de beheerders kan de onderlinge concurrentie van geulen positieve en negatieve gevolgen hebben. Daar waar door het overnemen van de rol van een (vaar)geul door een andere geul, de natuurlijke omvang van de (vaar)geul afneemt, betekent dit voor de beheerder van de vaargeul dat deze maatregelen dient te nemen. De maatregel kan bestaan uit het verleggen van de vaargeul of uit het intensiveren van het baggeren. Een van de onderliggende oorzaken van de toename van het baggerbezwaar in de vaarweg Holwerd-Ameland is de concurrentie van geulen (Kater et al., 2008). Het kan ook zo zijn dat de beheerder baat heeft bij het ontstaan of toenemen van de omvang van een geul, zoals dat bijvoorbeeld het geval was bij de gebaggerde doorsteken 'Suezkanaal' en 'Panamakanaal' (zie historische case 2 in hoofdstuk 3).

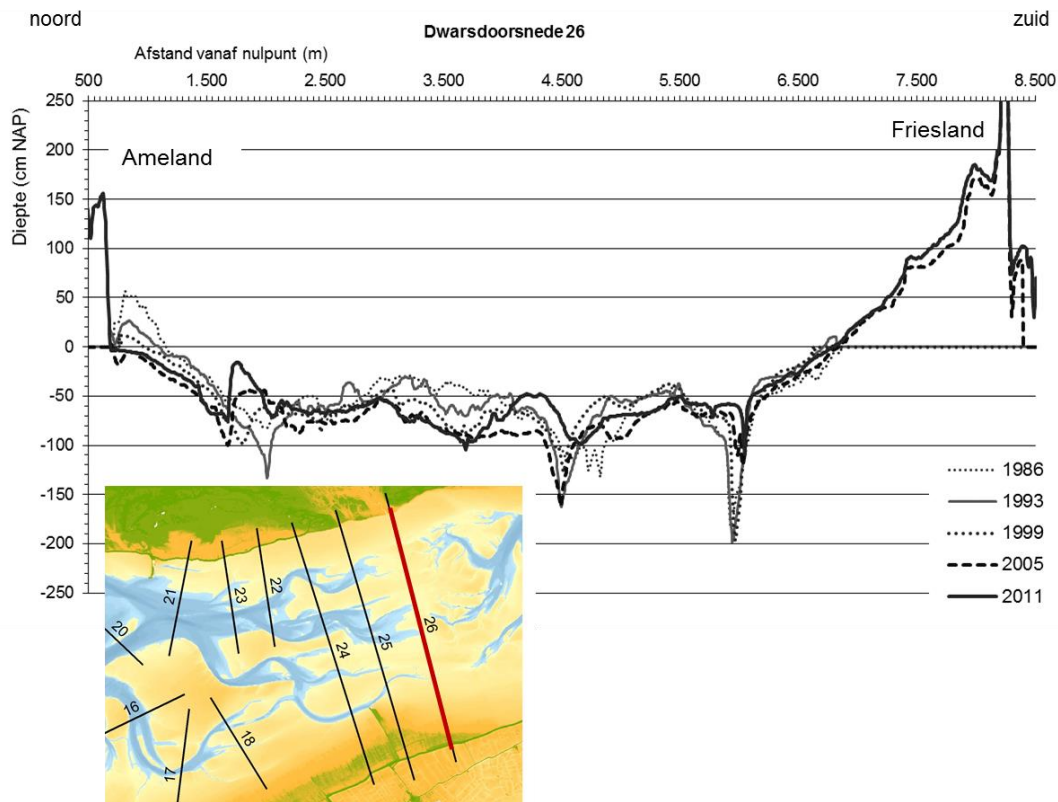
4.4.5 Het opschuiven van de geulen bij het wantij

De omvang van de geulen neemt steeds verder af, vanaf het zeegat tot aan de wantijen en het vasteland. Bij het wantij van Ameland eindigen alle geulen in de wadplaten, geen van de geulen steekt het wantij over. Bij het wantij onder Terschelling lopen de geulinsnijdingen niet

door over het wantij, maar ligt er onder de Boschplaat wel een sublitoraal gebied op het wantij. De positie van het wantij is niet statisch, de wantijen zijn in hun geheel naar het oosten verplaatst als onderdeel van grootschalige veranderingen in de kombergingsgebieden (van Geer, 2007; Vroom, 2011; Wang et al., 2013). Met het verplaatsen van de wantijen schuiven ook de uiteinden van de getijdegeulen mee. Het wantij van Ameland is bijvoorbeeld in de periode 1832-1987 over een afstand van 4,8 km naar het oosten opgeschoven (Oost, 1995). De verschuiving ging gepaard met het terugtrekken van de geulen van het Pinkegat in oostwaartse richting en een uitbreiding van de geulen van het Borndiep in dezelfde richting. Dergelijke verleggingen gaan veelal gepaard met grote hoeveelheden sedimentverplaatsing. Een groot deel van de geobserveerde erosie in het Borndiep van $29 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ over de periode 1926-1950 (De Boer et al., 1991) en de sedimentatie in het Pinkegat over de periode 1927-1949 van $25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (Oost, 1995) kunnen worden verklaard door de oostwaartse verschuiving van het wantij van bijna 1,5 km in dezelfde periode. Naast de grootschalige en langjarige verschuivingen naar het oosten, kan ook sprake zijn van het 'wapperen' van de ligging van het wantij, waarbij het noordelijke deel een andere ontwikkeling doormaakt dan het zuidelijke deel. Dergelijke ontwikkelingen zijn mede als verklaring gegeven voor de afname van de autonome omvang van de vaargeul Holwerd-Ameland (Kater et al., 2008; Cleveringa, 2012; Villars et al., 2016; Herman, 2016).

De veranderingen van de ligging van het wantij en de daarbij behorende geulen kunnen gevolgen hebben voor het beheer van kabels en leidingen en hebben gevolgen voor het beheer van de vaarweg Ameland-Holwerd. Ook kunnen verplaatsingen van het wantij met de bijbehorende geulen aanleiding zijn voor het aanpassen van de gemarkeerde routes over de wantijen.

Kabels en leidingen worden bij voorkeur onder het wantij aangelegd, omdat daar geen of weinig geulen aanwezig zijn (Figuur 4-17). De aanwezigheid van geulen betekent namelijk niet alleen dat de kabels en leidingen dieper begraven dienen te worden, maar ook dat rekening dient te worden gehouden met de verplaatsing van de geulen bij het bepalen van de begraafdiepte. Met het opschuiven van het wantij met de bijbehorende geulen, kan alsnog sprake zijn van het afnemen van de begraafdiepte, of zelfs het blootspoelen van de kabels en leidingen.

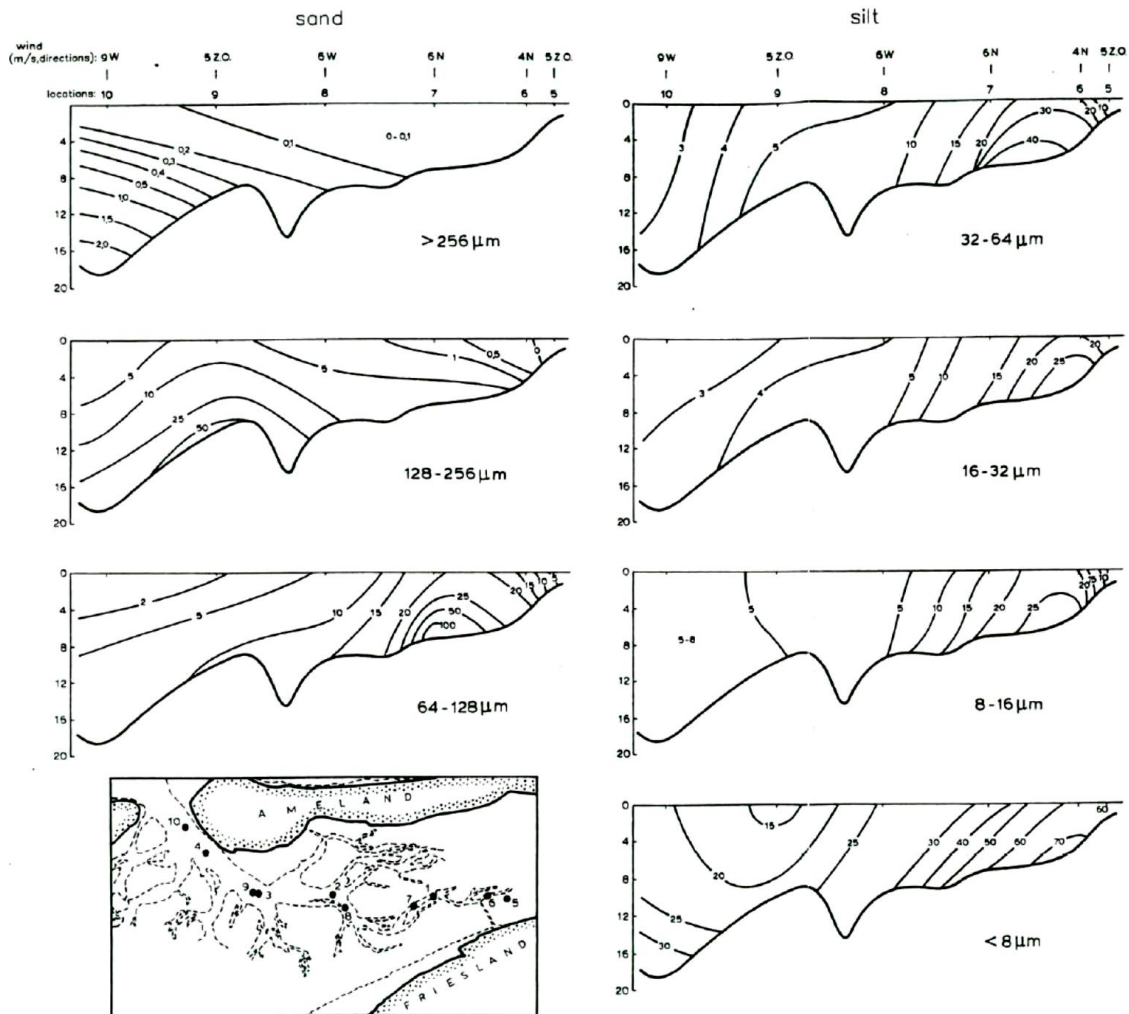


Figuur 4-17 Dwarsdoorsnede 26 over het wantij tussen de kombergingsgebieden Borndiep en Pinkegat (zie inzet voor locatie).

4.5 Korrelgroottes in geulen

De korrelgrootte van het sediment op de bodem van de geul wordt bepaald door de stromingscondities ter plaatse, in combinatie met de eigenschappen van het sediment in de Waddenzee. Lokaal kan de opbouw van de ondergrond zorgen voor afwijkende korrelgroottes, daar waar geulen insnijden in oudere geologische lagen. Dicht bij het zeegat en in sommige delen van de hoofdgeul zijn de stroomsnelheden zo hoog dat ook het medium tot zeer grove zand uitgewassen wordt en alleen schelpen en stenen blijven liggen. Zo vormen zich ter plekke zogeheten channel-lags. Het zijn die voorkomens van schelpen die bevestigd worden door schelpenwinners.

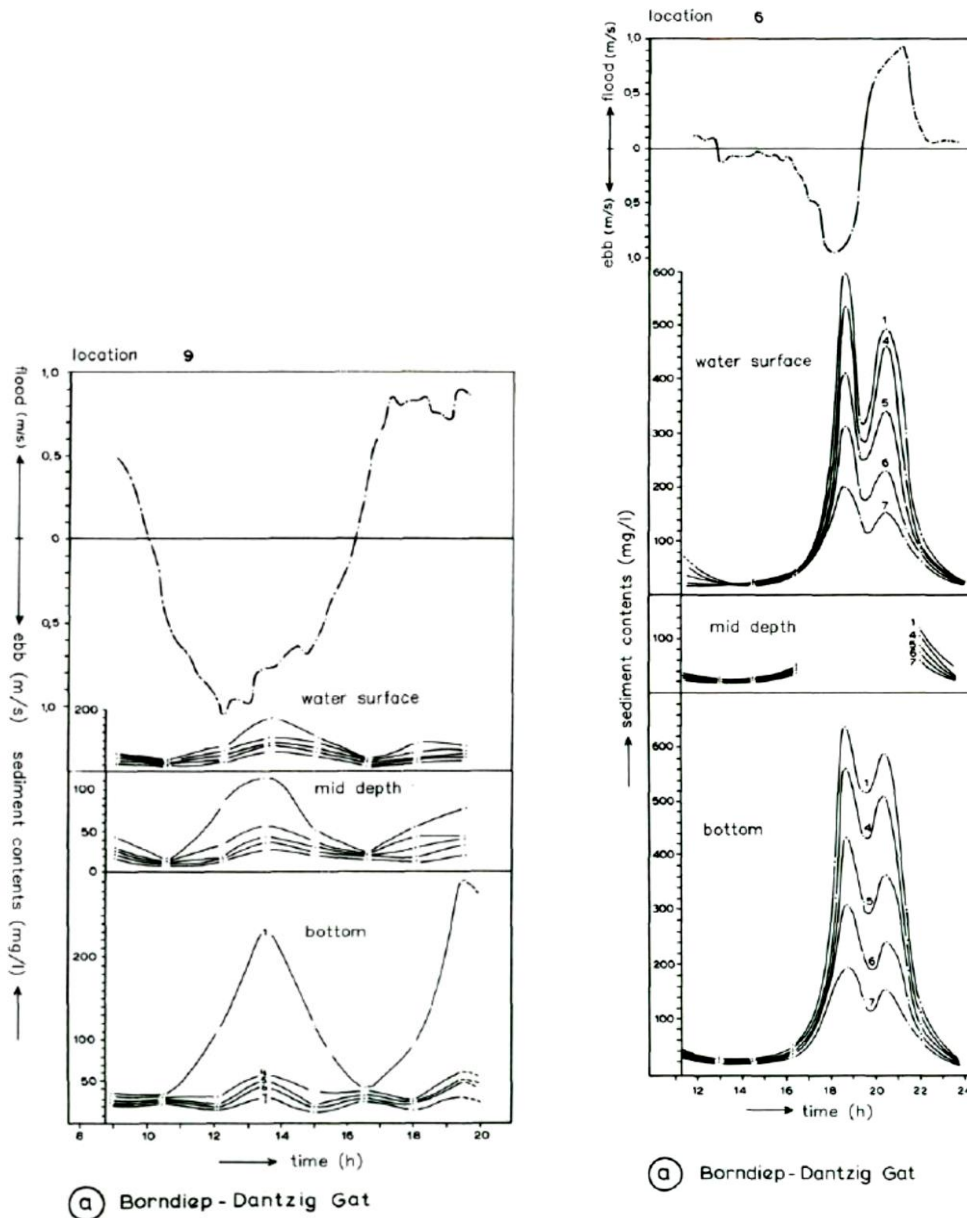
In de geulen is er bij rustig weer sprake van een afname van de korrelgrootte in het zeewater vanaf het zeegat naar binnen toe (Postma, 1961), zoals zichtbaar in Figuur 4-18. Bovendien kent iedere korrelgroottefractie een eigen maximum. Het grovere zand is vooral geconcentreerd dicht bij het zeegat, waarbij de mediane korrelgrootte landinwaarts afneemt. De aanwezigheid van grovere korrels op de bodem van de grotere geulen betekent dat daar megaribbels kunnen ontstaan. De korrelgrootteverdeling van de grove korrels (van channel-lags tot en met 250 micron) duidelijk wordt bepaald door de stroomcondities in de geul.



Figuur 4-18 Verdeling van de sedimentconcentratie in de waterkolom voor diverse fracties (Postma, 1961).

De fijnere korrels zijn met een duidelijke “sprong” gescheiden van het grove zand en ligt zo in haar geheel veel dicht bij het land (zie het verschil in de distributie van de korrel $> 256 \mu\text{m}$ en $64-128 \mu\text{m}$ in Figuur 4-18). Daarbinnen is dan weer een duidelijke afname van de gemiddelde korrelgrootte waarneembaar in de geul richting zeegat. Dit geldt ook voor het kleigehalte ($< 2 \mu\text{m}$) en de mediane korrelgrootte aan het sedimentoppervlak (Eysink, 1993). De waarnemingen (Postma; 1961) wijzen erop dat de transportprocessen in de geulen als een sorteermachine werken voor de korrelgroottefracties. De hoeveelheid gesuspendeerd materiaal is niet 1 op 1 gerelateerd aan de lokale stroomsnelheden (Eysink, 1993). Naast getijdestroming zijn ook golven en wind van invloed op de hoeveelheid gesuspendeerd materiaal in de geulen (Postma, 1961). Daarnaast wordt gesuspendeerd materiaal deels ook van de platen teruggevoerd de geulen in. De grafieken in Figuur 4-19 met daarin de

concentraties tijdens eb- en vloed op een locatie in een grote getijdegeul en in een kleine getijdegeul, in combinatie met de stroomsnelheden laten zien dat in de grote geul sprake is van twee pieken in de concentraties, die samenvallen met de pieken in de stroomsnelheid. In de kleine geul is sprake van één periode met hoge waarden, met daarin twee toppen. Die twee toppen vallen samen met de hoge stroomsnelheden. De verschillen in de concentraties gedurende het getij zijn groot, zeker in de kleine geulen.



Figuur 4-19 Sedimentconcentraties gedurende het getij op de locaties 9 (grote geul Borndiep) en 6 (kleine geul ten oosten van Veerдам, zie de locaties in Figuur 4-18) voor diverse fracties (uit Postma, 1961). De getallen bij de lijnen tonen de fracties: 1: totaal gesuspendeerd materiaal; 4: Fractie < 63 μm ; 5: Fractie < 32 μm ; 6: Fractie < 16 μm ; 7: Fractie < 8 μm

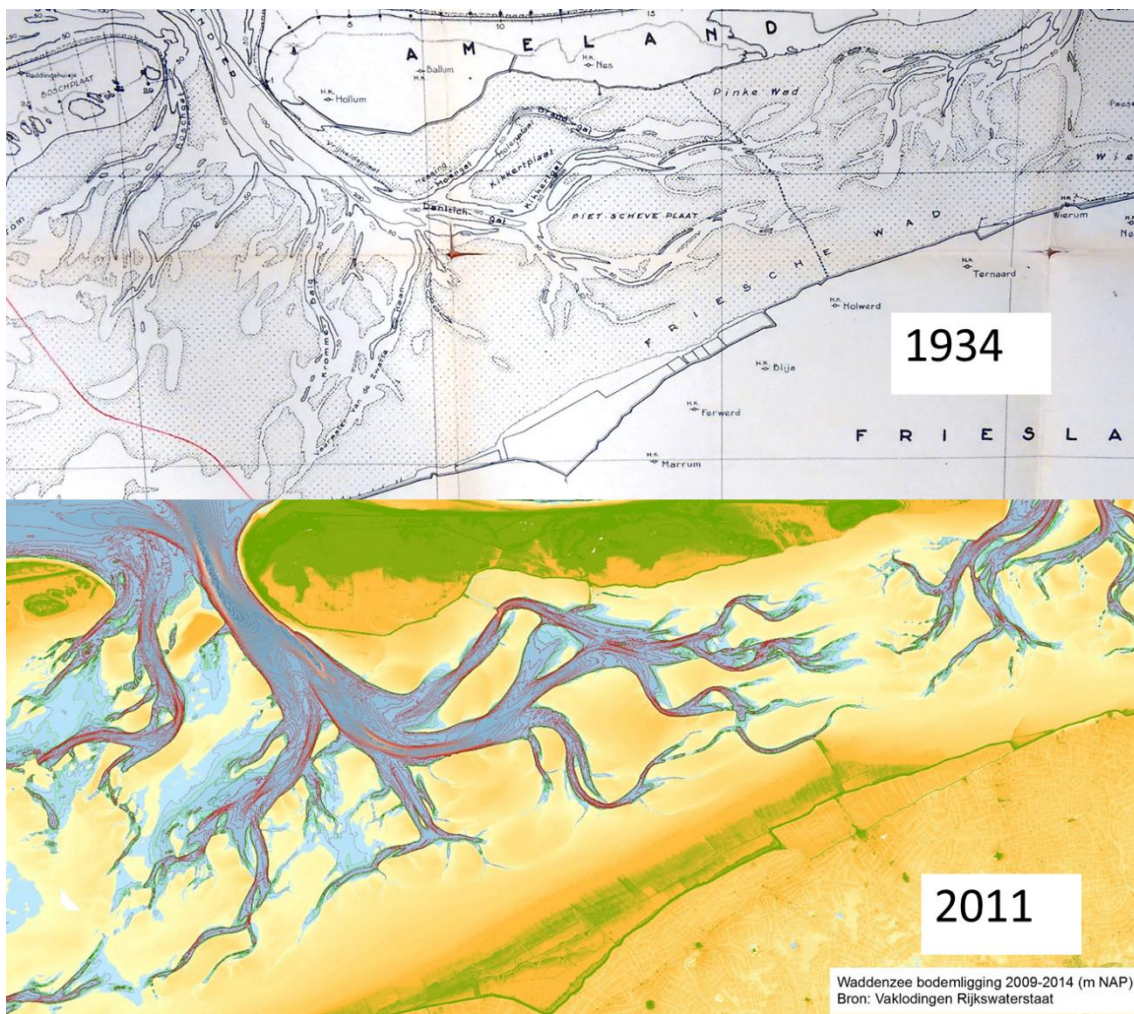
Rond de Waddenzee worden regelmatig vragen gesteld en opmerkingen geplaatst over enerzijds verzanding en anderzijds verslibbing. Daarbij worden soms directe relaties gelegd met menselijke activiteiten die van invloed zijn op de sedimentsamenstelling van het wad. De

relatie tussen bodemberoerende (kokkel-) visserij en het vergroven van het sediment is onderzocht in het kader van de EVA-onderzoeken (Zwarts, 2004). Over de rol van zandsuppleties en het 'verzanden' van de Waddenzee zijn ook regelmatig vragen gesteld.

Op basis van waarnemingen is het niet mogelijk om definitieve uitspraken te doen over eventuele veranderingen in de sedimentsamenstelling (Zwarts, 2004). De processen die samen de 'sorteermachine' vormen, die zorgt voor de verdeling van het sediment in de geulen, veranderen niet door menselijke ingrepen. Het gesuppleerde sediment wordt aan dezelfde sorteringsmechanismen onderworpen worden als de rest van het sediment. Wel kunnen veranderingen optreden in het aanbod van zand en slib en die zouden een effect kunnen hebben op de korrelgrootteverdeling in de Waddenzee. Voor zandsuppletie geldt dat sprake is van grote volumes zand, die in omvang echter beperkt zijn in vergelijking met het volume zand dat aanwezig en in beweging is. Het is daarom slecht voorstelbaar dat het suppleren van zand op strand en vooroever nabij die locatie tot een verandering van gemiddelde korrelgrootte leidt (Geleynse, concept). Ook is het zand dat op de kust van Ameland wordt gesuppleerd fijn, omdat het zand in de gebruikte zandwingebieden fijn is (Geleynse, concept). In de Waddenzee zijn nog veel grotere volumes zand en slib in beweging dan op strand en vooroever. Omdat op het strand en de vooroever al geen veranderingen optreden door de zandsuppleties, is het niet voorstelbaar dat zandsuppleties op Ameland leiden tot veranderingen in de sedimentsamenstelling in de Waddenzee.

4.6 Veranderingen in de ligging van de geulen in relatie tot gebruik en beheer

Op de grote schaal is het geulpatroon in het kombergingsgebied Borndiep relatief stabiel: de ligging van de geulen verandert, maar het hoofdpatroon in het geulstelsel is lang aanwezig. Een blik op de kaarten van 1934 en 2011, die zijn getoond in Figuur 4-20 laat de gelijkenis in het patroon zien. Ondanks de gelijkenis zijn er morfologische veranderingen in de ligging van de geulen die voor de beheerder aanleiding zijn geweest tot het nemen van maatregelen. De twee veranderingen die hier nader worden beschouwd zijn de migratie van het Borndiep bij de westkust van Ameland en de verschillende veranderingen die van invloed zijn op de vaarweg Ameland-Holwerd.



Figuur 4-20 Kaarten van ligging van de geulen in het kombergingsgebied uit 1934 en 2011.

4.6.1 Het Borndiep en de westkust van Ameland

De verplaatsing van het Borndiep en de erosie van de westkust van Ameland is het onderwerp van verschillende studierapporten. Het Borndiep is in de afgelopen twee eeuwen naar het oosten geschoven. Dit veroorzaakte erosie, waarbij de geul direct onder de eilandkop is komen te liggen (Figuur 3-3 en Figuur 3-4). De oostelijke migratie van het Borndiep werd succesvol gestopt door de aanleg van dammen en een kustparallele stenen verdediging aangelegd in 1947, die versterkt werd tussen 1972 en 1974. Voor de westkust van Ameland is gezocht naar de onderliggende oorzaken voor de structurele erosie in het gebied (Cleveringa et al, 2005). Dit heeft geleid tot meer inzicht in de onderliggende oorzaken voor de ontwikkelingen en de realisering dat het aanpakken van deze oorzaken niet haalbaar is. Op dit moment is de buitendelta van het zeegat van Ameland onderwerp van studie in het SeaWad project en het Kustgenese 2 programma en naar verwachting zullen deze studies nieuwe inzichten opleveren rond de toepassing van zandsuppleties op de buitendelta voor de kustbeheerder en de beleidsmakers.

Ter illustratie van de wijze waarop de kustlijn zorg is gerelateerd aan de morfologische ontwikkeling van de geul is een kustraijen getoond bij west Ameland uit Elias & Bruens (2013). Figuur 4-21 laat vijf dwarsdoorsneden zien van een kustraijen bij zuidwest Ameland, met steeds 10 jaar er tussen. De geul Borndiep heeft in de raijen geen consequente

verplaatsing naar de kust laten zien. In 1970-1990 lag de geul dicht onder kust, terwijl na ontwikkeling is hier in de periode 1970-2010 steeds dichterbij de kust van Ameland komen te liggen. In 2000 en 2010 ligt de geul bijna 500 meter naar het westen. Deze verrassende ontwikkeling heeft plaatsgevonden omdat na de aanlanding van de zandhaak vanaf de buitendelta op de kust van Ameland begin jaren '90 heel veel zand langs de kust naar het zuiden is getransporteerd (Cleveringa et al., 2005). Deze bult zand heeft de geul als het ware uit de kust 'gedrukt'.

Figuur 4-22 toont de bijbehorende grafiek met de ligging van kustlijn (op de rechteras) en de intensiteit van de zandsuppleties (op de linker as).

Figuur 4-22 toont de ontwikkelingen van de kust in de terminologie van de kustlijnzorg (MKL, TKL en BKL) in de tijd.

BKL: Basiskustlijn. Dit is de ligging van de kustlijn 1990, bij de start van het beleid van dynamische handhaven van de kust. Vandaar dat de BKL in deze grafiek altijd op dezelfde plek ligt⁷. Het doel van kustbeheer is om de kustlijn zeewaarts te houden van de BKL.

MKL: Momentane kustlijn. Dit is de kustlijn zoals die in het betreffende jaar is gemeten. Deze kustlijn is geen daadwerkelijk waterlijn of hoogtecontour, maar het resultaat van een berekening van het zandvolume in een vastgesteld diepte/hoogte bereik.

TKL: Te Toetsen kustlijn. Dit is de voorspelde ligging van de kustlijn, op basis van een trendbepaling van de posities van de MKL over meerdere jaren. De TKL wordt gebruikt om vast te stellen of de BKL op korte of langere termijn zal worden overschreden. Daar waar ene overschrijding wordt verwacht kunnen dan beheermaatregelen worden getroffen.

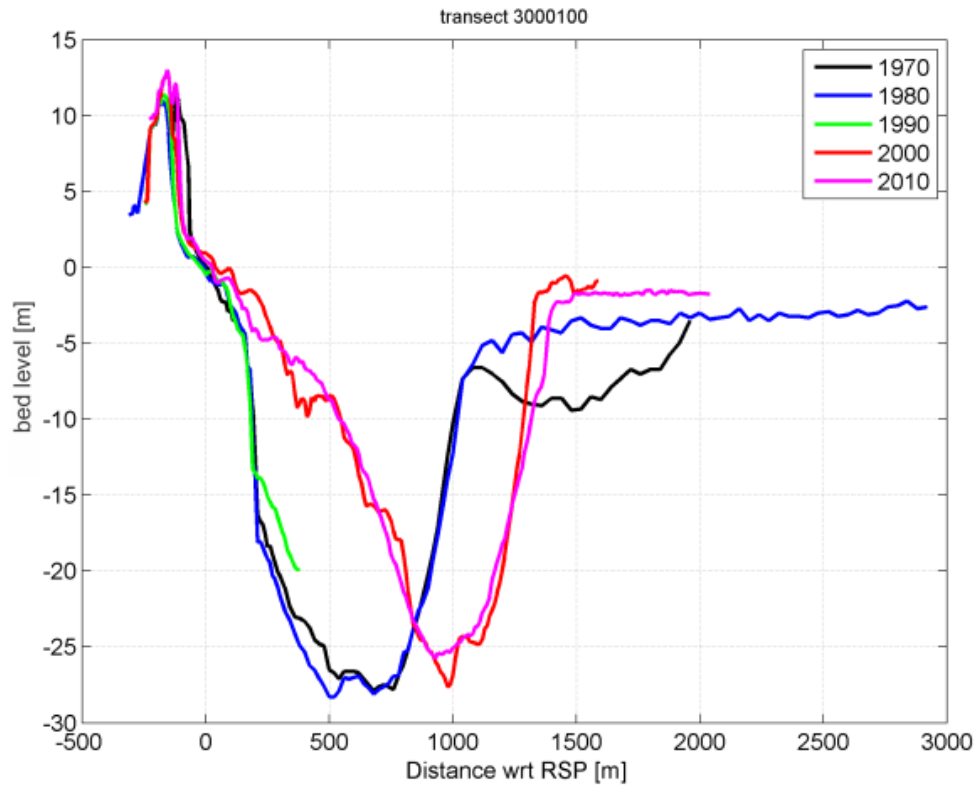
Ieder jaar worden voor de gehele Nederlandse kust in de Kustlijnkarten de posities van de MKL, TKL en BKL gerapporteerd (Rijkswaterstaat, 2017). In de kustlijnkarten is ook beschrijving opgenomen van de methode voor het bepalen van de MKL en TKL en referenties naar de onderliggende rapporten.

Figuur 4-22 laat zien dat de positie van de MKL redelijk stabiel is tot de jaren '90 (waarbij de uitschieter in landwaartse richting in 1985 buiten beschouwing blijft, omdat dit waarschijnlijk een fout betreft). Deze stabiele positie van de kustlijn gaat samen met de stabiele ligging van het Borndiep tegen de westkust van Ameland. Na 1990 is sprake van een snelle zeewaartse verplaatsing van de MKL, tot ongeveer 1995. De TKL, die is gebaseerd op de trend in de MKL gaat wat langer en verder door met verplaatsen in zeewaartse richting. De snelle zeewaartse verplaatsing van de kustlijn is het gevolg van de verplaatsing van het Borndiep naar het westen, onder invloed van de aanvoer van zand van de zandhaak. Na ongeveer 1999 vindt een gestage verplaatsing in landwaartse richting plaats van de MKL en TKL. Die landwaartse verplaatsing hangt niet samen met de verplaatsing van het Borndiep naar de kust, want in de dwarsdoorsnede in Figuur 4-21 is zichtbaar dat de geul in 2000 en 2010 vrijwel op dezelfde plek liggen. De achteruitgang van de kustlijn vindt na 1999 blijkbaar plaats in de bovenzijde van het kustprofiel. Dit is zichtbaar in Figuur 4-10, waar een duidelijk verschil zichtbaar is in de ontwikkeling van het diepe deel van geulwand en het ondiepe deel van de geulwand (overgang rond NAP -8 m).

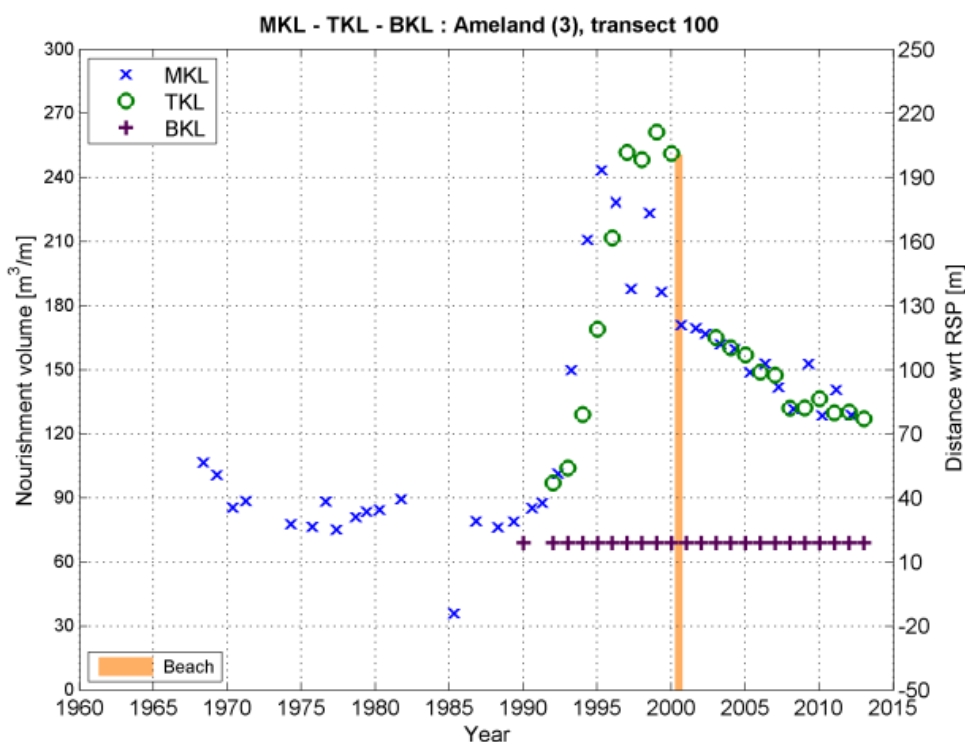
De ontwikkelingen van het Borndiep en de kustlijn langs de westkust van Ameland zijn divers, zoals ook blijkt als de ontwikkelingen die zichtbaar zijn in Figuur 4-21 en Figuur 4-10 worden vergeleken met de verder naar het zuidwesten liggende doorsneden in Figuur 4-11. De verschillen zijn het gevolg van ontwikkelingen op de relatief korte termijn van een tiental jaren

⁷ Op sommige locaties verspringt de ligging van de BKL, als voor het betreffende kustvak een beleidsherziening heeft plaatsgevonden. Hier is dat niet het geval.

bovenop de zeer langjarige verplaatsing naar het oosten van het zeegat en de kust (Cleveringa et al., 2005).



Figuur 4-21 Dwarsdoorsneden van de westkust van Ameland; raai 100 (locatie van deze raai in Figuur 3-4).



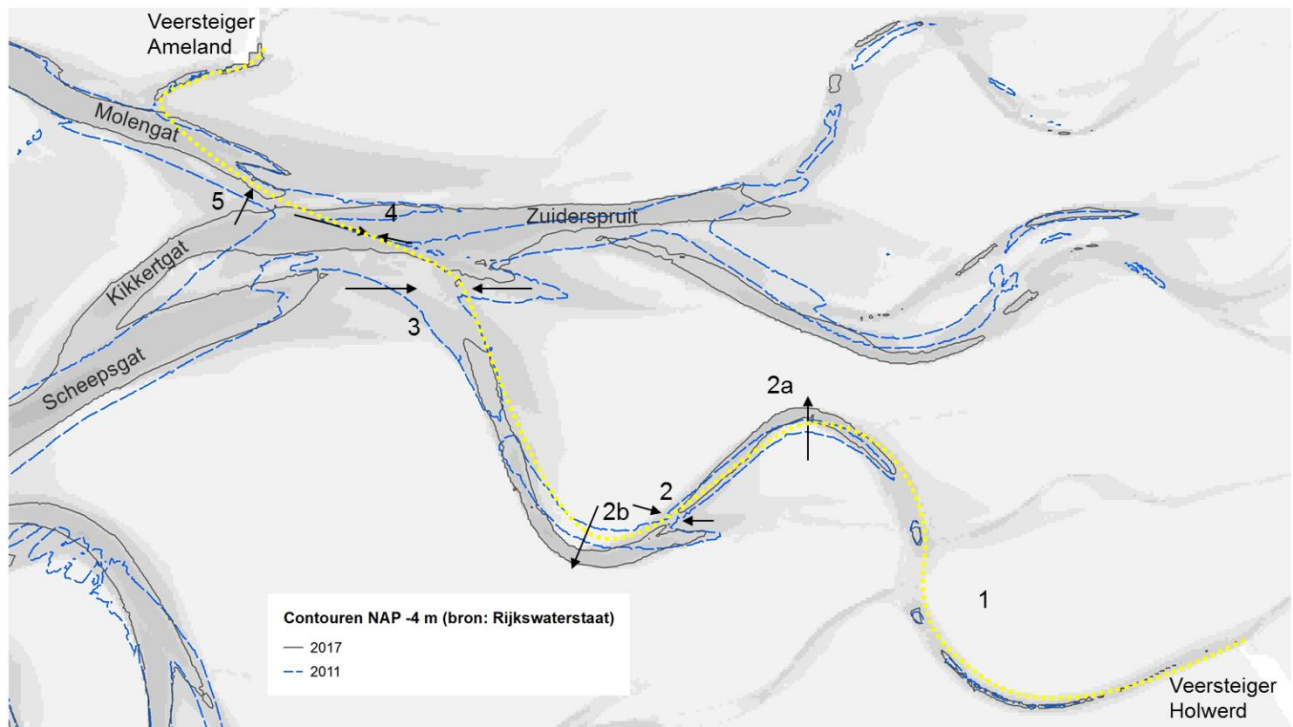
Figuur 4-22 Overzicht ontwikkeling JarKus profielen aan de westkust van Ameland; raai 100 (locatie van deze raai in Figuur 3-4).

4.6.2 Getijdegeulen en vaarwegen

De belangrijkste vaarroute in het kombergingsgebied Borndiep is de veerbootroute van Holwerd naar Ameland. Vanwege de toename van het aantal keren met vertraging en de duur van de vertraging, de toename van de lengte van de vaarweg en het oplopende baggerbezwaar zijn verschillende studies uitgevoerd naar de vaarweg en het gebruik door de veerboot (Steijn, 2005; Kater et al., 2008; Cleveringa, 2012; Villars et al., 2016; Herman, 2016). In eerste instantie spitste het onderzoek zich toe op het stuk van geul direct ten westen van de veerdam bij Holwerd, tot en met de eerste bocht (1 in Figuur 4-23). In tweede instantie zijn ook de twee grote bochten bij de onderzoeken betrokken (2a en 2b in Figuur 4-23), waar de uitbocht van deze geul heeft geresulteerd een sterke toename van de vaarweg. De andere ontwikkelingen die ook van belang zijn voor bruikbaarheid van de vaarweg en veranderingen in het baggerbezwaar zijn in Figuur 4-23 weergegeven bij:

2. Ontwikkeling van een drempel tussen de zuidwaarts gerichte bocht (2a) en de noordwaarts gerichte bocht (2b).
3. Ontwikkeling van een drempel bij de uitstroom van de vaarweg in het Scheepsgat;
4. Ontwikkeling van een drempel bij de inloop van het Molengat;
5. Noordwaartse migratie en daarmee versmalling van het Molengat.

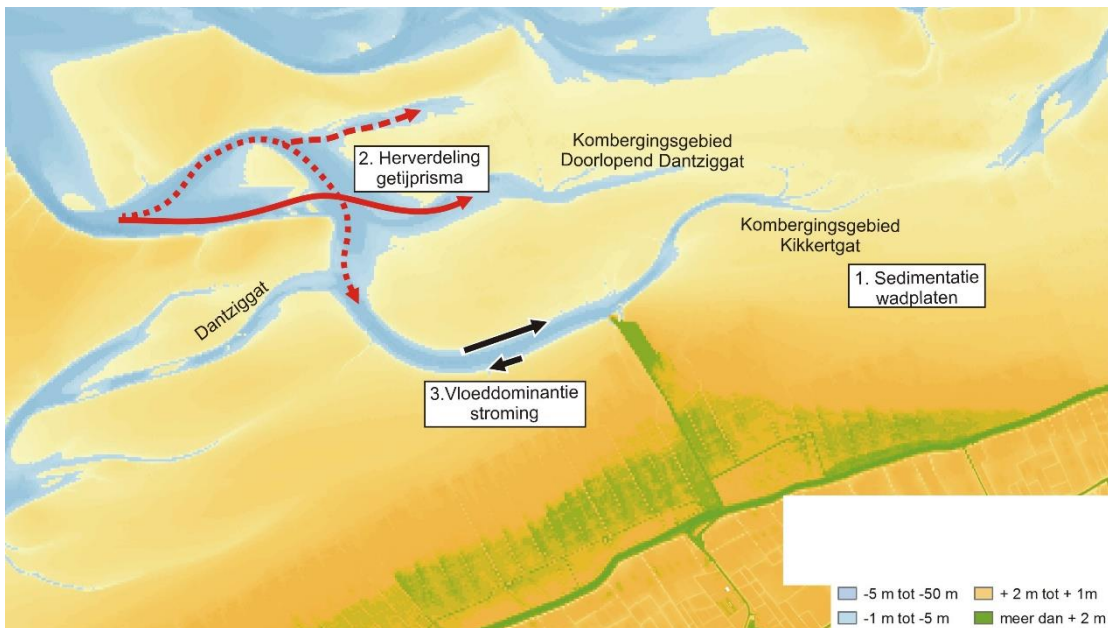
Deze ontwikkelingen worden hieronder nader toegelicht.



Figuur 4-23 Contouren van NAP -4 m waterdiepte van de geulen bij en rond de vaarweg (geel gestippelde route) voor 5 verschillende jaren.

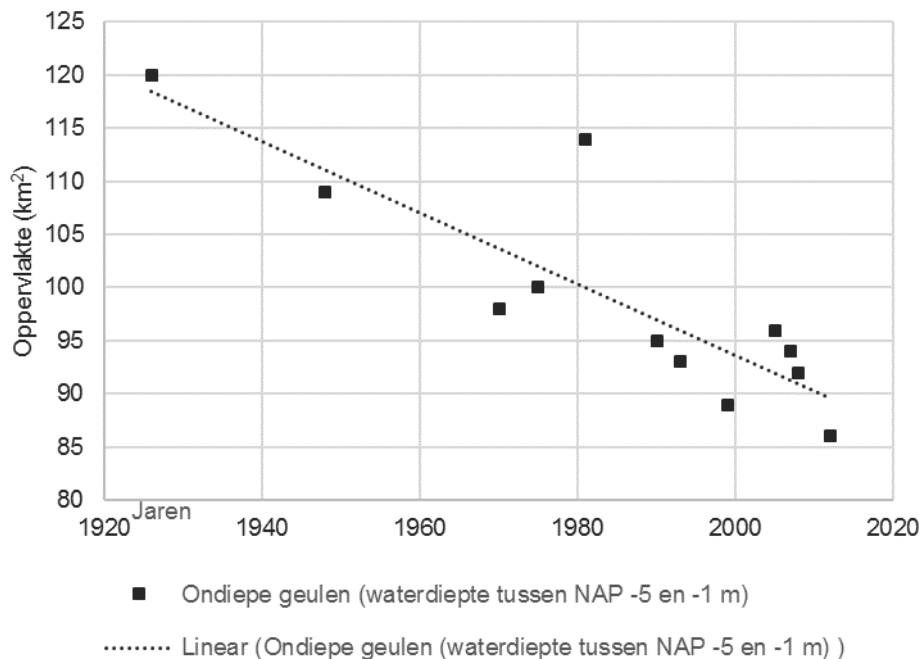
1 De vaarweg ten westen van de veerdam

Dit gedeelte van de vaarweg is tegenwoordig door het baggeren ruimer dan de geul van nature zou zijn (zie Figuur 4-3 als voorbeeld van de natuurlijke situatie, met een duidelijke afname van de geulomvang van nabij het zeegat tot verder in het kombergingsgebied). De toename van het baggerbezwaar ten westen van de veerdam is beschreven in verschillende studies, waarbij duidelijk is geworden dat naast de autonome morfologische ontwikkelingen ook de locatie van het verspreiden van de baggerspecie een rol speelt (Van Kessel et al., 2016; Herman et al., 2016). De autonome ontwikkelingen in de nabijheid van de geul hebben geresulteerd in een afname van het getijprisma van de vaargeul, door sedimentatie van de wadplaten en doordat andere geulen de rol van de geul deels hebben overgenomen. Daarbij is het stromingspatroon in de geul gewijzigd, waardoor de vloedstroom (die zorgt voor de aanvoer van sediment) dominant is geworden. In Figuur 4-24 zijn deze ontwikkelingen weergegeven.



Figuur 4-24 Kaartje met de lokale ontwikkeling van het kombeegingsgebied van de geul Kikkertgat, gemaakt voor de Vaarweg Holwerd-Ameland (Villars et al., 2016).

De autonome afname van de omvang van de getijdegeul is niet voorbehouden aan de Vaarweg Ameland. De analyse van de arealen door Nederhoff et al. (2017) laat zien dat in het kombergingsgebied van het Borndiep het areaal geulen met een waterdiepte tussen NAP -5 en 1 m structureel is afgenomen (Figuur 4-25).



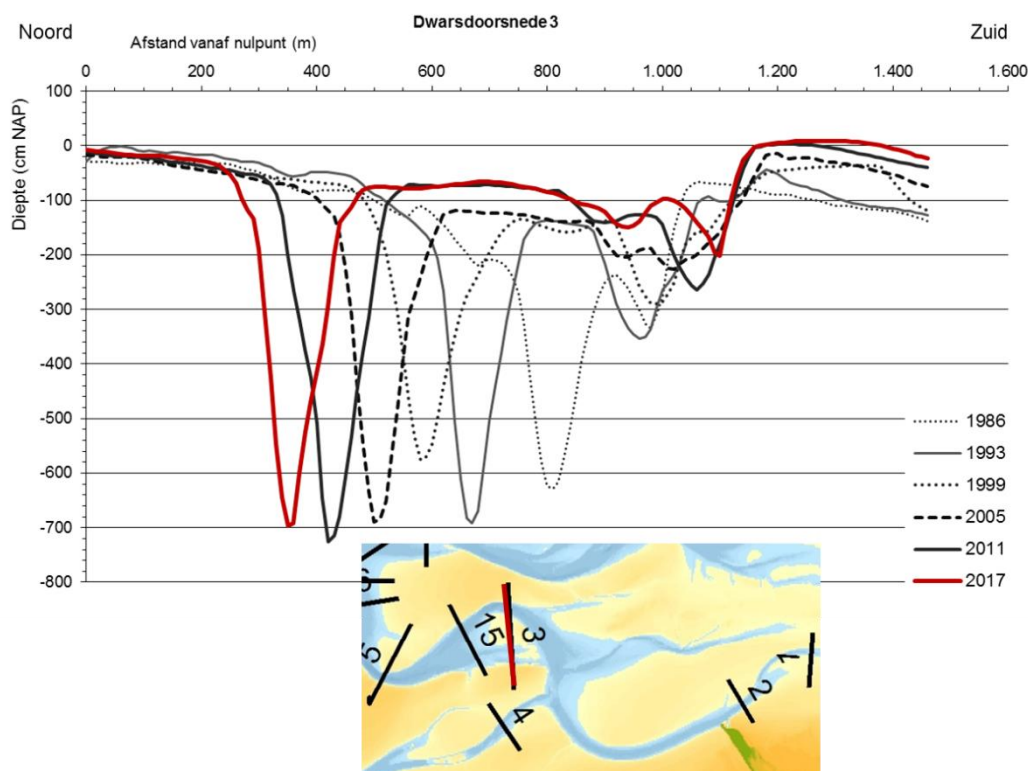
Figuur 4-25 Grafiek met het areaal ondiepe geulen met een waterdiepte tussen NAP -5 en -1 m, op basis van de gegevens van Nederhoff et al. (2017).

2a en b. De bochten in de vaarweg.

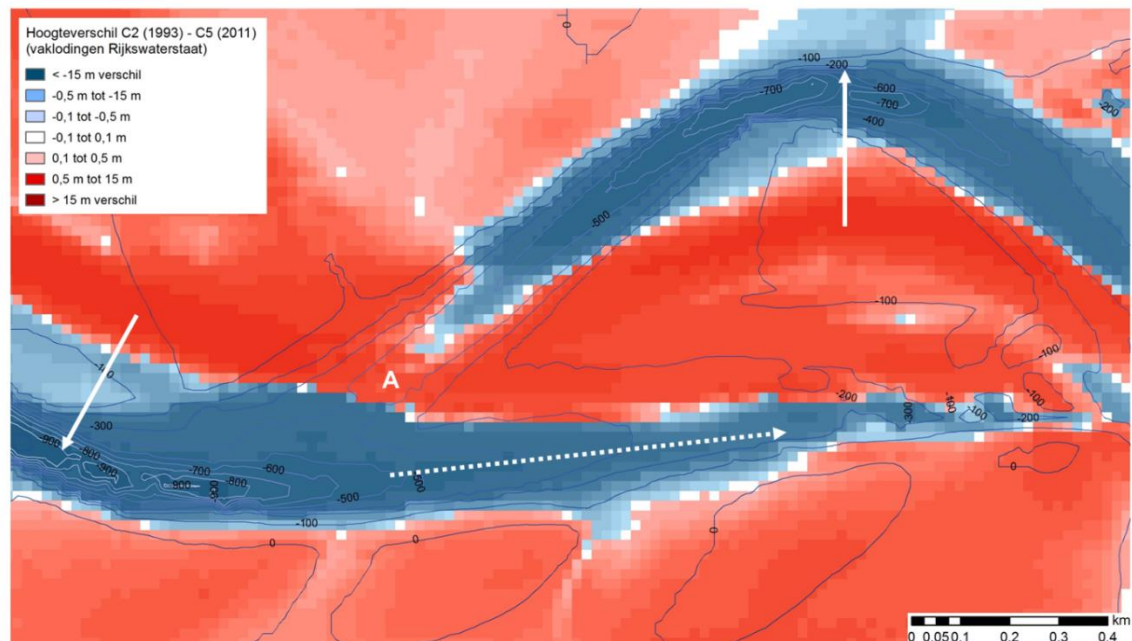
Bochten in geulen zijn een normaal onderdeel van de morfologie van getijdegeulen. De geulen bochten uit, totdat er een kortsluiting ontstaat of een andere geul de rol van de geul overneemt. De mate van uitbochten wordt daardoor beperkt in geulen waar geen beheer plaatsvindt (van Til, 2017). Het baggeren in de vaarweg heeft de bochten in staat gehouden, zodat deze verder uitbochten, zoals zichtbaar is in Figuur 4-26. De aanwezige vloedschaar kan door deze door ingrepen gestuurde ontwikkeling geen rol van betekenis gaan spelen. De lengte van de vaarweg is door deze ontwikkelingen toegenomen.

2. Ontwikkeling van een drempel.

Tussen de zuidwaarts gerichte bocht (1a in Figuur 4-23) en de noordwaarts gerichte bocht (1b in Figuur 4-23) is een drempel ontstaan tussen deze twee delen van de geul. In de kaart met de hoogteverschillen tussen 1993 en 2011 is de verondieping zichtbaar (A in Figuur 4-27). In deze kaart met de hoogteverschillen hebben de blauwe delen de vorm van twee elkaar ontwijkende scharen, waarbij het drempelgebied tussen de geulen de vorm heeft van een ebschild bij de ebschaar. Voor de beheerder is de toekomstige ontwikkeling van deze drempel van belang, om inzicht te krijgen in het baggerbezuur. Daarover zijn echter geen eenvoudige uitspraken mogelijk, de ontwikkeling hangt onder andere samen met de ontwikkeling van de vloedschaar, het verdere uitbochten van de geulen en ook de baggerinspanning is van invloed op de ontwikkelingen. Als de voorgenomen doorsteek (Ministerie van I&M, 2016) wordt uitgevoerd, dan vervalt dit deel van de vaargeul en hebben de ontwikkelingen geen gevolgen voor het beheer.



Figuur 4-26 Dwarsdoorsnede 3 door de noordgerichte bocht in de Vaarweg Ameland.



Figuur 4-27 Kaart met het hoogteverschil tussen 1993 en 2011, ter hoogte van de drempel in de vaarweg (2 in Figuur 4-23). Rood: ondieper; blauw: dieper.

3. Ontwikkeling van een drempel bij de uitstroom van de Vaarweg in het Scheepsgat &
4. Ontwikkeling van een drempel bij de inloop van het Molengat.

De ontwikkelingen van de drempels vinden plaats op het knooppunt van een aantal verschillende geulen, zoals zichtbaar is in Figuur 4-28. In deze figuur is de ligging van de geulen in 2011 en 2017 weergegeven. De morfologische ontwikkelingen rond dit knooppunt worden hier toegelicht. Het Scheepsgat had in 2011 een vloedsgaar aan de zuidzijde (V_S) en liep door tot een vloedsgaar bij de monding van de Vaarweg (V_{SV2}) en met een kleine vloedsgaar in de richting van de vaarweg (V_{SV1}). Ten noorden van de vloedsgaar bij de vaarweg (V_{SV2}) ligt een ebschaar (E_{SNZ}), die de overgang van Scheepsgat naar Noorder- en Zuiderspruit scheidt. De situatie in 2017 was duidelijk anders, met een splitsing in een vloedsgaar (V_S) en een ebschaar (E_S) aan de westzijde van het knooppunt. Van de vloedsgaar naar de vaarweg is slechts een restant aanwezig (V_{SV}). De Vloedsgaar van het Scheepsgat loopt in 2017 ononderbroken door naar het oosten, om daar te eindigen bij de vloedsgaar (V_{SNZ}). Ook de vloedsgaar waar het Molengat in eindigt heeft een andere ligging gekregen, verdere naar het noordwesten. Tussen de ebschaar (E_S) en de vloedsgaar (V_S) van het Scheepsgat is een drempel gevormd. Deze drempel is in dwarsdoorsnede 11 in Figuur 4-29 zichtbaar als de hoge rug, die is gemarkeerd met DZ. De geul is gemarkeerd met Scheepsgat is de vloedsgaar (V_S in Figuur 4-28). Aan de noordzijde wordt deze vloedsgaar gescheiden van het verlengde van het Molengat door een zandrug, die is gemarkeerd met DN. Deze ontwikkeling verloopt parallel aan het geleidelijk afnemen van de omvang van de Kikkertgat, dat in de meest recente opname (2017) niet meer als geul doorloopt van het Scheepsgat naar het Molengat, zoals dat eerder het geval was.

De drempel aan de overgang van de Vaarweg Ameland in het Scheepsgat is onderdeel van het ebschild van vaarweg (D in Figuur 4-28). In de dwarsdoorsnede in Figuur 4-30 is zichtbaar dat ook aan de zuidwestzijde sedimentatie heeft plaatsgevonden. De sedimentatie aan de noordoostzijde lijkt tot stilstand gekomen. In de dwarsdoorsnede is de doorgaande afname van de diepte van geul duidelijk zichtbaar.

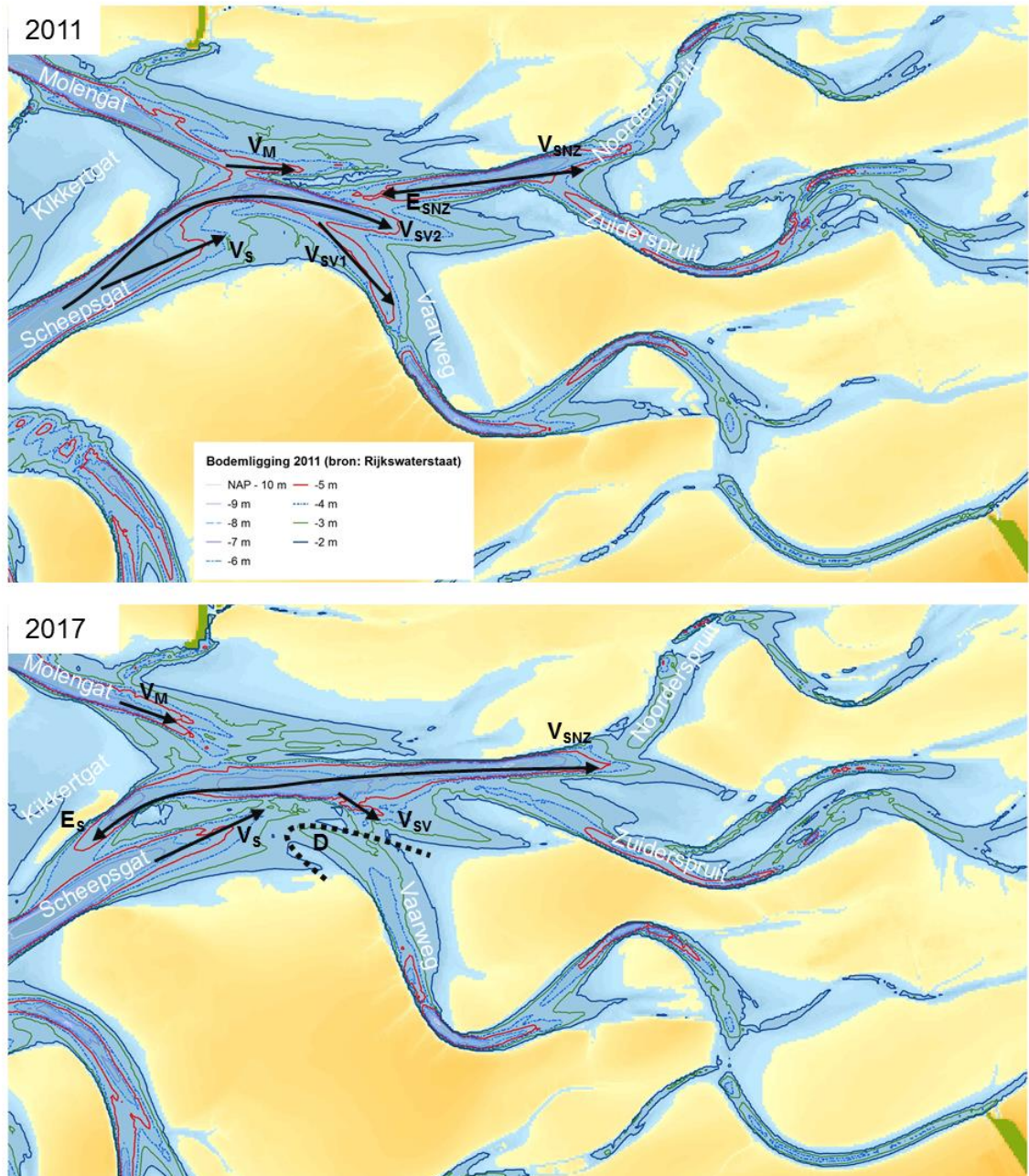
De ligging van de geulen en tussenliggende ondieptes is sterk veranderd. Deze ontwikkelingen zijn het best te begrijpen als autonome veranderingen van getijdegeulen, met hun eb- en vloedcharen en bijbehorende drempels. Het is niet waarschijnlijk dat deze veranderingen gekoppeld zijn aan grootschalige veranderingen in het sedimentbudget van het kombergingsgebied. Dergelijke ontwikkelingen vinden ook plaats wanneer de omvang van de geulen niet verandert. Ook het verspreiden van baggerspecie vanuit de vaarweg op de locaties in het Scheepsgat en de Zuiderspruit zijn waarschijnlijk niet de oorzaak voor deze veranderingen. Ondanks de omvang van het baggerbezwaar is het volume baggerspecie dat op deze locaties wordt verspreid beperkt in vergelijking met de volumes aan sediment die op de drempel in beweging zijn.

De onderliggende oorzaak voor de complexiteit is ongetwijfeld het samenspel tussen de water- en sedimenttransporten door de verschillende geulen die hier samenkomen. Deze situatie is vergelijkbaar met de drempels in de Westerschelde, waar de hoofd- en nevengeul samenkomen, waarvan de morfologische veranderingen complex zijn en snel verlopen (Jeuken, 2000). Werkelijk begrip van de waterbeweging en sedimenttransportprocessen die leiden tot autonome veranderingen in de ligging van getijdegeulen is nog niet beschikbaar. Basis voor het begrip zijn historische analoge ontwikkelingen en vergelijkbare ontwikkelingen in de andere gebieden kan De tegenwoordige situatie lijkt in een aantal aspecten op de situatie die in de jaren '40 van de vorige eeuw.

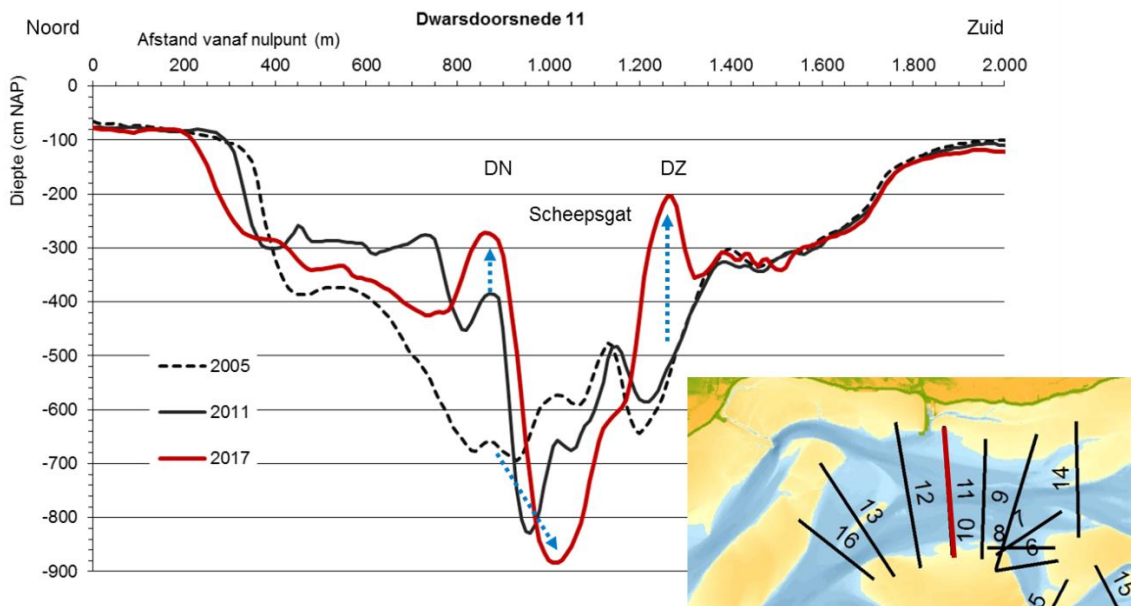
Het maken van voorspellingen van de morfologische ontwikkeling in dit soort gebieden is zeer lastig, maar wel van belang voor de beheerder van de vaarweg. Het voorspellen van de morfologische ontwikkelingen gebeurt op basis van een vergelijking met de ontwikkelingen die na de jaren '40 hebben plaatsgevonden. In een periode van 20 tot 25 jaar is de ligging van de geulen en ondieptes in het kruispunt geleidelijk zo gewijzigd dat geen sprake meer was van een drempel. Dit type morfologische veranderingen van relatief grote geulen omvat al snel tien tot een tiental jaren. Het lijkt niet uitgesloten dat het een dergelijke periode zal duren voordat de situatie zo veranderd dat geen sprake meer is van een of meerdere drempels.

5. Noordwaartse migratie en daarmee versmalling van het Molengat.

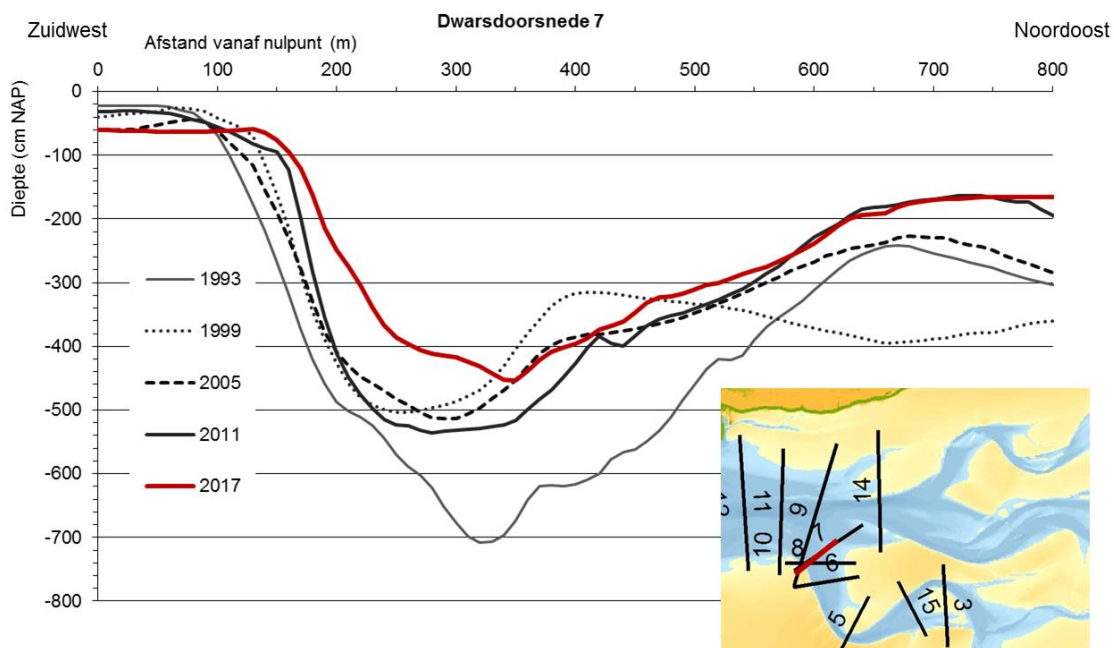
In vergelijking met de ontwikkelingen die hiervoor zijn beschreven, heeft deze ontwikkeling nog geen directe gevolgen voor de bruikbaarheid van de vaarweg en daarmee voor het beheer. De omvang van de geul is ook de komende jaren nog voldoende groot voor het gebruik als vaarweg.



Figuur 4-28 Kaarten met de ligging van de geulen rond het kruispunt van Vaarweg Ameland – Scheepsgat – Noorder- en Zuiderspruit en Molengat in 2011 en 2017. De vloedscharen zijn aangegeven met V en de ebbscharen met E.



Figuur 4-29 Dwarsdoorsnede 11 over het knooppunt tussen het Scheepsgat en het Molengat..



Figuur 4-30 Dwarsdoorsnede 7 over de drempel waar de Vaarweg Ameland uitkomt op het Scheepsgat -

De voorbeelden die hierboven worden getoond van de vaarweg Holwerd-Ameland laten verschillende morfologische ontwikkelingen op de mesoschaal zien die gevolgen hebben voor de bruikbaarheid en het beheer van de vaarweg. In deze beschrijving is nog niet stilgestaan bij de fysische processen die zorgen voor de sedimentatie en de snelheid waarmee deze plaatsvindt. Omdat in de onderdelen van de vaarweg verschillende processen een rol spelen, is die snelheid verschillend. Van de vaarweg ten westen van de veerdam is bijvoorbeeld bekend dat deze zeer snel kan verondiepen tijdens en direct na een storm. Andere ontwikkelingen verlopen geleidelijke, zoals de veranderingen in de ligging van het Scheepsgat. Maar een dergelijke geleidelijke ontwikkeling kan tot een plotselinge toename

van het baggerbezwaar leiden, als de waterdiepte dermate afneemt dat de scheepvaart beperkingen ondervindt.

Ontwikkelingen van geulen die beter begrepen moeten worden vanwege de beheervragen rond de getijdegeulen en dan met name vanuit het vaarweggebruik, zijn:

1. Het optreden van autonome verondiepingen door ophoging van platen en de uitbouw van kwelders en door het switchen van de rol van geulen in de water aan- en afvoer;
2. Het uitbochten en verlengen van geulen in relatie tot het ontstaan en de evolutie van kortsluitgeulen;
3. De ontwikkeling van drempels bij de verplaatsing van geulen.,.

5 Wadplaten

5.1 Inleiding

De Waddenzee vormen in hun soort (onbegroeide intergetijden-barriersystemen) de grootste aaneengesloten zand- en slikplaten ter wereld (Waddenacademie, website). De Waddenzee is een verbindingzone in het continuüm van land naar zee. Het vormt een samenhangend klimaat- en getijgedreven systeem van hydraulische, geo(morfo)logische biologische en biogeochemische componenten en processen waarin de droogvallende wadplaten een cruciale rol spelen. Met droogvallend wordt hier bedoeld: het gebied tussen de tussen laag- en hoogwater⁸. Bij hoogwater staan deze platen onder water en bij laagwater liggen de platen grotendeels droog. Grotendeels, omdat in de diepere delen van de platen, die niet direct afwateren op de geulen een laagje water kan blijven staan tijdens laagwater.

Tijdens laagwater worden wadplaten bezocht door allerlei foeragerende vogels, die daar op verschillende soorten bodemdieren prederen, of plantaardig voedsel tot zich nemen. Tijdens hoogwater worden de platen door watergebonden dieren (vissen, krabben en garnalen, etc..) bezocht, die daar dan hun voedsel zoeken. De ecologische waarde van de wadplaten hangt onder meer samen met abiotische karakteristieken, zoals de hoogte en het droogvalpercentage, de sedimentsamenstelling, de stroomsnelheden, de hoogte van de golven en, de bodemschuifspanning. In de ecotopenkaarten worden een aantal van deze abiotische factoren gecombineerd (Bouma et al., 2005).

Voor de beleidsmakers en beheerders van de Waddenzee is belangrijk wat het areaal droogvallende platen is en welke ontwikkelingen deze doormaken is. Ook is belangrijk wat de kwaliteit is van de wadplaten en of daar veranderingen in optreden. Andere vragen hebben betrekking op de gevolgen van verschillende menselijke activiteiten op de wadplaten en kwaliteit. In Tabel 7 worden de belangrijkste beleids- en beheervragen gepresenteerd.

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

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

Veel van de ecologische functies in het wadengebied zijn afhankelijk van de droogvallende platen. Op de droogvallende wadplaten vindt omzetting en uitwisseling van nutriënten plaats, evenals fotosynthese en trofische interacties (voedseluitwisseling). De nutriënten staan aan de basis van grote hoeveelheden bacteriën en schimmels en onder invloed van het licht vindt fotosynthese door diatomeeën en andere algen plaats. De wadplaten kennen een hoge productiviteit. Tijdens hoogwater wordt via de waterkolom nog een grote hoeveelheid voedsel

⁸ Welk laag- en hoogwater wordt gebruikt verschilt. In de definitie van Natura2000 wordt bijvoorbeeld het laagste astronomische tij (LAT) gebruikt als ondergrens voor de platen.

aangevoerd. De rijkdom aan primaire productie in, op en boven de wadplaten, maakt het mogelijk voor filterfeeders (zoals mosselen) en depositfeeders (zoals de wadpier) om in grote dichtheden voor te komen. Dit voedselaanbod is op haar beurt weer bepalend voor het voorkomen van vissen en vogels en hun toppredatoren. De Waddenzee is dan ook een van de belangrijke stations voor trekkende vogels en een kraamkamer voor Noordzeevis.

Door de rijkdom aan vis en schaal- en schelpdieren wordt het gebied ook benut door de visserij. Gevist wordt vooral op garnalen en in mindere mate op plat- en rondvis. Daarnaast is handkokkelvissen toegestaan voor vergunninghouders en wordt mosselzaad ingewonnen en mosselen gekweekt in daartoe aangewezen gebieden. In het kombergingsgebied Borndiep zijn geen mosselpercelen aanwezig, deze liggen in de westelijke Waddenzee. Verder worden er nog beperkt wadpieren gewonnen. Het is van belang om op te merken dat een groot deel van de visserij niet op de platen plaats vindt met uitzondering van staand wand, wadpier winning en handkokkelen. De overige visserij vindt vrijwel geheel in de geulen en boven de subgetijde platen plaats

Het voorkomen van de intergetijdenplaten en de daarop aanwezige natuur oefent een grote aantrekkingskracht uit op toeristen, die zowel vanaf de kant als in het gebied zelf genieten van het natuurschoon. Het gebied wordt door wadvaarders en door wadlopers bezocht. Op enkele gesloten gebieden na kunnen grote delen van het gebied in principe vrij bezocht worden.

Het beheer van de wadplaten is gericht op de natuurwaarden. Gebieden waar verstoringgevoelige dieren aanwezig zijn, kunnen worden gesloten gedurende bepaalde periodes of het gehele jaar. Verstoring door bezoekers worden verder voorkomen door het opstellen van gedragscodes.

De wadplaten bij het wantij vormen het gebied waar kabels en leidingen tussen het vasteland en de Waddeneilanden worden ingegraven. De reden om de kabels daar in te graven is dat de afwezigheid van getijdegeulen bij het wantij betekent dat de begraafdiepte beperkt kan worden. Daar waar kabels of leidingen bloot komen te liggen door onverwachte morfologische ontwikkelingen, zal de beheerder maatregelen treffen. De kabel of leiding wordt dan opnieuw ingegraven of toegedekt.

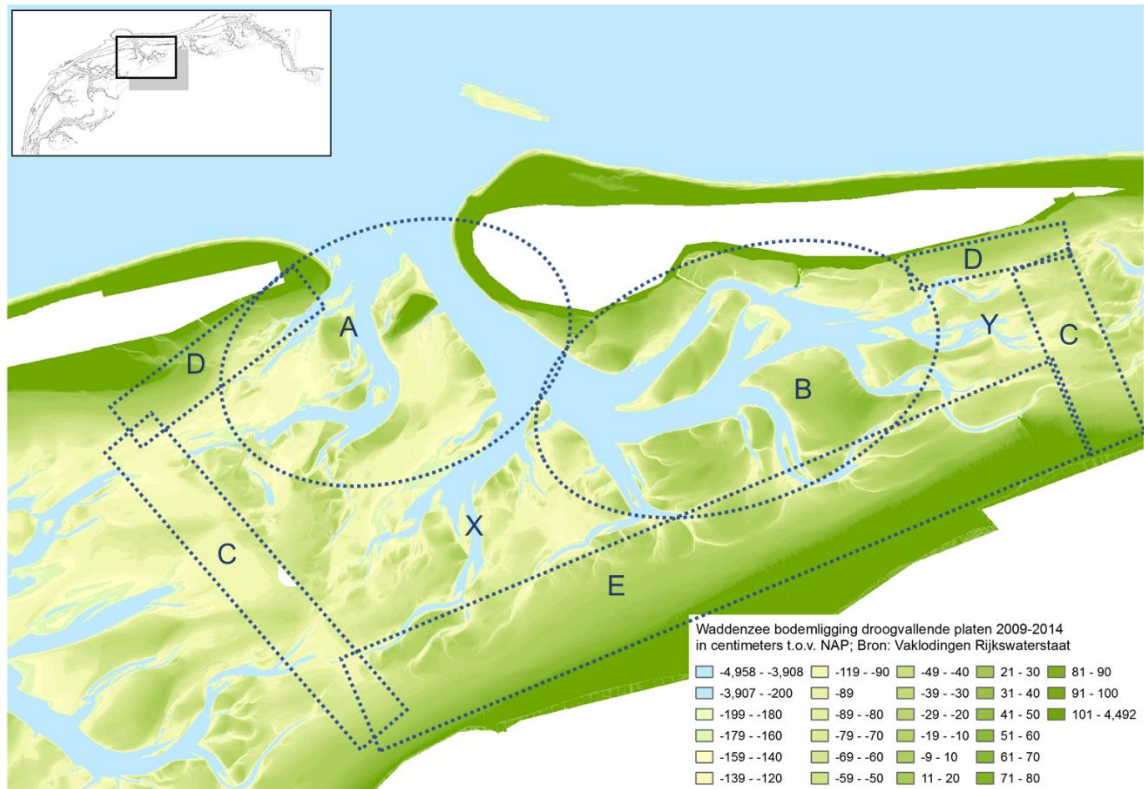
De wadplaten dragen bij tot golfreductie en daarmee tot de veiligheid tegen overstromingen. Uit onderzoek (van Loon-Steensma et al., 2012) is gebleken dat het vooral de hoogte is die daarin bepalend is en in de tweede plaats de breedte van de platen. Ook zijn de slikrijke hogere platen een bescherming van en een bron van slib voor de kwelders, die door hun hoogte een nog belangrijker rol spelen in de golfreductie.

5.2 Definitie(s)

Op de mesoschaal is het zinvol om onderscheid te maken naar de verschillende delen binnen de kombergingsgebieden. De wadplaten blijken bij nadere beschouwing veel grotere variatie in hoogte te vertonen dan meestal wordt verondersteld op basis van overzichtskaarten en zichtbaar in Figuur 5-1. Voor de beschrijving is onderscheid gemaakt tussen:

- A. De vloedgetijde delta;
- B. De hoge platen ten zuiden van Ameland;
- C. De wantij gebieden;
- D. & E De plaatgebieden die voor de eilandkwelders en de vastelandskwelders liggen;

De overige plaatgebieden (X en Y in Figuur 5-1).



Figuur 5-1 Bodemliggingen ten zuiden van Ameland (2011), waarbij de hoogteschaal voor de platen flink is opgerekt, waardoor hoogteverschillen duidelijk zichtbaar zijn.

5.2.1 A. De vloedgetijde delta

In 'back-barrier basins' aan de oostkust van de Verenigde Staten zijn 'flood-tidal deltas' zeer duidelijk herkenbare elementen. Het zijn de tegenhanger van de 'ebb-tidal deltas', oftewel buitendelta's aan de binnen van de zeegaten ('inlets'). 'Flood-tidal deltas' bestaan uit platen en ondieptes die worden doorsneden door geulen. Een deel van de geulen eindigt in de platen en ondieptes, die vloedchilden vormen. Figuur 5-2 toont een voorbeeld van zo'n 'flood-tidal delta', waarbij de platen en geulen aan de bekkenzijde duidelijk zichtbaar zijn. De zichtbaarheid is groot, omdat in de rest van het bekken vrijwel geen droogvallende platen zichtbaar zijn.

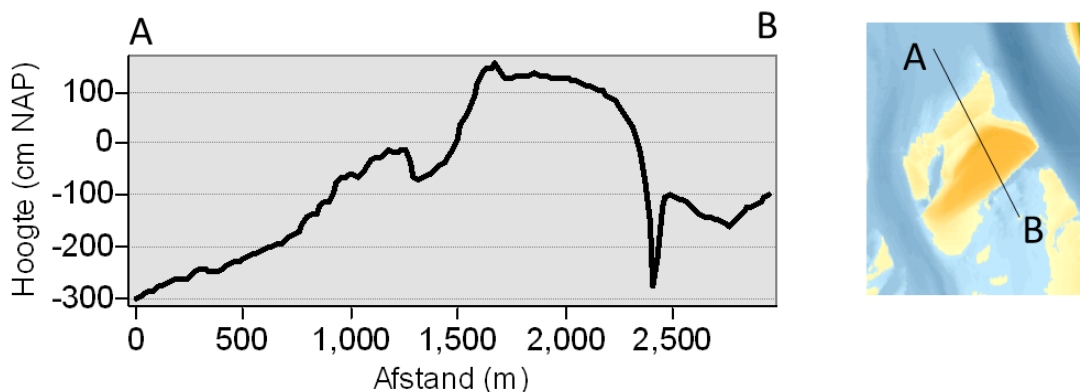
In het kombergingsgebied van het Borndiep liggen overal droogvallende platen. Een losliggende 'flood-tidal delta', zoals getoond in Figuur 5-2, is dan ook niet mogelijk in de Waddenzee. Wel laten gedetailleerde kaarten van de hoogte van de platen zien dat in de nabijheid van het zeegat relatief hoge platen aanwezig zijn. De Zeehondenplaat is hoger dan de andere platen in het kombergingsgebied en een deel van deze ligt boven het niveau van gemiddeld hoogwater (Figuur 5-3). Ook bij veel andere zeegaten of op hun buitendelta's liggen dergelijke hoge platen, zoals Richel, Noorderhaaks en Rif (Figuur 5-5). Deze gebieden worden door hun hoogte gekenmerkt door andere en bijzondere ecologische functies, zowel in vergelijking met de omringende wadplaten, als met de nabije Waddeneilanden. Zo worden deze gebieden gebruikt als broedplaats voor bepaalde schaarse kustvogels (sterns, plevieren) en als rust, werp en zooglocaties voor (grijze) zeehonden.



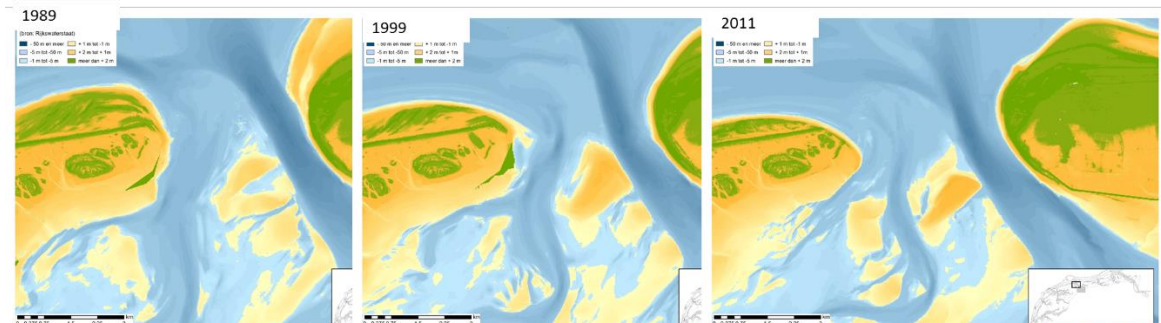
Figuur 5-2 Drum inlet aan de oostkust van de Verenigde Staten (North Carolina)

De dynamiek van deze hoge platen is anders dan die van gewone wadplaten, waarbij golfwerking waarschijnlijk een belangrijke rol speelt. De golven zorgen zowel voor de opbouw en de hoogte van deze platen, als voor de snelle verplaatsing en vervorming (Figuur 5-4). In de nabijheid van de buitendelta en het zeegat zijn de golven hoger dan in de Waddenzee. De aanwezigheid van de hogere golven heeft te maken met de nabijheid van de Noordzee, waar de hoge golven ontstaan. Een deel van de energie in de golven ‘verdwijnt’ op de buitendelta. Mogelijk dragen de golven bij aan de aanwezigheid van hogere platen in de nabijheid van het zeegat.

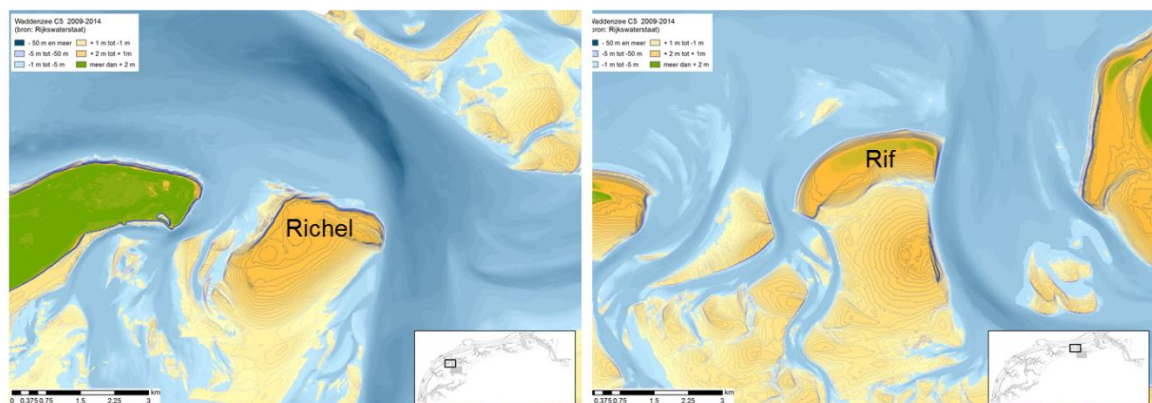
De bijzonder ecologische waarden van de hoge platen, zoals de Zeehondenplaat, geven aanleiding tot beheervragen over hun autonome ontwikkelingen: ‘Kunnen deze platen in (dynamisch) evenwicht blijven of zijn ze gedoemd te verdwijnen?’ en op de mogelijkheden (en noodzaak) tot behoud.



Figuur 5-3 Dwarsdoorsnede van de Zeehondenplaat in het Zeegat van Ameland.

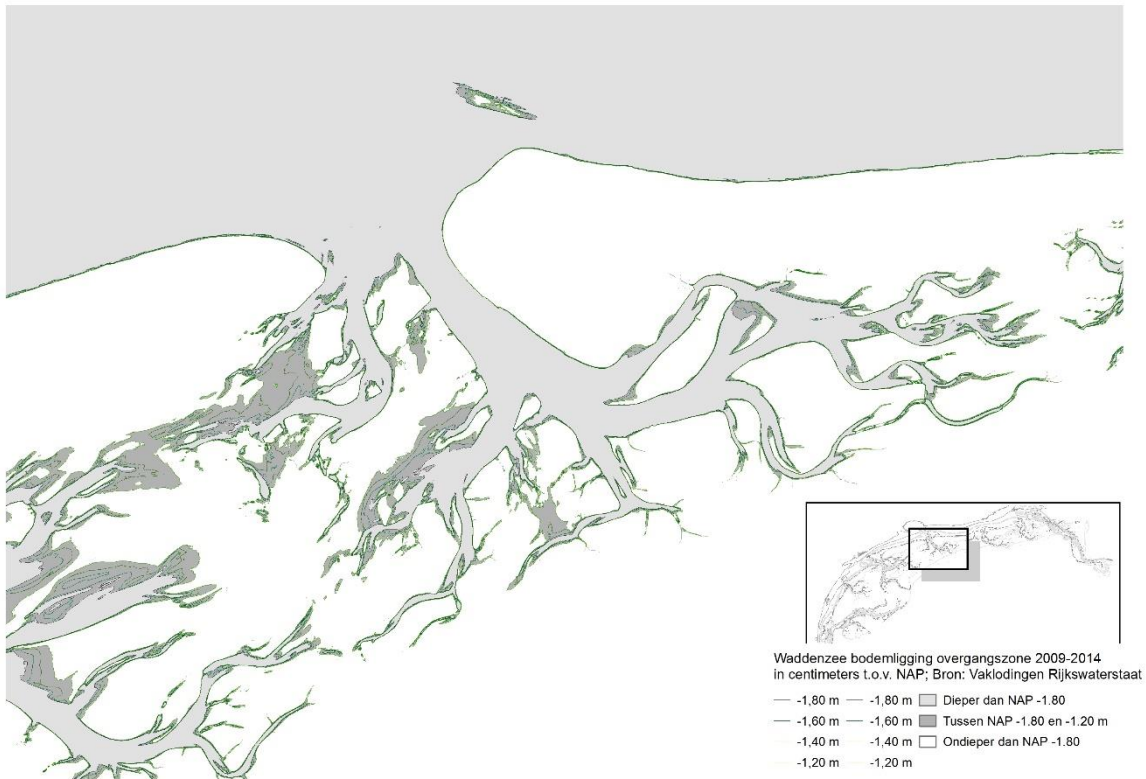


Figuur 5-4 De Zeehondenplaat in drie verschillende jaren laat de grote veranderingen in positie en vorm zien.

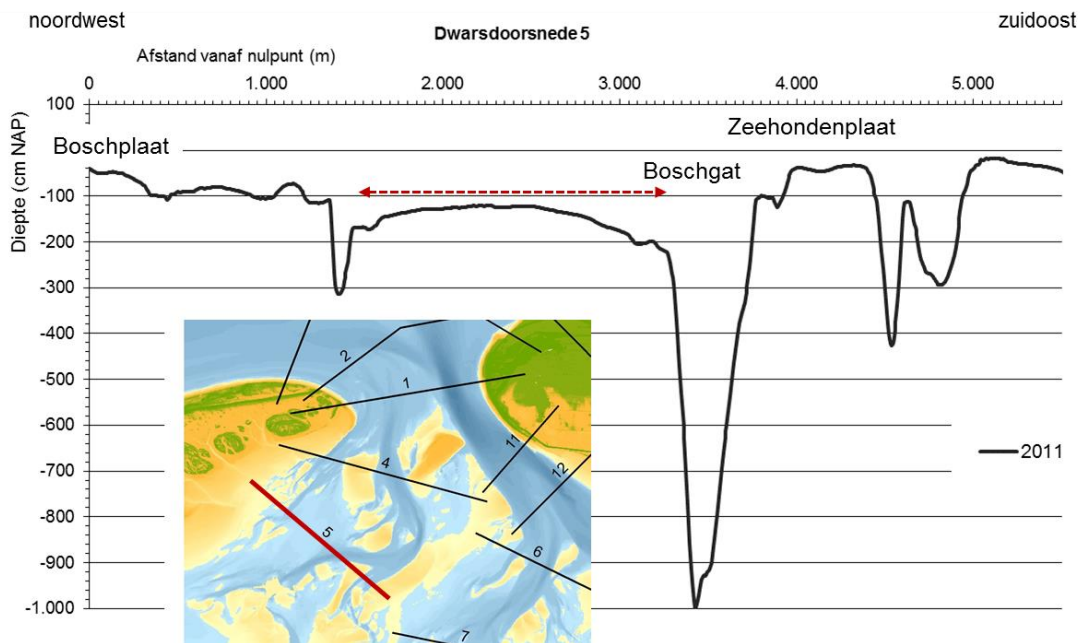


Figuur 5-5 Twee andere hoge platen op vergelijkbare posities in het Zeegat: Rif tussen Ameland en Schiermonnikoog en Richel tussen Vlieland en Terschelling.

Met name in de nabijheid van het zeegat liggen naast droogvallende platen en geulen ook sublitorale overgangszones tussen geul en droogvallende plaat. Deze sublitorale platen (niet-droogvallende platen) hebben niet het kenmerkende geulprofiel heeft, maar wel de relatief vlakke geometrie van de droogvallende wadplaten. Figuur 5-7 toont in een dwarsdoorsnede het grootste van deze gebieden, dat ten zuiden van de Boschplaat ligt. In de kaart in Figuur 5-6 zijn deze gebieden zichtbaar als de brede donkergrijze gebieden, tussen plaat (wit) en geul (lichtgrijs).



Figuur 5-6 Kaart van de overgangszone (donkergrijs) tussen geul (lichtgrijs) en droogvallende platen (wit) in het kombergingsgebied Borndiep, met daarin de contouren tussen de NAP – 1 en -2 m



Figuur 5-7 Dwarsdoorsnede door het sublitorale areaal ten zuiden van de Boschplaat (zie inzet voor locatie).

5.2.2 B. Hogere platen ten zuiden van Ameland

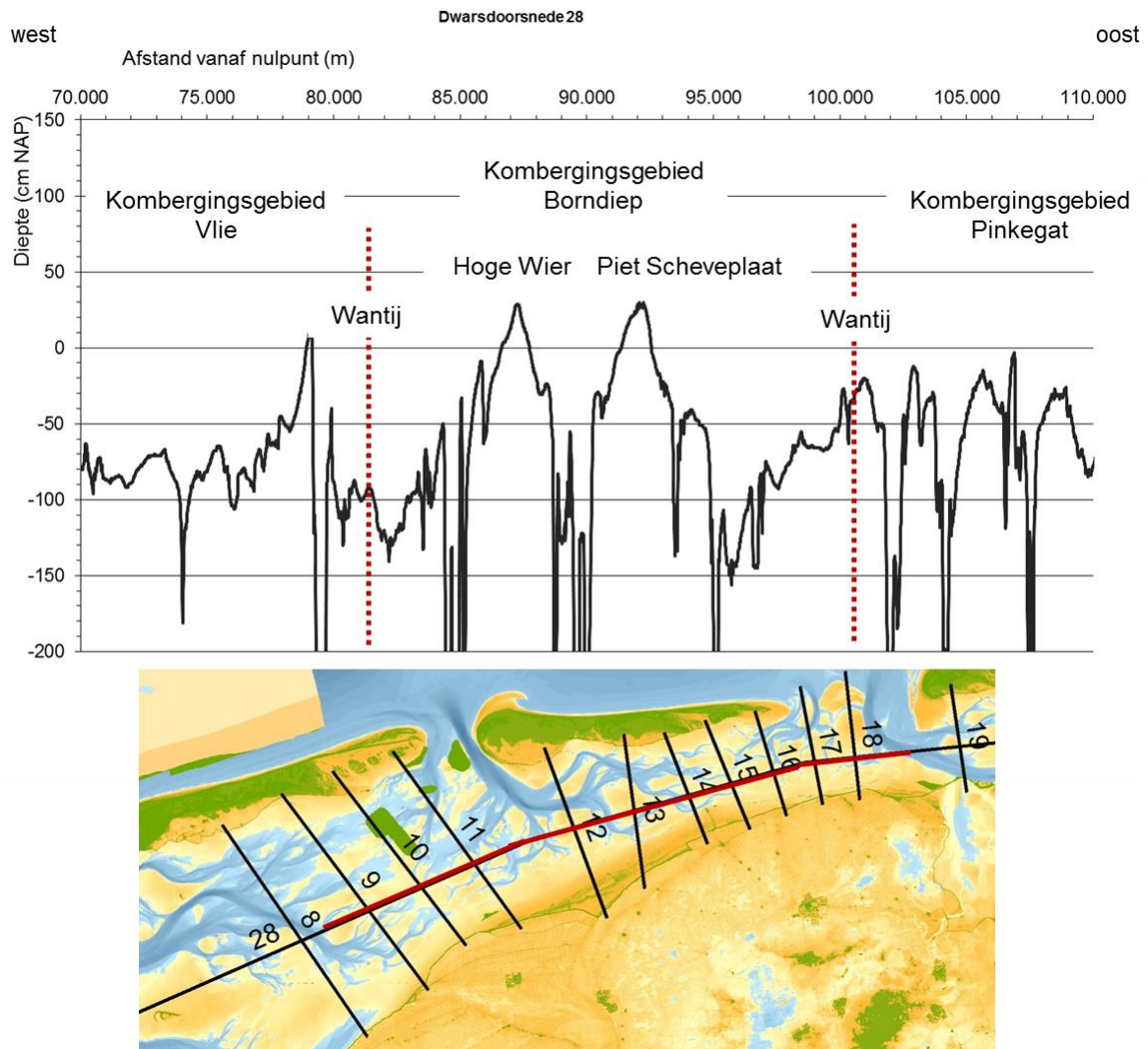
Ten zuiden van Ameland liggen de platen Vrijheidsplaat, Molenplaat, Hoge Wier, de Piet Scheveplaat en de plaat ten oosten van de Piet Scheveplaat, die allemaal relatief hoog zijn ten opzichte van de wadplaten ten westen en ten oosten daarvan. Dit is duidelijk zichtbaar in de dwarsdoorsnede in Figuur 5-8 die ten zuiden van de Waddeneilanden loopt. De twee hoogste gebieden in deze dwarsdoorsnede zijn de platen die in het midden tussen de wantijen liggen.

De aanwezigheid van de hogere platen in deze zone heeft mogelijk te maken met de beperkte migratie van de geulen in dit gebied, waardoor de opbouw van de platen gedurende langere tijd door kan gaan. Een andere verklaring is dat de golfwerking in de Waddenzee in deze zone relatief beperkt is, omdat het gebied geheel is afgeschermd van het zeegat. Deze twee verklaringen sluiten elkaar overigens niet uit.

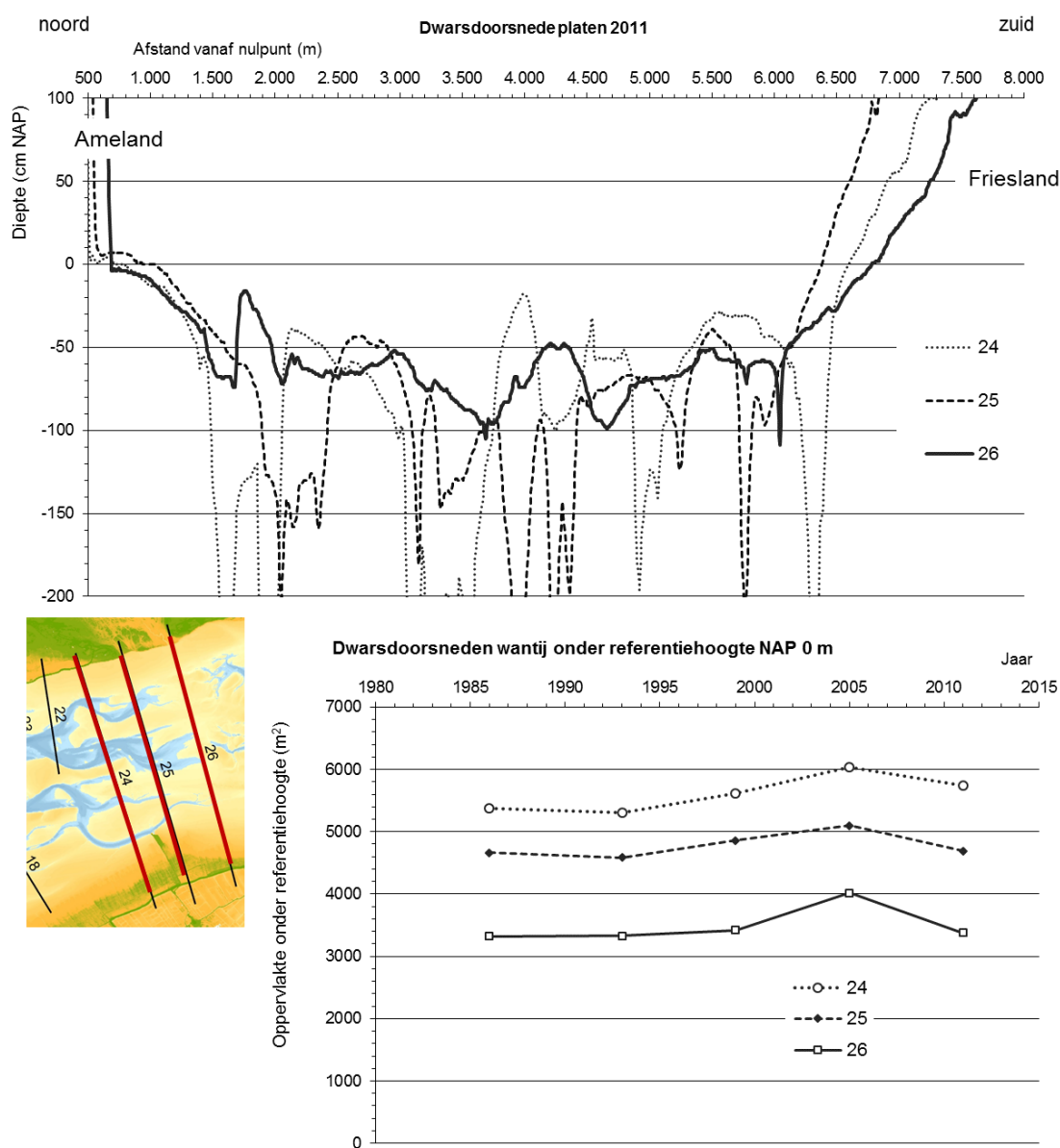
5.2.3 C. Wantijen

De wantijen tussen Zeegat van het Vlie en Borndiep en tussen Borndiep en het Pinkegat blijken relatief laaggelegen platen te hebben, in vergelijking met de aanliggende gebieden. In de dwarsdoorsnede in Figuur 5-8 zijn deze relatieve laag liggende delen zichtbaar. Deze observatie gaat in tegen de bestaande beschrijving van de wantijen als hoge ruggen tussen twee kombergingsgebieden (zie bijvoorbeeld Oost en de Boer, 1994).

Het denkmodel voor de hogere ligging van het wantij is gebaseerd op de lage stroomsnelheden die optreden onder rustige omstandigheden. De lage stroomsnelheden leiden tot de afzetting van sediment en daarmee tot een hogere ligging van het wantij. Maar de stroomsnelheden bij het wantij zijn niet onder alle omstandigheden laag. Door opstuwing en golfgedreven stroming kan tijdens stormen stroming over het wantij optreden. Door het ontbreken van geulen vormt het wantij dan een bottleneck voor de stroming. Ter illustratie is het doorstroomoppervlak onder NAP 0 m van drie dwarsdoorsneden rond het wantij onder Ameland berekend en uitgezet in een grafiek (Figuur 5-9). De doorstroomoppervlakte van de dwarsdoorsnede 26, zonder geulen, is zoals verwacht, beduidend kleiner dan de dwarsdoorsneden met geulen.



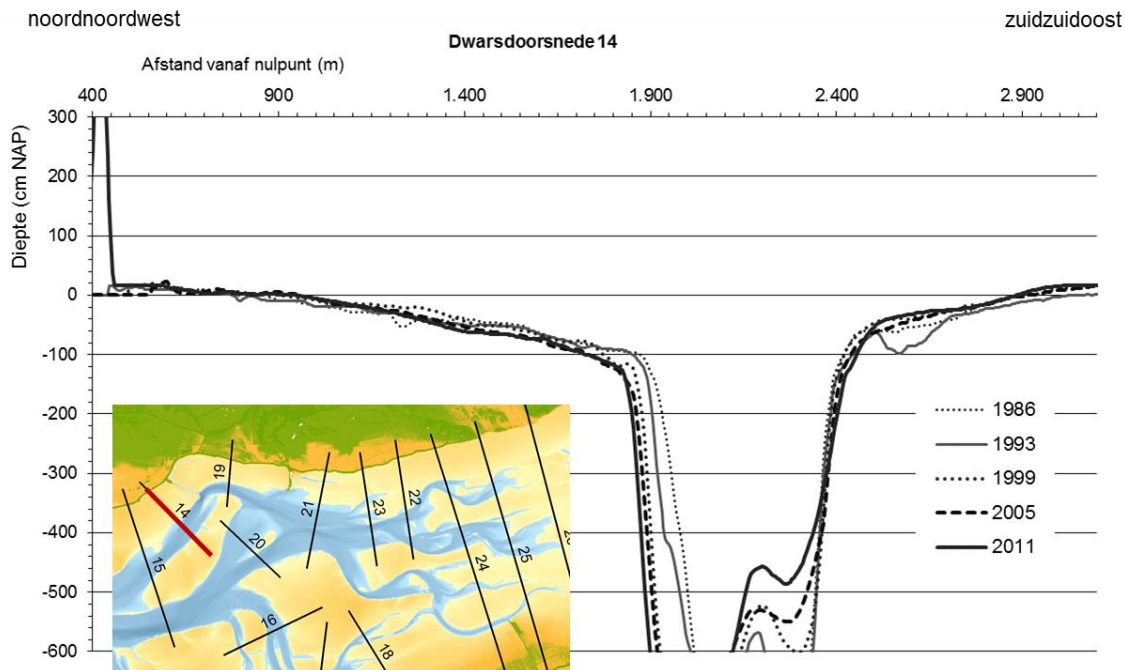
Figuur 5-8 Dwarsdoorsnede 28 over de kombergingsgebieden Vlie, Borndiep en Pinkegat (zie inzet voor locatie).



Figuur 5-9 Dwarsdoorsnedes 24, 25 en 26 (bovenste grafiek) in het Borndiep doorstroomoppervlakte onder NAP 0,0 m (onderste grafiek) (zie inzet voor locatie).

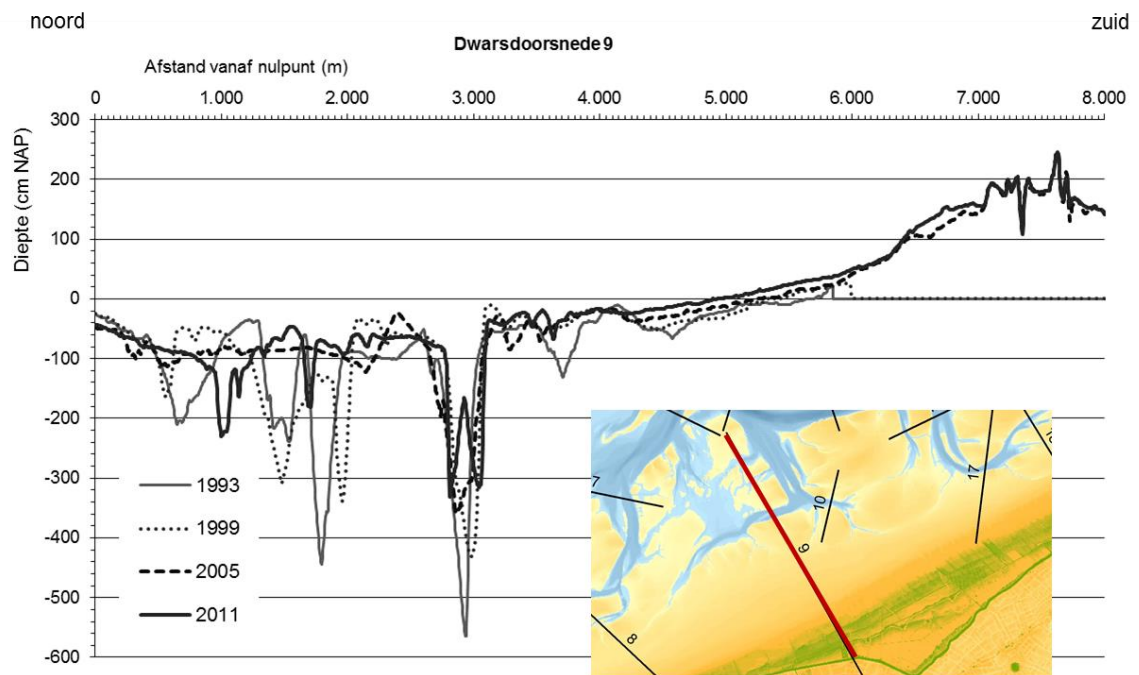
- 5.2.4 D. & E De plaatgebieden die voor de eilandkwelders en de vastelandskwelders liggen; In de dwarsdoorsnedes in Figuur 5-9, die van Ameland naar de Friese kust lopen, is zichtbaar dat de droogvallende platen een soort kuip vormen. De hoogste platen liggen aan de zuidzijde, bij de Friese kust, waar de platen geleidelijk overgaan in kwelders. Ook aan de zijde van Ameland lopen de kwelders geleidelijk omhoog. Dit is in meer detail geïllustreerd voor de dwarsdoorsnede 14 bij de Ameland. Deze plaat loopt vanaf net boven het niveau van NAP 0 m af naar de geul. Het knippunt in het profiel dat de overgang naar de geul markeert, ligt rond de NAP -1,0 m. De vorm van het profiel is een klein beetje 'bol', oftewel convex. Langs de hele zuidkust van Ameland hebben de profielen een vergelijkbare vorm, waarbij de maximale hoogte (aan de landzijde) en de breedte wel enigszins verschillen. De breedte wordt bepaald door de ligging van de geulen. Een duidelijke lijn in de maximale hoogte is niet

herkend. Lokaal liggen er geultjes vlakbij de dijk, die de plaat doorsnijden. Deze geultjes zijn verbonden met de uitwateringssluizen die zoetwater kunnen afvoeren uit de Amelander polders.



Figuur 5-10 Dwarsdoorsnede 14 ten westen van de dam bij de Ballumerbocht (zie inzet voor locatie).

De dwarsdoorsneden van het plaatgebieden dat voor de vastelandskust ligt, hebben allemaal een redelijk vergelijkbare vorm (Figuur 5-9 en Figuur 5-11), met een overgang van geul of plaat rond de NAP -0,5 m. De overgang naar de kwelders ligt rond de NAP + 1,0 m. De vorm van de profielen is vlak, tot licht concaaf ('hol'). De platen worden niet doorsneden door geultjes.



Figuur 5-11 Dwarsdoorsnede 9 bij Friesland buitendijks.

5.2.5 De overige plaatgebieden (X en Y in Figuur 5-1).

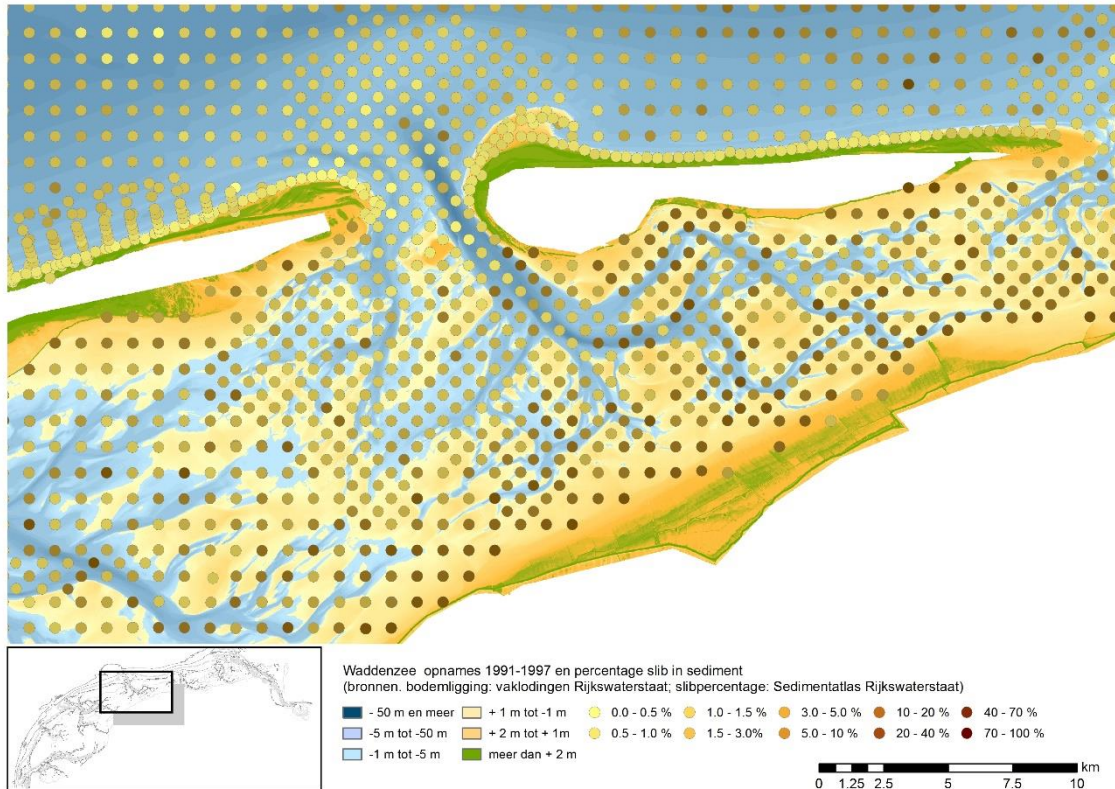
Tussen de hierboven beschreven plaatgebieden liggen twee gebieden een, die niet onder de beschrijving van de andere delen van. De droogvallende platen in deze gebieden liggen wat hoogte betreft tussen de lager liggende wantijgebieden en de hogere plaatdelen. De platen ten zuiden van Ameland bij Y zijn behoorlijk aangesloten en vormen een geleidelijke overgang van de hogere platen naar het wantij. De platen ten zuidoosten van het zeegat bij Y vertonen veel variatie in de hoogteligging, in vergelijking met de andere plaatgebieden. De hogere en de lagere delen zijn gefragmenteerd. Mogelijk hangt dit samen met de relatief grote dynamiek van de geulen in deze omgeving.

5.3 Korrelgrootteverdeling op de platen

Naast variatie in de hoogte en droogvalpercentages verschilt de sedimentsamenstelling van de wadplaten. De verdeling van zand- en slibrijke wadplaten over de kombergingsgebieden is op grote lijnen goed te schetsen, met de slibrijke wadplaten bij het vasteland (slikken) en bij de wantijen en de zandrijke platen dicht bij de zeegaten. Op de schaal van de individuele platen kunnen grote variaties optreden in de zand- en slibrijkdom waarvan de oorzaak vooralsnog minder duidelijk is.

Zoals bij de geulen al aangegeven blijven de grovere korrels voornamelijk in de geul. Bij korrels onder de 160 μm zijn de stroomsnelheden benodigd voor het oppikken van de korrels zodanig hoog dat de korrels na oppikken door het stromende water onmiddellijk gaan zweven in de waterkolom. Dat impliceert dat transport voornamelijk in suspensie plaatsvindt. Gebieden waar dit sediment tot bezinking komt zijn dus per definitie gebieden met lage stroomsnelheden. Het gaat dan vooral om de platen en de achterste delen van de geulen. Op de platen stroomt bij vloed het water uit als het buiten de geuloevers treedt en verliest dan vrij snel haar stroomsnelheid. Bij eb worden de hoogste snelheden pas bereikt als de platen weer droogvallen. Niet alleen de stroming en golven zijn van belang, maar ook de hoeveelheid

sediment die aanwezig is. Door de concentratie van diverse korrelgroottes op een zekere plek in het systeem kan er zeker binnen de suspensielast een overmaat aanwezig zijn in de waterkolom, waardoor het dan wel netto bezinkt ook al is de stroomsnelheid hoog.



Figuur 5-12 Slib percentage van oppervlaktemonsters in het Borndiep. Data Sediment-atlas Waddenzee (RIKZ, 1998).

Voor intergetijdse platen, waar golfinvloeden tot aan de bodem kunnen reiken, levert golfwerking een zeer belangrijke bijdrage. Golfwerking zorgt er vooral voor dat sediment opgewerveld wordt. In combinatie met stroming kan dit leiden tot een verhoogd sedimenttransport, wat gemakkelijk een tienvoud kan zijn van wat er in beweging wordt gezet door stroming alleen. Eysink & Biegel (1993) waren met Postma (1961) van mening dat het sedimenttransport op de platen gedomineerd wordt door golfwerking en dat stroming geen belangrijke rol speelt. Dit strookt echter niet met een aantal waarnemingen:

- 1) De diverse waarnemingen dat de korrelgrootte van de eilanden af, gaande dwars over het wantij afneemt in de richting van het vasteland (Postma, 1954; Kamps, 1962; Flemming & Nyandwi, 1994; Flemming & Ziegler, 1995; sedimentatlas RWS) suggereert dat de getijdestroom ook nog invloed moet hebben op de patronen. Immers: achter de eilanden is veel luwte en zou daarom verwacht mogen worden dat daar de korrelgrootte eerder laag is dan nabij het vasteland. De afname van de korrelgroottes (zie Flemming & Nyandwi, 1994) kan het gemakkelijkst verklaard worden uit settling lag en scour lag effecten (Postma, 1954; Van Straaten & Kuenen, 19xx).
- 2) Bij vergelijkbare delen van het milieu neemt de mediane korrelgroottediameter van het sediment af van west naar oost. Aangezien de wadden oostelijk van Schiermonnikoog minder in de luwte liggen dan de wadden onder Schiermonnikoog en Ameland kan de afname niet verklaard worden met golfinvloed, wel met een langzame sortering over de wantijen en langs de stranden van west naar oost, waarbij ook stroming een rol moet spelen.

- 3) Tijdens stormvloed bepaalt de getij- + windgedreven stroming waar het sediment op de platen heen gaat (Kamps,1962).

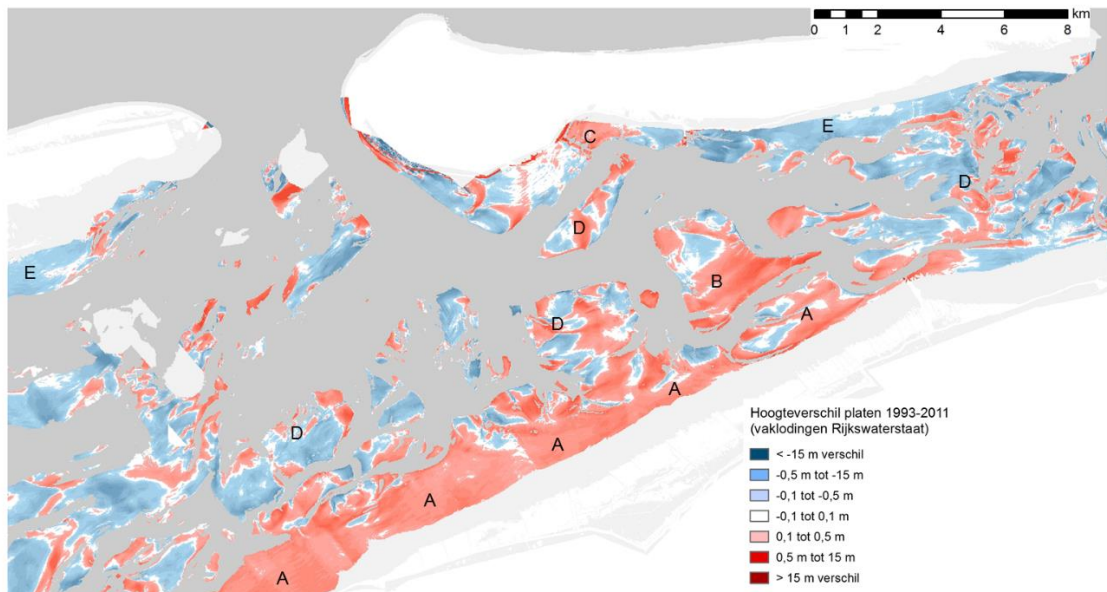
5.4 Autonome ontwikkelingen van droogvallende platen

De hoogteontwikkeling van wadplaten is een constant punt van aandacht in het waddegebied. Dat heeft te maken met de stijging van de zeespiegel en de daling van de ondergrond, waaronder de daling als gevolg van gaswinning. Netto sedimentatie op de wadplaten is nodig om de relatieve stijging van de zeespiegel bij te houden. Op basis van waarnemingen aan de platen in de gehele Waddenzee, modelsimulaties van deze ontwikkelingen en in combinatie met reconstructies van de Holocene kombergingsgebieden uit West-Nederland is vastgesteld dat de wadplaten in staat zijn om mee te groeien met de huidige stijging van de zeespiegel (Oost et al., 1999). Bij deze bepalingen wordt steeds gesproken over de gemiddelde toename van de hoogte van de wadplaten in een kombergingsgebied.

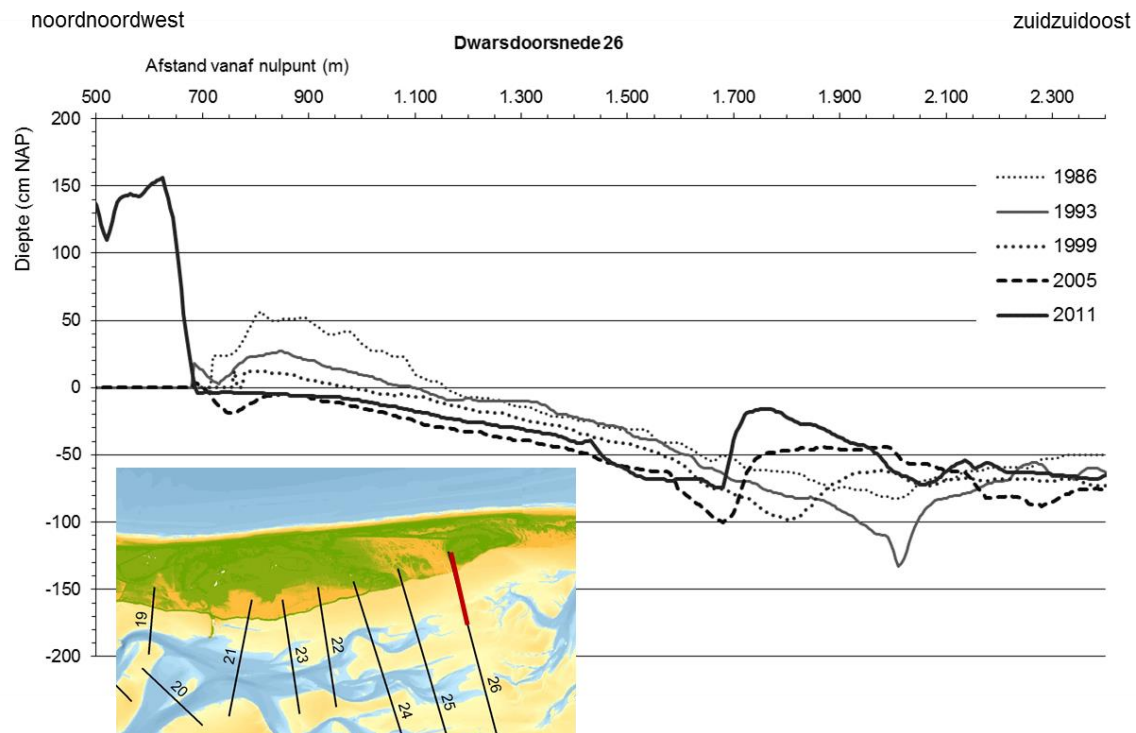
De verandering in de hoogte laat veel verschillen zien, zoals zichtbaar in Figuur 5-13 met het verschil in hoogteligging van alleen de droogvallende platen tussen twee vaklodingen. In de periode van 12 tussen de twee vaklodingen blijkt de hoogte centimeters tot decimeters te verschillen. In de kaart is zichtbaar dat de wadplaten ten noorden van de Friese kust over een groot gebied in hoogte zijn toegenomen (A in Figuur 5-13). In de dwarsdoorsneden van dit gebied is deze toename van de hoogte ook zichtbaar (Figuur 5-9 en Figuur 5-11). Op de Piet Scheveplaat is ook een groot aaneengesloten waar de hoogte is toegenomen (B in Figuur 5-13), net als bij de Ballumerbocht, in de luwte van de dam (C in Figuur 5-13). Veel andere gebieden laten een variatie zien, met gebieden die hoger en gebieden die lager zijn geworden in elkaars nabijheid. (D in Figuur 5-13). Er zijn ook gebieden waarvan de hoogte is afgenomen over een groter gebied, zoals de wadplaten ten zuiden van de eilandkwelders (E in Figuur 5-13). Figuur 5-14 laat de hoogteontwikkeling van de wadplaat ten zuiden van de eilandkwelder bij Ameland zien. In deze dwarsdoorsnede is vooral de afname van de hoogte aan de linkerzijde duidelijk, dit is het gebied voor de kwelderrand.

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

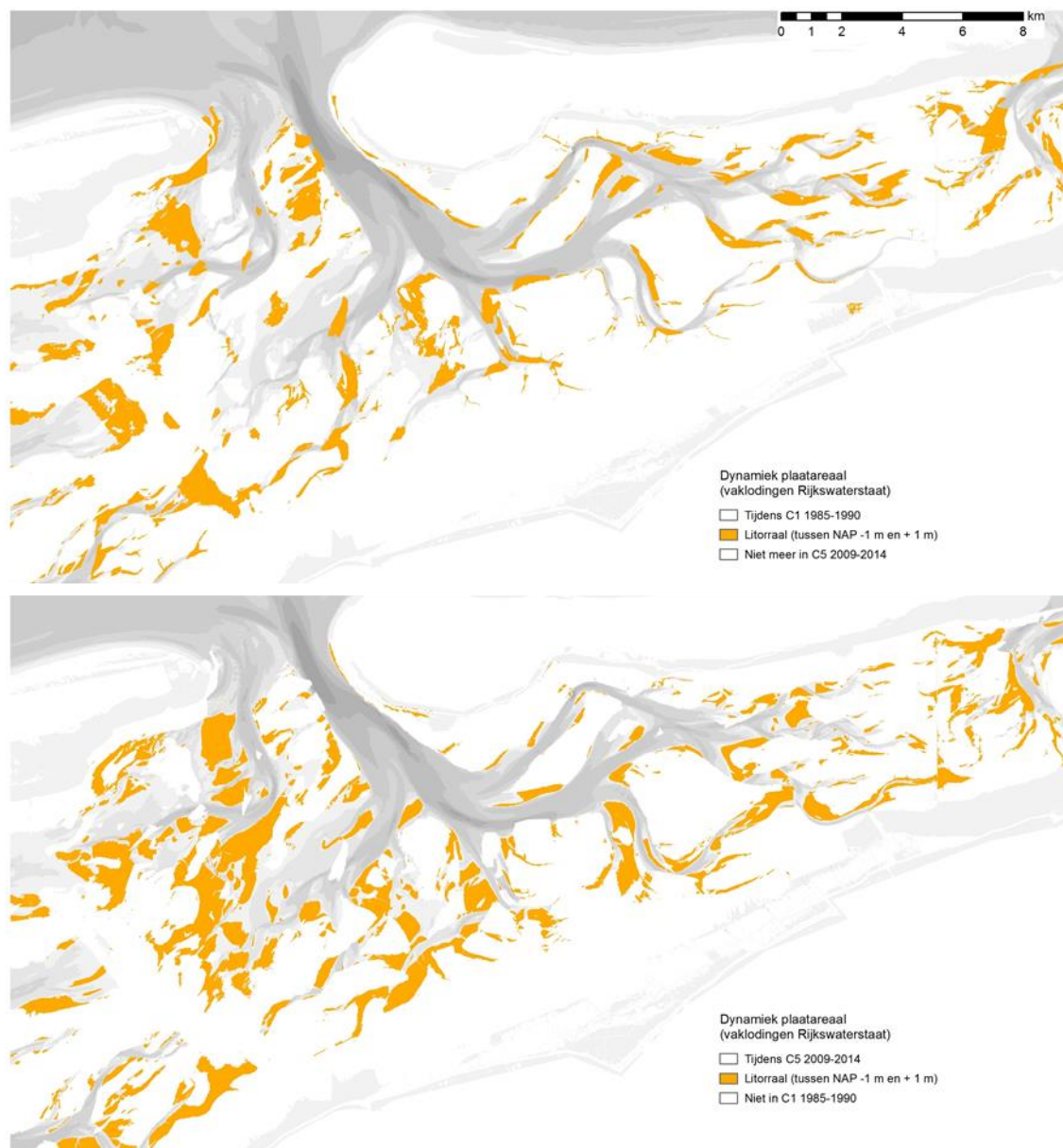
Naast de hoogteverandering van de platen, vindt er ook constante toe- en afname plaats van het areaal van de platen, doordat geulen op de ene plek verplaatsen, of ontstaan, ten koste van de droogvallende platen, terwijl het opvullen van geulen en het verplaatsen ervan op de andere plaatsen weer leidt tot een toename van het areaal droogvallende platen. Figuur 5-15 laat in twee kaarten zien welke delen van het kombergingsgebied in 1986 droogvallende plaat waren, maar dat in 2011 niet waren, en omgekeerd, de delen die in 2011 droogvallende plaat waren, maar dat in 1986 niet waren.



Figuur 5-13 Verschilkaart van de hoogteligging in een periode van 12 jaar, waarbij alleen de droogvallende platen zijn weergegeven. Rood: sedimentatie; Blauw: erosie. Grijs: geulen in één of beide vakclodingen.



Figuur 5-14 Dwarsdoorsnede 26 ter hoogte van het wantij, ten zuiden van de eilandkwelder Neerlands Reid.



Figuur 5-15 Kaarten met de delen van het kombergingsgebied Borndiep die in 1986 nog droogvallende plaat waren, maar in 2011 niet meer (boven) en delen die in 1986 geen droogvallende plaat waren, maar wel in 2011.

Voor de beleidsmakers en de beheerders die te maken hebben met de droogvallende platen in de Waddenzee is het belang van de bovenstaande complexe ontwikkelingen dat de weliswaar gemiddelde netto sedimentatie op de droogvallende wadplaten plaatsvindt, maar dat dit niet betekent dat de lokale ontwikkeling van een plaat heel anders kan verlopen. Erosie van platen vindt dan nog steeds plaats. Ontwikkelingen die specifiek van belang zijn voor de beheerders van kabels en leidingen zijn trendmatige veranderingen in de hoogte van de wadplaten rond het wantij. Aan de Amelandzijde van het wantij heeft een verlaging van het wad plaatsgevonden (Figuur 5-14), wat betekent dat de bedekking van de aanwezige kabels en leidingen is afgenomen. Aan de landzijde heeft een structurele toename van de hoogte plaatsgevonden, wat betekent dat de bedekking is toegenomen. In het midden lijkt geen sprake te zijn van structurele veranderingen (Figuur 5-9).

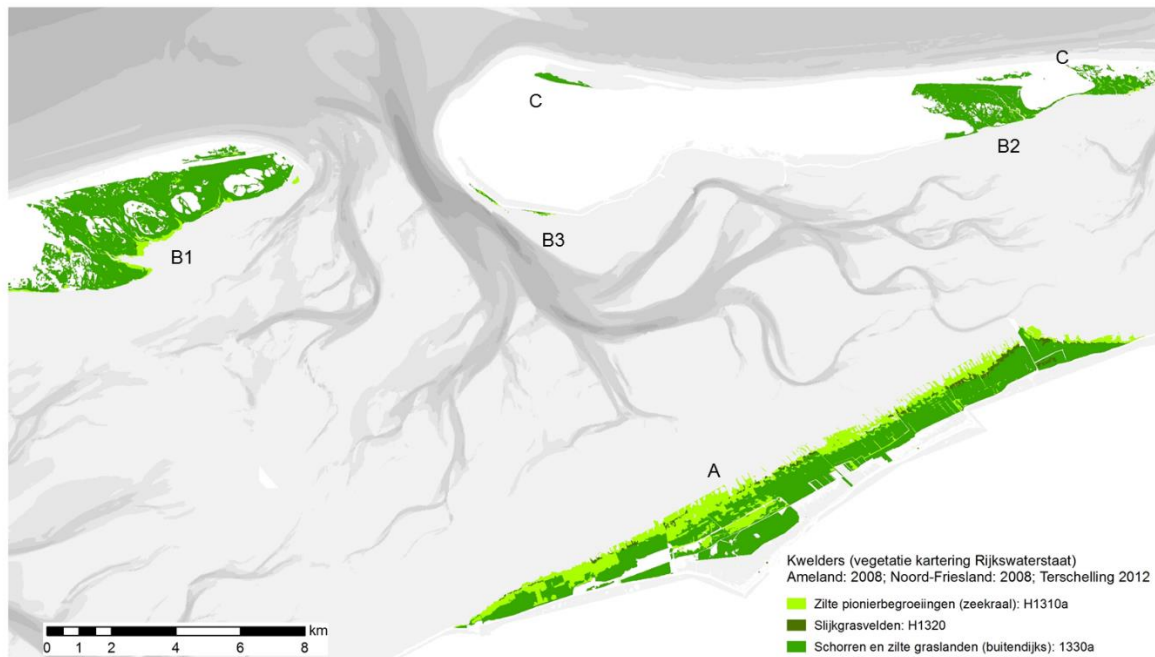
6 Kwelders

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de kwelders. Kwelders zijn die gebieden in de wadden die begroeid zijn met kruiden, grassen of lage struiken die regelmatig (gemiddeld 5 keer per jaar of vaker) worden overstroomd door zout of brak water (Adam 1990). De kwelders in de Waddenzee strekken zich uit van het bovenste gedeelte van het intergetijdengebied tot en met waar stormvloedrekeningen reiken. In 6.2 worden de belangrijkste definities besproken. Kwelders hebben een belangrijke ecologische functie en vertegenwoordigen specifieke ecotopen. Ook hebben ze een functie voor de veiligheid in het Waddengebied door tegengaan van de vorming van golven en een bijdrage aan het dempen van de golfaanval op de erachter liggende dijken (Venema et al., 2012).

In het Waddengebied zijn drie soorten kwelders aanwezig, namelijk:

- A. De vastelandskwelders, die voor de vastelandsdijken liggen (A in Figuur 6-1). Dit zijn tegenwoordig voornamelijk kwelders die ontstaan zijn door de aanleg en het onderhoud van de kwelderwerken. De kwelderwerken (vroeger landaanwinningswerken) omvatten verschillende maatregelen die tot doel hadden de aanwas en kweldervorming te bevorderen, waarvan de bekendste de rijzenhoutenschermen zijn, maar waar ook greppelen en beweiding toe behoren. De bevordering van kweldervorming nam vooral vanaf de jaren '30 van de vorige eeuw een grote vlucht.
- B. De eilandkwelders aan de Waddenzeezijde. Dit zijn vrij natuurlijke kwelders welke zich vormen in de luwte van de duinen. De meeste kwelders zijn ingedijkt en omgezet in polders. Daardoor zijn er in het gebied van het Borndiep nog een tweetal grote kwelders van dit type over en een zeer kleine:
 - De deels beweide en deels onbeweide kwelder van de Boschplaat (B1 in Figuur 6-1).
 - De beweide kwelder in Neerlands Reid, westelijk van de Oerderduinen op Ameland (B2 in Figuur 6-1).
 - Het kleine kweldertje van de Fugelpolle, aan de zuidwestzijde van Ameland (B3 in Figuur 6-1).
- C. De eilandkwelders aan de Noordzeezijde zoals ze voorkomen in Sluifers, washoveropeningen en op groene stranden (C in Figuur 6-1). Deze vallen buiten het bestek van dit rapport en worden verder niet besproken.



Figuur 6-1 Kaart met de kwelders rond het kombergingsgebied Borndiep.

De beleids- en beheervraagstukken rond de kwelders zijn weergegeven in Tabel 8. Voor de natuurfunctie van het waddengebied zijn de ontwikkelingen van de arealen van belang. De arealen veranderen door aangroei en afslag van de kwelders, maar ook door veranderingen in de vegetatie. De veranderingen in de vegetatie hangen deels samen met de veranderingen van de hoogte en de waterstanden en zijn deels autonoom, door de opeenvolging (successie) van verschillende vegetatietypen. In dit rapport worden vooral de morfologische componenten van deze ontwikkelingen beschouwd.

Tabel 8 Overzicht van de belangrijkste beleids- en beheervraagstukken rond de kwelders.

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

De intensiteit van het gebruik en beheer van de kwelders is, in vergelijking met de andere delen van het gebied relatief hoog. Een deel van de kwelders wordt een deel van het jaar gebruikt voor beweiding. De kwelderwerken beslaan een groot deel van de vastlandskwelders, er zijn bestortingen aangebracht langs de kwelderrand bij het Neerlands Reid en bij de Feugelpolle zijn verschillende ingrepen gepleegd die zijn gericht op het behoud en de versterking.

6.2 Definities

Kwelders zijn de begroeide hogere delen van het waddengebied. In Figuur 6-2 zijn in een schematische dwarsdoorsnede de verschillende onderdelen van de kwelder benoemd, waarbij ook de relatie met de waterstanden is aangeduid.

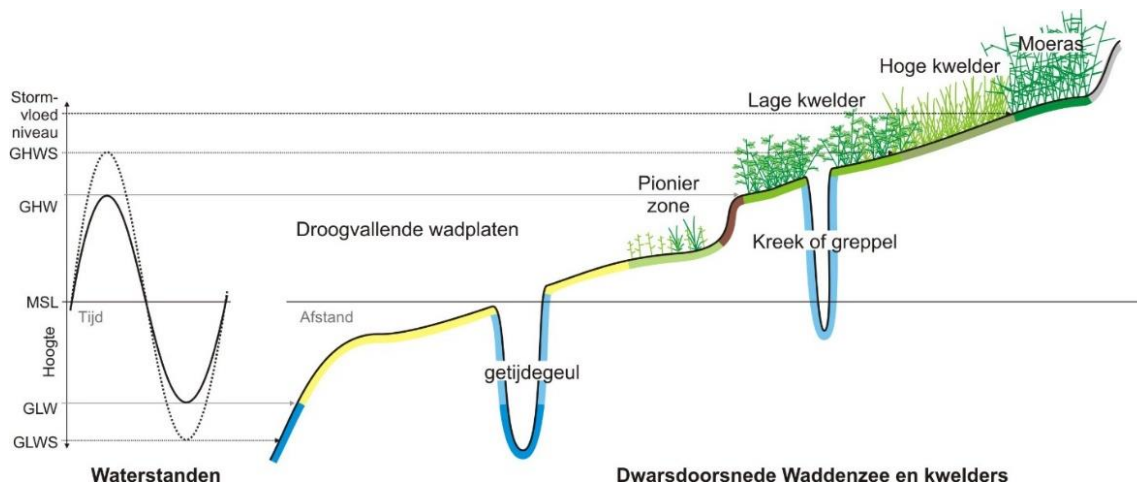
Pionierzone: De pionierzone, of pionierkwelder wordt gevormd door de hoogste delen van het wad, die vrijwel ieder hoogwater onder water staan. Hier vestigen zich typische soorten van de pionierkwelder, zoals zeekraal (*Salicornia*) en slijkgras (*Spartina*).

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

Hoge kwelder: De hoge kwelder wordt enkele malen per jaar overstroomd door zoutwater en heeft een niveau vanaf gemiddeld hoogwater bij springtij tot aan het stormvloedniveau (hier de waterstand die gemiddeld 1 tot 5 keer per jaar wordt bereikt). Hier groeien planten zoals russen (*Juncus*).

Kreken of greppels: In kwelders zijn geultjes aanwezig die de kwelder ontwateren (bij eb) en van water voorzien (bij hoge waterstanden). In kwelders met een natuurlijke oorsprong wordt gesproken over kreken, in kwelders die zijn ontstaan onder invloed van menselijke ingrepen zijn dit vaak gegraven greppels.

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



Figuur 6-2 Schematische dwarsdoorsnede van een kwelder met voorliggende wadplaat en de verschillende eenheden.

Naast deze indeling, die is gebaseerd op de relatieve hoogte van de kwelders, zijn er ook indelingen die zijn gebaseerd op de kenmerkende vegetatie. Bij de kartering die door Rijkswaterstaat is uitgevoerd van de kweldervegetatie zijn de classificaties Salt97 (de Jong et al., 19989, tot en met 2007) en Salt08 (vanaf 2008) gehanteerd (Reitsma, 2012). Voor de ecotopenkaart wordt de classificatie uit ZES gehanteerd (Bouma et al, 2005). De indeling van de Natura2000 en de habitatkaarten volgt de profielbeschrijvingen van de habitattypen (Ministerie van EZ, 2012). De kweldervegetatiekaart kan met een vertaaltabel worden omgezet naar een vegetatiezoneringskaart, een vegetatiestructuurkaart, een Habitattypenkaart en een KRW-zoneringskaart.

6.2.1 Morfologische ontwikkelingen

De ontwikkeling van kwelders wordt op hoofdlijnen bepaald door hydrodynamica, sedimentaanbod, relatieve zeespiegelstijging en de huidige toestand van de kwelder. De ontwikkeling van de vegetatie vindt plaats met enige vertraging (Dankers et al. 1987). In Figuur 6-3 zijn de morfologische ontwikkelingen van kwelders schematisch weergegeven en deze worden hieronder toegelicht.

1. Erosie van het kwelderklif

Op de overgang van de pionierzone naar de (lage) kwelder kan erosie plaatsvinden. Deze afname van het kwelderareaal is een richtingsverkeer, uitbouw van de kwelder vindt niet vanaf de rand plaats. De belangrijkste factor die de erosie bepaalt is de golfaanval die op de kwelderrand plaatsvindt. De hoogte en breedte van de wadplaten of de pionierkwelder voor het kwelderklif zijn hiervoor van belang, zie hiervoor punt 3.

2. Verhoging of verlaging van de kwelder.

Verhoging of verlaging van de kwelders, inclusief de pionierkwelder vindt plaats over het gehele areaal van de kwelder. De richting van het proces is afhankelijk van de balans tussen de netto aan- dan wel afvoer van sediment en de inklinking van de kwelderbodem. Over het algemeen is sprake van netto aanvoer van sediment (slib en zand) naar kwelders, als de kwelders overstromen. Het door de stroming meegevoerde sediment blijft grotendeels achter op de kwelder, geholpen door de aanwezige vegetatie. Tussen de plantenstengels zijn de stroomsnelheden laag, zodat veel van het sediment op de kwelder kan bezinken. In situaties waarbij de vegetatie sterk verstoord of afwezig is, of in situatie waar de aan- en afvoer van het water sterk verstoord is, kan de balans tussen de aan- en afvoer van sediment omslaan en kan sprake zijn van erosie. De hoogtetoename bij netto sedimentatie is afhankelijk van de aanvoer van het sediment en van de bodemdaling (zie punt 4) en de inklinking van het kweldersediment. In natuurlijke kwelders is sprake van ruimtelijke differentiatie van de sedimentatie, die samenhangt met de afstand tot de kreek en kreekjes. In kwelderwerken is ook sprake van ruimtelijke differentiatie die samenhangt met de afstand tussen wad en kwelder.

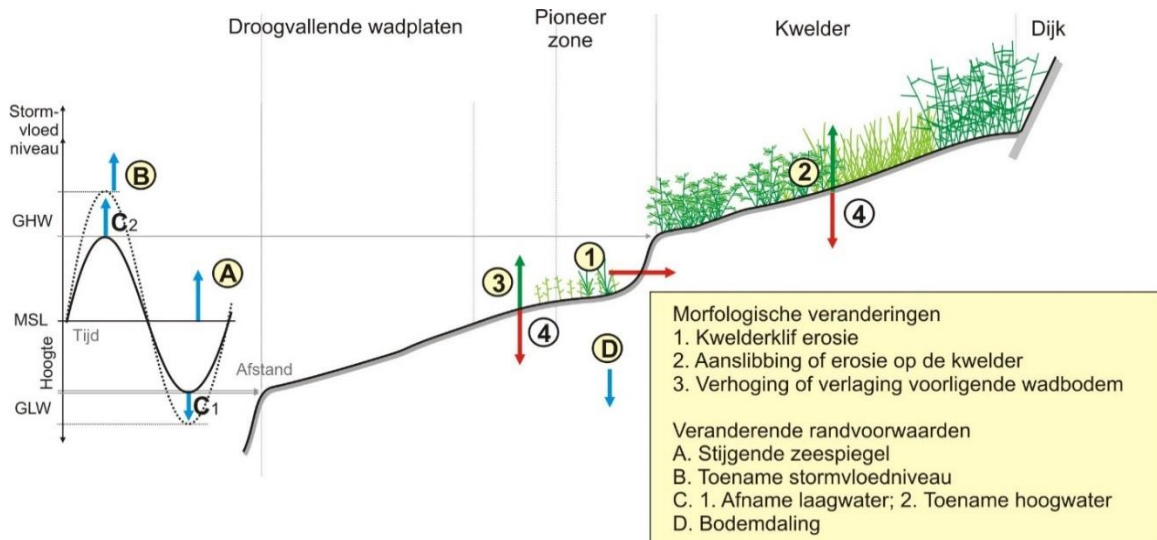
3. De verhoging dan wel verlaging op de voorliggende droogvallende platen

De verhoging dan wel verlaging op de voorliggende droogvallende platen is zowel van belang voor de eventuele erosie van het kwelderklif, als voor de mogelijke doorontwikkeling van hoge wadplaat naar pionierzone. Of verhoging, dan wel verlaging plaatsvindt, is afhankelijk van de netto sedimentatie of erosie die in de loop van de tijd plaatsvindt op de wadplaten. De factor tijd is hierbij van belang, omdat van seizoen tot seizoen verschillen optreden in de hoogte van de wadplaten. In de relatief rustige (zomer)maanden wordt een laag slibrijk, maar niet erg stevig sediment opgebouwd op de wadplaten (dikte tot 1 dm), die in de onrustige maanden door golfwerking tijdens stormen wordt opgeruimd. Voor de daadwerkelijke verhoging of verlaging moeten meerdere jaren worden beschouwd. De netto verhoging of verlaging van de wadplaten verschilt in het kombergingsgebied van het Borndiep, met aan de vastelandszijde voornamelijk verhoging en voor de eilandkwelders voornamelijk verlaging (paragraaf 5.4).

4. Bodemdaling

Bodemdaling is de term die wordt gebruikt voor de daling van de diepere ondergrond (dit in tegenstelling tot inklinking of compactie van het ondiepe deel van de bodem). Hiervoor wordt ook wel de term Pleistocene bodemdaling gebruikt, omdat het Pleistocene pakket op veel plekken in de Nederlandse ondergrond het eerste stevige (zand)pakket vormt. De bodemdaling bestaat uit twee componenten, namelijk de tektonische bodemdaling waar heel noordwest Nederland mee te maken heeft en die samenhangt met de grootschalige en

extreem langjarige geologische ontwikkeling van Nederland en de regionale bodemdaling door gaswinning. De tektonische bodemdaling is onderdeel van de relatieve zeespiegelstijging en dat is de zeespiegelstijging die wordt beschouwd als randvoorwaarde. In het kombergingsgebied van het Borndiep vindt onder de eilandkwelder Neerlands Reid op Ameland bodemdaling plaats door de gaswinning Ameland (Begeleidingscommissie Bodemdaling Ameland (2017)).



Figuur 6-3 Schematische dwarsdoorsnede van een kwelder met morfologische veranderingen en randvoorwaarden.

De bovengenoemde ontwikkelingen kunnen elkaar cyclisch afwisselen, waardoor kliferosie en aangroei van kwelders elkaar afwisselen (Van de Koppel et al. 2005). De morfologische ontwikkelingen kunnen ook gelijktijdig op dezelfde kwelder plaats vinden (Van Wesenbeeck et al. 2014). Daar waar de wadplaten hoog genoeg worden, ontstaat de mogelijkheid voor de vestiging van pioniervegetatie zoals *Salicornia sp.* en *Spartina sp.*. De aanwezigheid van de vegetatie beïnvloedt de stroming en golfcondities, zodat slib makkelijker kan bezinken en minder snel wordt geërodeerd en de pionierkwelder toeneemt in hoogte. Eerst breiden zich dan plantensoorten van de lage kwelder uit. Bij doorgaande ophoging vestigen zich soorten van de midden- en hoge kwelderzones. De vestiging van vegetatie zorgt ervoor dat de stroming zich verder concentreert, waardoor meer krekken zich vormen (Van Straaten, 1964; Temmerman et al., 2007). De ophoging leidt ertoe dat de overstromingsfrequentie geleidelijk vermindert, de sedimentatie afneemt en de vegetatieontwikkeling minder direct gestuurd wordt door abiotische processen. De biologische mechanismen, zoals competitie tussen soorten, worden dan sturend in het bepalen van de structuur van de plantengemeenschappen (Bertness 1991).

6.2.2 Krekken, oeverwallen en kommen

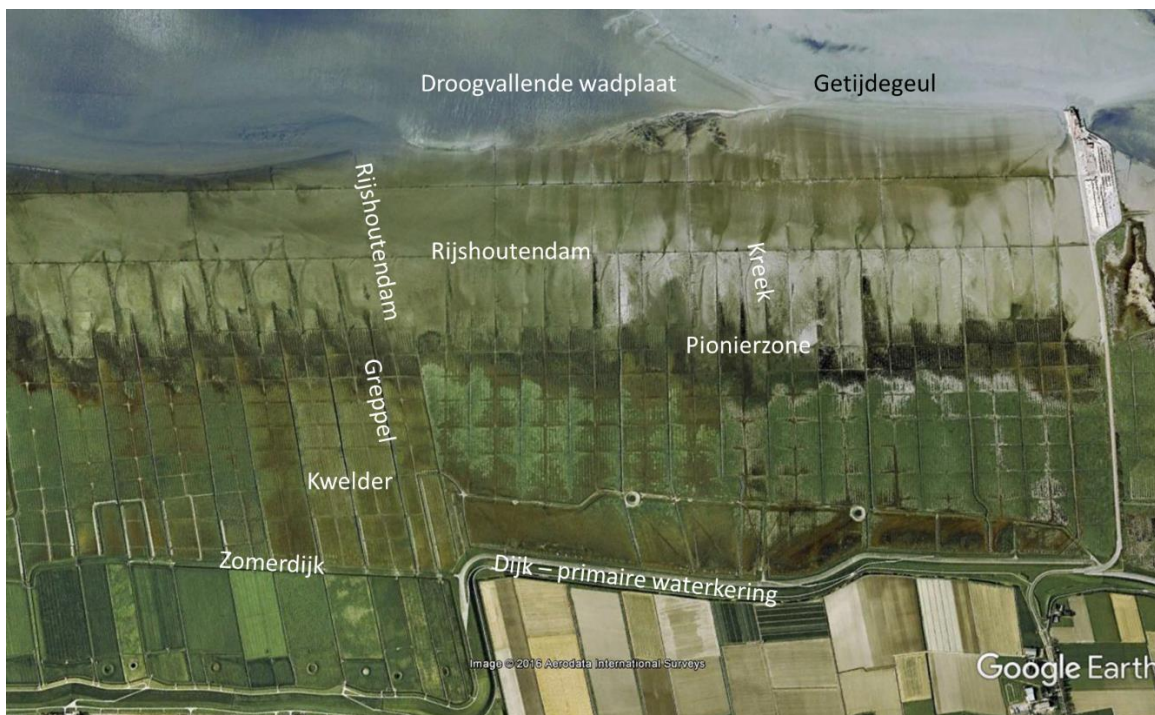
Krekken vormen een belangrijk onderdeel van de kwelders, vanwege hun rol bij de aan- en afvoer van water en sediment. Tijdens hogere getijden en stormvloeden treden grote stroomsnelheden op in de krekken, waarbij sediment in suspensie wordt gebracht en de kwelder opgevoerd wordt. Zodra water over de kreekrand op de kwelder uitstroomt, neemt de stroomsnelheid drastisch af zodat het grootste deel van het sediment dicht bij de kreek tot afzetting komt (Stumpf 1983, Temmerman et al. 2003). Daarbij kan aan weerszijden van de kreek een oeverwal ontstaan (Esselink et al. 1998), die fijnkorreliger wordt verder van de kreek. De kwelderhoogte neemt vanaf de kreek af door de afnemende laagdikte van de afzettingen en doordat fijner sediment meer inklinkt. Iets soortgelijks gebeurt er in

landwaartse richting, waarbij ook een groot deel van het sediment bezinkt op de kwelderrand (Temmerman et al. 2003). Dit leidt tot een sterkere ophoging van de zeekant en minder verder landwaarts (Stock 2011, Suchrow et al. 2012), waarbij in deze richting ook het aandeel klei in de bodem toeneemt (De Groot et al. 2011). Dit leidt in combinatie met klink van klei tot een kwelderprofiel met een kom die lager ligt dan het zeewaartse gedeelte.

In tegenstelling tot geulen en prielen in de het wad zijn krekken in de kwelders weinig dynamisch. Als de kwelder hoger wordt kunnen de krekken zich naar achteren steeds verder insnijden, waardoor het krekkenstelsel zich uitbreidt (French and Stoddart 1992, Allen 2000). Verder worden de krekken dieper door insnijding in de ondergrond en ophoging van het kwelderoppervlak (Allen 2000). Als de kwelder zo hoog wordt dat er minder water boven komt te staan, slibt een deel van de krekken weer dicht (Allen, 2000). Kreekpatronen verschillende per kwelder. Bij de vastelandskwelder is een deel van de kreekpatronen vastgelegd door de openingen in de rijshouten en door het aanleggen en onderhouden van greppels.

6.3 Vastelandskwelders

De kwelderwerken langs het vasteland van het kombergingsgebied van het Borndiep bestaan uit gegraven greppels en watergangen in plaats van natuurlijk gevormde krekken (Figuur 6-4), met ongeveer tweemaal zoveel "kreek"-oppervlakte als een natuurlijke kwelder (Reents et al. 1999). Wanneer de greppels niet onderhouden worden, slibben de greppels het verste van het inlaatpunt dicht. De greppels het dichtste bij de hoofdleiding diepen juist uit.



Figuur 6-4 Overzicht van de vastelandskwelder ten westen van de veerdam bij Holwerd, met de namen van de verschillende onderdelen.

Huidige situatie beheer

Aanvankelijk was het uiteindelijke doel inpoldering van de aangewonnen kwelders en de slikvelden. Daarna zijn er 3 nieuwe doelen voor de landaanwinningswerken bijgekomen:

1. Voldoen contractuele verplichtingen met de oevereigenaren (o.a. streven naar 300 m beweidbare kwelder).
2. Gebruik van kwelders als onderdeel van de kustbescherming, opgevat als handhaving van omvang van het voorland voor de zeedijk (1969).
3. Bescherming en herstel van de natuurlijke waarden (1980).

Voor het beheer van de kwelderwerken door Rijkswaterstaat wordt nu het volgende streefbeeld gehanteerd (Dijkema et al. 2013):

- Handhaving huidig areaal vastelandskwelders binnen de kwelderwerken;
- Natuurlijke ontwikkeling van de kwelders: door via beheer het zoveel mogelijk benaderen van een natuurlijke kwelderstructuur. Voorwaarden zijn behoud van de huidige oppervlakte en een zo gering mogelijk ruimtebeslag op het voorliggende wad;
- Verbeterde natuurlijke vegetatiestructuur, inclusief de pionierzone, inclusief de bijbehorende natuurlijke dynamiek.



Figuur 6-5 Blik op de vastelandskwelders vanaf de Veerdam Holwerd naar het westen.

Rijshoutdammen

De afgelopen 25 jaar is veel aandacht besteed aan een optimalere rol van de rijshoutdammen voor de bescherming van de kwelder en pionierzone (Dijkema et al. 2013). In Friesland is het damonderhoud in het westelijke deel (ca. van Zwarte Haan tot Nieuwe Bildtzijl) gestopt vanwege de extreem snelle opslibbing. De huidige trend is dat extra uitbreiding van bezinkvelden op het wad nu is gestopt maar dat de bezinkvelden liggend in de pionierszone en kwelder nog wel worden onderhouden, voornamelijk daar waar erosie plaats

vindt. Er is dus nog steeds weinig ruimte voor erosie en afbrekende processen. Vanwege de gewenste natuurlijke dynamiek is flexibiliteit nodig. Het kwelderareaal binnen de Friese kwelderwerken is de laatste decennia met ca. 50% gegroeid, terwijl het in Groningen vrij stabiel is. De instandhouding van de rijshoutdammen in Friesland is daarom in 2010 aangepast:

1. Behoud van de kweldervegetatie door een strikte bescherming van de pionierzone tot ca. GHW –50 cm zeewaarts d.m.v. de huidige dammen loodrecht op de kust, met een damhoogte van GHW + 30 cm.
2. Flexibel onderhoud van de rijshoutdammen evenwijdig aan de kust, afhankelijk van de ontwikkeling van de arealen kwelder- en pioniervegetatie na het jaar 2000. (Dijkema et al. 2013).

Vermindering van grondwerk en onderhoud aan ontwateringssysteem

De oorspronkelijke kunstmatige ontwatering werd toegepast, omdat het de vegetatieontwikkeling versnelde en daarmee ook de opslibbing bevorderde. Omdat de hoofddoelstelling veranderde van "landaanwinning" naar "vergroten natuurlijkheid" is overal in de internationale Waddenzee het onderhoud aan hoofdleidingen, dwarssloten, greppels en gronddammen verminderd of zelfs gestopt (Dijkema et al. 2013). De conclusie was dat grondwerk in de zin van het regelmatig (her)graven van greppels volgens een vast patroon niet zonder meer tot de meest optimale ontwikkeling van de vegetatie leidt, met name voor de pionierzone.

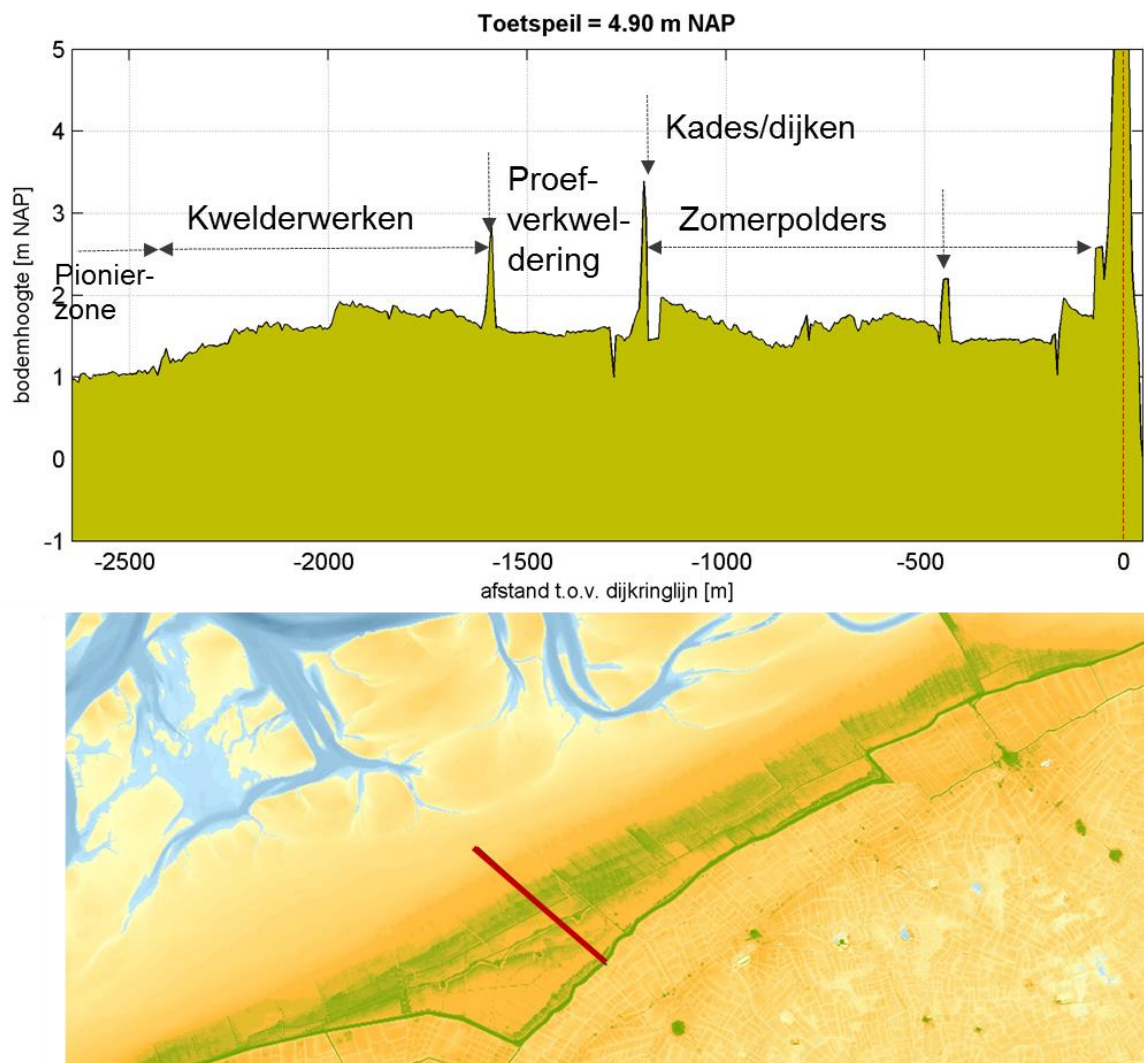
Beweiding en begrazing

Rond 1980 waren in de Friese kwelderwerken twee uitersten in beweiding aanwezig, intensieve beweiding of geen beweiding, waardoor de vegetatie weinig divers was. De beweiding vond plaats op brede kwelders in combinatie met de aangrenzende zomerpolders met dobbes waardoor het vee tevens hoogwatervluchtplaatsen had. Na 2000 is in de Friese kwelders door een verminderde beweiding en voortgaande opslibbing de climaxvegetatie met Zeekweek sterk in een langzaam tempo toegenomen, waardoor de variatie van de kweldervegetatie is afgenomen.

Kwelderherstelprojecten

Het gebied Friesland Buitendijks ligt, zoals de naam al aangeeft, aan de waddenzeezijde van de dijk die de primaire waterkering vormt. In het gebied liggen verschillende lagere kades en dijken, zoals zichtbaar is in de dwarsdoorsnede in Figuur 6-6. Het gebied is onder te verdelen in drie zones, die zijn aangegeven in de dwarsdoorsnede in Figuur 6-6. De drie zones zijn het zeewaarts deel met kwelderwerken, het middengebied met verkweldering en het landwaartse deel dat in gebruik is als zomerpolder. De dijken en kades zorgen ervoor dat de meest landwaarts gelegen delen alleen bij zeer hoge waterstanden kunnen overstromen. Naar deze zomerpolders wordt dan ook vrijwel geen sediment aangevoerd. Omdat er geen sedimentatie plaatsvindt, maar wel klink, neemt de hoogte van de zomerpolders af, zodat de meest landwaarts gelegen delen tegenwoordig lager liggen dan de huidige kwelder.

In het gebied met de proefverkweldering zijn opnieuw verbindingen met de Waddenzee gecreëerd (Proefverkweldering Noorderleech (uit Esselink e.a., 2015)). Het gebied wordt daardoor frequenter geïnundeerd met zout water, zodat opnieuw kweldervegetatie kan ontwikkelen. Het project is nauwgezet gemonitord (Esselink et al, 2015)



Figuur 6-6 Dwarsdoorsnede door de kwelders van Friesland Butendyks (op basis van het AHN hoogtebestand).



Figuur 6-7 Proefverkweldering Noarderleech (uit Esselink e.a., 2015)

Evaluatie huidige situatie vastelandskwelders

Vastelandskwelders werden vroeger bij voldoende hoogte ingepolderd, waardoor oude kwelders bijna een zeldzaamheid waren. Tegenwoordig laten bijna alle kwelders een vegetatieontwikkeling zien in de richting van een eindfase van de successie.

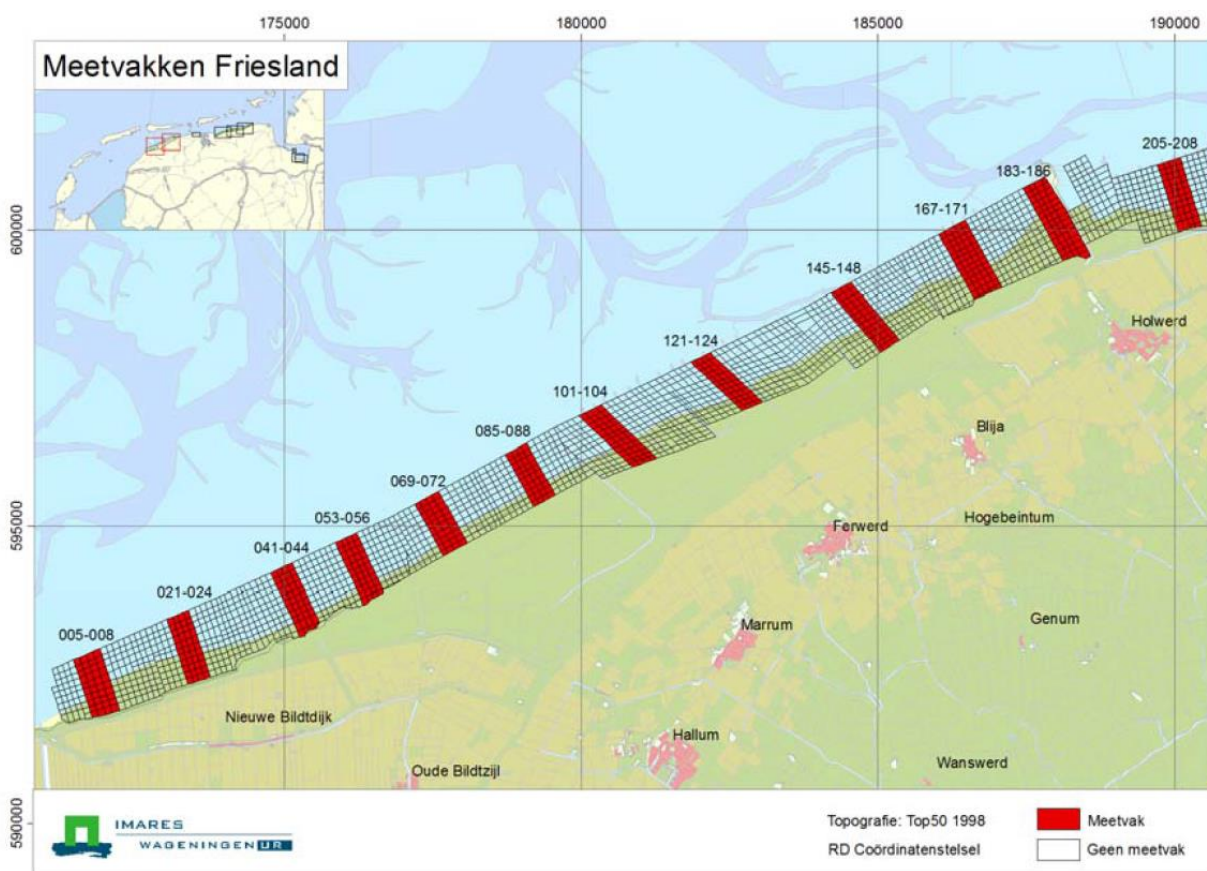
De ontwikkeling van de Friese en Groninger kwelderwerken wordt als sinds lange tijd gemeten (onderdeel van het WOK- programma: Werkgroep Onderzoek Kwelderkwelder) en over de ontwikkelingen wordt al sinds lange tijd gerapporteerd. De meest recente rapportage is uit 2016 (van Duin e.a., 2016) en omvat de periode van 1960 tot 2014. Een overzicht van de meetvakken van de Friese kwelders staat Figuur 6-8.

De samenvattende resultaten van de ontwikkelingen na 1992 van Van Duin e.a., 2016 in termen van de hoogtetoe name ten opzichte van NAP zijn opgenomen in Tabel 9. Uit deze tabel wordt duidelijk dat de hoogtetoe name van de kwelderzone in de Friese meetvakken meer dan één cm per jaar bedraagt, ook in de meest recente periode. De hoogtetoe name in de pionierzone verschilt van die op de kwelder. Bij de Friese kwelderwerken is de hoogtetoe name in de pionierzone stelselmatig groter dan op de andere kwelders. Een van de verklaringen is dat de beschikbaarheid van sediment dermate groot dat hoge sedimentatiesnelheden mogelijk zijn. Ook op de wadplaten voor de kwelderwerken vindt consequent sedimentatie plaats.

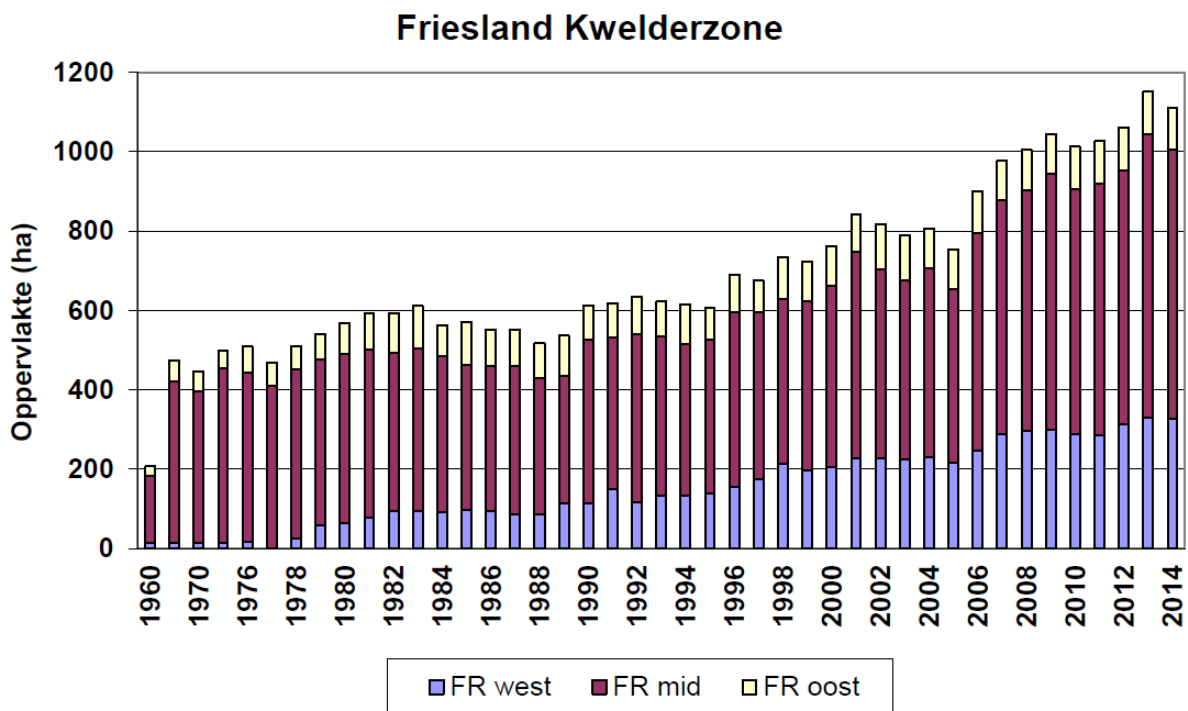
Ook de ontwikkeling van de arealen wordt gerapporteerd in van Duin (2016). In Figuur 6-9 is de ontwikkeling van het areaal kwelders in de Friese kwelderwerken weergegeven op basis van extrapolatie van de meetvakken, waarbij duidelijk sprake is van een overall toename van het areaal, die doorloopt tot de meest recente opname.

Tabel 9 Gemiddelde hoogte toename in cm/jaar ten opzichte van NAP (dit wordt de gemiddelde bruto-opslibbing genoemd) op basis van de meetvakken (uit van Dijk e.a., 2016).

Friese meetvakken	3 ^e bezinkveld onbegroeid	2 ^e bezinkveld onbegroeid	2 ^e bezinkveld pionierzone	1 ^e bezinkveld kwelderzone
1992-2000	-0.1	1.2	2.1	1.6
2000-2008	0.6	0.6	2.2	1.9
2008-2014	0.4	0.7	2.0	1.6



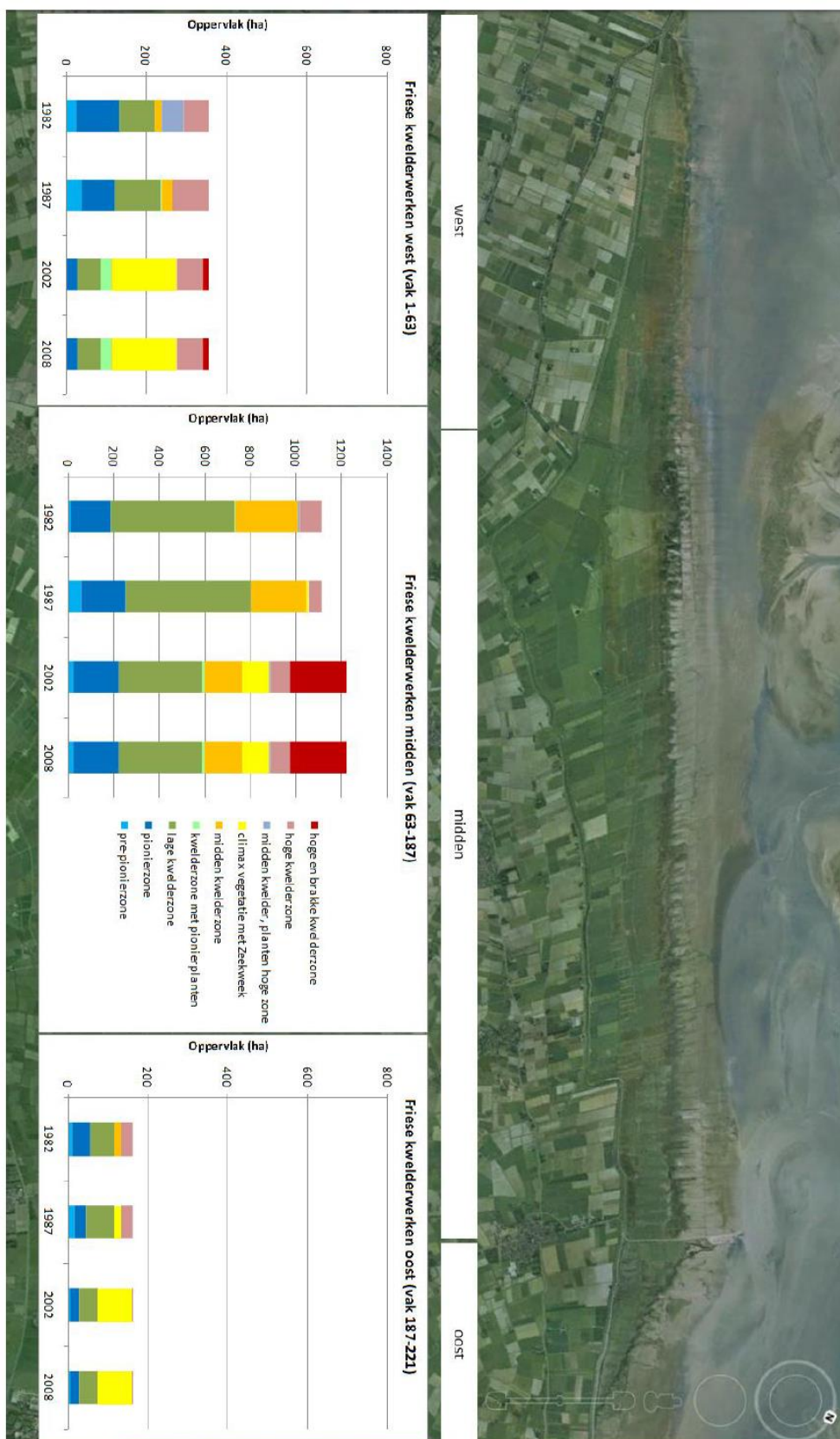
Figuur 6-8 Kwelderwerken en meetvakken in de Friese kwelders (uit Duin et al., 2016).



Figuur 6-9 Grafiek met het areaal van de kwelderzone in de Friese kwelderwerken op basis van extrapolatie van de meetvakken uit Van Duin et.al. (2016).

In Wesenbeeck et al (2014) is de huidige situatie in de vastelandskwelders van de Friesland, grotendeels liggende in het kombergingsgebied van het Borndiep, geëvalueerd. Daartoe zijn negen zones gedefinieerd; climaxvegetatie met Zeekweek of Riet, hoge kwelder, midden kwelder met planten hoge zones, midden kwelder, kwelderzone met pionierplanten, lage kwelder, pionierzone en prepionierzone gebaseerd op de VEGWAD vegetatietypologie (van Wesenbeeck, 2015). Per deelgebied (Figuur 6-10: Friesland west, midden, oost) is gekeken naar het areaal van elk type in elk jaar. De conclusies waren dat:

- Het totale kwelderareaal in Friesland niet onder de 1500 ha komt.
- In deelgebied Friesland west het areaal pionierzone en pre-pionierzone vrijwel geheel verdwijnt na 2002, door successie.
- Langs Het Bildt (Friesland west) en het Noorderleeg (Friesland midden) het areaal kwelderzone met pionierplanten (Zeekraal en/of Schorrenkruid) na 2002 is toegenomen van in totaal 50 ha naar 334 ha, zowel in de kwelderwerken als in de verkwelderde zomerpolder.
- In deelgebied Friesland west het areaal climaxvegetatie van Zeekweek tussen 2002 en 2008 is gehalveerd, als gevolg van beweiding.
- In deelgebied Friesland midden de climaxvegetatie van Zeekweek tussen 1987 en 2002 is toegenomen. Deze toename is een gevolg van natuurlijke successie door de combinatie van voortgaande opslibbing en een afnemende beweiding. Daarna is het areaal tot 2008 stabiel gebleven.
- ??



Figuur 6-10 Verdeling van kwelderzones in 1982, 1987, 2002 en 2008 in kwelders in west, midden en oost Friesland gebaseerd op VEGWAD kartingen (Wesenbeek et al., 2014).

6.4 Eilandkwelders

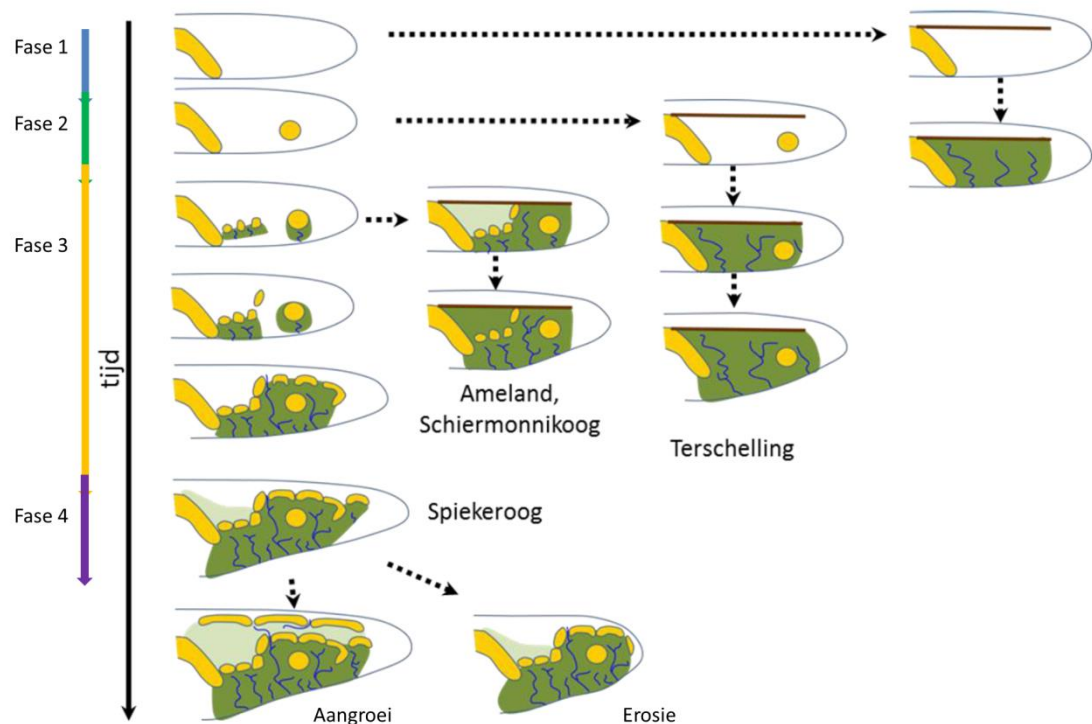
In het kombergingsgebied van het Borndiep vormen de kwelders op de Boschplaat, aan de oostzijde van Terschelling het grootste areaal. De eilandkwelders bij Ameland liggen aan de oostzijde van Ameland en lagen vroeger geheel in het kombergingsgebied van het Pinkegat. Met het opschuiven van het wantij naar het westen ligt het Neerlands Reid tegenwoordig in het kombergingsgebied Borndiep. De Boschplaat en Neerlands Reid zijn beide kwelders van eilandstaarten. Verder ligt aan de westzijde nog een heel kleine kwelder, de Feugelpolle, waar aan het einde van het hoofdstuk kort op in zal worden gegaan.

De morfologische veranderingen op de eilandkwelders zijn hetzelfde als die beschreven in Figuur 6-3. De kwelders op de eilandstaarten in het kombergingsgebied Borndiep zijn natuurlijker in ontwikkeling dan de vastelandskwelders, zoals blijkt uit de afwezigheid van de structuren van kwelderwerken. Desalniettemin is de ontwikkeling sterk beïnvloed door menselijke ingrepen, waaronder de aanleg van stuifdijken tussen de Noordzee- en Waddenzeezijde. Uniek voor (jonge) eilandstaarten zijn de overgangen tussen duin en kwelder op relatief kleine ruimtelijke schalen binnen enkele tientallen meters, en extreme omstandigheden waar microbiële matten langdurig kunnen ontwikkelen. Deze overgangen zorgen voor een relatief hoge diversiteit op een klein oppervlak waarbij van zoete naar brakke naar zoute vegetatie wordt overgegaan (Grootjans et al., 2014).

De ontwikkeling van de kwelders op de eilandstaarten is beschreven in een conceptueel model van De Groot et al. (2015; 2017). Op de eilandstaarten is de ontwikkeling van geomorfologie, waterhuishouding en vegetatie sterk gekoppeld en voltrekt zich in een aantal fasen. In essentie is dit voor alle eilandstaarten hetzelfde en daardoor bestaan de meeste eilandstaarten ruwweg ook uit dezelfde elementen in vergelijkbare configuratie (Figuur 6). Deze elementen ontwikkelen zich in de tijd en kunnen in grootte toe- of afnemen. Hoe ver de eilandstaart en de elementen erop zijn ontwikkeld, hangt af van de leeftijd van de eilandstaart, de grootte van de eilandstaart en de mate en timing van menselijke beïnvloeding. Daarbij is de successie op de Boschplaat het verst gevorderd.

Natuurlijke eilandstaarten ontwikkelen zich van kale platen via een aantal fasen naar een samenhangend geheel van duinen, stranden, groene stranden, duinvalleien, kwelders en washovercomplexen, als gevolg van de interactie tussen fysische krachten en de successie van de vegetatie. De snelheid van ontwikkeling is niet voor alle afzonderlijke elementen van de eilandstaart gelijk. Het dominante proces in de vegetatieontwikkeling is successie naar een climaxstadium, en spontane regressie komt maar beperkt voor. Op washovercomplexen kan de vegetatie langer in een eerder stadium blijven.

Menselijke ingrepen zijn op de Nederlandse eilanden met name stuifdijken geweest. De dynamiek verdwijnt in het achterliggende gebied en kwelders komen versneld en over grote oppervlakken tegelijk tot ontwikkeling. Daardoor neemt de abiotische en biotische variatie in ruimte en tijd af en verouderen dit soort gebieden versneld. De huidige situatie verschilt per eilandstaart, afhankelijk van wanneer de stuifdijk is aangelegd, in welk stadium het eiland toen was, welk deel van de eilandstaart onder invloed was (en is), en hoe de grootschalige processen sindsdien de eilandstaart hebben beïnvloed.



Figuur 6-11 Conceptueel model van eilandstaartontwikkeling (deels naar Ten Haaf & Buijs, 2008), zonder (links) en met (midden en rechts) menselijke ingrepen. In deze figuren is de Noordzee aan de bovenzijde. Geel = duinen, donkergroen = kwelder, lichtgroen – groen strand, blauw = krekens, bruin = stuifdijk

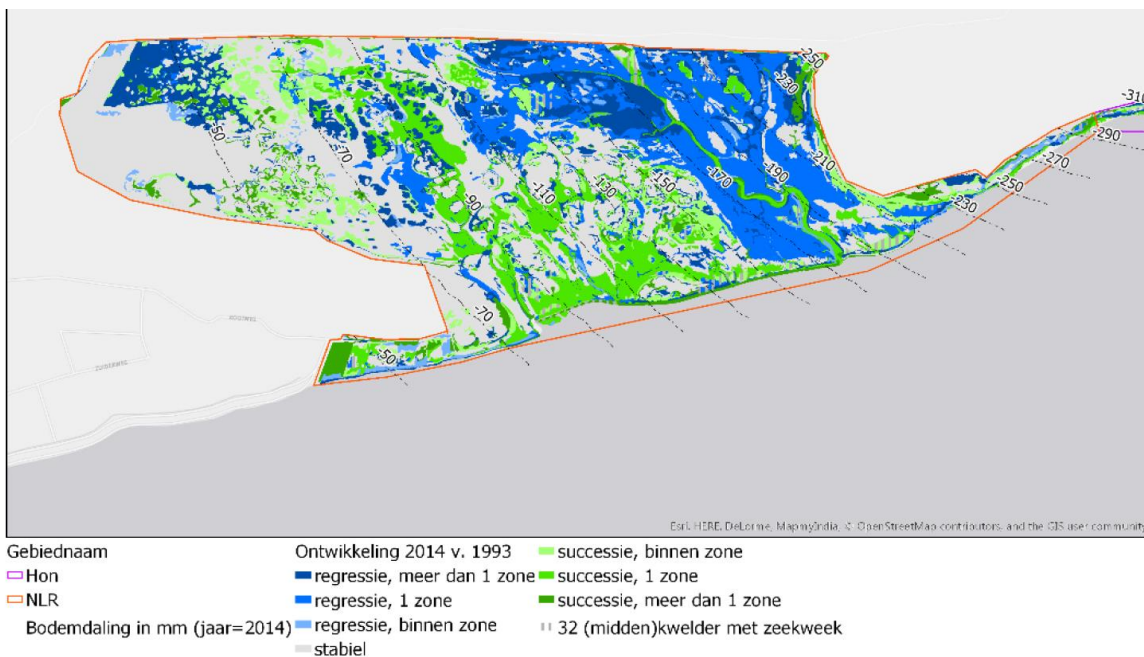
Onder natuurlijke omstandigheden is er niet alleen ruimte voor aangroei en successie van de eilandkwelders, maar ook voor erosie en regressie. Tempo en richting daarvan worden bepaald door de natuurlijke grootschalige ontwikkelingen, zoals de verplaatsing van de zeegaten en de aangroei en afbraak van de eilandstaarten. Ook ontwikkelingen op een kleinere schaal, zoals kliferosie en de opbouw van pionierkwelders voor de kwelder horen hierbij.

Neerlands Reid

Neerlands Reid op Ameland was van oorsprong een oud washovergebied, waar zich een kwelder begon te ontwikkelen evenals lage duinen. De aanleg van een serie stuifdijken aan de Noordzezijde (vanaf 1882-1888 na eerdere mislukte pogingen), zal naar verwachting de kwelderontwikkeling hebben gestimuleerd. Momenteel is het Neerlands Reid ook de waddenkant beschermd door een stortstenen beschoeiing, zodat het gebied aan alle kanten vast ligt, met een stuifdijk/fietspad aan de Noordzijde, duinen aan de oost- en westkant en de beschoeiing aan de waddenkant (Figuur 6-12). Via krekens is het gebied verbonden met de Waddenzee. In het oostelijke deel van het Neerlands Reid heeft, in tegenstelling tot veel andere kwelders geen successie, maar regressie van de vegetatie plaatsgevonden (Figuur 6-13). De toename van de hoogte van de kwelder, die mede sturend is voor de successie, wordt beperkt of zelfs te niet gedaan door bodemdaling door de gaswinning (Begeleidingscommissie Bodemdaling Ameland, 2017). En de begrazing (met inbegrip van de daarbij optredende vertrappeling) heeft ook invloed op de vegetatie ontwikkeling. De ontwikkelingen van de hoogte, opslibbing en vegetatieontwikkeling van Neerlands Reid worden nauwgezet gevolgd als onderdeel van de monitoring van de bodemdaling Ameland en informatie over de waargenomen ontwikkelingen kan worden gevonden in (Begeleidingscommissie Bodemdaling Ameland, 2017).



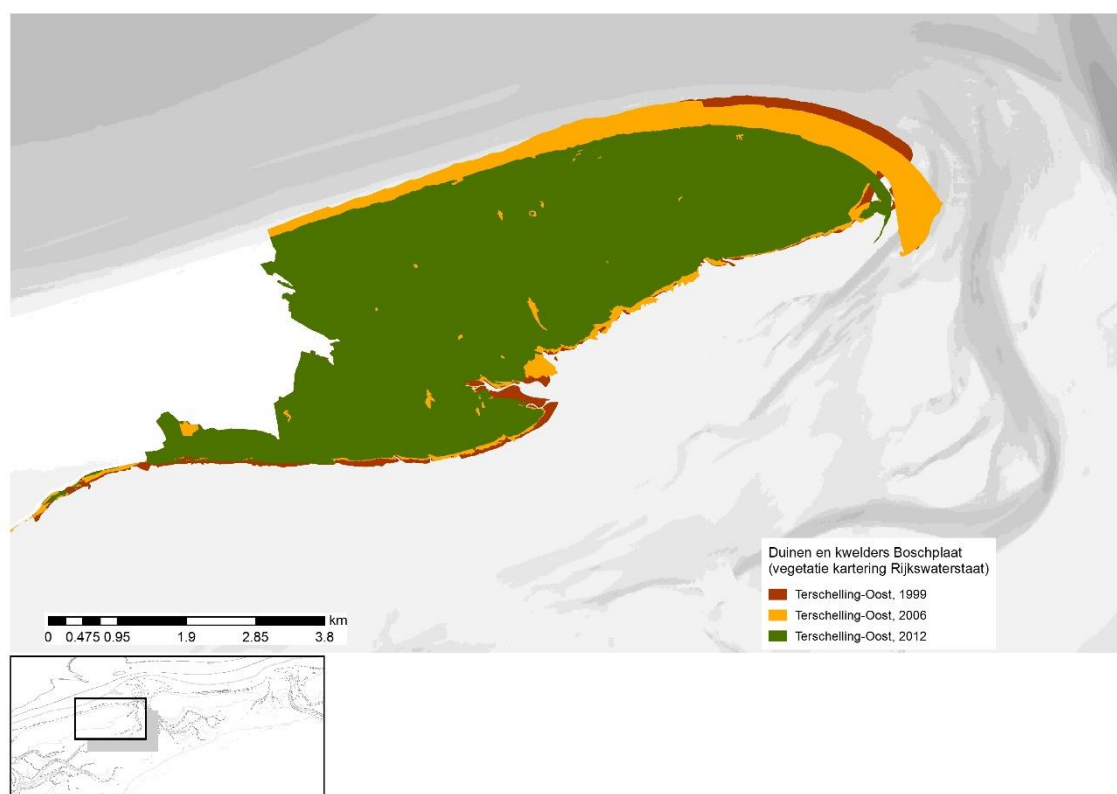
Figuur 6-12 Luchtfoto van de westzijde van de overgang van de duinen naar het Neerlands Reid, met in de voorgrond de bestorte kwelderrand en in het midden een van de kwelderkreken (bron Rijkswaterstaat/ Joop van Houdt.)



Figuur 6-13 Successie-regressie in de vegetatie van Neerlands Reid, op basis van de VEGWAD-vegetatiekaart uit 1993 en 2014 (met bodemdalingscontourlijnen van 2014) Successie binnen een zone is veroudering en regressie binnen een zone is verjonging. (Uit Elschoot et al. in Begeleidingscommissie Bodemdaling Ameland, 2017)

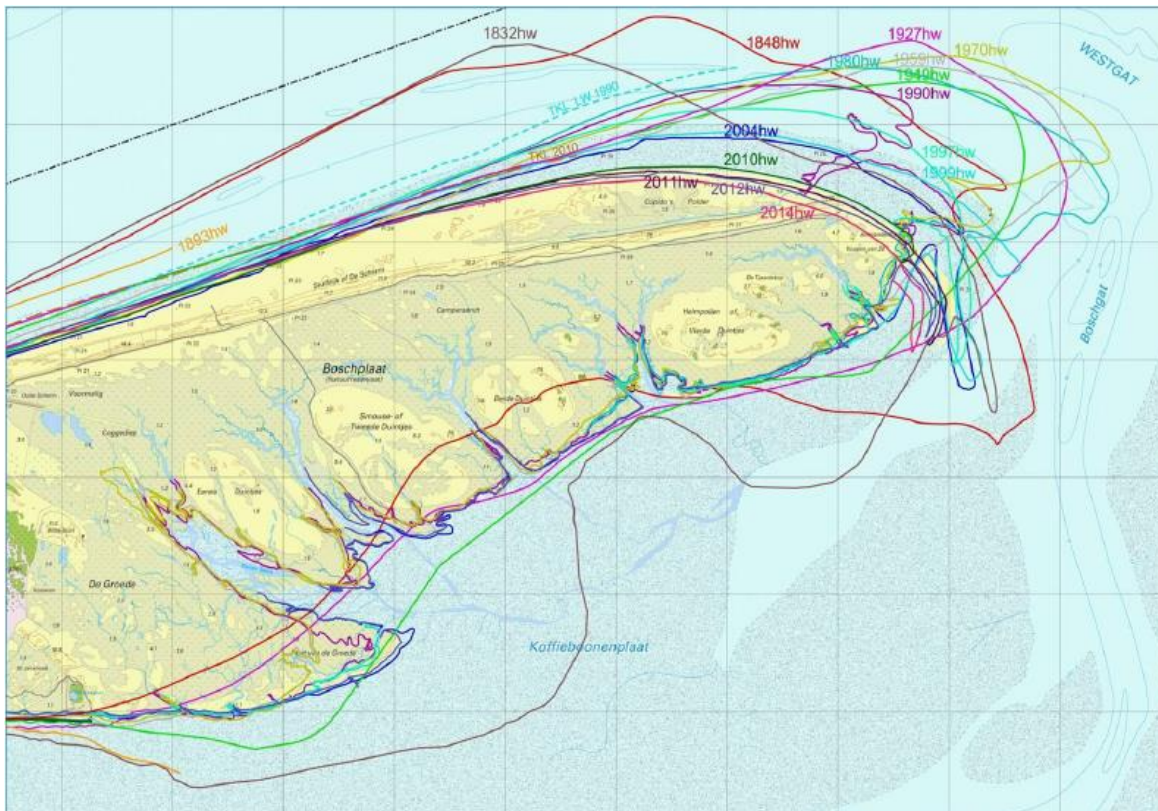
Boschplaat

Van de Nederlandse Waddeneilanden is op de Boschplaat op Terschelling de successie het verst gevorderd. Grootschalige duin- en kweldervorming van de 1^o duintjes en verder heeft op de grote, in één keer met Terschelling verheelde Boschplaat plaatsgevonden zonder menselijke ingrepen. De successie is sterk bevorderd door de aanleg van de stuifdijk in de periode 1931-1937. Het gebied is voor een belangrijk deel vergrast. Het gebied zal naar verwachting verder verruigen. Lokaal kan beheer door de middel van plaggen en dergelijke worden ingezet om de successie “terug te zetten”. Beheermaatregelen op deze schaal kunnen niet de dynamische geomorfologische processen en daarbij behorende landschappelijke variatie van de beginfasen van de kwelderontwikkeling terugbrengen. Aan de oostzijde van de Boschplaat vindt al sinds een tiental jaren (vanaf het begin van de jaren '70) achteruitgang van de Boschplaat plaats, waardoor het eiland tegenwoordig enkele kilometers korter is dan vroeger (Figuur 6-15). Deze erosie van de Boschplaat betekent ook dat het kwelderareaal hier afneemt. Ook vindt erosie langs de kwelderrand plaats, daar waar geen kwelderrandbestorting is aangebracht.



Figuur 6-14 Kaart van de gekarteerde duin- en kweldervegetatie op de Boschplaat, Terschelling.

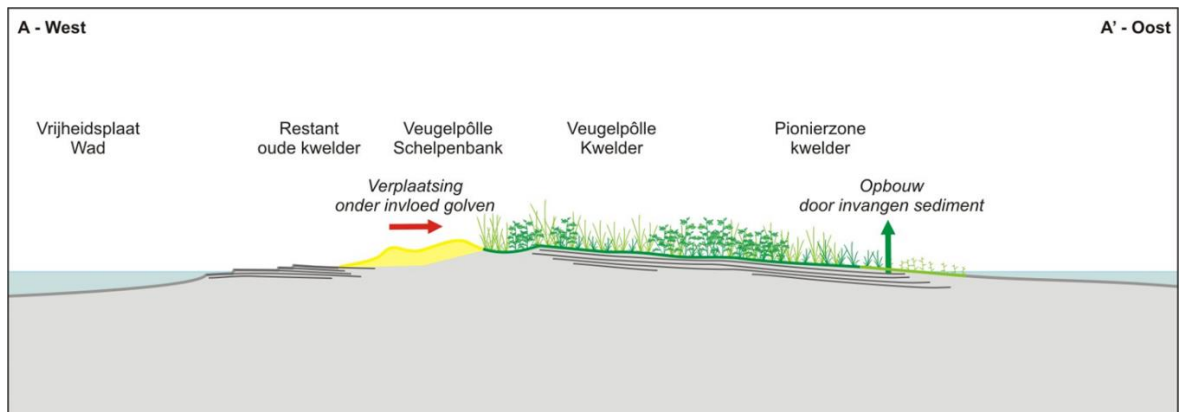
De mechanismen achter de erosie van de oostpunt van Terschelling worden gezocht in de dynamiek van het Zeegat van Ameland. Naast de ligging van de geulen in het Zeegat speelt het transport van zand door golven waarschijnlijk een belangrijke rol bij de ontwikkelingen. De hoogte en de invalrichting van de golven worden medebepaald door de ligging van de geulen en de ondieptes op de buitendelta (Elias, in prep). Naar verwachting zal de Boschplaat ook weer gaan aangroeien, zodat daarna nieuwvorming van de kwelder kan plaatsvinden (Elias en Bruens, 2012). De grote vraag blijft wanneer deze verwachting overgang naar een situatie met uitbouw zal plaatsvinden.



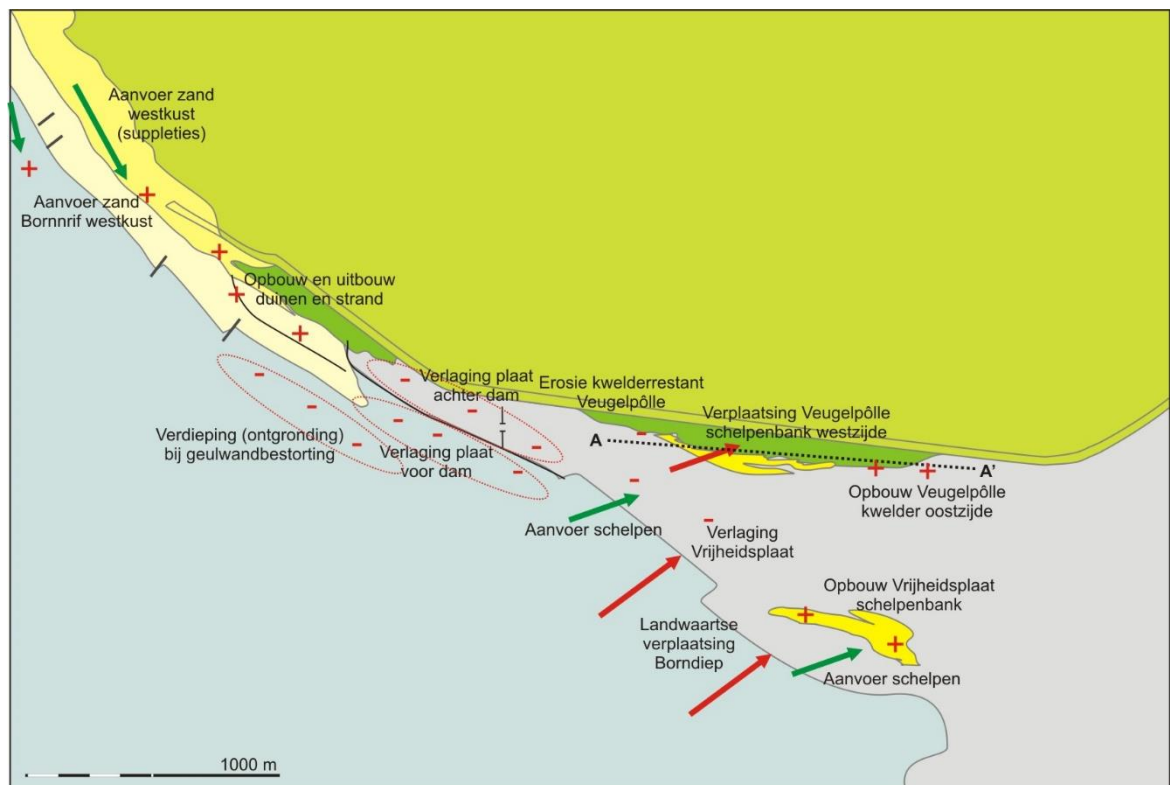
Figuur 6-15 Ligging van de kustlijn en de grens van de oostpunt van Terschelling (Rijkswaterstaat).

Feugelpolle

Aan de zuidwestzijde van Ameland ligt een zeer klein kwelder, die in feite een restant is van de veel grotere kwelder die is bedijkt. Vanwege de ligging aan de westzijde van het eiland, op grotere afstand van de duinen, is dit een ander soort eilandkwelder dan die op de eilandstaarten. De aanwezigheid van een broedkolonie grote sterns en andere kustvogels maakt dat de Feugelpolle en het behoud ervan veel aandacht heeft gekregen. De kwelder is relatief dynamisch en heeft, in tegenstelling tot de andere kwelders in het kombergingsgebied, een zand- en schelpenbank aan de zuidwestzijde voor de kwelder liggen. Figuur 6-16 toont een schematische dwarsdoorsnede, met de schelpenbank aan de westzijde. Deze bank verplaatst onder invloed van de golfwerking naar het oostnoordoosten. Aan de oostzijde, in de luwte van de kwelder vindt ophoging plaats en nieuwvorming van de kwelder. Met verschillende ingrepen, zoals het aanbrengen van een bank van kleischelpen en stimuleringsmaatregelen voor de vorming van een mosselbank, is en wordt de autonome ontwikkeling van de kwelder gestimuleerd (Staatsbosbeheer, 2015). Deze maatregelen zijn onderdeel van het programma Klimaatbuffers. De maatregelen worden gemonitord, om het inzicht te krijgen in de werking. Op basis van de opgedane inzichten bij de Feugelpolle kunnen in de toekomst beheermaatregelen voor andere kwelders worden geoptimaliseerd.



Figuur 6-16 Schematische dwarsdoorsnede van de Feugelpolle (zie voor de locatie Figuur 6-17) (uit Cleveringa, 2010)



Figuur 6-17 Overzichtsk kaart met de verschillende morfodynamische processen aan de zuidwest van Ameland, in relatie tot de Feugelpolle (in deze en de volgende figuur aangeduid met 'Veugelpolle' (uit Cleveringa, 2010).

6.5 Beleid en beheer rond kwelders en kennisvragen

Vanwege het belang van de kwelders voor verschillende beleidsvelden worden de ontwikkelingen over het algemeen nauwgezet gevolgd. De ontwikkeling van kwelders en de relatie met omgevingsvariabelen (onder andere bodemdaling, sedimentaanvoer en het gevoerde beheer) wordt op verschillende plekken gemonitord en geanalyseerd. En de kennisvragen rond kwelders op de mesoschaal worden daarmee in verschillende andere kaders geadresseerd. Dat geldt bijvoorbeeld voor de ontwikkelingen van de vastelandskwelders door het WOK (van Duin et al., 2016), de ontwikkelingen van de oostpunt

van Ameland, met inbegrip van Neerlands Reid (Begeleidingscommissie Bodemdaling Ameland, 2017) en de eilandkwelders door OBN (Wesenbeeck et al., 2014). In het Ecoshape en STW project Kwelderontwikkeling Koehoal wordt gekeken naar het stimuleren van de aangroei van kwelders.

Voor de korte en lange termijn benutting van kwelders voor de waterveiligheid is aanvullend inzicht nodig over hoe de voorlanden aangroeien, welke (formele) rol dit kan spelen in de waterveiligheid (kwelders als onderdeel van de waterkering, toetsing,...), welke veranderingen optreden in de ecologische waarden van de kwelders (successie van de vegetatie) en wat de gevolgen zijn van beheer en gebruik (begrazing). Een deel van dit soort aspecten wordt beschouwd in de Programma Overstijgende Verkenning (POV) Waddenzeedijken van de drie noordelijke Waterschappen.

Een aandachtspunt is dat het type gegevens en de rapportages erover per kwelders verschilt. Het is daardoor niet eenvoudig (en voor sommige kwelders zelfs niet mogelijk) om informatie over de ontwikkeling van arealen, hoogtes en vegetatieontwikkeling te vergelijken. Een overzicht van de areaal-, hoogte- en vegetatieontwikkeling van de kwelders in het kombergingsgebied Borndiep ontbreekt daarom nog. Een ander aandachtspunt is dat voor de Kaderrichtlijn Water (KRW) en de Natura2000 verschillende gebiedsindelingen zijn gehanteerd. Hierdoor wordt bijvoorbeeld voor de KRW specifiek gekeken naar de eilandkwelders, terwijl dit onderscheid in het Natura2000-gebied Waddenzee niet wordt gemaakt. Daar waar de doelstellingen bij KRW en Natura2000 niet naadloos op elkaar aansluiten, kan dit problemen opleveren.

De belangrijke kennisvragen rond kwelders die niet in andere programma's of kaders worden beantwoord hebben betrekking op de koppeling tussen de ontwikkelingen op mesoschaal en die op de macroschaal. Het gaat om de invloed op de sedimentvoorraden en om de rol in de grootschalige evenwichten. Kwelders vormen, vanwege de overheersende sedimentatie, over het algemeen een *sink* voor sedimenten. Een verband tussen de evolutie van kwelders en de sedimenthuishouding op de schaal van de kombergingsgebieden is voor sommige gebieden in beeld gebracht, maar een generiek beeld hierover ontbreekt nog. De rol in de grootschalige evenwichten is er omdat uitbreiding van de kwelders plaatsvindt ten koste van droogvallende plaat (en omgekeerd, maar die situaties doen zich zelden voor). Deze rol is expliciet in beeld gebracht in de sedimentbalansen voor de verschillende kombergingsgebieden uit de jaren '80 (Stive & Eijnsink, 1998), maar meer recente informatie hierover ontbreekt.

Het combineren van gegevens, informatie en kennis die over de 'klassieke' grenzen van wad, vastelandskwelder en eilandkwelder heenstapt, lijkt de aangewezen manier om nog meer inzicht te bieden, dat bruikbaar is voor de verschillende beleidsmakers en beheerders.

7 Overzicht van de bevindingen voor de gebruikers

7.1 Inleiding

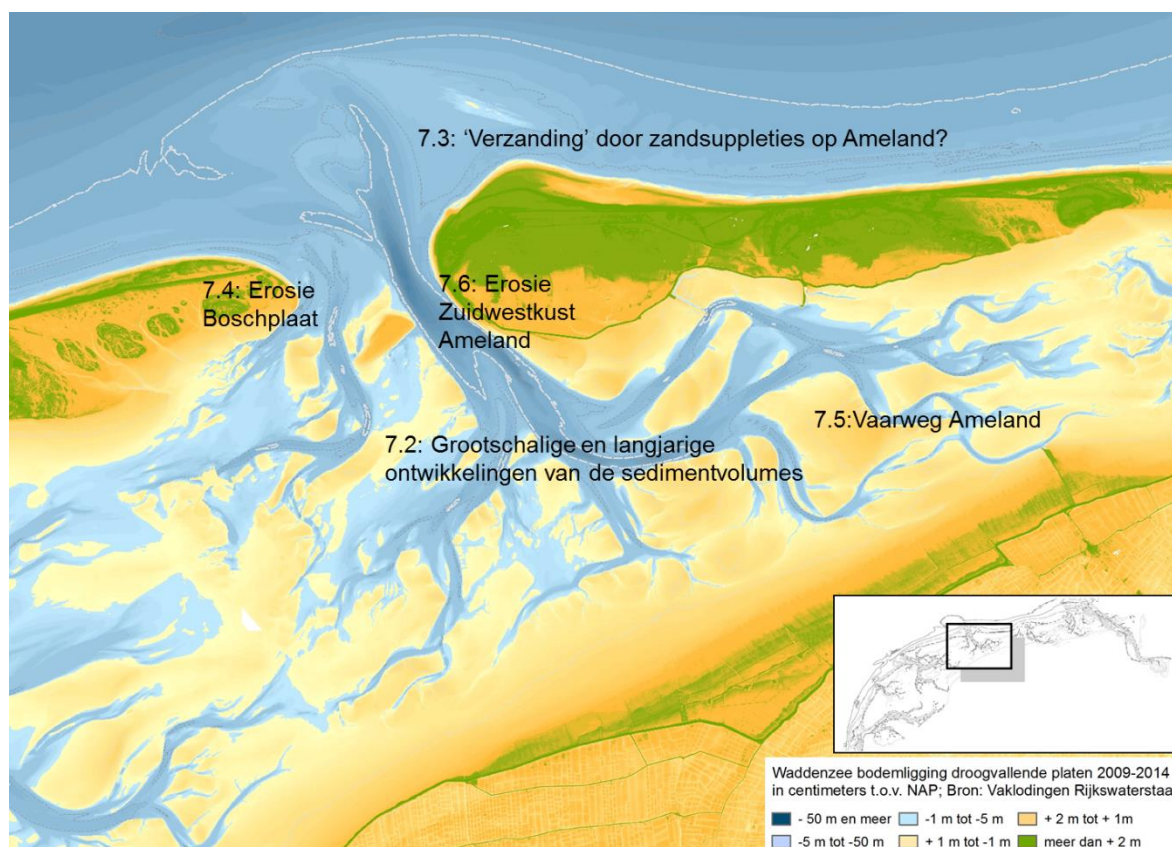
De voorgaande hoofdstukken bevatten veel informatie over de morfologie en de morfologische ontwikkelingen op de mesoschaal in het kombergingsgebied Borndiep. In dit hoofdstuk worden deze bevindingen samengevat voor de gebruikers, beheerders en beleidsmakers. In Figuur 7-1 is een overzicht opgenomen van de onderwerpen die in dit hoofdstuk aan bod komen, dit zijn in paragraaf:

7.2: De grootschalige en langjarige ontwikkelingen van het sedimentvolume;

7.3: Het antwoord op de vraag of 'verzanding' optreedt door zandsuppleties, samen met de betekenis van 'verzanding';

7.4: De erosie van de Boschplaat aan de oostzijde van Terschelling;

7.5: De morfologische ontwikkelingen in relatie tot het gebruik van de vaarweg Holwerd-Ameland.



Figuur 7-1 Overzicht vraagstukken op meso-schaal rond de morfologie en het gebruik en beheer van het kombergingsgebied van het Borndiep.

De conclusies in deze paragraaf adresseren steeds een vraagstuk op het gebied van het beheer en/of het beleid. Bij elk onderwerp is de opbouw hetzelfde:

- *Beschrijving van het vraagstuk*
- *Waarnemingen & begrip van de processen*
- *Verwachte toekomstige ontwikkelingen*
- *Consequenties voor het beheer en het beleid*

7.2 Welke grootschalige en langjarige ontwikkelingen van de sedimentvolumes treden op in de kombergingsgebieden en de kwelders, de buitendelta's en de kustgebieden?

Beschrijving van het vraagstuk

De vraag is wat de langjarige ontwikkelingen zijn in de sedimentvolumes van de geulen en platen in het kombergingsgebied, de kwelders, de buitendelta's en de kustgebieden? Daarbij hoort de vraag tot welke veranderingen in de arealen dit heeft geleid.

Waarnemingen en begrip van de processen

In het kombergingsgebied (zonder de kwelders) heeft in de periode van 1926 tot en met 2012 een trendmatige netto sedimentatie plaatsgevonden van $0,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$ (op basis van de getallen uit Nederhoff et al., 2017). Als dat per jaar wordt gemiddeld over de oppervlakte van het kombergingsgebied, dan is dat een gemiddelde jaarlijkse hoogtoename van 1,9 mm/jaar. Dat is meer dan nodig is om de stijging van de zeespiegel bij te houden, die in dezelfde periode 1,3 mm/jaar was (Tabel 1; Baart et al., 2015). De sedimentatie is niet gelijk verdeeld over het gehele kombergingsgebied, het belangrijkste gebied waar sedimentatie heeft plaatsgevonden is het wadplatengebied aan de noordzijde van kwelderwerken. De sedimentatie heeft geleid tot een trendmatige toename van areaal droogvallende platen trend $0,32 \text{ km}^2/\text{jaar}$ en eenzelfde afname van het areaal geulen in het kombergingsgebied.

Door Elias et al (2012) zijn ook de veranderingen in de sedimentvolumes het kombergingsgebied en de buitendelta bepaald voor de periodes 1935-1990, 1990-2005 en 1935-2005. In het kombergingsgebied (zonder de kwelders) heeft in de periode van 1935 tot en met 2005 een netto sedimentatie plaatsgevonden van $55,6 \times 10^6 \text{ m}^3$. Het buitendeltavolume is toegenomen met $39,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ en in periode 1990-2005 is afgenomen met $-6,1 \times 10^6 \text{ m}^3$. De volumeverandering over de gehele periode van 1935 tot en met 2005 is $33,7 \times 10^6 \text{ m}^3$. De buitendelta maakt deel uit van het grotere gebied dat door Elias et al. (2012) met 'coast' is aangeduid en dat ook een toename in het sedimentvolume heeft doorgemaakt, van $94,2 \times 10^6$ in de gehele periode van 1935 tot en met 2005.

Het is misschien verassend om te zien dat het sedimentvolume van het gebied 'coast' is toegenomen, omdat het de kust van Ameland al sinds tenminste een eeuw een duidelijke achteruitgang heeft laten zien IJnsen (1993). De toename van het sedimentvolume en de achteruitgang van de kust zijn niet met elkaar in tegenspraak, omdat het gebied waarvan door Elias et al. (2012) het sedimentvolume is vastgesteld veel groter is dan de kustlijn van Ameland.

Naast de veranderingen in het sedimentvolume van de door Elias et al. (2012) beschouwde delen van het kombergingsgebied, de buitendelta en de kust, zijn er ook veranderingen in het sedimentvolume van de kwelders en de duinen. De kwelders en de duinen vallen buiten de geanalyseerde gebieden. De kwelders zijn over het algemeen netto sedimentatiegebieden. Van de omvang van de netto sedimentatie in de vastelandskwelders is een bepaling beschikbaar in Vermaas en Marges (2015) en deze bedraagt $15,3 \times 10^6 \text{ m}^3$. Van het sedimentatievolume op de eilandkwelders zijn geen schattingen of bepalingen bekend. Het sedimentatievolume in de duinen van Ameland en in de duinen van Terschelling in de periode 1990-2012 is ook bepaald in Vermaas en Marges (2015) en bedraagt $19,9 \times 10^6 \text{ m}^3$ voor de duinen van Ameland en $7,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ voor de duinen van Terschelling. De netto sedimentatievolumes op de kwelder en in de duinen zijn dermate groot dat deze ook in beschouwingen van de sedimentvolumes meegenomen moeten worden. Ook de omvang van de zandsuppleties is in beeld gebracht door Vermaas en Marges (2015). De omvang voor de

gehele kust van Ameland bedroeg $20 \times 10^6 \text{ m}^3$ in de periode 1990-2012. Daarbij wordt opgemerkt dat het grootste deel van het zand ten oosten van de buitendelta van het Zeegat van Ameland is gesuppleerd. Omdat de zandtransportprocessen langs de kust een overheersend transport naar het oosten genereren, mag worden verondersteld dat slechts een beperkte deel van dit volume heeft geleverd aan het sedimentdelende systeem van het kombergingsgebied Borndiep.

Verwachte toekomstige ontwikkelingen

De te verwachten ontwikkelingen moeten daarom worden afgeleid uit de waarnemingen en de trends daarin. Dit wijst op een doorgaande sedimentatie in het kombergingsgebied. Bij een vergelijkbare snelheid van zeespiegelstijging wordt voor de toekomstige ontwikkelingen een zelfde trend verwacht, ook voor de toename van het areaal platen en de afname van het areaal geulen.

Consequenties voor het beheer en het beleid

Doorgaande sedimentatie in het kombergingsgebied Borndiep met een vergelijkbare snelheid als in de voorgaande 70 jaar leidt tot een verdere toename van het areaal droogvallende platen en een verdere afname van het areaal geulen. Deze ontwikkelingen van de arealen betekent dat de doelstellingen van gelijkblijvende arealen voor de Natura2000 habitats 'geulen' (feitelijk: H1110A - Permanent overstroomde zandbanken (getijdengebied) en 'droogvallende platen' (feitelijk: H1140A - Slik- en zandplaten) niet worden gerealiseerd. Waarschijnlijk neemt ook de droogvalduur van de platen enigszins toe en dat heeft mogelijk consequenties voor de kwaliteit van het habitat.

Niet alleen de oppervlakte van de geulen neemt af, maar ook de omvang van de geulen zal afnemen. Bij de vaarweg Holwerd-Ameland heeft dit al geleid tot een toename van het baggerbezwaar. De bruikbaarheid als vaarweg zal voor sommige geulen afnemen.

7.3 Treedt 'verzanding' op in het kombergingsgebied van het Borndiep door de zandsuppleties op Ameland?

Beschrijving van het vraagstuk

De kust van Ameland is een van de suppletie 'hot spots' van de Nederlandse kust, waar sinds 1990 (toen zandsuppleties vanuit het kustbeleid de voorkeurs beheermaatregel werden) $26,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ zand is gesuppleerd (Kustlijnkaarten 2007 en 2017, Rijkswaterstaat). De kust van Terschelling daarentegen is slechts eenmaal gesuppleerd, toen in 1993 de eerste onderwatersuppletie is aangelegd.

Rond zandsuppleties in de nabijheid van de kombergingsgebieden spelen twee vraagstukken, namelijk:

1. Vergroten de zandsuppleties de aanvoer van zand naar de kombergingsgebieden en daarmee de sedimentatie aldaar?;
2. Leiden de zandsuppleties tot een toename van de korrelgrootte van het sediment in de kombergingsgebieden?

Beide vragen worden samengevat in de vraag of 'verzanding' van het kombergingsgebied van het Borndiep optreedt en dit is de vraag die hier wordt beantwoord.

Waarnemingen en begrip van de processen

Twee typen processen worden besproken:

1. De processen die het zand en slib sorteren.
2. De processen die verantwoordelijk zijn voor het netto transport van zand van de kust naar de kombergingsgebieden.

De processen die het zand en slib sorteren

Sorteringsprocessen van zand en slib spelen zich af op het strand, op de buitendelta, in de geulen en in het kombergingsgebied. Deze sorteringsprocessen leiden tot een verdeling van zand en slib op de macroschaal van het kombergingsgebied, met het meest grove zand nabij het zeegat en op de bodems van de grote geulen en veel slib op de wadplaten nabij het vasteland, bij het wantij en in de luwe gebieden 'achter' de eilanden (zoals de Ballumerbocht). Ook op de schaal van de morfologische onderdelen zelf wordt het zand gesorteerd, zoals men op het strand goed kan waarnemen, met lokaal aanrijking van grove korrels en schelpen, en fijn verstoven zand hoog op het strand. Omdat sprake is van een veelvoud aan fysische en biologische processen bij het sorteren van de korrels, worden deze hier niet beschreven. De processen die samen de 'sorteermachine' vormen, die zorgt voor de verdeling van het sediment, veranderen niet door menselijke ingrepen. Het gesuppleerde sediment wordt aan dezelfde sorteringsmechanismen onderworpen worden als de rest van het sediment.

Welke sortering plaats kan vinden heeft niet alleen te maken met de processen, maar ook met de korrelgrootteverdeling van het oorspronkelijke materiaal. Op Ameland wordt relatief fijn zand gesuppleerd omdat het zand in de gebruikte zandwingebieden fijn is (Geleynse, concept). Verder geldt voor zandsuppleties dat weliswaar sprake is van grote volumes zand, maar dat die omvang beperkt is in vergelijking met het volume zand dat aanwezig en in beweging is. Het is daarom slecht voorstelbaar dat het suppleren van zand op strand en vooroever nabij die locatie tot een verandering van gemiddelde korrelgrootte leidt (Geleynse, concept). In de Waddenzee zijn nog veel grotere volumes zand en slib in beweging dan op strand en vooroever. Omdat op het strand en de vooroever al geen veranderingen optreden door de zandsuppleties, is het niet voorstelbaar dat zandsuppleties op Ameland leiden tot veranderingen in de sedimentsamenstelling in de Waddenzee.

Het netto transport van zand van de kust naar de kombergingsgebieden

Er is al meer dan 25 jaar structureel zand gesuppleerd op de Nederlandse kust, waarbij de grootste volumes zijn aangebracht bij de Kop van Noord-Holland en Texel en Ameland. Ook op Vlieland is structureel zand gesuppleerd. Op Terschelling is vrijwel niet gesuppleerd en op Schiermonnikoog en de beide Rottums in het geheel niet. Er is geen correlatie tussen sedimentatie in kombergingsgebieden en de locaties en/of timing van suppleties. De meeste sedimentatie heeft plaatsgevonden in het kombergingsgebied van het Vlie en deze sedimentatie is al bezig sinds de aanleg van de Afsluitdijk en dus gestart ruim voordat sprake was van zandsuppleties. De kombergingsgebieden nabij de intensief gesuppleerde gebieden vertonen minder of geen sedimentatie. En er is geen sprake van een toename in de sedimentatie na de start van het suppletieprogramma.

Verwachte toekomstige ontwikkelingen

Er is geen relatie tussen het suppletievolume aan de kust en de sedimentatie in de kombergingsgebieden. De proces- en systeemkennis geeft ook geen aanleiding om zo'n relatie te veronderstellen en zo'n relatie ook in de toekomst niet verwacht. Hetzelfde geldt voor de korrelgrootteverdeling van het sediment en het uitvoeren van zandsuppleties. Zelfs wanneer met veel grover zand gesuppleerd wordt (dan aanwezig is in de zandwingebieden in de nabijheid van Ameland) zal geen meetbare of merkbare vergroving gaan optreden in het kombergingsgebied. Dit houdt niet in dat netto sedimentatie of korrelgrootteverdeling ongewijzigd blijven. Een versneld stijgende zeespiegelstijging zal bijvoorbeeld voor veranderingen kunnen zorgen.

Consequenties voor het beheer en het beleid

Er is geen 'verzanding' van het kombergingsgebied van het Borndiep door het uitvoeren van zandsuppleties. Dit geldt zowel voor veranderingen in de netto sedimentatie en voor veranderingen in de korrelgroottes. Daarom is er geen aanleiding om hier in het beheer of beleid rekening mee te houden.

7.4 Welke erosie vindt plaats aan de oostpunt van Terschelling (Boschplaat)?

Beschrijving van het vraagstuk

De oostpunt van Terschelling is na het begin van de jaren '70 gestaag korter geworden, zodat tegenwoordig de kustlijn tussen de 2 à 3 km korter is dan in 1970 (Figuur 6-15). Het vraagstuk is hoeveel erosie nog zal plaatsvinden en of na verloop van tijd ook weer sprake zal zijn van uitbouw van de oostpunt?

Waarnemingen en begrip van de processen

Voordat de oostpunt van Terschelling na het begin van de jaren '70 gestaag korter geworden, is de kustlijn van Terschelling juist langer geworden. Het korter worden van de oostpunt van Terschelling gaat nog steeds door. Samen met de verkorting van de kustlijn is aan de Noordzijde de oriëntatie van de kustlijn veranderd en landwaarts verplaatst. Het duincomplex aan de Noordzeezijde is in omvang afgenomen en het areaal eilandkwelder op de Boschplaat is afgenomen.

De afname en ook de groei van de 'eilandstaart' van Terschelling is direct gekoppeld aan de ontwikkelingen in het Zeegat van Ameland en op de buitendelta. Het transport van zand door golven en de getijstrooming zijn de fysische processen die van dag tot dag leiden tot de erosie. Hoe de golven en de stroming het eiland raken hangt af van de ligging van de geulen in het zeegat en ondieptes op de buitendelta. De ligging van de geulen in het zeegat en de ondieptes op de buitendelta veranderen op een manier die zich in de tijd lijkt te herhalen, hoewel er wezenlijke verschillen bestaan met en tussen de eerdere situaties. Kortweg is soms sprake van één geul in het zeegat, met meer ruimte voor Terschelling, terwijl in andere perioden twee of meer geulen aanwezig zijn, met minder ruimte voor Terschelling. De overgang van de ene naar de andere situatie leidt tot erosie van de oostpunt van Terschelling en omgekeerd.

Verwachte toekomstige ontwikkelingen

Het is lastig gebleken om de ontwikkeling van de oostpunt van Terschelling te voorspellen, omdat de ontwikkelingen zich niet geheel op dezelfde wijze en termijnen voordoen als in het verleden. Het is mogelijk dat de achteruitgang van de oostpunt nog verder zal gaan.

Consequenties voor het beheer en het beleid

In het beheer is al rekening gehouden met de achteruitgang van de oostpunt. Voor de kustlijnverzorging is afgesproken dat achteruitgang is toegestaan voor dit deel van de kust. Daarom zijn er geen aanleidingen om tot maatregelen (zandsuppleties) over te gaan. Ook het beheer van het Natura2000-gebied Duinen Terschelling biedt ruimte voor achteruitgang, als kenmerk van de natuurlijke dynamiek van de habitats in dit gebied.

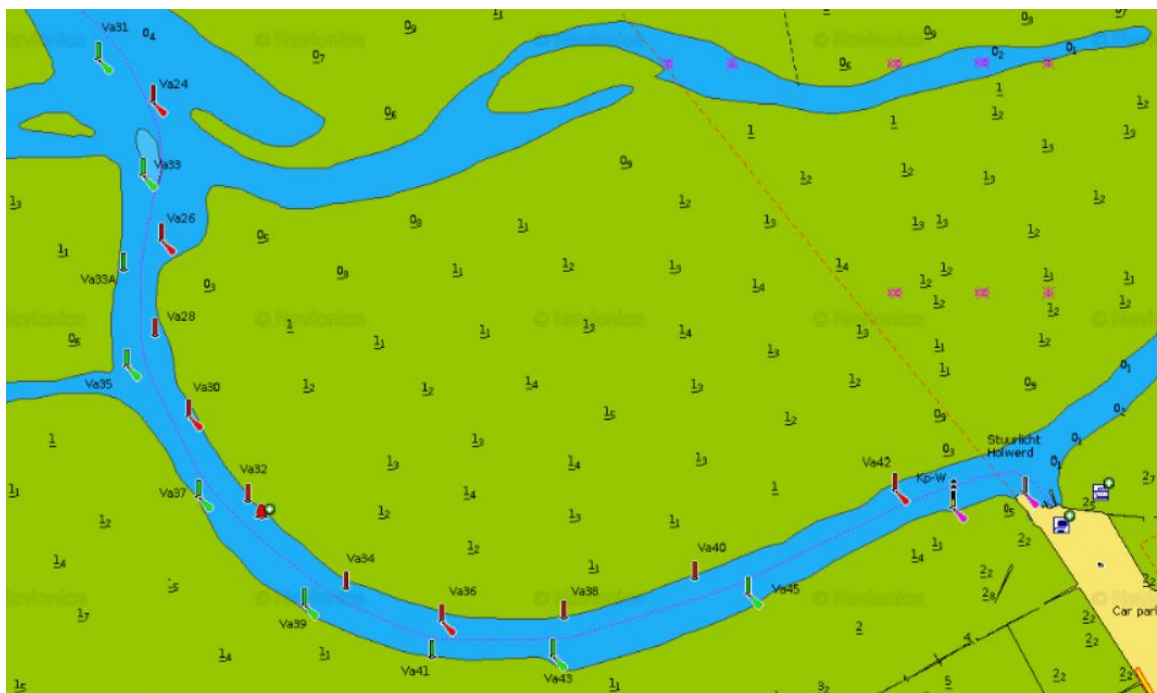
7.5 De vaarweg Holwerd-Ameland

Het vraagstuk over de morfologische ontwikkelingen van de vaarweg Holwerd-Ameland en de invloed daarvan op de op de bruikbaarheid en het beheer (baggeren) van de vaarweg is opgesplitst in drie deelgebieden.

7.5.1 Deelgebied 1: Nabij de veersteiger: VA42-VA24

Beschrijving van het vraagstuk

In het deel van de vaarweg (Figuur 7-2) vanaf de veersteiger vinden veel baggerwerkzaamheden. De omvang is sterk toegenomen vanaf halverwege de jaren '90, met een piek in 2016. Een deel van de toename na 2010 is verklaarbaar door een toename van de breedte met 10 m en de diepte met 30 cm in dat jaar.



Figuur 7-2 Navigatiekaart Nabij de veersteiger: VA42-VA24 (Navionics.com).

Waarnemingen en begrip van de processen

De sterke toename van het baggerbezwaar in dit deel van de vaargeul wordt begrepen door drie verschillende aspecten te beschouwen:

1. De autonome veranderingen in het lokale kombergingsgebied van dit deel van de vaargeul hebben ervoor gezorgd dat het kombergingsvolume is afgenomen. Deze afname is het resultaat van de sedimentatie op de wadplaten, de verplaatsing van de lokale wantjen tussen deze en de andere geulen in de omgeving en het overnemen van de aan- en afvoerende rol van de vaargeul door een nieuw ontstane geul iets naar het noorden. Bij een kleiner kombergingsvolume hoort een kleiner getijdegeul, dat wil zeggen, met een kleinere dwarsdoorsnede. De geleidelijke afname van het benodigde doorstroomoppervlakte behorend bij het kombergingsvolume zorgt ervoor dat gaandeweg voor een steeds groter deel van de geul de dimensies van de vaarweg groter zijn dan de evenwichtsomvang.
2. Veranderingen in de stroomsnelheden tijdens het getij, in de debietverdeling over eb- en vloed en in de resulterende sedimenttransportprocessen hebben ervoor gezorgd dat meer sediment netto werd aangevoerd naar de geul en dat het sediment makkelijker bleef liggen op de geulbodem. Van deze veranderingen is die in de stroomsnelheden het eenvoudigst te beschrijven en te begrijpen. Omdat de gebaggerde geul steeds ruimer werd in verhouding tot het kombergingsvolume, namen de stroomsnelheden in de geul steeds verder af. De lagere stroomsnelheden kunnen het sediment dat op de bodem van vaargeul bezinkt nog maar beperkt of helemaal niet meer transporten. Het zand en slib wordt dan nog wel aangevoerd door de getijstroomingen, maar niet meer afgevoerd. De sedimentatiesnelheid nam hierdoor toe en dat betekent dat de geul sneller ondieper werd en er eerder moet worden gebaggerd.

3. De verdeling van de baggerspecie over de verschillende locaties waar deze wordt verspreid is veranderd naarmate het baggervolume toenam. In eerste instantie werd vrijwel alle baggerspecie weggebracht naar de verspreidingslocaties (Scheepsgat en Zuiderspruit) die buiten de vaargeul liggen. Omdat het volume baggerspecie niet zo groot was, was er voldoende tijd voor de sleepopperzuiger om naar deze locaties te varen en daar via de bodemluiken 'te klappen'. Het toenemen van het baggerbezwaar betekende dat steeds meer tijd nodig was om de vaartocht naar de verspreidingslocaties te maken. En uiteindelijk was er te weinig tijd om alle gebaggerde specie weg te brengen naar de bestaande verspreidingslocaties. Daarom werd een steeds groter deel van de baggerspecie in de vaargeul 'op stroom gezet' (dat betekent dat het vanuit de boot, tijdens het varen over boord wordt gepompt), op beperkte afstand van de baggerlocaties. De baggerspecie kwam daarbij dichtbij de oorspronkelijke baggerlocatie vrij. En dit betekende dat meer sediment beschikbaar was dat weer in de gebaggerde vaargeul werd afgezet.

Verwachte toekomstige ontwikkelingen

Verschiedene factoren dragen bij aan het baggerbezwaar, waaronder het baggeren zelf. Eerdere voorspellingen van het baggerbezwaar hebben de toename steeds onderschat. In de recente opname van de bodemligging lijkt geen sprake meer te zijn van een afname van de doorstroomoppervlakte in het deel van de geul ten oosten van de veerdam. Dit is een indicatie dat geen sprake meer is van een verdere afname van het kombergingsvolume. De andere twee factoren zijn met onzekerheden omgeven. Duidelijk is dat ook in de toekomst in dit deel van de vaargeul moet worden gebaggerd voor het handhaven van de vereiste diepte en breedte.

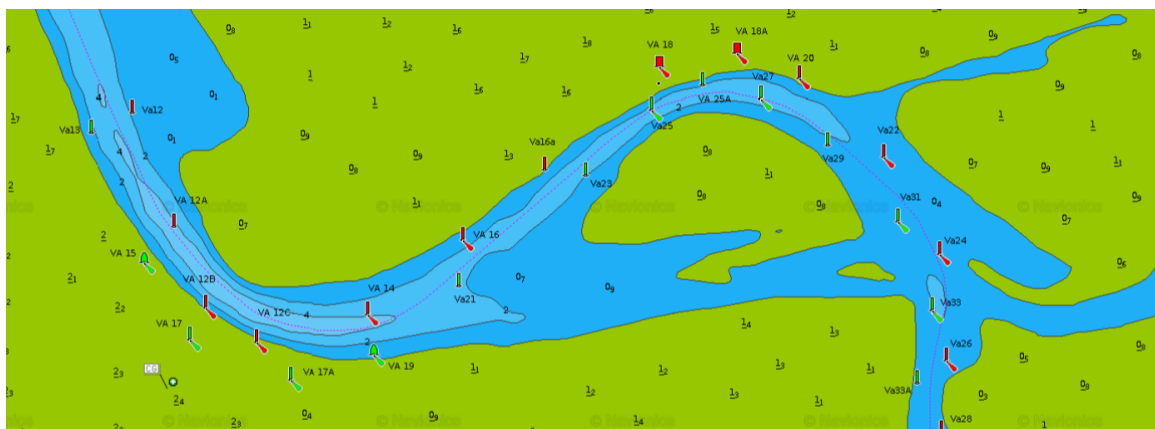
Consequenties voor het beheer en het beleid

Uitgaande van het vigerende beheer betekenen de verwachte morfologische ontwikkelingen dat intensief baggeren van dit deel van de vaargeul nodig zal blijven. De mogelijkheden om het baggerbezwaar te verminderen én de dimensies van de vaarweg te garanderen zijn zeer beperkt. Als 'minder baggeren' gewenst is, dan is het onontkoombaar om andere oplossingen te zoeken. Dergelijke oplossingen, zoals de aanleg van een spoelmeer, kleinere veerboten, varen op het getij, of het verlengen of verplaatsen van de veerdam zijn niet altijd mogelijk binnen de randvoorwaarden van het huidige beleid.

7.5.2 Deelgebied 2 De grote bochten van VA12 tot VA24

Beschrijving van het vraagstuk

De morfologische ontwikkelingen van de vaarweg in het deel dat is gemarkeerd met de boeien VA12 tot VA24, betekenden een toename van de lengte van de geul. De afgelopen jaren zijn de twee bochten die zichtbaar zijn in Figuur 7-3 verder uitgebocht. Eerder is dat gebeurd met de eerste bocht die de vaargeul maakt na vertrek van de veersteiger bij Holwerd. Door de verlenging van de vaargeul duren de overtochten van de veerboot langer. Daarmee is de speling in het vaarschema van de veerboten afgenomen en is de kans op het optreden van vertragingen toegenomen.



Figuur 7-3 Navigatiekaart met twee van de bochten in de vaarweg: let op de positie van de rode tonnen VA18, VA18a en VA20 op de wadplaat bij de noordwaarts gerichte bocht en de groene tonnen VA17a, VA17 en VA15 op de wadplaat bij de zuidwaarts gerichte bocht (Navionics.com).

Waarnemingen en begrip van de processen

De bochten in de geul ontstaan door de natuurlijke processen van sedimenttransport in getijdegeulen. Ook in geulen die niet als vaargeul worden gebruikt en waar niet wordt gebaggerd, zijn bochten aanwezig. Maar in de vaargeul kunnen de bochtvormende processen doorgaan, terwijl in een ongestoorde situatie een afsnijding zou kunnen plaatsvinden. Zo'n afsnijding vindt mede niet plaats door de sedimentatie in de vloodschaar. Deze is mogelijk versterkt door het verspreiden van baggerspecie. De omvang van de bochten in de vaarweg is daardoor groter dan de bochten die in niet-beïnvloede geulen aanwezig zijn.

Verwachte toekomstige ontwikkelingen

De ontwikkeling van de beide bochten is al verder gegaan dan die van niet-beïnvloede geulen. Er zijn geen aanwijzingen dat het uitbochten langzamer verloopt. Ook in de omgeving zijn er geen beperkingen die de komende jaren leiden tot een einde van die ontwikkeling, bijvoorbeeld doordat de geul een andere geul aansnijdt.

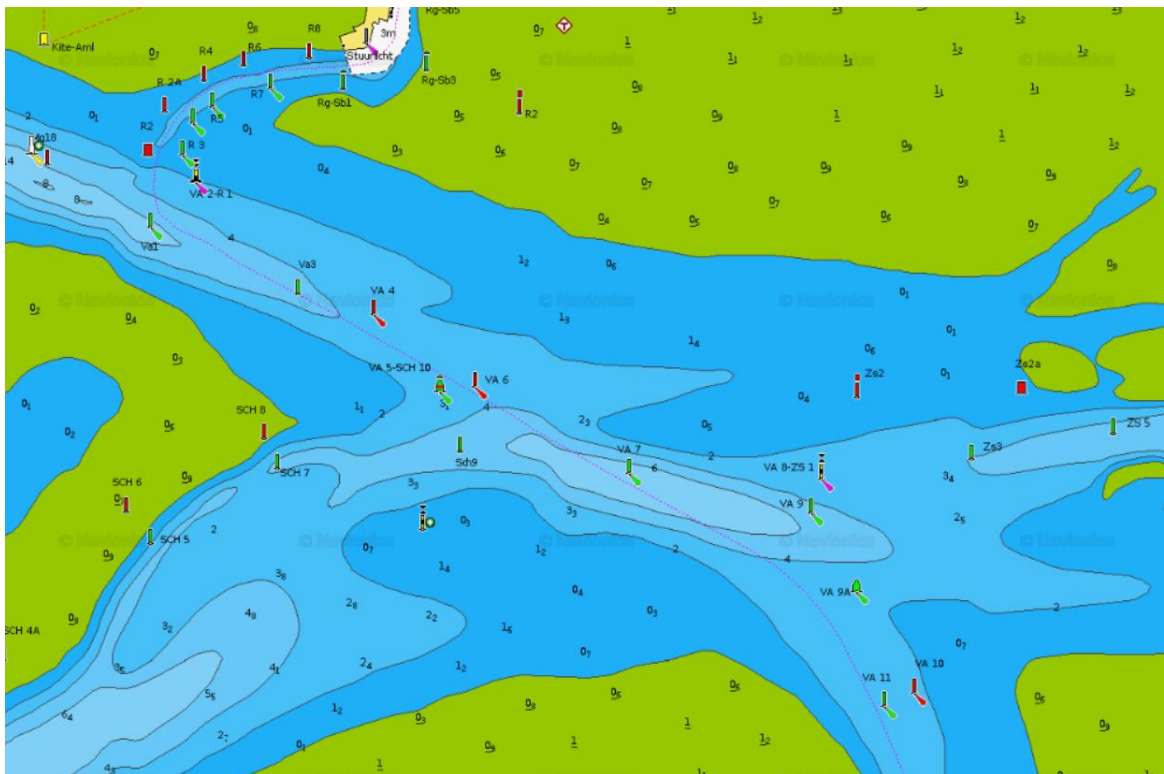
Consequenties voor het beheer en het beleid

Voor de beheerder betekent deze doorgaande ontwikkeling dat de vaarweg nog langer zal worden. Zonder ingrijpen verbetert de situatie niet. Een mogelijke ingreep is het creëren van een doorsteek via de vloodschaar. Met het baggeren van deze doorsteek wordt eigenlijk de autonome ontwikkeling nagebootst, waarbij de vloodschaar na verloop van tijd de rol van geul overneemt. Deze optie wordt verder onderzocht en er worden voorbereidingen getroffen om de ingreep uit te voeren.

7.5.3 Deelgebied 3. Nieuwe drempels op het kruispunt Scheepsgat-Zuiderspruit met de vaarweg VA12-VA4

Beschrijving van het vraagstuk

Het gebied waar de vaargeul de geulen Scheepsgat-Zuiderspruit schuin overstak (Figuur 7-4), leverde tot enkele jaren geleden nooit problemen op met betrekking tot de waterdiepte. De afgelopen jaren is in het gebied een aantal drempels ontstaan die snel zijn verondiept en waar gebaggerd moet worden voor het beheer van de vaargeul.



Figuur 7-4 Navigatiekaart nieuwe drempels op het kruispunt Scheepsgat-Zuiderspruit met de vaarweg VA12-VA4 (Navionics.com).

Waarnemingen en begrip van de processen

De ligging van de geulen en tussenliggende ondieptes is sterk veranderd. Deze ontwikkelingen zijn het best te begrijpen als autonome veranderingen van getijdegeulen, met splitsing van eb- en vloedscharen en het ontstaan van de bijbehorende drempels. Basis voor het begrip zijn historische analoge ontwikkelingen en vergelijkbare ontwikkelingen in de andere gebieden. De tegenwoordige situatie lijkt in een aantal aspecten op de situatie die in de jaren '40 van de vorige eeuw. Omdat de ligging van de hoofdgeulen in het gebied vergelijkbaar is met deze historische situatie lijkt het aannemelijk dat de ontwikkelingen op vergelijkbare wijze zullen gaan plaatsvinden als na de jaren '40.

Verwachte toekomstige ontwikkelingen

Het voorspellen van de morfologische ontwikkelingen gebeurt op basis van een vergelijking met de ontwikkelingen die na de jaren '40 hebben plaatsgevonden. In een periode van 20 tot 25 jaar is de ligging van de geulen en ondieptes in het kruispunt geleidelijk zo gewijzigd dat geen sprake meer was van een drempel. De aanwezigheid van de drempels, kunnen zich komende 10 jaar nog zeker blijven voordoen, het lijkt dan ook niet uitgesloten dat er sprake blijft van een of meerdere drempels. Het lijkt niet uitgesloten dat het een dergelijke periode zal duren voordat de situatie zo veranderd dat geen sprake meer is van een of meerdere drempels.

Consequenties voor het beheer en het beleid

Op dit soort drempelgebieden is over het algemeen veel sediment in beweging vanwege de hoge stroomsnelheden die optreden. Dat betekent dat de gebaggerde drempelgebieden ook snel kunnen aanzanden. Het baggerbezwaar kan daardoor op deze locaties aanzienlijk toenemen. Bij de keuzes voor het te baggeren tracé zal goed moeten worden geanticipeerd op de veranderingen van de ligging van de geulen en drempels.

7.6 Waaronder vindt erosie plaats bij de zuidwest kust van Ameland en welke maatregelen worden daar tegen in gezet?

Beschrijving van het vraagstuk

Het kennisvraagstuk bij de zuidwestkust van Ameland is waarom erosie plaatsvindt bij dit deel van de kust. Daarbij hoort het beheervraagstuk naar de maatregelen die worden ingezet om deze achteruitgang tegen te gaan.

Waarnemingen en begrip van de processen

De westkust van Ameland erodeert al tenminste enkele eeuwen. Dit heeft tot de jaren '50 van de vorige eeuw geleid tot een grote achteruitgang van de kustlijn, waarbij de oorspronkelijke duingordel voor een belangrijk deel is verdwenen (Figuur 3-3). In de jaren '50 zijn bij de zuidwestkust strekdammen (stroomhoofden) aangelegd, om de verdere landwaartse verplaatsing tegen te gaan. Tot halverwege de jaren negentig werden ook onderwaterbestortingen gedaan. De meest recente ingreep is de uitvoering van een geulwandsuppletie in 2017. Uit de waarnemingen blijkt dat de oever en de kust niet altijd en overal verplaatsen in de richting van Ameland. De tijdelijke aanvoer van zand van de buitendelta zorgt lokaal en tijdelijk ook voor vooruitgang van de onderwateroever (Figuur 4-21) en de kustlijn (Figuur 4-22).

De achteruitgang van de kust omvat niet alleen de kustlijn, maar de hele onderwateroever. De onderwateroever wordt gevormd door de geulwand van de getijdegeul Borndiep. De langjarige trend van achteruitgang is het gevolg van grootschalige en langjarige veranderingen in het kombergingsgebied, zoals beschreven in paragraaf 3.1. Deze langjarige ontwikkelingen worden gemoduleerd door veranderingen op de korte termijn, zoals de aanvoer van zand vanaf de aangelande strandhaak (Cleveringa et al., 2005). Veranderingen in de ligging van eb- en vloedscharen in de geul kunnen lokaal leiden tot verdieping (Figuur 4-11).

Verwachte toekomstige ontwikkelingen

De autonome ontwikkeling van de kustlijn is bij de westkust van Ameland gekoppeld aan de oostwaartse verplaatsing van het Borndiep. Het gevolg van de koppeling is dat de autonome grootschalige en langjarige ontwikkeling van de kustlijn een landwaartse trend omvat. De ontwikkelingen zullen op dezelfde wijze doorgaan: de langjarige trend is een oostwaartse verplaatsing van de geulwand. Hierop worden variaties geïntroduceerd door ontwikkelingen die op korte termijn plaatsvinden.

Consequenties voor het beheer en het beleid

Het beleid voor de kustlijn zorg is gericht op het handhaven van de ligging van de kustlijn. Voor het beheer van de kust betekent de autonome ontwikkeling dat naar verwachting met enige regelmaat maatregelen nodig zullen zijn. De maatregelen kunnen bestaan uit het uitvoeren van bestortingen, die aan de zuidwest al aanwezig zijn, of het uitvoeren van zandsuppleties. De zandsuppleties kunnen ook op de geulwand worden uitgevoerd (geulwandsuppleties).

7.7 Het onderliggende denkmodel bij de bevindingen voor de gebruiker.

De bevindingen voor de gebruiker zijn gebaseerd op een onderliggend denkmodel dat twee ruimte- en tijdschalen verbindt: de ontwikkelingen op de mesoschaal en op de macroschaal (het gehele kombergingsgebied en de aangrenzende delen van buitendelta en kust).

Op de macroschaal domineren twee ontwikkelingen: de netto sedimentatie in het kombergingsgebied en de verplaatsing van het zeegat naar het oosten. De netto sedimentatie leidt tot veranderingen in de arealen droogvallende plaat en geul en levert ook een bijdrage aan de toename van het baggerbezwaar in de vaarweg. Deze ontwikkeling raakt aldus zowel het mobiliteit en bereikbaarheidsbeleid en -beheer als dat voor natuur. De verplaatsing van het zeegat naar het oosten is de belangrijkste factor voor de structurele achteruitgang van de westkust van Ameland (veiligheid).

De dynamiek van de kustlijn en de problematiek van de vaarweg worden ook beïnvloed door veranderingen op de mesoschaal. In beide gevallen gaat het om dynamiek van de getijdegeulen, met eb- en vloed scharen en hun drempels. Bij de westkust van Ameland leidt dit tot fluctuaties op het tempo van kustachteruitgang. Soms is er lokale en tijdelijke vertraging (of zelfs tijdelijk aangroei) en soms is er juist versnelde achteruitgang. In de vaargeul is de ontwikkeling van de geulbochten en het splitsen van geulen in eb- en vloedscharen van invloed op de lengte van de vaarweg en het ontstaan van nieuwe drempels. Deze veranderingen spelen op een tijdschaal van enkele tot een tiental jaren omvat, op de ruimteschaal van de betreffende geul.

Dit denkmodel verschaft ook inzicht in toekomstige ontwikkelingen. De gevoeligheid voor zeespiegelstijging is afhankelijk van de sedimentatie in het kombergingsgebied en speelt op de macroschaal. Op de mesoschaal domineren juist de autonome (aangedreven door evoluties binnen het kombergingsgebied) ontwikkelingen. Er is wel een invloed van eventuele versnelde zeespiegelstijging op de problematiek van de vaarweg, aangezien het kombergingsvolume van de geul daardoor zal toenemen, maar dit is een orde kleiner dan de invloed van de veranderingen op de mesoschaal op de problematiek, zeker voor de komende twee decennia.

8 Referenties

- Allen J.R.L., 2000. Morphodynamics of Holocene salt marshes: a review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe. *Quaternary Science Reviews*, 19, 1155-1231.
- Baart, F., Leander, R., de Ronde, J., de Vries, H., Vuik, V., and Nicolai, R. 2015. Zeespiegelmonitor 2014. Technical Report 1209426.202, Deltares, HKV en KNMI.
- Beckerling Vinkers, J.A., 1943. Ameland Gat, 1943, Rijkswaterstaat studiedienst Hoorn, Nota D98.
- Begeleidingscommissie Bodemdaling Ameland, 2017. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost; evaluatie na 30 jaar gaswinning.
- Bertness M.D., 1991. Interspecific Interactions among High Marsh Perennials in a New-England Salt-Marsh. *Ecology*, 72, 125-137.
- Biegel. E.R.J., 1993. Morphological changes due to sea-level rise in tidal basins in the Dutch Wadden Sea versus concepts morphological response model MORRES. Rijksuniversiteit Utrecht IMAU rapport IMAU 93-14.
- Bouma, H., D.J. de Jong, F. Twisk, F. & K. Wolfstein, 2005. Zoute wateren EcotopenStelsel (ZES.1); voor het in kaart brengen van het potentiële voorkomen van levensgemeenschappen in zoute en brakke rijkswateren. Rapport RIKZ RIKZ, 2005.024.
- Cleveringa J., 2012. Quick Scan Baggervolumes Vaarweg Ameland. Arcadis, Document 076619305:A, in opdracht van RWS Noord-Nederland, 14 september 2012.
- Cleveringa, J. & A. Oost, 1999, The fractal geometry of tidal-channel systems in the dutch wadden sea, *Geologie en Mijnbouw* 78, 21.
- Cleveringa, J., 2010. Klimaatbuffer Zuidwest Ameland: Veiligheid, natuur en recreatie hand in hand rond de Veugelpölle; Projectplan; April 2010. Alkyonrapport A2553R1r4.
- Cleveringa, J., C.G. Israel, & D.W. Dunsbergen, 2005. De Westkust van Ameland. Resultaten van 10 jaar morfologisch onderzoek in het kader van de Rijkswaterstaat programma's KUST2000 en KUST2005. Rapport RIKZ/2005.029. Rijkswaterstaat RIKZ.
- Dankers N., Dijkema K.S., Londo G. & Slim P.A., 1987. De ecologische effecten van bodemdaling op Ameland. RIN, Texel.
- de Boer, M., G. Kool, M.F. Lieshout, 1991, Erosie en sedimentatie in de binnendelta van het Zeegat van Ameland 1926-1984, deelonderzoek nr. 4, Rijkswaterstaat Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Kust en Zee, Adviesdienst Hoorn, Rapport ANVX-91.H202, 42 pag., 22 bijlagen.
- De Groot A.V., Van Wesenbeeck B.K. & Van Loon-Steensma J.M. (2012). Stuurbaarheid van kwelders. In: Ministerie van Economische Zaken
- De Groot, A.V., A. P. Oost, R. M. Veeneklaas, E. J. Lammerts, W. E. van Duin & B. K. van Wesenbeeck, 2017. Tales of island tails: biogeomorphic development and management of barrier islands. *Journal of Coastal Conservation*, Volume 21, pp 409-419.
- Dijkema, K.S. , W.E. van Duin, E.M. Dijkman, A. Nicolai, H. Jongerius, H. Keegstra, L. van Egmond, H.J. Venema & J.J. Jongsma. 2013 Vijftig jaar monitoring en beheer van de Friese en Groninger kwelderwerken: 1960-2009, Alterra WOt-werkdocument 229.

- Dillingh, D., Baart, F., and de Ronde, J. 2010. Definitie zeespiegelstijging voor bepaling suppletiebehoefte. Technisch rapport 1201993-002, Deltares. Dillingh et al., 2010 (lineaire trend);
- Duran Matute, M., Gerkema, T., de Boer, G.J., Nauw, J.J. & Gräwe, U.. 2014. Residual circulation and freshwater transport in the Dutch Wadden Sea : a numerical modelling study. Ocean Science Vol. 10, p. 611-632. Duran-Matute, 2014
- Elias, E. & A. Bruens, 2012. Morfologische Analyse Boschplaat (Terschelling); Quicksan. Deltaresrapport 1206171-001.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B., en De Ronde, J., 2012, Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. Netherlands Journal of Geosciences, 91(03), 293-310.
- Elias, E. *in concept prep*, Paper over de Boschplaat en het Zeegat van Ameland.
- Elorche, M., 1983, Morfologische ontwikkeling van het Zeegat van Ameland, Rijkswaterstaat Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Kust en Zee, Adviesdienst Hoorn, Nota WWKZ-83.H010, 13 pag., 14 bijlagen.
- Esselink P., Dijkema K.S., Reents S. & Hageman G., 1998. Vertical accretion and profile changes in abandoned man-made tidal marshes in the Dollard estuary, the Netherlands. Journal of Coastal Research, 14, 570-582.
- Esselink, P. D. Bos, P. Daniels, W.E. van Duin & R.M. Veeneklaas. 2015. Van polder naar kwelder: tien jaar kwelderherstel Noorderleech. PUCCIMAR rapport 06, PUCCIMAR Ecologisch Onderzoek & Advies, Vries. A&W rapport 1901, Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek, Feanwâlden
- Eysink, W.D. & E.J. Biegel, 1992. Impact of sea level rise on the morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function; Investigations on empirical morphological relations, WL|Delft Hydraulics, rapport H1300.
- Eysink, W.D., 1979. Morfologie van de Waddenzee; gevolgen van zand- en schelpenwinning, WL|Delft Hydraulics, rapport R1336.
- French J.R. & Stoddart D.R., 1992. Hydrodynamics of salt marsh creek systems: implications for marsh morphological development and material exchange. Earth Surface Processes & Landforms, 17, 235-252.
- Geleynse, *in concept*. Korrelgrootte van zandwingebied tot strand; Conceptrapport Arcadis C03014.0002060.
- Gerritsen, F., 1952, Onderzoek kustverdediging Z.W.-kust Ameland, Rijkswaterstaat, Studiedienst Hoorn, Nota WWKZ-52.0, 36 pag en 16 bijlagen.
- Groot, A.V. de; Oost, A.P.; Veeneklaas, R.M.; Lammerts, E.J.; Duin, W.E. van; Wesenbeeck, B.K. van; Dijkman, E.M.; Koppenaal, E.C., 2015. Ontwikkeling van eilandstaarten - geomorfologie, waterhuishouding en vegetatie. OBN-rapport2014/OBN198-DK.
- Grootjans, A., Stuyfzand, P., Everts, H., de Vries, N., Kooijman, A., Oostermeijer, G., Nijssen, M., Wouters, B., Petersen, J., Shahrudin, R., 2014. Ontwikkeling van zoet-zoutgradiënten met en zonder dynamisch kustbeheer : een onderzoek naar de mogelijkheden voor meer natuurlijke ontwikkelingen in het kustgebied. Bosschap, bedrijfschap voor bos en natuur, Driebergen.
- Herman, P.M.J., N. Villars, H. Winterwerp, T. van Kessel, Z. Wang, C. Briere, L. van Rijn & J. Cleveringa. 2016. Analyse Vaargeul Holwerd-Ameland; Eindrapport. Deltaresrapport 1230378-005-ZKS-0001.

- Hoeksema, H.J., Mulder, H.P.J., Rommel, M.C., De Ronde, J.G. & De Vlas, J., 2004. Bodemdalingstudie Waddenzee 2004. Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd. Rapport RIKZ/2004.025. Rijkswaterstaat.
- IJnsen, F., 1979. Onderzoek naar de mogelijke oorzaken van de snelle verondieping van het Abt. Rijkswaterstaat directie Friesland, Rapport ANP 79-6.
- IJnsen, F., 1993. Analyse ligging kustlijn Friese Waddeneilanden met extrapolaties, Rijkswaterstaat Friesland, Rapport ANW 93.06.
- Israël, C.G., 1998, Morfologische ontwikkeling Amelanders Zeegat, Rijkswaterstaat RIKZ, werkdocument RIKZ/OS-98.147x, 32 pag., 11 bijlagen.
- Israel, C.G., and D.W. Dunsbergen, 1999. Cyclic morphological development of the Ameland Inlet, The Netherlands., paper presented at Proceedings IAHR Symposium on river, coastal and estuarine morphodynamics, Genova, Italy.
- Jager, M. & J. W. de Kleuver, 2016. Open Plan Proces vaarverbinding Ameland-Holwerd, Eindadvies.
- Jeuken, M.C.J.L., 2000. On the morphologic behaviour of tidal channels in the Westerschelde estuary. Proefschrift Universiteit Utrecht.
- Jong, D.J. de, K.S. Dijkema, J. Bossinade & J.A.M. Jansen, 1998, SALT97, een classificatieprogramma voor kweldervegetaties. Rijkswaterstaat-Meetekundige Dienst, afdeling GAE, Delft.
- Kater, B. L. Perk & J. Cleveringa Alkyon, 2008. Haalbaarheidsstudie vaarweg Ameland; Fase 1: selectie van Kansrijke alternatieven, Alkyon rapport A2066.
- Kool, G. 1980. Erosie/sedimentatie vlakte van Oosterbierum – 't Abt. Rijkswaterstaat Studiedienst Hoorn, Notitie WWKZ-80.H253.
- Löffler, M.A.M., De Leeuw, C.C., Ten Haaf, M.E., Verbeek, S.K., Oost, A.P., Grootjans, A.P., Lammerts, E.J., Haring, R.M.K., 2008. Eilanden natuurlijk. Natuurlijke Dynamiek en veerkracht op de Waddeneilanden. Het Tij Geleerd.
- LTV V&T Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013a. Ontwikkeling mesoschaal Westerschelde (factsheets). LTV V&T-rapport K-16. Rapport.
- LTV V&T Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013b. Samenhang in ontwikkelingen op verschillende tijd- en ruimteschalen project ltv veiligheid en toegankelijkheid; LTV V&T-rapport K-17
- Ministerie van EZ (voorheen LNV), 2012. Profielen habitattypen en soorten, Internetbron synbiosys Natura 2000, 2012
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016. Reactie op het eindadvies over de vaarverbinding Ameland-Holwerd, brief aan de Voorzitter van de Tweede Kamer der Staten-Generaal Den Haag, 19 december 2016.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007; Hydraulische Randvoorwaarden primaire waterkeringen voor de derde toetsronde 2006-2011 (HR 2006).
- Mulder, S. 2015. Buitendijks erfgoed oostelijke Waddenzee, rapport Rijksuniversiteit Groningen
- Nederhoff, K., B. Smits & Z. B. Wang. *in concept* 2017. KPP Wadden Data analyse: getij en morfologie Deltares rapport 11200521-000.
- Oost, A. P., 1995. Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian Inlet. A study of barrier islands, ebb-tidal deltas, inlets and

- drainage basins, *Geologica Ultraiectina*, Mededelingen van de Faculteit Aardwetenschappen no. 126, Utrecht University.
- Oost, A.P. & P.L. de Boer, 1994,. Sedimentology and development of barrier islands, ebbtidal deltas, inlets and back barrier areas of the Dutch Wadden Sea, *Senckenbergiana Maritima*, vol. 24, pag. 65-115 (ook als hoofdstuk in Oost, 1995).
- Oost, A.P. en H. de Haas, 1993, Het Friesche Zeegat, morfologisch sedimentologische veranderingen in de periode 1927-1970; Cyclische veranderingen in een tidal-inlet systeem, deel 1 en 2, Rapport in het kader van Kustgenese werkgroep 1, 96 pag.
- Oost, A.P., B.J. Ens, A.G. Brinkman, K.S. Dijkema, W.D. Eysink, J.J. Beukema, H.J. Gussinklo, B.M.J. Verboom & J.J. Verburgh, 1998. Integrale bodemdalingstudie Waddenzee, Nederlandse Aardolie Maatschappij, rapport.
- Oost, A.P., R. van Buren & A. Kieftenburg, 2017. Overview of the hydromorphology of ebbtidal deltas of the trilateral Wadden Sea. *Deltares report 11200926-001*, 338 pp. Oost 2017
- Rakhorst, H.D. & E.R.F. van der Goes. 1978. Invloed zandwinning Kikkertgat op bodemligging aangrenzende platen. Rijkswaterstaat Studiedienst Hoorn, Notitie 78H246
- Reents S., Dijkema K., van den Bergs J., Bossinade J. & de Vlas J., 1999. Drainage systems in the Netherlands foreland salt marshes and natural creek systems. *Marine Biodiversity*, 29, 125-126.
- Reitsma, J.M., J. de Jong, P. Boddeke & G. Hoefsloot. 2014. Toelichting bij de Vegetatiekartering Boschplaat 2012 Op basis van false colour-luchtfoto's 1:10.000.
- de Reus, J.H. de, 1983, Kustverdediging Ameland west, Rijkswaterstaat Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Kust en Zee, Adviesdienst Hoorn, Nota nr. WWKZ-83.H012, 34 pag., 27 bijlagen.
- Ridderinkhof, 2016.;
- Rijkswaterstaat, 2013. ;Kenmerkende waarden; Getijgebied 2011.0. Rapport.
- Rijkswaterstaat, 2017. Kustlijnkaarten 2016. rapport.
- Staatsbosbeheer, 2015. Klimaatbuffer Zuidwest Ameland Bouwen met de Natuur! Brochure.
- Stive, M.J.F. & W.D. Eysink, 1989. Voorspelling kustlijnontwikkeling 1990-2090, fase 3; deelrapport 3.1:dynamisch model van het Nederlandse kustsysteem, WL|Delft Hydraulics, rapport H825 IV.
- Stock M., 2011. Patterns in surface elevation change across a temperate salt marsh platform in relation to sea-level rise In: *Dynamische Küsten – Prozesse, Zusammenhänge und Auswirkung* (eds. Karius, Hadler, Deicke, Eynatten v, Brückner & Vött).
- Stumpf R.P., 1983.. The process of sedimentation on the surface of a salt marsh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 17, 495-508.
- Stuurgroep hydrografisch-sedimentologisch en biologisch ecologisch onderzoek met betrekking tot de winning van zand in de Waddenzee c.a., 1981. Zandwinning in de waddenzee; Resultaten van een hydrografisch-sedimentologisch en biologisch-ecologisch onderzoek. Rapport.
- Suchrow S., Pohlmann N., Stock M. & Jensen K., 2012. Long-term surface elevation changes in German North Sea salt marshes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 98, 71-83.
- Temmerman S., Bouma T.J., Van de Koppel J., Van der Wal D., De Vries M.B. & Herman P.M.J., 2007. Vegetation causes channel erosion in a tidal landscape. *Geology*, 35, 631-634.

- Temmerman S., Govers G., Wartel S. & Meire P., 2003. Spatial and temporal factors controlling short-term sedimentation in a salt and freshwater tidal marsh, Scheldt estuary, Belgium, SW Netherlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 739-755.
- Ten Haaf, M.E., Buijs, P.H., 2008. Morfologie en dynamiek van washoversystemen. Verkennende studie voor de Nederlandse Waddeneilanden.
- Van de Koppel J., Van der Wal D., Bakker J.P. & Herman P.M.J., 2005. Self-organization and vegetation collapse in salt marsh ecosystems. *The American Naturalist*, 165, E1-E12.
- Van der Spek, A. J. F., 1994, Large-scale evolution of Holocene tidal basins in the Netherlands, Proefschrift, Universiteit Utrecht, 191 pp.
- 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" Tidal Signatures in Modern and Ancient Sediments. Special Publications International Association of Sedimentologists, 24, B.W. Flemming and A. Bartholomä, eds., 239-258.
- Van Duin, W. E., H. Jongerius, A. Nicolai, J.J. Jongsma, A. Hendriks & C. Sonneveld, 2016. Friese en Groninger kwelderwerken: monitoring en beheer 1960-2014. WOt/Imares-rapport C042/16.
- Van Geer, P.F.C., 2007. Long-term morphological evolution of the Western Dutch Wadden Sea. WL| Delft Hydraulics rapport Z4169.00
- van Loon-Steensma, J.M. ,P.A. Slim, J. Vroom, J. Stapel & A.P. Oost. 2012. Een Dijk van een Kwelder; Een verkenning naar de golfreducerende werking van kwelders. Alterra-rapport 2267 & van Loon-Steensma, J.M., A.V. de Groot, W.E. van Duin, B.K. van Wesenbeeck en A.J. Smale. Zoekkaart Kwelders en Waterveiligheid Waddengebied; Een verkenning naar locaties in het Waddengebied waar bestaande kwelders of kwelderontwikkeling mogelijk kunnen bijdragen aan waterveiligheid. Alterra-rapport 2391.
- Van Rijn, L., J. Cleveringa en T. van Kessel. 2016. Analyse Vaargeul Holwerd-Ameland:Analyse historische baggergegevens en lodingen. Deltares rapport. 49 pp + annexes.
- Van Straaten, L.M.J.U. 1964. De bodem der Waddenzee. In: Abrahamse, J. e.a. Het Waddenboek, Thieme, Zutphen, pp. 75-151.
- Van Til, S.W., 2017. Tidal Meanders in the Ameland Basin A study to the underlying processes in the evolution of tidal meanders. Afstudeerverslag TU Delft.
- Van Veen, J. Ebb and flood channel systems in the Netherlands tidal waters, *Tijdschrift Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap* 67, 303 (1950).
- Vellinga P., H. Sas et al. 2015, Rapport Kennistafel 'Spoelmeer Holwerd aan Zee', (Leeuwarden, 2015), ISBN: 978-94-90289-33-1.
- Venema, J.E., H.A. Schelfhout, E. Moerman, L.A. van Duren, 2012, Kwelders en dijkveiligheid in het Waddengebied DP Wadden - Cluster 2 - Kwelders Projectnr 1205299-000, Deltares, Delft.
- Vermaas, T. & M. Marges. 2015. Detailanalyse volumeveranderingen rondom Ameland. Rapport Deltares 1220040-006.
- Villars, N., T. van Kessel, H. Winterwerp, Z. Wang, C. Briere, M. de Lucas Pardo, J. Cleveringa, L. van Rijn, P.M.J. Herman. 2016. Analyse vaargeul Holwerd-Ameland: Verkennende studie naar maatregelen om vertragingen en baggerbezwaar op te lossen. Deltares rapport. 69 pp. + annexes.

- 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.
- Wang Z.B., Vroom J., Van Prooijen B.C., Labeur R.J., Stive M.J.F., 2013, Movement of tidal watersheds in the Wadden Sea and its consequences on the morphological development, International. J. of Sed. Res., Vol. 28, No. 2, 2013, pp. 162–171.
- Weck van der A. & Crosato A., 2007. Aanslibbing Kikkertgatvaarbootroute tussen Holwerd en Nes. Analyse en inventarisatie oplossingsrichtingen. Z4021.00. WL | Delft Hydraulics.
- Wesenbeeck, B.K. van, P. Esselink, A.P. Oost, W.E. van Duin, A.V. de Groot, R.M. Veeneklaas, T. Balke, P. van Geer, A.C. Calderon & A. Smale, 2014. Verjonging van half-natuurlijke kwelders en schorren. OBNRapport nr. 2014/OBN196-DK, Driebergen. 75 p.
- Zwarts, L., 2004. Bodemgesteldheid en mechanische kokkelvisserij in de Waddenzee. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat RIZA rapport RIZA/2004.028. incl. cd-rom.

A Metingen en gegevens fysica

Bodemligging

Vaklodingen: 1989, 1993, 1999, 2005, 2011, 2017

Beheerslodingen: vaargeulen

Specials bodemligging: aanvullende loding 2016, opnamen stabiliteit bestorting Ameland zuidwest

Kwelderhoogte (ook in AHN en enkele LIDAR opnamen)

Hydrodynamica

Waterstanden: Nes & Holwerd.

Andere MWTL waarnemingen: Dantzigat: zwevend stof etc.

Stroomsnelheden, debieten ADCP debietmeting Borndiep 2003

- Barsingerhorn, S., J. Briek, M.A. Huizinga, H.J. Hut en P. Noordstra, 1997, Project Strobodi; meting Bornrif/Borndiep september 1996, Rijkswaterstaat directie Noord-Nederland Meetdienst Noord-Nederland, rapport ANI 97.006, 26 pag. en 30 bijlagen.
- Briek, J., M.A. Huizinga, H.J. Hut en P. Noordstra, 1998, Project Strobodi; meting Borndiep september 1997, Rijkswaterstaat directie Noord-Nederland Meetdienst Noord-Nederland, rapport ANI 98.005, 16 pag. en 17 bijlagen.
- Visser, R., 1999, Amelander Zeegat '99; Debietmetingen en morfologische ontwikkelingen, Ingenieursbureau S.D. Kamminga, rapport, 19 pag. en 1 bijlage.
- Kamminga, S.D., 1996, Resultaten van stromingsmetingen in het Borndiep op 17 september 1996, Aqua Vision, rapport AV20, 8 pag. en 4 bijlagen.

Vaarweg Holwerd-Ameland 2016.

Specials golven: SBW golfmeetboeien

Sedimentsamenstelling

Sedimentatlas

Niet Rijkswaterstaat: SIBES bodemsamenstelling

Kwelders

Friese Groningse kwelders:

Friese en Groningse kwelders 1992

Friese en Groningse kwelders 1996

Friese en Groningse kwelders 2002

Friese en Groningse kwelders 2008

Friese en Groningse kwelders 2014

Ameland:

Ameland 1988

Ameland-Oost 1993

Ameland-Oost 1997

Ameland 2002

Ameland 2008

Ameland 2014

Terschelling:

Terschelling Boschplaat 1991

Terschelling Boschplaat 1995

Terschelling Boschplaat 2006

Terschelling Boschplaat 2012