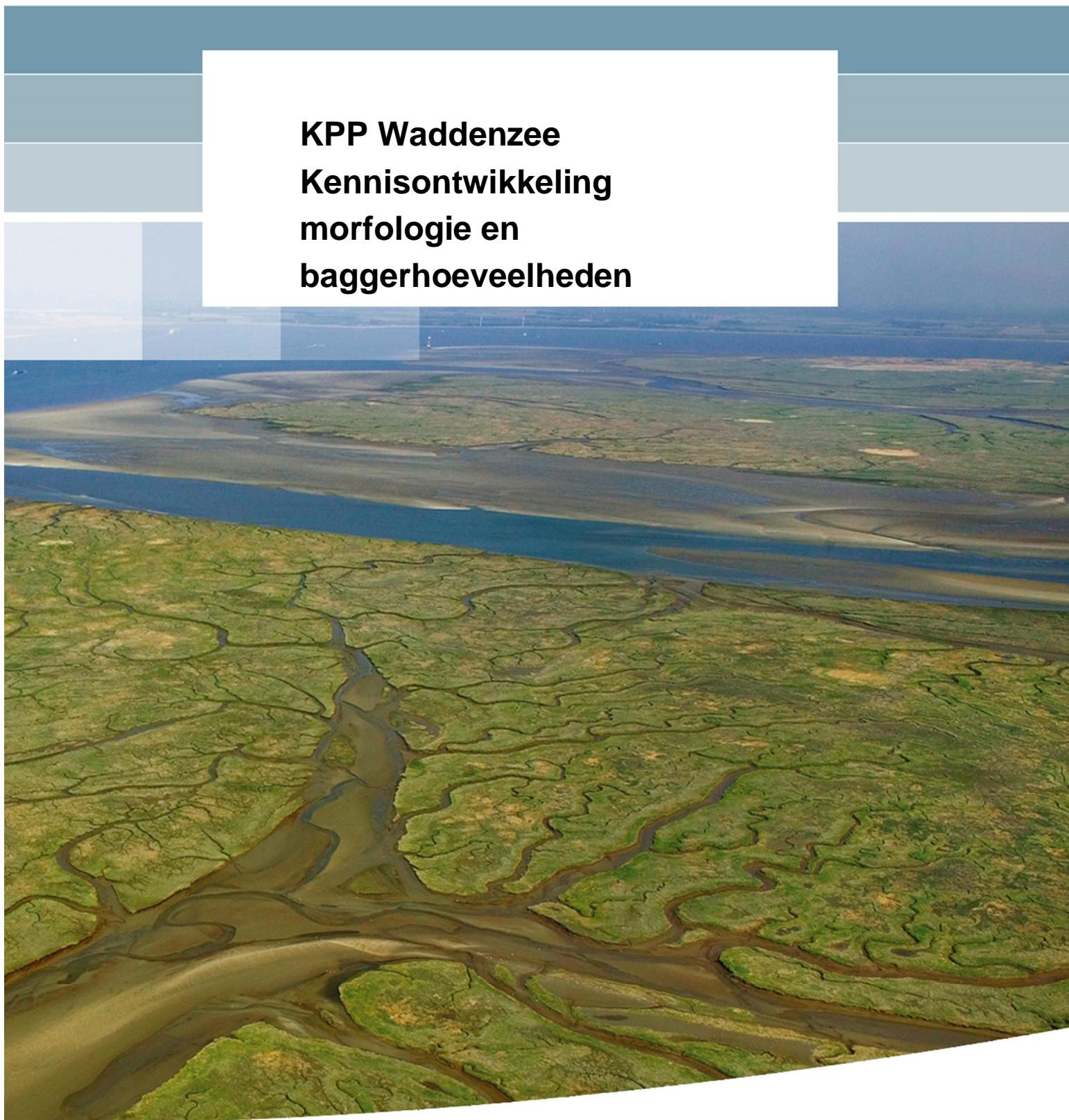


**KPP Waddenzee  
Kennisontwikkeling  
morfologie en  
baggerhoeveelheden**





**KPP Waddenzee**  
**Kennisontwikkeling morfologie en**  
**baggerhoeveelheden**

Data analyse hypsometrie en getij

11200521-000



**Titel**  
KPP Kennisontwikkeling Morfologie Waddenzee

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Rijkswaterstaat Noord-Nederland	11200521-000	11200521-000-ZKS-0005	46




**Trefwoorden**  
Waddenzee, Morfologie, Getij, Data analyse

**Samenvatting**

In het kader van het KPP Kennisontwikkeling Morfologie Waddenzee project is een data analyse verricht waarbij de historische waarnemingen van bodemhoogtes en waterstanden in het Nederlandse deel van de Waddenzee zijn geanalyseerd. In deze studie is de analyse van Elias et al. (2012) herhaald, die de bodemhoogtes tot 2005 beschouwde, en uitgebreid met nieuwe gegevens. Bovendien zijn voor de Waddenzeebekkens ook hypsometrische curven bepaald om de ontwikkelingen van zowel de geulen, sub-getijdengebieden en intergetijdengebieden te analyseren. Verder zijn de waterstanden van alle stations binnen en buiten de beschouwde bekkens geanalyseerd om de ontwikkelingen van de getijamplificatie en -asymmetrie te bepalen. Door de morfologische veranderingen en de ontwikkelingen van het getij met elkaar te relateren, is het begrip van de verschillende zeegatsystemen in het Nederlandse deel van Waddenzee verbeterd.

De belangrijkste bevindingen van deze studie zijn:

- Sedimentatie is opgetreden sinds 1930 in alle bekkens van de Nederlandse Waddenzee en volgt een min of meer lineaire trend tot en met de laatste observatie. Het Eierlandse Gat vormt een uitzondering op deze trend en erodeert sinds de jaren '30. De afsluitingen van de Zuiderzee en de Lauwerszee zijn de belangrijkste oorzaken van de sedimentatie. Sinds 1990 is er bijna 100 miljoen m<sup>3</sup> sediment gesedimenteerd waarvan 65% in de westelijke Waddenzee.
- De intergetijdengebieden van alle bekkens, inclusief het Eierlandse Gat waarin erosie is opgetreden, zijn uitgebreid en/of verhoogd. De hypothese is dat ontwikkeling van de plaathoogte in belangrijke mate is gestuurd door de verandering van de zeespiegel. De gebruikte analysemethode is echter niet geschikt om beslissend te bepalen of platen meegroeien met de zeespiegelstijging
- Veranderingen van de getijamplificatie en -asymmetrie in de verschillende bekkens zijn te verklaren door de opgetreden morfologische ontwikkelingen. De ontwikkelingen van sedimentimport naar de bekkens zijn echter niet goed te relateren aan de veranderingen van de asymmetrie van het verticale getij ( $M_4$  en  $M_2$  amplitudeverhouding en relatief faseverschil)

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
v1.1	dec. 2017	Kees Nederhöff		Edwin Elias		Frank Hoozemans	
		Bob Smits					
		Zheng Bing Wang					

**Status**  
definitief



## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1	Achtergrond en probleemstelling	1
1.2	Doel van de data-analyse studie	1
1.3	Leeswijzer	1
<b>2</b>	<b>Studiegebied</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Morfologische analyse</b>	<b>5</b>
3.1	Beschikbare data	5
3.2	Analysemethode	5
<b>4</b>	<b>Getij analyse</b>	<b>7</b>
4.1	Beschikbare data	7
4.2	Analysemethode	8
4.3	Tijdspannes en getijdefinities	8
4.3.1	Tijdspannes	8
4.3.2	Getijkarakteristieken	9
<b>5</b>	<b>Resultaten</b>	<b>11</b>
5.1	Morfologische analyse	11
5.1.1	Zeegat van Texel	12
5.1.2	Eierlandse Gat	15
5.1.3	Zeegat van het Vlie	18
5.1.4	Amelander Zeegat	21
5.1.5	Friesche Zeegat	24
5.1.6	Westelijke en Oostelijke Waddenzee	27
5.2	Getij analyse	28
5.2.1	Algemene patronen	28
5.2.2	Specifieke patronen op basis van jaarlijkse periodes	31
<b>6</b>	<b>Samenhang ontwikkelingen van morfologie en getij</b>	<b>39</b>
6.1	Veranderingen van getijamplificatie en morfologie	39
6.2	Veranderingen van getijasymmetrie en morfologie	39
6.3	Veranderingen van getijasymmetrie en sedimentimport	40
<b>7</b>	<b>Discussie</b>	<b>41</b>
<b>8</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>43</b>
8.1	Conclusies	43
8.1.1	Morfologische analyse	43
8.1.2	Getij analyse	43
8.2	Aanbevelingen	44
<b>9</b>	<b>Referenties</b>	<b>45</b>

## Bijlage(n)

<b>A</b>	<b>Korte termijn dagelijkse patronen</b>	<b>A-1</b>
A.1	Zeegat van Texel	A-1
A.2	Zeegat van het Vlie	A-3
A.3	Amelander Zeegat	A-5
A.4	Friesche Zeegat	A-7
<b>B</b>	<b>Repository voor de data en analyse scripts</b>	<b>B-1</b>
<b>C</b>	<b>Bathymetrische kaarten</b>	<b>C-1</b>
C.1	Zeegat van Texel	C-1
C.2	Eierlandse Gat	C-2
C.3	Zeegat van het Vlie	C-4
C.4	Amerlander Zeegat	C-5
C.5	Friesche Zeegat	C-6



# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond en probleemstelling

De Waddenzee wordt gekenmerkt door enerzijds grootschalig menselijk ingrijpen (e.g. afsluiting Zuiderzee en Lauwerszee) en anderzijds door autonome natuurlijke morfologische ontwikkeling. Vanuit het beheer bestaat de behoefte om meer inzicht te krijgen in de effecten van menselijk ingrijpen en natuurlijke invloeden in de Waddenzee ten gunste van de veiligheid, toegankelijkheid en natuurlijkheid van het systeem.

Elias et al. (2012) beschrijft de morfologische ontwikkeling van de Waddenzee in de 20<sup>e</sup> eeuw onder invloed van zeespiegelstijging en toenemende invloed van menselijk ingrijpen. In deze studie werden de sedimentbalans en de morfologische ontwikkeling over de periode 1926-2005 beschreven. Deze studie is echter niet volledig te reproduceren. Daarnaast is het met de doorgaande metingen het nu mogelijk ook mogelijk de analyse met zeven jaar uit te bereiden en zo een beeld van de meest recente ontwikkelingen te verkrijgen.

## 1.2 Doel van de data-analyse studie

Deze rapportage beschrijft een data analyse. Het koppelen van de geconstateerde veranderingen in de morfologie en het getij met beheersvraagstukken valt buiten het bereik van dit rapport. De analyse zal nauwkeurig worden beschreven om reproduceerbaarheid te garanderen. Dit is van belang om zo de analyse te kunnen herhalen wanneer er nieuwe data beschikbaar is. In Appendix B wordt de reproduceerbaarheid verder toegelicht.

Het doel van deze studie is driedelig.

- 1 Allereerst, vult deze studie het sedimentbudget aan tot 2012.
  - Dit maakt het mogelijk om te kwantificeren hoeveel sediment van de kustzone naar de bekkens van de Waddenzee wordt getransporteerd (i.e. vraag naar sediment).
- 2 Ten tweede, beoogt deze studie een verbeterd inzicht te geven in de morfologische ontwikkeling van de Waddenzee van de 20<sup>e</sup> eeuw tot en met nu door de ontwikkeling van hypsometrische curves te onderzoeken.
  - Dit laat bijvoorbeeld zien waar er erosie/sedimentatie in het bekken optreedt en of het intergetijde gebied (platen) zeespiegelstijging volgt.
- 3 Ten derde, worden waterstandstijdseries gebruikt voor de kwantificatie en analyse van getijkarakteristieken (i.e. getijcomponenten, amplificatie, asymmetrie) in de Waddenzee voor lange en kortere tijdschalen.
  - Dit geeft weer in hoeverre veranderingen van de getijamplificatie en -asymmetrie in de verschillende bekkens zijn te verklaren door de opgetreden morfologische ontwikkelingen (i.e. transport van sediment).

## 1.3 Leeswijzer

Na de inleiding van dit rapport (Hoofdstuk 1) en een beschrijving van het gebied (Hoofdstuk 2) valt het rapport uiteen in drie grote onderdelen. De methodiek van de morfologische analyse wordt gepresenteerd in Hoofdstuk 3 en getij analyse in Hoofdstuk 4. De resultaten van beide analyses wordt gepresenteerd in Hoofdstuk 5. Ten slotte wordt in Hoofdstuk 6 een discussies / conclusies een aanbeveling gegeven op basis van de doelstelling uit de inleiding.



## 2 Studiegebied

De Waddenzee is een ondiep estuarium gescheiden van de Noordzee door een reeks Waddeneilanden. Het bevat werelds grootste ononderbroken systeem van intergetijdengebieden en is van ongekeerde ecologische waarde. In juni 2009 kreeg de Waddenzee een plek op de UNESCO Werelderfgoedlijst. De zeegaten tussen de Waddeneilanden verbinden de Waddenzee met de Noordzee wat water- en sedimentuitwisseling mogelijk maakt.

Er zijn vijf bewoonde eilanden in het Nederlandse deel van de Waddenzee, van west naar oost: Texel, Vlieland, Terschelling, Ameland en Schiermonnikoog. Verder richting het oosten zijn er een aantal kleinere eilanden en zeegaten die het Groninger Wad verbinden met de Waddenzee. Deze eilanden zijn niet bewoond en worden niet beschermd tegen overstromingen. De Eems vormt de grens tussen Nederland en Duitsland en is qua morfologie significant anders dan de rest van de zeegaten in het Nederlandse deel van de Waddenzee. In het vervolg van dit rapport wordt de Eems dan ook buiten beschouwing gelaten. Een overzicht van de getijdenbekkens is opgenomen in Figuur 2.1.

Alle zeegaten in de Waddenzee hebben een vergelijkbare morfologische structuur. Zeewaarts van het zeegat vindt uitwisseling van sediment plaats tussen de buitendelta en de aangrenzende kust. Via het zeegat vindt er ook uitwisseling plaats tussen de buitendelta en het getijdebekken met droogvallende platen en geulen. Het merendeel van het sediment in de Noordzee is zandig, en het sediment in de Waddenzeebekkens bestaat uit een mengsel van zand en slib.

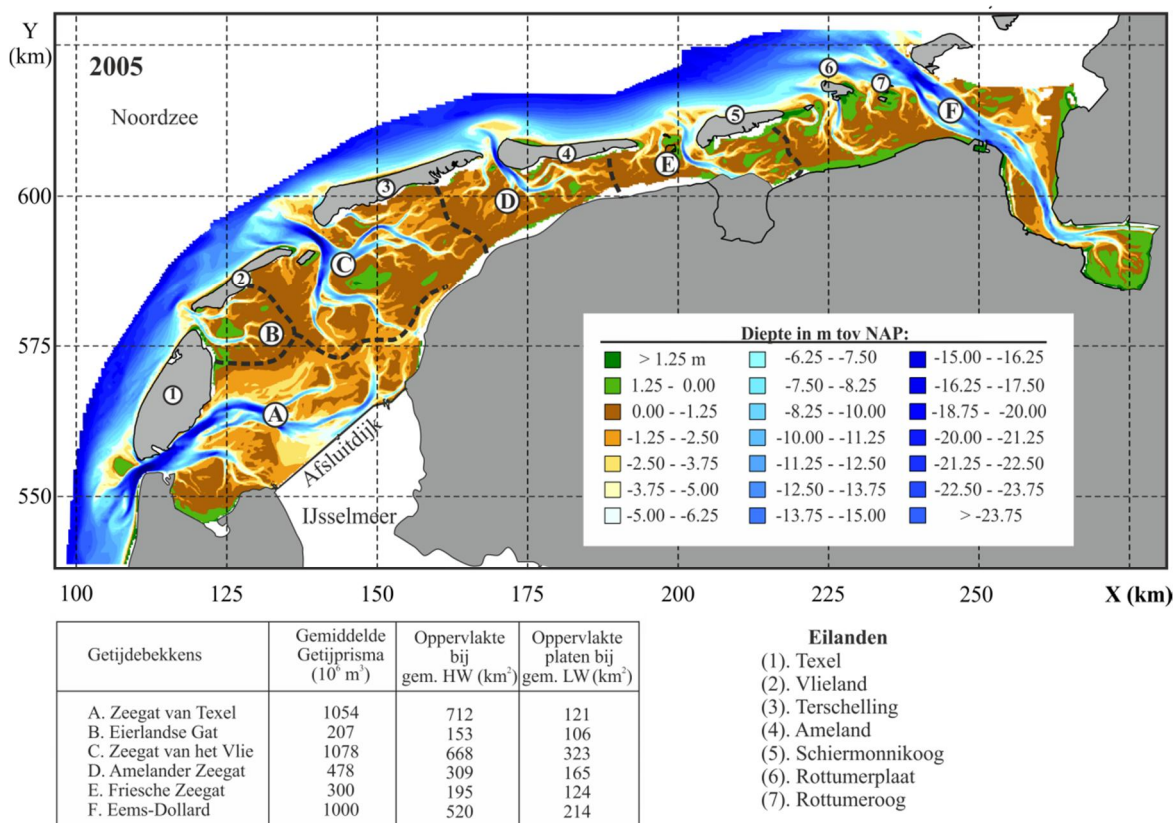
De lange termijn morfologische ontwikkeling van de Waddenzee is beïnvloed door zowel globale veranderingen zoals zeespiegelstijging als door lokaal menselijk ingrijpen.

In de laatste eeuw steeg in de Waddenzee de zeespiegel met ongeveer 20 cm. De verwachting is dat de zeespiegelstijging zich verder doorzet en versnelt als gevolg van klimaatverandering. Hoe snel de zeespiegel zal stijgen is echter onzeker. Tegen het eind van de 21e eeuw kan dit tussen de 30 en 300 cm zijn (e.g. Meehl et al., 2007; KNMI, 2017; Le Bars et al, 2017). Bodemdaling als gevolg van gas- en zoutwinning kan echter lokaal maar tijdelijk resulteren in een hogere relatieve zeespiegelstijging (Hoeksema et al., 2004; Cleveringa and Grasmeyer, 2010).

Menselijke ingrepen startten in de Waddenzee rond de 10<sup>e</sup> eeuw met de ontginning van veen waardoor grootschalige doorbraken optraden. De grootste ingrepen vonden echter vele honderden jaren later plaats met het afsluiten van de Zuiderzee (1932) en de Lauwerszee (1969). Deze ingrepen blijven de morfologische ontwikkeling in de Waddenzee beïnvloeden (Elias et al., 2012). Ook in de toekomst blijft de menselijke invloed van belang. Bijvoorbeeld, bodemdaling als gevolg van gas- en zoutwinning en toevoer van sediment via zandsuppleties voor het onderhoud van de Noordzeekust zijn ingrepen die het morfologische systeem van de Waddenzee beïnvloeden.

De zeegaten in het Nederlandse deel van de Waddenzee behoren tot de gemengde energie omgeving (Engels: *mixed-energy environment*) volgens de classificatie van Davis & Hayes (1984). Het getij is dubbeldaags met een gemiddelde getijslag van 1.4 meter (m) bij het Zeegat van Texel tot 2.5 m in de monding van de Eems-Dollard. Het golfklimaat bevat

voornamelijk opgewekte golven vanuit de Noordzee. De gemiddelde significante golfhoogte is 1.3 meter vanuit de richting westzuidwest met een golfperiode van 5 seconden (s) (Roskam, 1988; Wijnberg, 1995).



\* Kentallen bekkens gebaseerd op Louters & Gerritsen (1994)

Figuur 2.1 Getijdenbekkens van de Waddenzee

### 3 Morfologische analyse

#### 3.1 Beschikbare data

Rijkswaterstaat verzamelt bodemhoogtegegevens voor kustbeheerprogramma's. Voor deze studie werden vier verschillende datasets gebruikt. De Vaklodingen dataset omvat bodemhoogtegegevens van verschillende jaren langs de gehele kustlijn en is daarmee de belangrijkste bron voor deze studie. De Vaklodingen dataset wordt geïnterpoleerd naar een 20x20 m resolutie (Rijkswaterstaat, 2005) en bevatte ten tijde van dit onderzoek bodemhoogtegegevens voor de periode van 1926 tot 2012. Vanaf 1986 zijn de gegevens direct op 20x20 m resolutie digitaal beschikbaar gemaakt door Rijkswaterstaat. Daarvóór waren de data verkregen door digitalisatie van kaarten en de oorspronkelijke resolutie was 250x250 m.

Sinds 1997 worden er aanvullende LIDAR<sup>1</sup> metingen gedaan in het kader van het Kusthoogte programma, waarbij ook de kwelders en droogvallende platen worden meegenomen. Deze data heeft een wisselende resolutie en meetfrequentie en werd gebruikt om ontbrekende gegevens uit de Vaklodingen aan te vullen. Verder worden de kustlijnen jaarlijks opgemeten en opgeslagen in de JarKus database. Deze worden ook gebruikt om missende gedeeltes in te vullen.

Tot slot werden er ook metingen gebruikt die gedaan zijn in het kader van het programma Sterkte & Belastingen Waterkeringen (SBW). Het SBW betracht hiermee hydrodynamische modellen die de Nederlandse kustbeschermingswerken beoordelen te verbeteren. Deze data werd uitsluitend gebruikt om de Vaklodingen data aan te vullen voor het Amelander Zeegat (Rijkswaterstaat, 2007). Daarmee zijn de bodems van 2007 en 2008 voor Amelander Zeegat gemaakt.

De beschikbare data per jaar is gevisualiseerd op kaarten, die te vinden zijn op de repository. Ten opzichte van Elias et al. (2012) zijn dit dezelfde databronnen. Hierbij wordt wel opgemerkt dat naast de meest recente bodems (> 2005) ook het jaar 2005 al anders kan zijn dan in de studie van Elias et al. (2012). De Waddenzee bekkens worden namelijk elke 6 jaar opgemeten. In de studie van Elias was er nog geen dekkende 2005 bodem voor de gehele Waddenzee beschikbaar. Voor een aantal zeegaten extrapoleerde Elias et al (2012) vanuit de dan meest recent beschikbare dataset. In deze studie was die stap niet nodig. Data van voor 2005 zou in principe wel hetzelfde moeten zijn, echter is het mogelijk dat er een correctie in de meetdata heeft plaatsgevonden.

#### 3.2 Analysemethode

De Vaklodingen dataset is opgesplitst per zeegat op basis van de begrenzingen gedefinieerd door VOP<sup>2</sup> (Walburg, 2005), zie Figuur 3.1. Om de datasets te completeren werden volgende stappen ondernomen waar nodig:

- 1) indien beschikbaar werden ontbrekende gegevens opgevuld met allereerst LIDAR data en vervolgens SBW data uit hetzelfde jaar;
- 2) thans missende data is opgevuld door gebruik te maken van lineaire interpolatie tussen dichtstbijzijnde in de tijd beschikbare data per locatie;

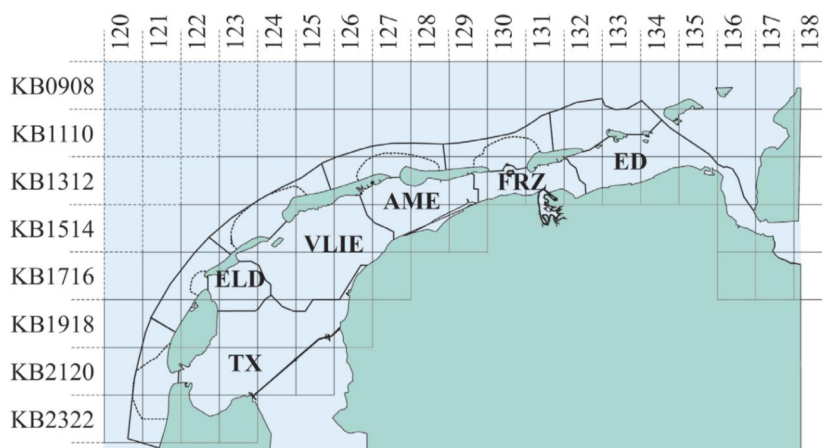
<sup>1</sup> Light Imaging, Detection And Ranging (LIDAR) is een onderzoeksmethode die de afstand tot een bepaald punt bepaalt met een laser, waarbij de gereflecteerde puls wordt gemeten met een sensor

<sup>2</sup> [https://repos.deltares.nl/repos/KPP-Wadden/trunk/11200521-000-ZKS-0002/01\\_morfologische-analyse/01\\_data](https://repos.deltares.nl/repos/KPP-Wadden/trunk/11200521-000-ZKS-0002/01_morfologische-analyse/01_data)

- 3) overgebleven gaten in de datasets werden gevuld met interpolatie vanaf de dichtstbijzijnde ruimtelijke punten binnen hetzelfde jaar;
- 4) afwijkende data die in eerdere analyses buiten beschouwing is gelaten, is ook voor deze analyse verwijderd.

Deze analysemethode is erg vergelijkbaar met Elias et al. (2012). Hierin werd de data eerst per jaar visueel geïnspecteerd, waarbij individuele ontbrekende punten gecorrigeerd werden middels ruimtelijke driehoeksinterpolatie en uitschieters verwijderd werden. Ontbrekende data werd ofwel gevuld door tijdsinterpolatie (voor grote gaten) of door interne diffusie vanuit de dichtbijgelegen ruimtelijke punten (voor kleinere gaten). Omdat deze methode niet volledig objectief (en daarmee reproduceerbaar) is, werd in deze data analyse missende data altijd opgevuld door eerst te interpoleren over de tijd (stap 2) en daarna ruimtelijk te interpoleren (stap 3) i.e. tijd-ruimte interpolatie. Deze methode wordt geprefereerd boven een ruimte-tijd interpolatie, aangezien data voornamelijk ontbreekt op ruimtelijk afwijkende locaties, zoals droogvallende platen, die niet goed worden afgeschat door een ruimtelijke interpolatie. Een ruimtelijke interpolatie zou daarom tot fouten kunnen leiden, vooral wanneer er grote temporele bathymetrische variaties zijn. Immers, een geul zal met een ruimte-tijd interpolatie leiden tot minder diepe geul dan met een tijd-ruimte interpolate. Stap 4 is van toepassing op afwijkende data uit voor het Vlie voor de jaren 1981 & 2005. Een impressie voor het eerste en laatste jaar is weergegeven in Appendix C.

Vervolgens werd de hypsometrische curve bepaald per zeegat. De bodemhoogtegegevens werden gesorteerd op grootte en weergegeven ten opzichte van het cumulatieve bekkenoppervlakte. Dit maakt het mogelijk aan te geven wat het aandeel van de verschillende hoogtezones aan het natte oppervlak is. Tot slot, is het natte volume ten opzichte NAP door deze oppervlakte (gerepresenteerd door de hypsometrische curve) te integreren over de diepte. De verandering van dit natte volume is bepaald ten opzichte van het basisjaar 1990. Het basisjaar van 1990 is gekozen aangezien dit het moment is waarin de Nederlandse overheid is begonnen om structurele achteruitgang van de kustlijn tegen te gaan doormiddel van de zandsuppleties.



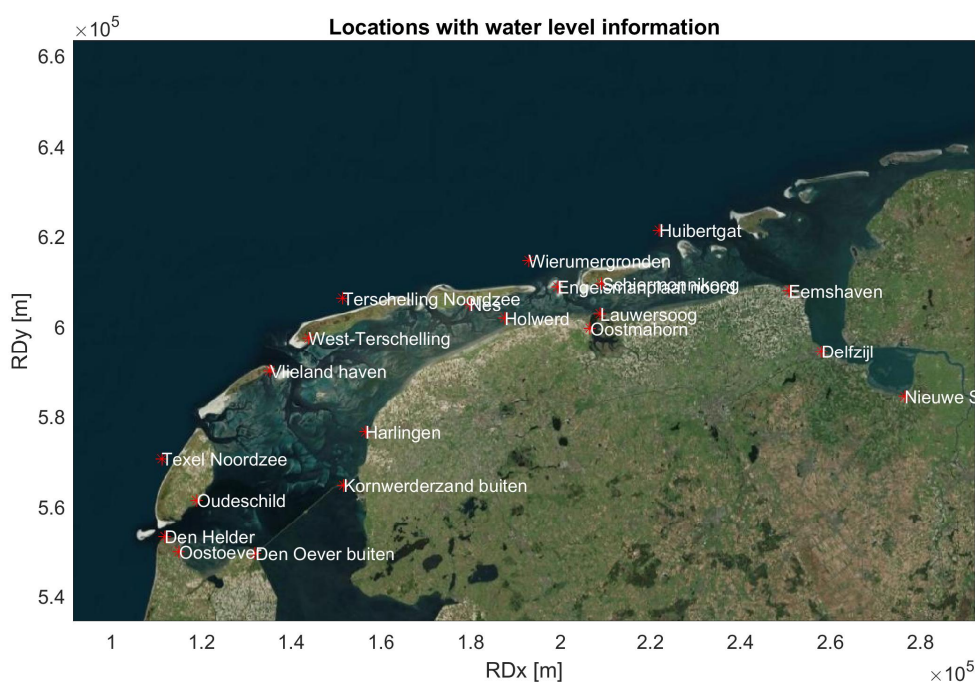
Figuur 3.1: Overzichtskartaal van de 'Vaklodingen' blokken en begrenzingen, zoals gebruikt in de analyse van bekkenvolumes. Buitendelta's zijn weergegeven met de gestreepte lijn (Elias et al., 2012).

## 4 Getij analyse

### 4.1 Beschikbare data

In deze data analyse worden de waterstanden bij de 21 stations gebruikt waarvan lange-termijn data beschikbaar is (Figuur 4.1). Er is gestart met het opslaan van waterstanden sinds het eind van de 19<sup>e</sup> eeuw, de methode en frequentie verschilt over de tijd. Bijvoorbeeld, in het verleden werden getijmeters manueel afgelezen tijdens hoog- en laagwater, maar tegenwoordig is de dataverzameling elke tien minuten en volledig automatisch. Tabel 4.1 laat zien dat de eerste dataverzameling van waterstanden is gestart in 1879 bij Den Helder. Bij de meeste stations begon het opnemen van waterstanden rond de jaren 1970.

Tijdsreeksen van waterstanden zijn verkregen via waterbase<sup>3</sup>. Verzamel en analyse stappen zijn uitgevoerd in Matlab. De volledige dataset met alle waterstanden is opgeslagen in netcdf en Matlab formaat op de KPP Wadden repository<sup>4</sup>.



Figuur 4.1 Overzicht van alle getijstations in en in nabijheid van de Nederlandse Waddenzee

<sup>3</sup> URL: [live.water.base.nl](http://live.water.base.nl)

<sup>4</sup> [https://repos.deltares.nl/repos/KPP-Wadden/trunk/11200521-000-ZKS-0002/02\\_getij\\_analyse/01\\_data](https://repos.deltares.nl/repos/KPP-Wadden/trunk/11200521-000-ZKS-0002/02_getij_analyse/01_data)

Tabel 4.1 Beschikbare getijstations met bijhorende periode

Stations	Eerste obs	Laatste
Delfzijl	01-Jan-1889	03-Apr-16
Den Helder	01-Jan-32	03-Apr-16
Den Oever buiten	01-Jan-21	21-Apr-17
Eemshaven	29-Dec-78	21-Apr-17
Engelsmanplaat noord	01-Jan-81	01-Dec-92
Harlingen	01-Sep-35	03-Apr-16
Holwerd	01-Jan-71	21-Apr-17
Huibertgat	01-Jan-73	21-Apr-17
Kornwerderzand buiten	01-Sep-32	21-Apr-17
Lauwersoog	01-Jan-71	21-Apr-17
Nes	01-Jan-71	21-Apr-17
Nieuwe Statenzijl	01-Jan-79	21-Apr-17
Oostmahorn	01-Jan-32	25-May-69
Oostoever	01-Jan-71	01-Jan-81
Oudeschild	01-Jan-71	15-Apr-17
Schiermonnikoog	01-Jan-71	15-Apr-17
Terschelling Noordzee	01-Mar-89	02-May-17
Texel Noordzee	01-Jun-89	02-May-17
Vlieland haven	01-Nov-43	21-Apr-17
West-Terschelling	01-Feb-28	15-Apr-17
Wierumergronden	01-Jan-81	02-May-17

## 4.2 Analysemethode

De dataset per station is een tijdserie. Voor verschillende tijdsperiodes is een klassieke harmonische analyse uitgevoerd met  $t_{tide}$  (Pawlowicz et al., 2002). Dit betekent dat het getijsignaal is gemodelleerd als de sommatie van een eindige set van sinusoiden met een specifieke frequentie, amplitude en faseverschil gerelateerd aan astronomische parameters. Er wordt niet gecorrigeerd voor onopgeloste getijcomponenten (bijvoorbeeld de periodieke beweging van de maan met een periode van 18,6 jaar is zichtbaar in de getijamplitude), aangezien de focus is op de belangrijkste getijcomponenten (e.g. M2). Dit geldt voor alle geanalyseerde tijdsperiodes.

Het resultaat van een harmonische analyse is een set van getijcomponenten, elk met een eigen frequentie, amplitude en fase. Een analyse van de resultaten is uitgevoerd voor verschillende tijdsperiodes en met nadruk op verschillende getijkarakteristieken (zie 4.3.2).

## 4.3 Tijdsperiodes en getijdefinities

### 4.3.1 Tijdsperiodes

De datasets zijn geanalyseerd voor drie verschillende tijdsperiodes.

- Allereerst, de algemene patronen voor alle verschillende stations zijn bepaald door middel van een harmonische analyse voor de gehele beschikbare tijdseries. Het resultaat is een overzicht van de algemene patronen van de verschillende getijcomponenten op de Noordzee en in de Waddenzee.
- Ten tweede, de dataset is opgesplitst in jaarlijkse tijdseries van 1945-2016. Voor elke jaarlijkse tijdserie wordt, wederom, een harmonische analyse uitgevoerd. Het resultaat geeft een beeld van de lange termijn ontwikkeling van de verschillende getijkarakteristieken. Om eventuele ruis te filteren is er gebruik gemaakt van een



glijdend gemiddeld van 5 jaar. Voor de jaarlijkse analyse worden ook lineaire trends inclusief bijhorende p-waarde bepaald. Wanneer de p-waarde kleiner dan 0.05 is, is de trend statistisch significant.

- Ten derde, om te focussen op de korte termijn dagelijkse patronen, wordt de dataset verdeeld in tijdseries van 49 uur en 40 minuten (i.e. vier keer de periode van  $M_2$ ) van 1970 tot 2016. Deze tijdsperiode is te kort om onderscheid te maken tussen twee beperkte in de frequentie verschillende dubbeldaagse of viermaaldaagse getijcomponenten (e.g.  $M_2$  en  $S_2$  of  $M_4$  en  $MS_4$ ). Vandaar dient men te spreken over dubbeldaagse ( $D_2$ ) en viermaaldaagse ( $D_4$ ) getijden. Het voordeel van deze methode is dat dagelijkse gebeurtenissen in kaart kunnen worden gebracht aangezien dag-tot-dag variaties expliciet worden meegenomen (Wang et al., 2014). Om het nadeel van ruis te boven te komen wordt gebruik gemaakt van een glijdend gemiddelde van een lunaire maand.

#### 4.3.2 Getijkarakteristieken

De ontwikkeling van de waterstanden in de Waddenzee zijn geanalyseerd op basis van volgende parameters.

- Algemeen: getijcomponenten
  - $M_2$  amplitude en fase. De  $M_2$  is het dubbeldaags maangetij en vaak de belangrijkste getijcomponent (i.e. grootste amplitude). De amplitude en fase zijn gerelateerd aan de sinus met een snelheid van  $28.98^\circ/\text{uur}$ .
  - $M_4$  amplitude en fase. De  $M_4$  is een hogere harmonische component met een snelheid van  $57.97^\circ/\text{uur}$  en een ondiepwatereffect van  $M_2$  (i.e. harmonische boventoon / veelvoud van  $M_2$ ). Naast  $M_4$  bestaan er ook de hogere harmonische boventonen van  $M_2$  zoals  $M_6$  en  $M_8$ . Ondiepwatereffecten ontstaat doordat de getijgolf sneller voorplant in hoogwater dan in laagwater.
- Specifiek: getijamplificatie. Getijamplificatie betekent dat getijamplitudes toenemen en vindt plaats door onder andere de morfodynamiek en reflectie in het bekken.
  - Ratio:  $M_2$  amplitude in het getijdebekken /  $M_2$  amplitude op zee
- Specifiek: getijasymmetrie. Getijasymmetrie wordt veroorzaakt door vervorming van de getijgolf en is afhankelijk van de morfologie van de zeebodem of getijbekkens en is belangrijk voor het netto sedimenttransport.
  - Ratio:  $M_4/M_2$  amplitude
  - Fase verschil:  $2M_2 - M_4$

Voor de getijamplificatie nemen we aan dat het voldoende is om alleen naar  $M_2$  te kijken, omdat het de grootste astronomische component in de Waddenzee is. Voor getijasymmetrie nemen we aan dat het voldoende is om naar  $M_4$  en  $M_2$  (als amplitudeverhouding en relatief faseverschil) te kijken. Dit is gebaseerd op de theorie van Friedrichs en Aubrey (1988).



## 5 Resultaten

### 5.1 Morfologische analyse

De ontwikkeling van het natte volume over de tijd ten opzichte van het jaar 1990 is vergeleken met de ontwikkeling zoals bepaald in Elias et al. (2012). A priori, worden kleine verschillen tussen Elias et al. (2012) en deze data-analyse verwacht. De kleine verschillen hangen samen met het verschil in interpolatietechniek (zoals beschreven in paragraaf 3.2). Datapunten uit deze studie zijn weergegeven als bollen en met onzekerheidsmarge als lijn op basis van de onzekerheid in bodemhoogte ( $\pm 15$  cm = 2 standaarddeviaties; BRON) maal het oppervlakte van het bekken. Daarnaast is de trendlijn op basis van de datapunten berekend en vergeleken met Elias et al. (2012).

De hypsometrische curves zijn weergegeven voor alle beschikbare jaren per zeegat. Telkens zowel de hypsometrische curve als geheel getoond en een uitvergroting voor het gedeelte tussen -2 en +2 m NAP. Blauwe kleuren tonen hierbij de vroegste jaren, groene en gele kleuren tonen latere jaren en rode kleuren tonen de meest recente jaren. Voor de hypsometrische curve als geheel is de onzekerheid in bodemhoogte ( $\pm 15$  cm = 2 standaarddeviaties) toegevoegd als schaduw rondom de daadwerkelijk berekende lijn.

Daarnaast is de hypsometrische curve opgedeeld in drie hoogteklassen waarvan het relatieve oppervlakte en de gemiddelde hoogteligging per deel is bepaald. Tussen hoog en laagwater is gedefinieerd als intergetijdedeel (droogvallende platen; alle punten boven NAP -1 meter). Daarnaast rekenen we met het ondiepe subgetijde deel (tussen NAP -5 en -1 meter) en geulen (alles onder NAP -5 meter). Deze indeling geeft een eerste inschatting voor de geulen, subgetijde en platen, maar is niet volledig correct (de grenswaarden zouden bijvoorbeeld mee moeten groeien met zeespiegelstijging en de analyse zou eigenlijk moeten worden gerelateerd aan zeeniveau en hoog- en laagwater). Dit maakt het wel mogelijk om de ontwikkeling van het bekken beter te kunnen kwantificeren dan met een hypsometrische curve alleen. De verhouding tussen de oppervlaktes van deze deelgebieden zijn voor de verschillende jaren per zeegat weergegeven in een staafdiagram.

De gemiddelde diepte van de geul, het subgetijde deel en de platen is berekend aan de hand van de volumeverandering in het betreffende deelgebied en de bijbehorende oppervlakte (op basis van de informatie uit de hypsometrische curve). De ontwikkeling van deze gemiddelde hoogtes over de tijd (ten opzichte van het basisjaar 1990) is weergegeven in een grafiek per zeegat waarbij de bollen de berekende datapunten zijn, de lijn verticaal ten opzichte van de bollen de onzekerheid ( $\pm 15$  cm = 2 standaarddeviaties) en de stippellijn de trendlijn. De absolute waarden zijn gepresenteerd in tabelvorm.

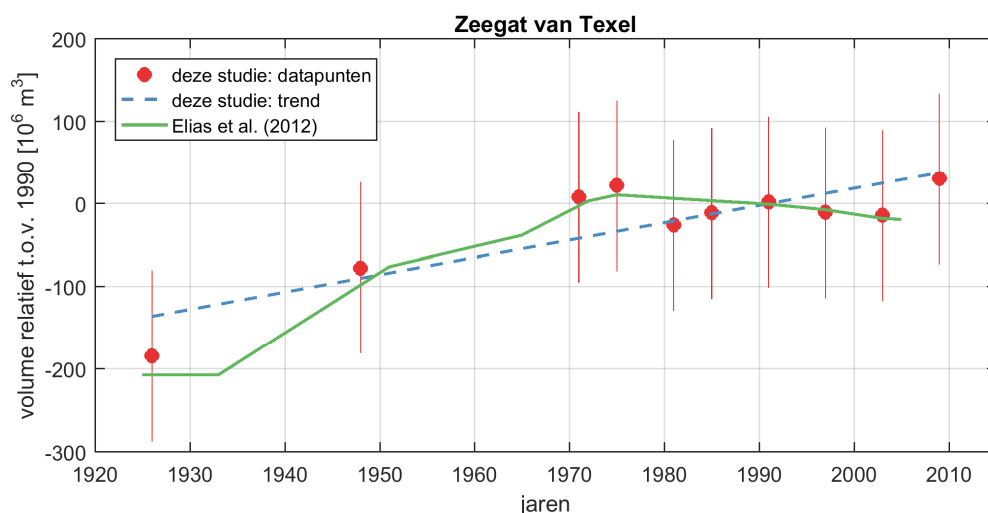
## 5.1.1 Zeegat van Texel

De resultaten van de huidige analyse met betrekking tot de ontwikkeling van het sedimentvolume komen goed overeen met de resultaten van de eerdere analyse tot 2005 van Elias et al. (2012), zie Figuur 5.1 Tabel 5.1. Sedimentatie treedt op tot jaren 1970 met een min of meer lineaire trend. Daarna blijft het sedimentvolume ongeveer constant, hoewel het laatste data punt, dat nieuw is ten opzichte van Elias et al (2005), weer sedimentatie na 2005 suggereert (hoewel dit datapunt wel weer in lijn is met de lineaire trendlijn). Sinds 1990 is er meer dan 30 miljoen m<sup>3</sup> gesedimenteerd in het Zeegat van Texel (1.6 miljoen m<sup>3</sup> per jaar).

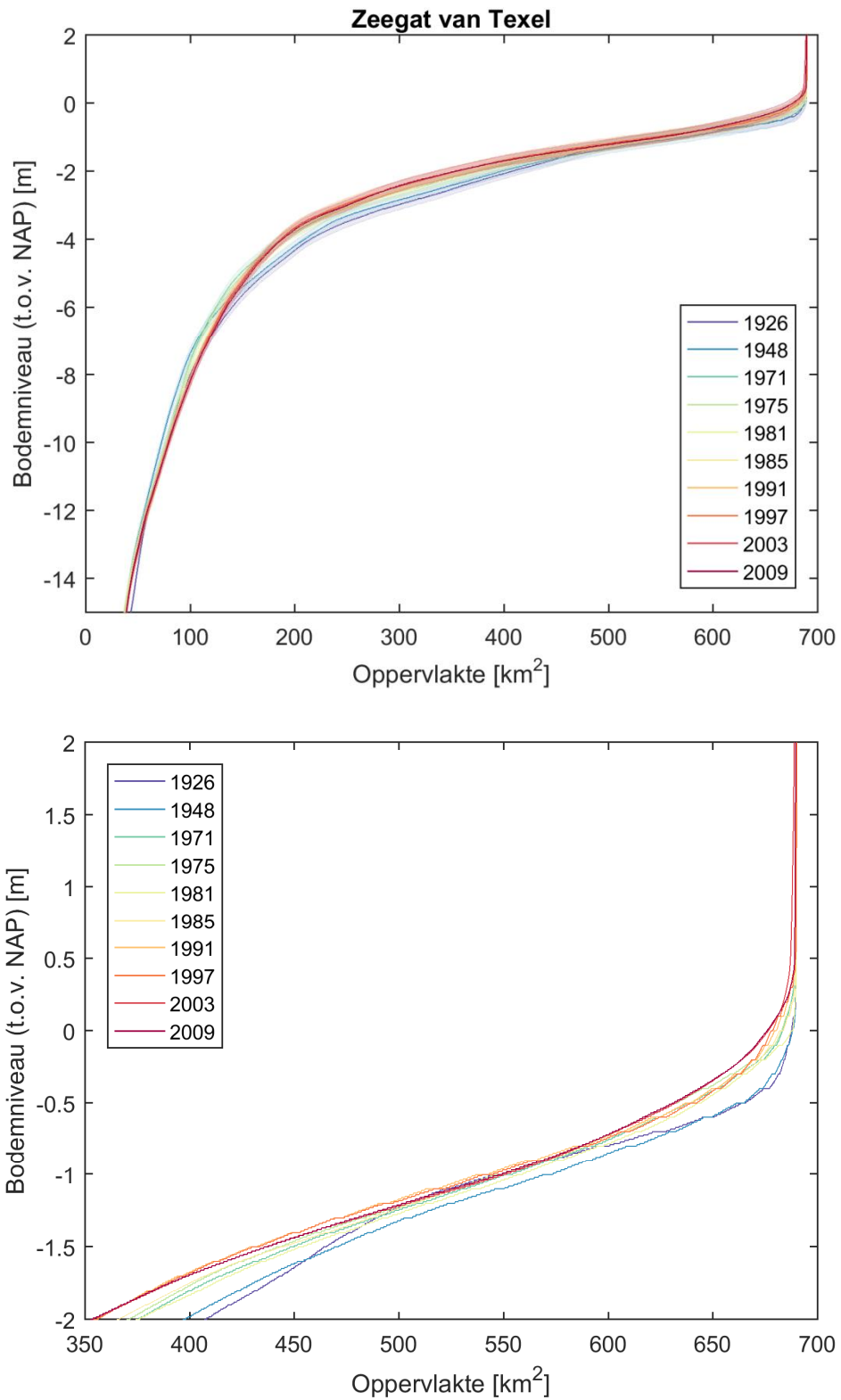
De meeste sedimentatie is opgetreden in het ondiepe subgetijde deel, tussen NAP -5 m en -1 m (bovenpaneel van Figuur 5.2). Het intergetijdedeel (droogvallende platen, boven ~ NAP -1 m) is uitgebreid en verhoogd (benedenpaneel van Figuur 5.6). De afwijking van het droge gedeelte (boven NAP) in 2003 t.o.v. de andere jaren komt mogelijk doordat het gebied hoger dan NAP + 2 m groter is. De verhouding in oppervlakte tussen de verschillende gebiedsdelen is niet veel veranderd (Figuur 5.3). De ontwikkeling van de gemiddelde hoogte van de geul, het subgetijdedeel en de platen (Figuur 5.4) fluctueert behoorlijk in de tijd. Bijvoorbeeld de piek in 1948 lijkt onrealistisch. Dit hangt mogelijk samen met de vaste indeling in hoogteklassen. Op basis van de trendlijn komt wel naar voren dat de sedimentatie met name in het subgetijdedeel optreedt (in totaal ongeveer 25 cm) en in mindere mate de platen zijn verhoogd met in totaal 15 cm. Daarnaast blijkt uit deze analyse dat de geulen juist verdiept zijn (+/- 60 cm).

Tabel 5.1 Volume van het Zeegat van Texel per jaar t.o.v. 1990 in miljoenen kubieke meters en gemiddelde hoogte van platen, subgetijdedeel en geulen in meters t.o.v. NAP

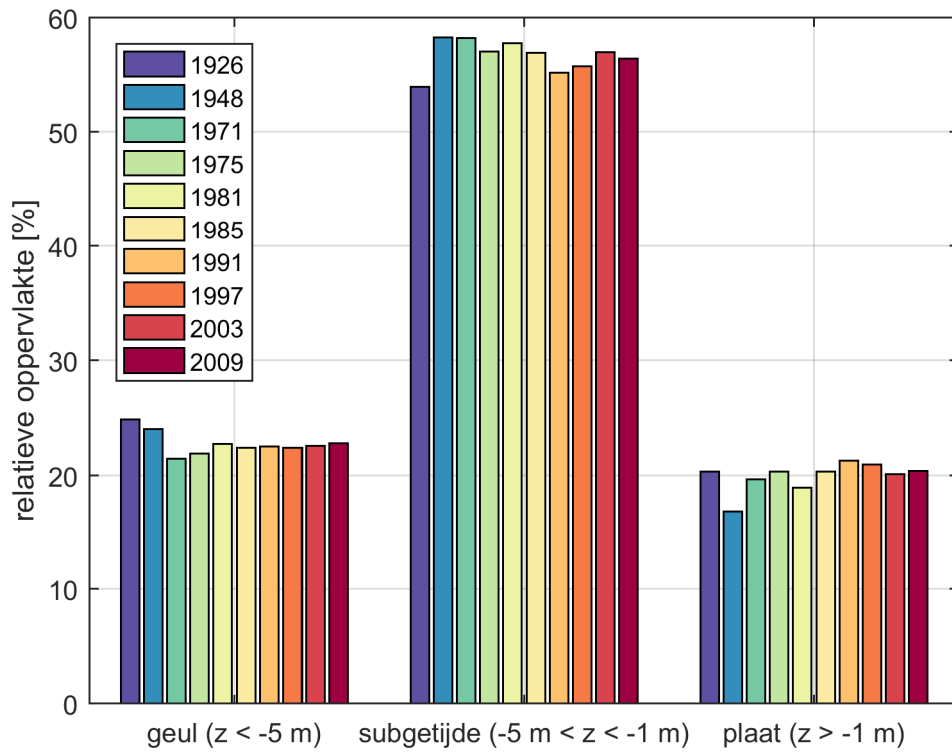
Jaar	1926	1948	1971	1975	1981	1985	1991	1997	2003	2009
Volume	-184,0	-77,4	8,3	22,2	-25,8	-11,1	2,2	-10,6	-13,7	30,4
Platen	-0,69	-0,65	-0,57	-0,56	-0,58	-0,57	-0,58	-0,58	-0,49	-0,51
Subgetijde	-2,55	-2,43	-2,40	-2,37	-2,36	-2,32	-2,28	-2,29	-2,26	-2,27
Geulen	-11,3	-10,9	-11,7	-11,6	-11,5	-11,7	-11,7	-11,8	-11,7	-11,7



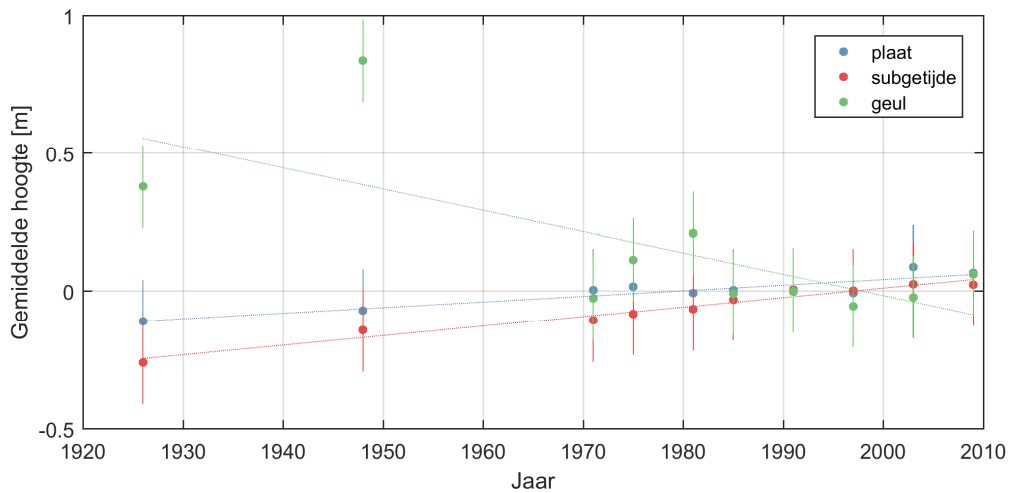
Figuur 5.1 Ontwikkeling van het natte volume van het Zeegat van Texel over de tijd in 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. In rood zijn de in deze data analyse berekende punten. De bollen zijn de punten zelf. De lijn geeft de onzekerheid weer. In blauw is de trend van deze lijnen. In groen is de lijn van Elias et al. (2012) weergegeven.



Figuur 5.2 Hypsometrische curve over de jaren van het Zeegat van Texel (boven) en ingezoomd tussen -2 m en +2 m NAP (onder). In het bovenste paneel is in schaduw de onzekerheidsmarge op basis van onzekerheid in bodemhoogte weergegeven (2 standaarddeviaties).



Figuur 5.3 Relatieve oppervlakte van de geul, het subgetijde- en het plaatareaal in het Zeegat van Texel opzichte van het totale bekken.



Figuur 5.4 Ontwikkeling van de gemiddelde hoogte van de geul, het subgetijdedeel en de platen in het Texels Zeegat relatief ten opzichte van de hoogte in 1990

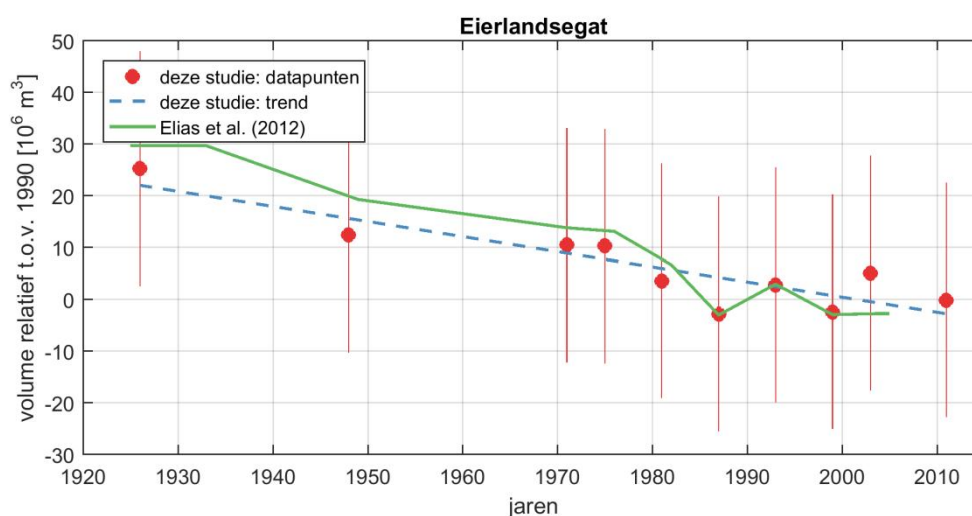
### 5.1.2 Eierlandse Gat

Dit is het enige zeegat in de Nederlandse Waddenzee waarvan het bekken is geërodeerd (Figuur 5.5 en Tabel 5.2). De resultaten van Elias et al. (2012) voor de ontwikkeling van het sedimentvolume tot 2005 zijn goed gereproduceerd. Beide analyses suggereren een afname van het sedimentvolume (erosie) tot ongeveer 1990. Daarna blijft het sedimentvolume ongeveer constant. Het nieuwe datapunt laat geen verandering in de trend van ontwikkeling zien.

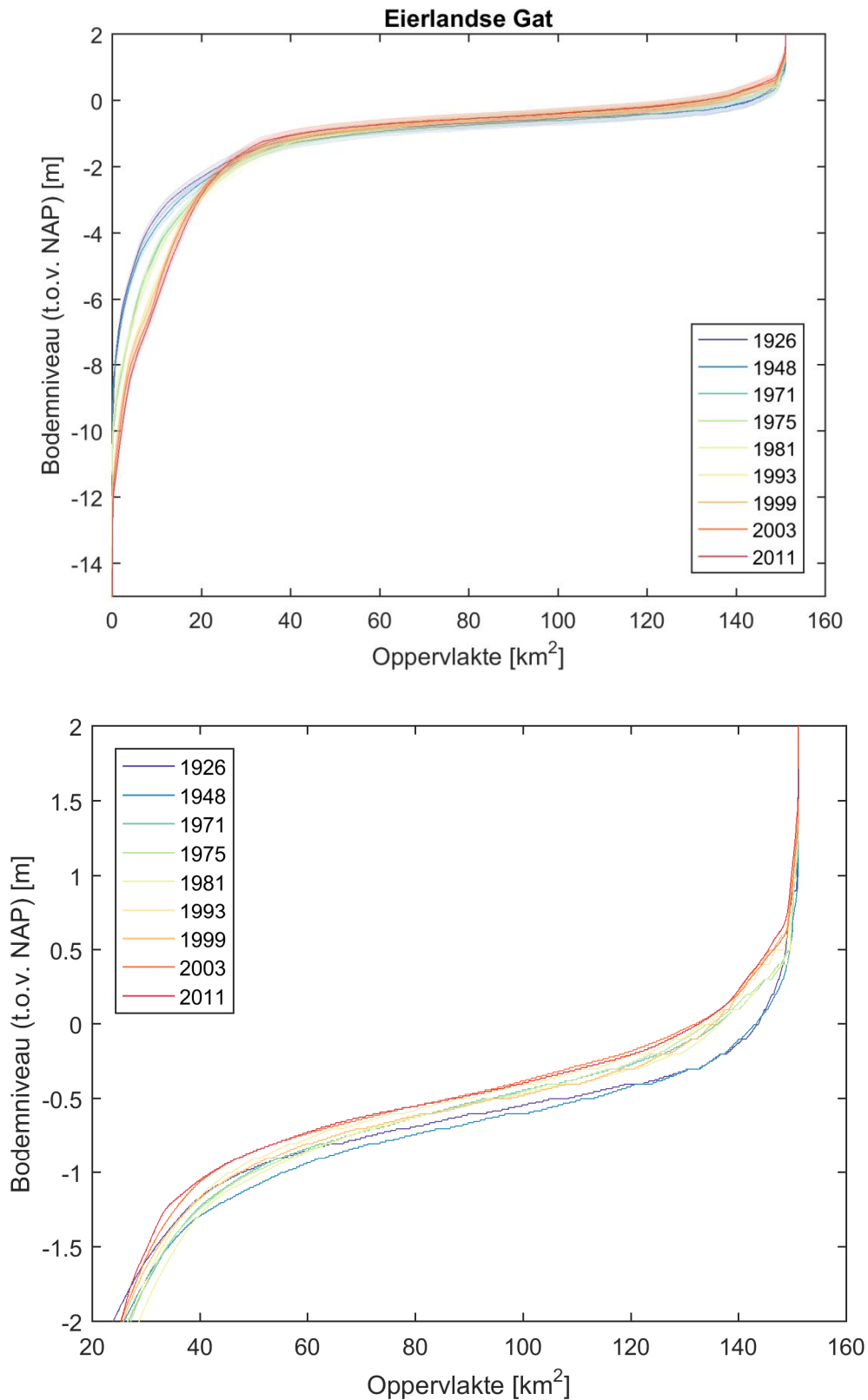
De erosie in het bekken is vooral opgetreden onder NAP -5 m, dus in de geulen (zie bovenpaneel van Figuur 5.6). Het relatieve oppervlakte van het subgetijdegebied is afgenomen, terwijl er meer oppervlakte tot platen en geulen is gaan behoren (Figuur 5.7). De gemiddelde hoogte van het subgetijdegebied is echter vrij stabiel gebleven, waar de platen in het intergetijdengebied gemiddeld zo'n 15 cm hoger zijn komen te liggen (Figuur 5.14).

Tabel 5.2 Volume van het Eierlandse Gat per jaar t.o.v. 1990 in miljoenen kubieke meters en gemiddelde hoogte van platen, subgetijdedeel en geulen in meters t.o.v. NAP

Jaar	1926	1948	1971	1975	1981	1987	1993	1999	2003	2011
Volume	25,3	12,4	10,5	10,3	3,6	-2,8	2,8	-2,4	5,1	-0,1
Platen	-0,50	-0,51	-0,39	-0,39	-0,40		-0,36	-0,39	-0,34	-0,34
Subgetijde	-2,12	-2,09	-2,21	-2,21	-2,21		-2,20	-2,10	-2,19	-2,17
Geulen	-6,61	-6,59	-7,08	-7,19	-6,92		-7,41	-7,47	-7,70	-7,83

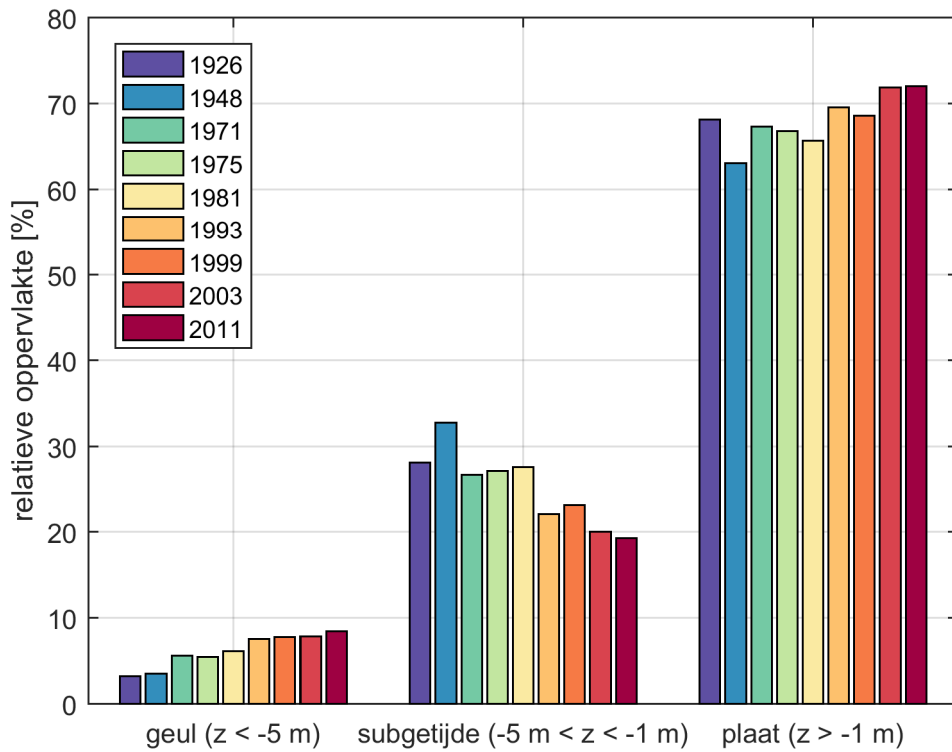


Figuur 5.5 Ontwikkeling van het natte volume van het Eierlandse Gat over de tijd in  $10^6 \text{ m}^3$ . In rood zijn de in deze data analyse berekende punten. De bollen zijn de punten zelf. De lijn geeft de onzekerheid weer. In blauw is de trend van deze lijnen. In groen is de lijn van Elias et al. (2012) weergegeven.

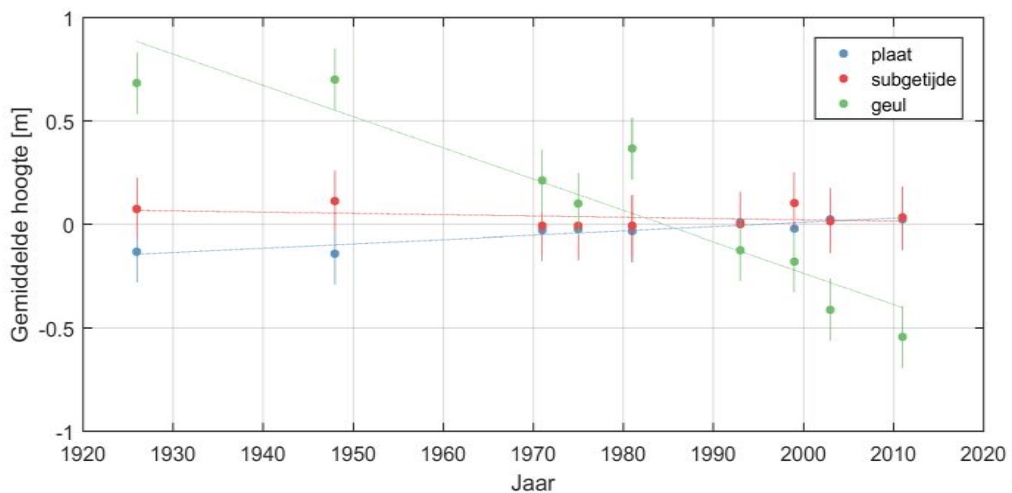


Figuur 5.6 Hypsometrische curve over de jaren van het Eierlandse Gat (boven) en ingezoomd tussen -2 m en +2 m NAP (onder). In het bovenste paneel is in schaduw de onzekerheidsmarge op basis van onzekerheid in bodemhoogte weergegeven (2 standaarddeviaties).





Figuur 5.7 Relatieve oppervlakte van de geul, het subgetijde- en het plaatareaal in het Eierlandse Gat opzichte van het totale bekken.



Figuur 5.8 Ontwikkeling van de gemiddelde hoogte van de geul, het subgetijdedeel en de platen in het Eierlandse Gat relatief ten opzichte van de hoogte in 1990

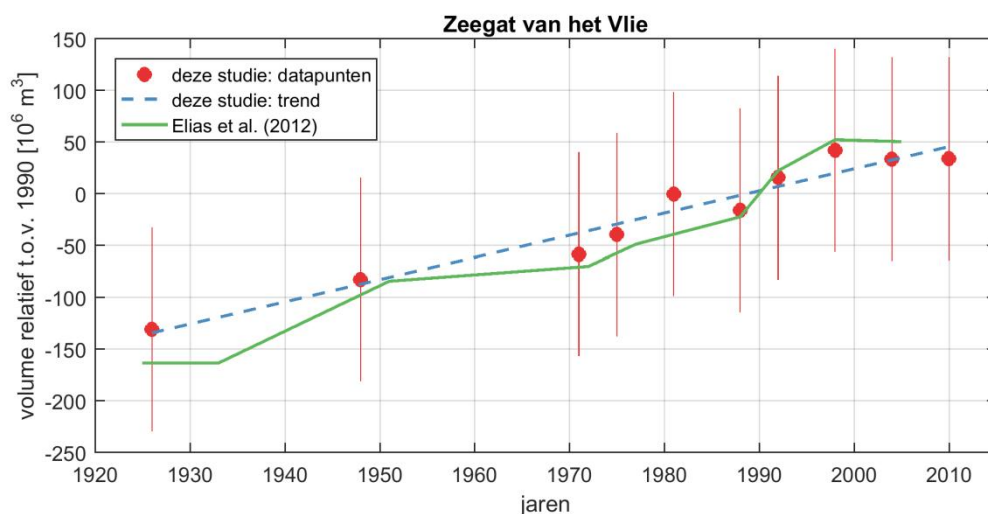
## 5.1.3 Zeegat van het Vlie

De resultaten van Elias et al (2012) en deze studie laten zien dat er sedimentatie in het bekken is opgetreden tot eind vorige eeuw (Figuur 5.4 en Tabel 5.3). Daarna blijft het sedimentvolume ongeveer constant. In de data analyse van Elias et al. (2012) wordt de volumebalans van het bekken in de 21<sup>e</sup> eeuw overigens slechts met een datapunt beschreven. In deze analyse zijn dat twee datapunten. Sinds 1990 is er meer dan 34 miljoen m<sup>3</sup> gesedimenteerd in het Zeegat van het Vlie (1.7 miljoen m<sup>3</sup> per jaar).

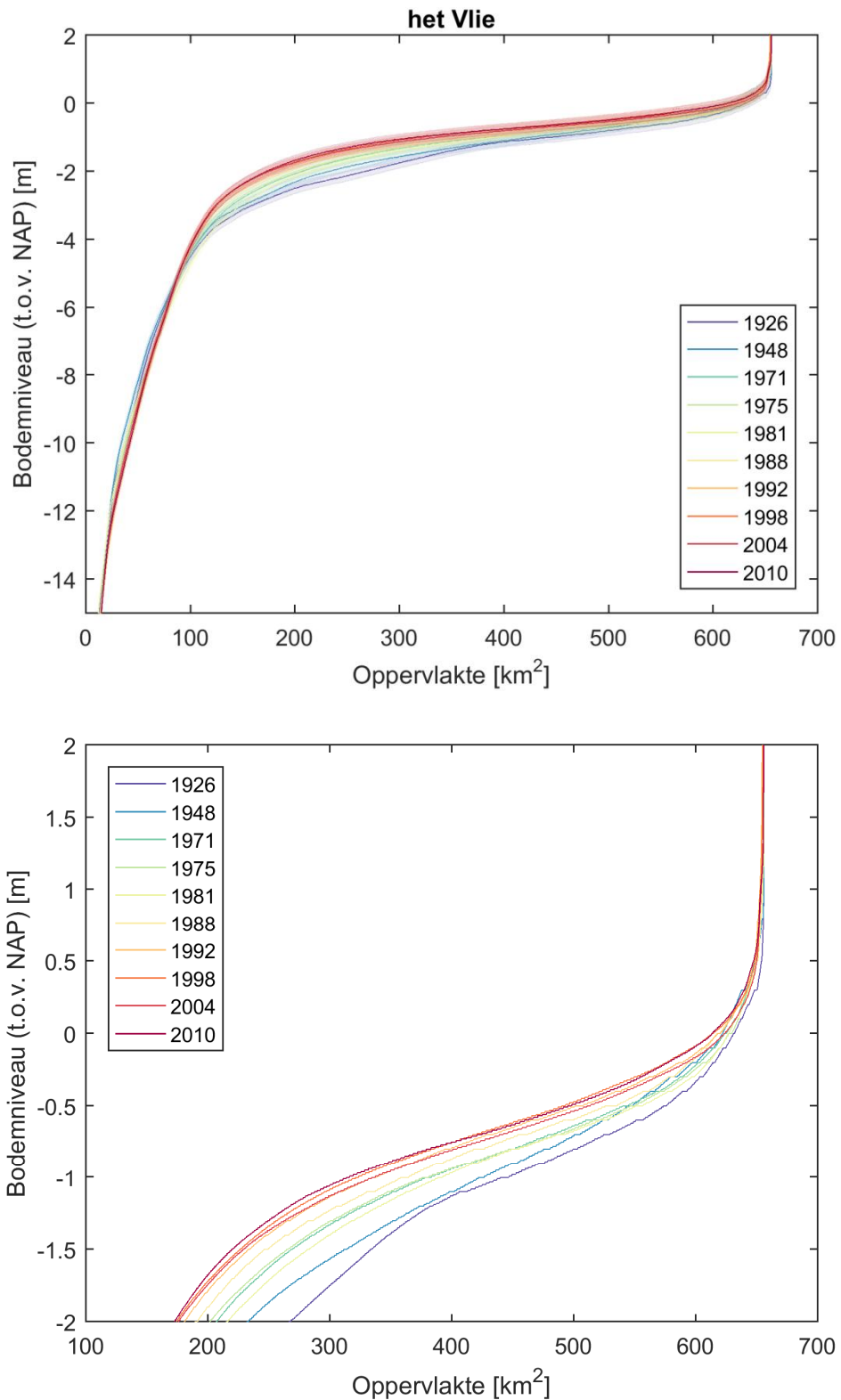
De sedimentatie is vooral opgetreden in gebieden hoger dan NAP -5 m (bovenpaneel van Figuur 5.8). Het relatieve oppervlakte van het subgetijdegebied is afgenomen, terwijl er meer oppervlakte bij de platen is gekomen (Figuur 5.11). Op basis van de trendlijn van de individuele datapunten is de gemiddelde hoogte van de platen vrij stabiel gebleven, terwijl het subgetijdegebied gemiddeld zo'n 20 cm hoger is komen te liggen (Figuur 5.12).

Tabel 5.3 Volume van het Zeegat van het Vlie per jaar t.o.v. 1990 in miljoenen kubieke meters en gemiddelde hoogte van platen, subgetijdedeel en geulen in meters t.o.v. NAP

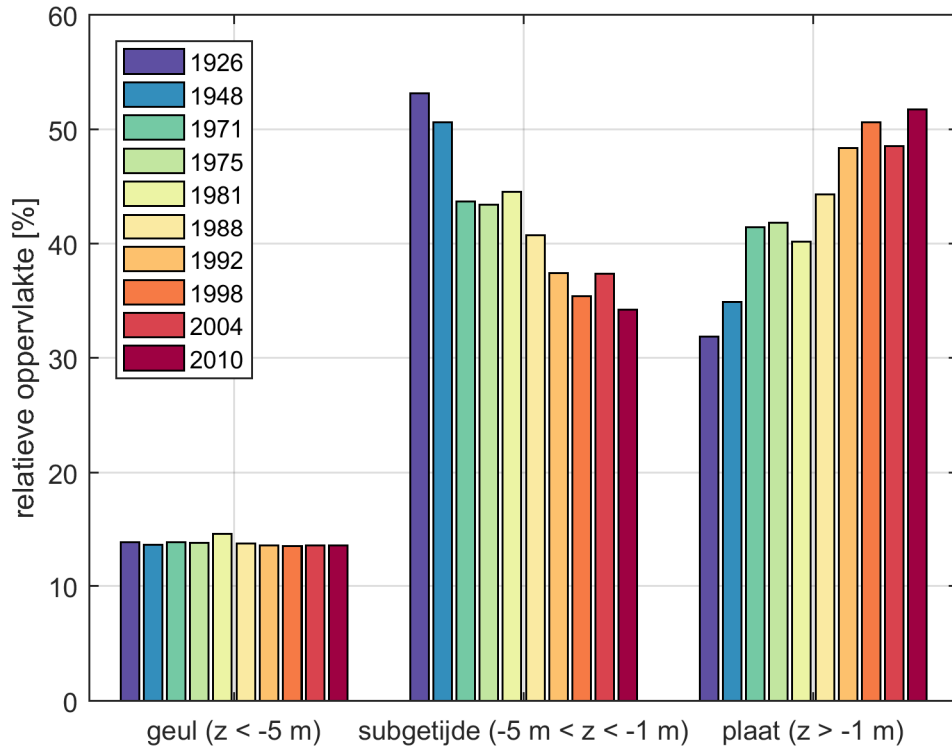
Jaar	1926	1948	1971	1975	1988	1992	1998	2004	2010
Volume	-131,9	-82,6	-58,2	-39,2	-15,8	15,8	42,1	33,8	34,1
Platen	-0,53	-0,45	-0,50	-0,52	-0,48	-0,44	-0,43	-0,47	-0,45
Subgetijde	-2,19	-2,12	-2,06	-2,03	-1,99	-2,00	-2,00	-1,97	-2,01
Geulen	-10,2	-10,2	-10,7	-10,7	-11,1	-11,1	-11,0	-11,0	-11,0



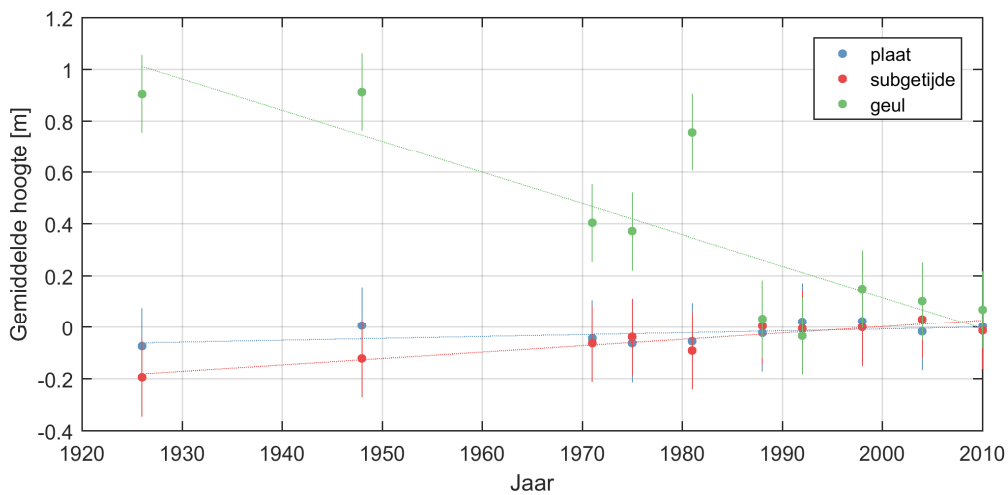
Figuur 5.9 Ontwikkeling van het natte volume van het Zeegat van het Vlie over de tijd in 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. In rood zijn de in deze data analyse berekende punten. De bollen zijn de punten zelf. De lijn geeft de onzekerheid weer. In blauw is de trend van deze lijnen. In groen is de lijn van Elias et al. (2012) weergegeven.



**Figuur 5.10** Hypsometrische curve over de jaren van het Zeegat van het Vlie (boven) en ingezoomd tussen - 2 m en +2 m NAP (onder). In het bovenste paneel is in schaduw de onzekerheidsmarge op basis van onzekerheid in bodemhoogte weergegeven (2 standaarddeviaties).



Figuur 5.11 Relatieve oppervlakte van de geul, het subgetijde- en het plaatareaal in het Zeegat van het Vliee opzichte van het totale bekken.



Figuur 5.12 Ontwikkeling van de gemiddelde hoogte van de geul, het subgetijdedeel en de platen in het Zeegat van het Vliee relatief ten opzichte van de hoogte in 1990

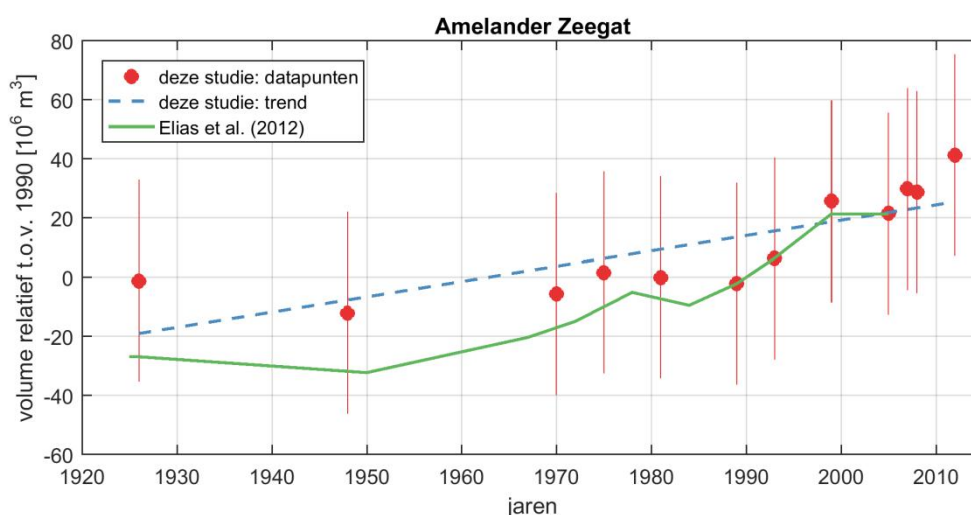
### 5.1.4 Amelander Zeegat

Voor het bekken van Amelander Zeegat zijn de resultaten van de huidige analyse duidelijk anders dan die van Elias et al. (2012). Volgens de analyse uit deze studie was er tot 1990 nauwelijks verandering in het sedimentvolume in het bekken. Na 1990 is er sedimentatie opgetreden (Figuur 5.13 en Tabel 5.4). Volgens Elias et al. (2012) is er juist tot 1997 sedimentatie opgetreden. Opvallend is dat het totale volume van sedimentatie uit beide analyses wel ongeveer gelijk is. Er is nog geen verklaringen voor deze grote verschillen gevonden. Volgens deze data analyse is er sinds 1990 meer dan 41 miljoen m<sup>3</sup> gesedimenteerd in het Amelander Zeegat (1.9 miljoen m<sup>3</sup> per jaar).

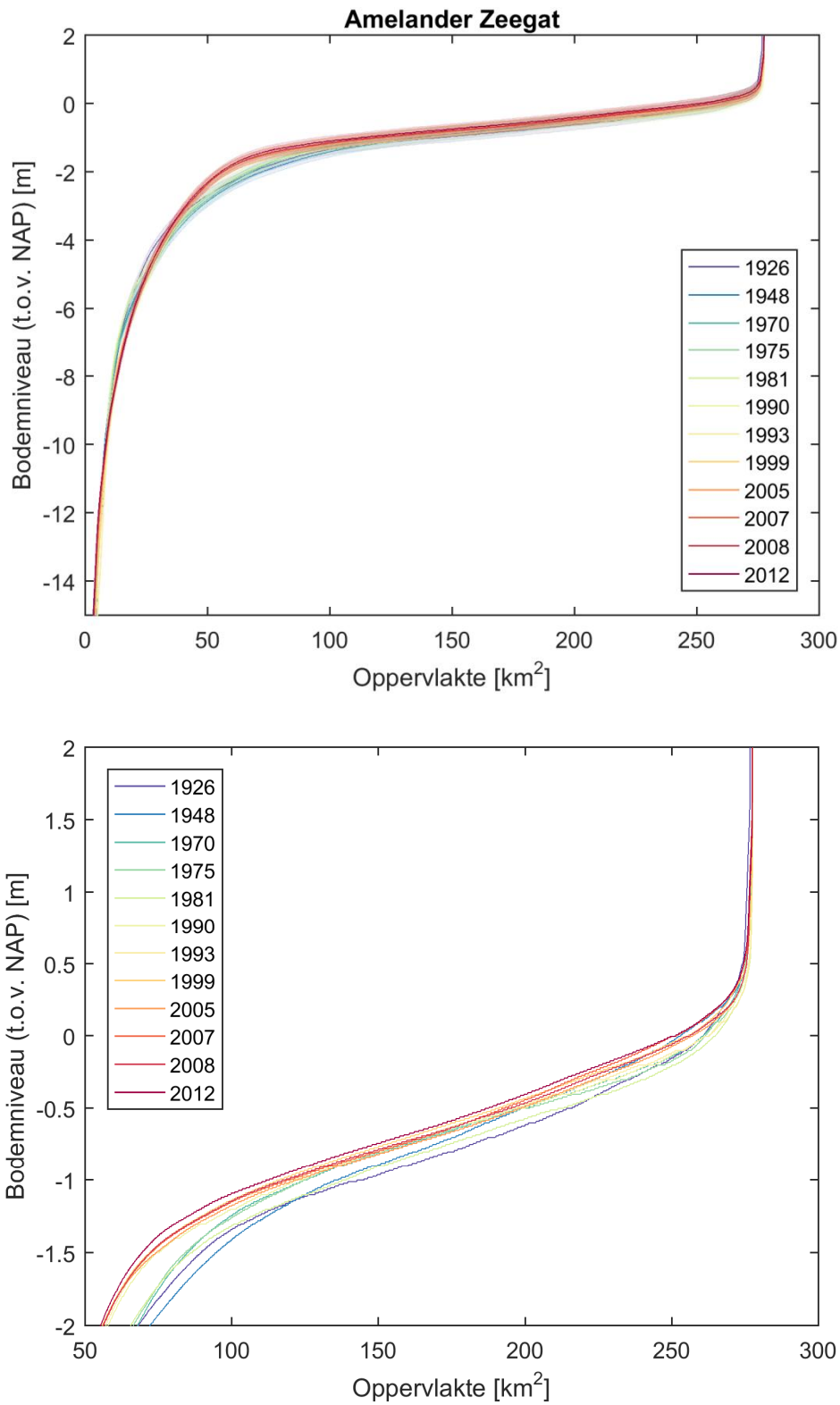
Volgens de hypsometrische curven (bovenpaneel van Figuur 5.14) is de sedimentatie vooral opgetreden in gebieden hoger dan NAP -3 m. Het relatieve oppervlakte van het subgetijdegebied is afgenomen, terwijl er meer oppervlakte bij de platen is gekomen (Figuur 5.15). Ook bij het Amelander Zeegat zijn de platen in het intergetijdengebied hoger komen te liggen. De plaathoogte is sinds 1980 met gemiddeld 10 cm toegenomen, waar de plaathoogte voor 1980 afnam. Het subgetijdegebied is gemiddeld zelfs zo'n 20 cm hoger komen te liggen sinds 1975 (Figuur 5.18). De gemiddelde hoogte van de verschillende gebiedsdelen vertoont dus een duidelijke trendbreuk tussen 1970 en 1980.

Tabel 5.4 Volume van het Amelander Zeegat per jaar t.o.v. 1990 in miljoenen kubieke meters en gemiddelde hoogte van platen, subgetijdedeel en geulen in meters t.o.v. NAP

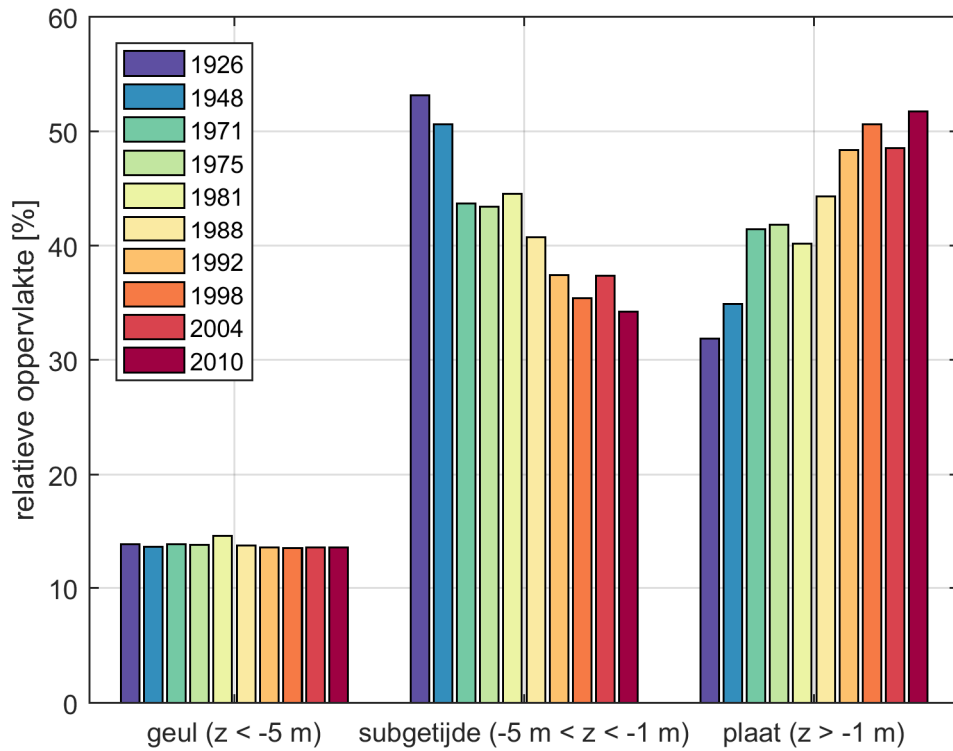
Jaar	1926	1948	1970	1975	1989	1993	1999	2005	2007	2008	2012
Volume	-1,2	-12,0	-5,6	1,6	-2,1	6,4	25,7	21,5	29,9	28,8	41,3
Platen	-0,42	-0,39	-0,44	-0,45	-0,45	-0,45	-0,41	-0,43	-0,40	-0,42	-0,39
Subgetijde	-2,01	-2,14	-2,13	-2,13	-1,96	-1,97	-1,97	-1,95	-1,97	-1,98	-1,98
Geulen	-10,0	-9,61	-9,67	-9,84	-10,1	-10,2	-9,79	-9,76	-9,76	-9,71	-9,70



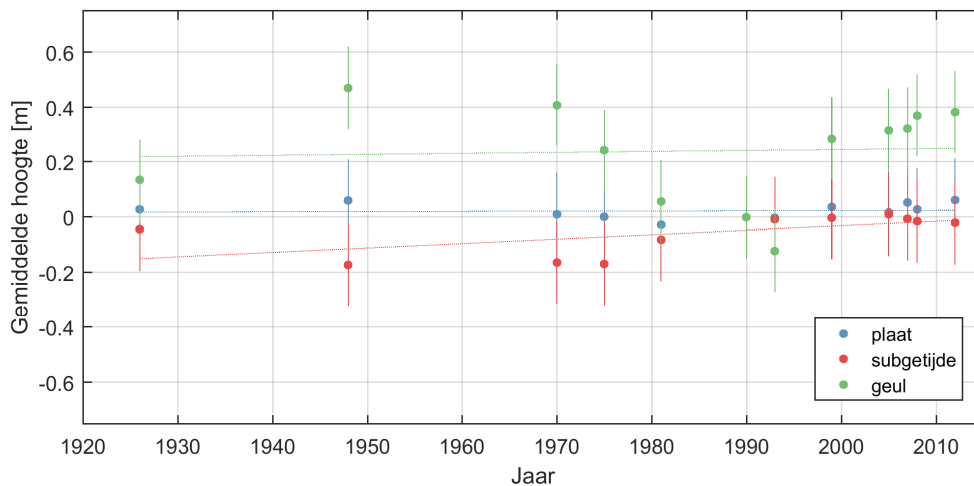
Figuur 5.13 Ontwikkeling van het natte volume van het Amelander Zeegat over de tijd in 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. In rood zijn de in deze data analyse berekende punten. De bollen zijn de punten zelf. De lijn geeft de onzekerheid weer. In blauw is de trend van deze lijnen. In groen is de lijn van Elias et al. (2012) weergegeven.



Figuur 5.14 Hypsometrische curve over de jaren van het Ameland Zeevat (boven) en ingezoomd tussen -2 m en +2 m NAP (onder). In het bovenste paneel is in schaduw de onzekerheidsmarge op basis van onzekerheid in bodemhoogte weergegeven (2 standaarddeviaties).



Figuur 5.15 Relatieve oppervlakte van de geul, het subgetijde- en het plaatareaal in het Ameland Zeevat opzichte van het totale bekken.



Figuur 5.16 Ontwikkeling van de gemiddelde hoogte van de geul, het subgetijdedeel en de platen in het Ameland Zeevat relatief ten opzichte van de hoogte in 1990

## 5.1.5 Friesche Zeegat

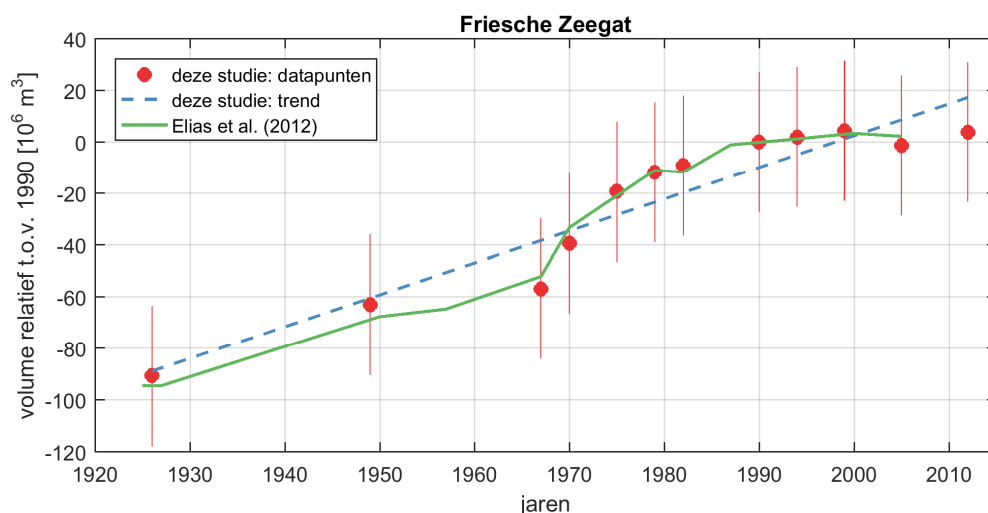
De resultaten van Elias et al (2012) en deze studie komen goed overeen. In het bekken is sedimentatie opgetreden tot 1990, en daarna blijft het volume min of meer constant (Figuur 5.17 en Tabel 5.5). Verder is de invloed van de afsluiting van de Lauwerszee (1969) goed te zien in de ontwikkeling van het sedimentvolume in het bekken: de trendbreuk vanaf 1970 en de langzame afname (i.e. exponentieel) van de sedimentatiesnelheid sindsdien. Sinds 1990 is er beperkt sediment geïmporteerd in het bekken (+/-5 miljoen m<sup>3</sup>).

Sedimentatie in het bekken is vooral opgetreden in de geulen en in het lagere deel van het intergetijdengebied, i.e. onder NAP -0.5 m (bovenpaneel van Figuur 5.18). De ontwikkeling van het intergetijdengebied wijkt af van de andere zeegaten. Er is een minder duidelijke verhoging van de platen opgetreden, maar juist een verhoging van de geulen. Tussen 1920-197 nam het geuloppervlakte af, doordat bepaalde locaties bij de hoogteklasse subgetijde gaan behoren (komen boven -5m NAP uit; Figuur 5.19). Mede daardoor daalt de gemiddelde hoogte van de geulen (want hoogstgelegen punten worden niet langer meegerekend; Figuur 5.20). Mogelijk vindt er ook erosie plaats in de diepere delen van de geulen. Na 1970 neemt de gemiddelde geulhoogte toe. Dit leidt dan niet tot een toename van het geuloppervlak, dus kan het enkel komen door sedimentatie in de geulen (en niet omdat er meer gebieden tot 'geul' gaan behoren).

Over de gehele periode neemt het plaatoppervlakte toe, zonder dat de plaathoogte nu bijzonder hard stijgt. Dat komt dus doordat er punten vanuit 'subgetijde' nu onder 'platen' vallen (wat geen respons geeft in de gemiddelde hoogte maar niet uitsluit dat er toch sedimentatie plaatsvindt op individuele locaties op de platen. De gemiddelde plaathoogte is vrij stabiel gebleven, mede door de uitbreiding van het plaatareaal.

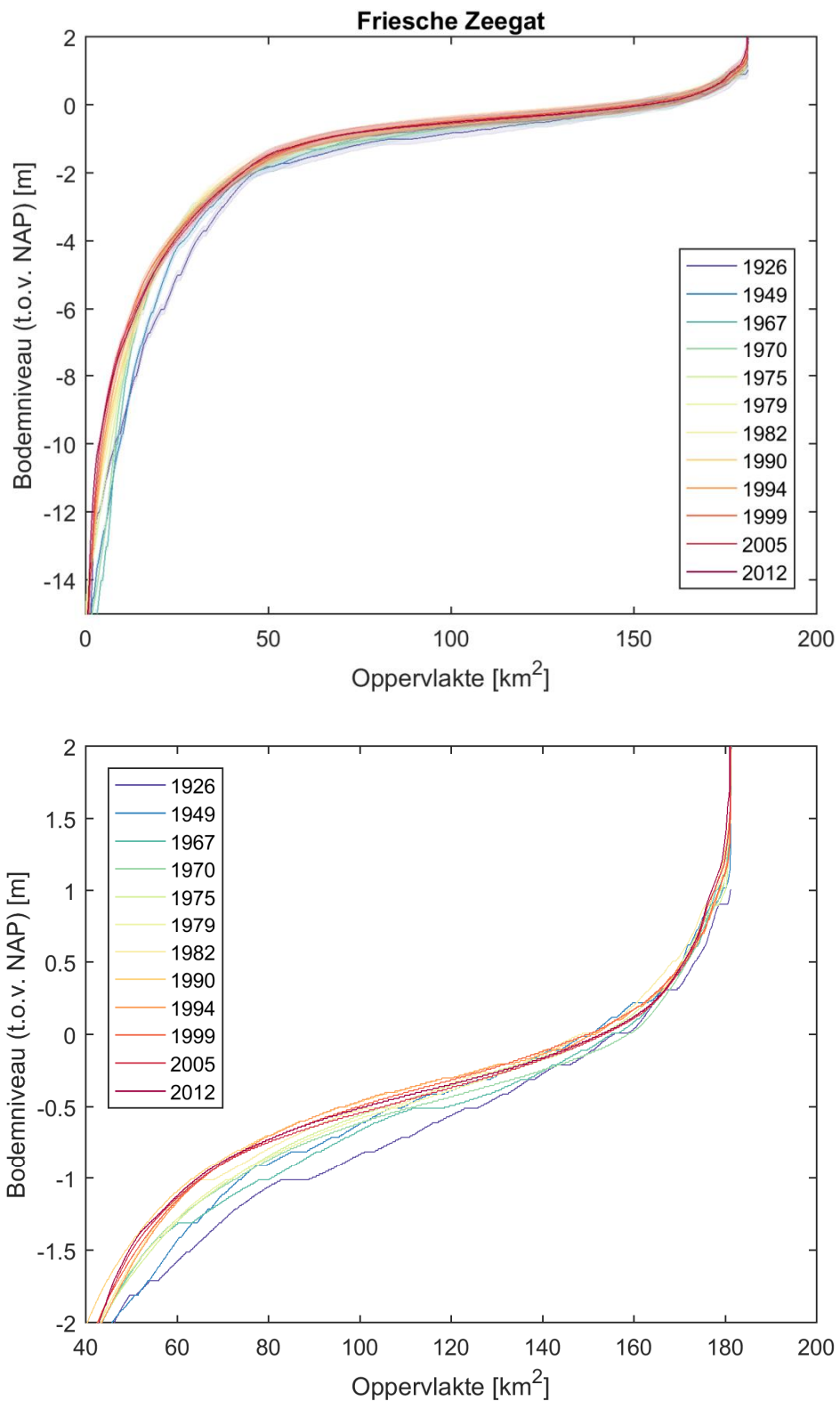
Tabel 5.5 Volume van het Friesche Zeegat per jaar t.o.v. 1990 in miljoenen kubieke meters en gemiddelde hoogte van platen, subgetijdedeel en geulen in meters t.o.v. NAP

Jaar	1926	1949	1967	1970	1975	1979	1982	1990	1994	1999	2005	2012
Volume	-90,6	-63,0	-56,8	-39,3	-19,2	-11,7	-9,1	0,0	2,0	4,4	-1,3	3,9
Platen	-0,28	-0,22	-0,25	-0,27	-0,21	-0,23	-0,20	-0,20	-0,20	-0,21	-0,24	-0,22
Subgetijde	-1,99	-2,25	-2,06	-2,22	-2,26	-2,22	-2,22	-2,29	-2,44	-2,41	-2,41	-2,39
Geulen	-8,81	-9,68	-10,2	-9,87	-9,09	-8,68	-8,84	-8,65	-8,74	-8,60	-8,25	-8,15

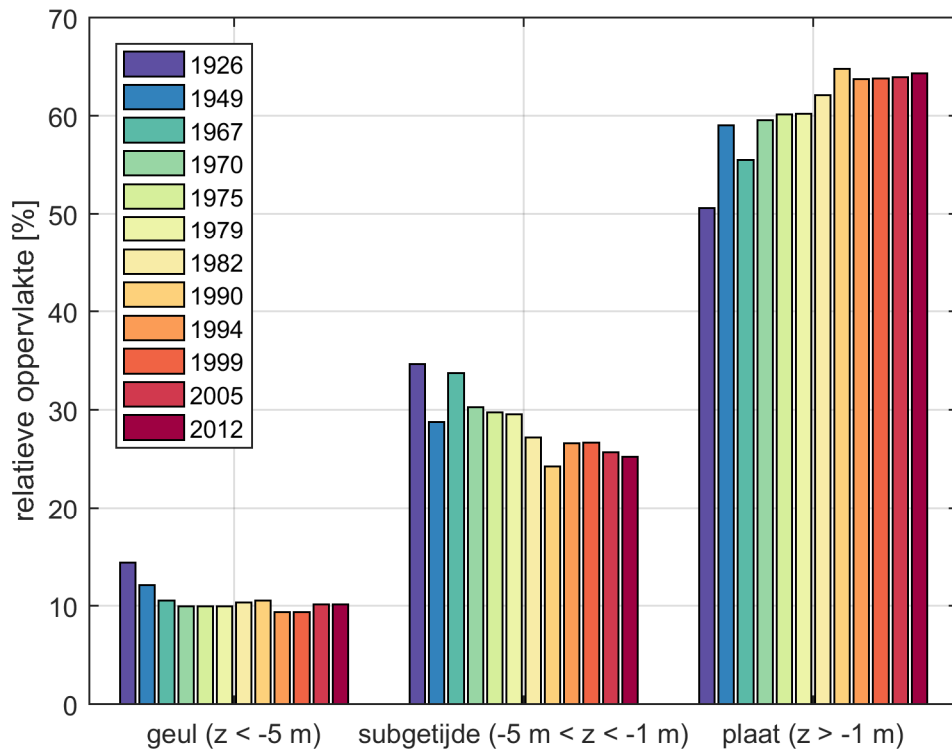


Figuur 5.17 Ontwikkeling van het natte volume van het Friesche Zeegat over de tijd in 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. In rood zijn de in deze data analyse berekende punten. De bollen zijn de punten zelf. De lijn geeft de onzekerheid weer. In blauw is de trend van deze lijnen. In groen is de lijn van Elias et al. (2012) weergegeven.

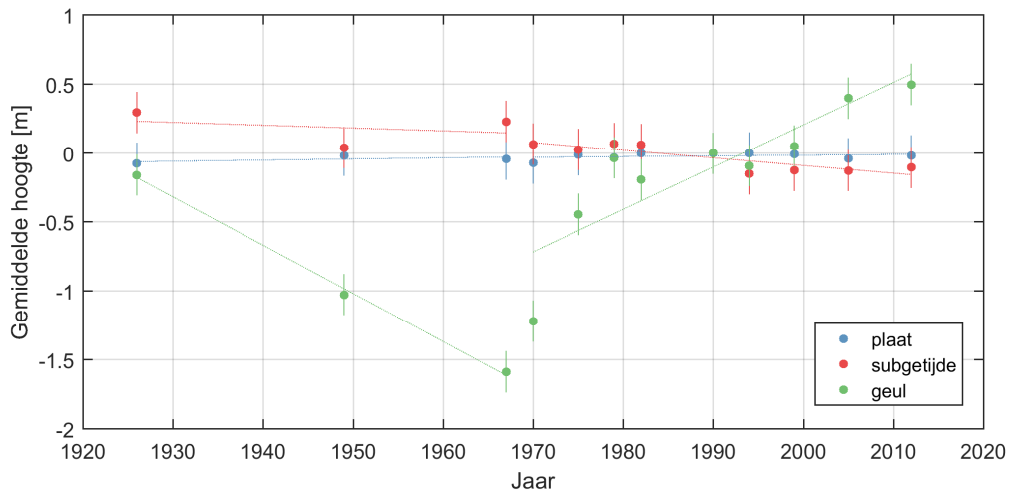




Figuur 5.18 Hypsometrische curve over de jaren van het Friesche Zeegat (boven) en ingezoomd tussen -2 m en +2 m NAP (onder). In het bovenste paneel is in schaduw de onzekerheidsmarge op basis van onzekerheid in bodemhoogte weergegeven (2 standaarddeviaties).



Figuur 5.19 Relatieve oppervlakte van de geul, het subgetijde- en het plaatareaal in het Friesche Zeegat ten opzichte van het totale bekken

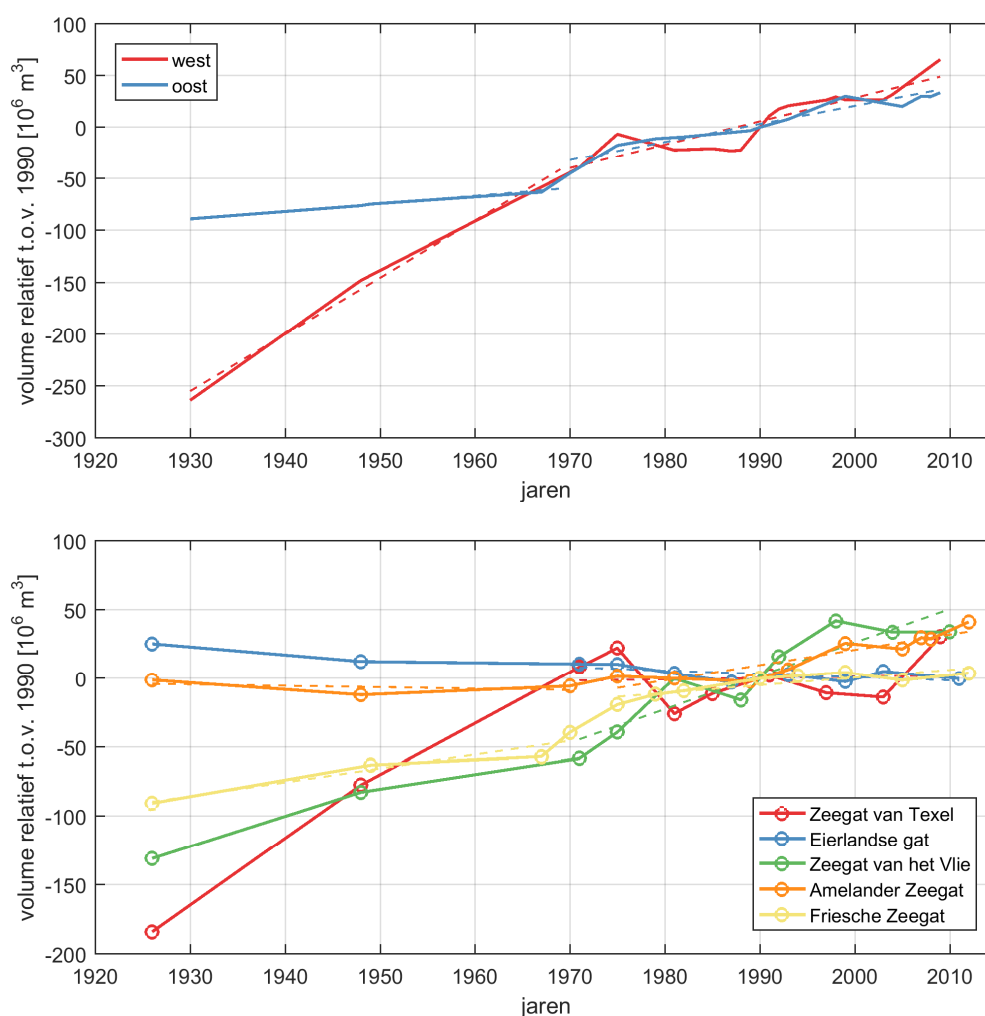


Figuur 5.20 Ontwikkeling van de gemiddelde hoogte van de geul, het subgetijdedeel en de platen in het Friesche Zeegat relatief ten opzichte van de hoogte in 1990

### 5.1.6 Westelijke en Oostelijke Waddenzee

De individuele zeegaten kunnen worden aggregaat tot een westelijke en oostelijke Waddenzee. Zeegat van Texel, Eierlandse Gat en Zeegat van het Vlie vallen dan onder de Westelijke Waddenzee. Amelander Zeegat en Friesche Zeegat vallen onder Oostelijke Waddenzee. Al deze resultaten zijn samengebracht in Figuur 5.21. Waarin daargetrokken lijnen de datapunten zijn en stippellijnen trendlijnen tussen 1930-1970 en 1970-heden.

Het valt op dat het westelijke deel van de Waddenzee als geheel een bijna continue sedimentatietrend vertoont. Hoewel de sedimentatiesnelheid lager ligt tussen 1970-heden dan 1930-1970. Voor het oostelijke deel valt op dat de ontwikkeling voor de afsluiting van de Lauwerszee (1969) min of meer lineair in de tijd verloopt en beperkt sedimenteert. Na afsluiting van de Lauwerszee was er periode van snelle sedimentatie, die inmiddels is afgezwakt. De trendlijn voor 1970-heden voor de oostelijke Waddenzee ligt ook onder die van de westelijke Waddenzee. Ook alle beschouwde bekkens samen vertonen een sedimentatietrend die min of meer lineair is. Wat ook opvalt uit Figuur 5.21 is dat er veel meer sedimentatie is opgetreden in de westelijke dan oostelijke Waddenzee en dit verschil vooral is opgetreden voor 1970.



Figuur 5.21 Bovenpaneel: ontwikkelingen van het westelijke deel (rood), het oostelijke deel (blauw).  
Benedenpaneel: de verschillende bekkens. Stippellijnen zijn trendlijnen voor periode voor 1970 en na 1970.  
Veranderingen zijn in miljoen m<sup>3</sup> t.o.v. 1990. Toename betekent sedimentatie

## 5.2 Getij analyse

### 5.2.1 Algemene patronen

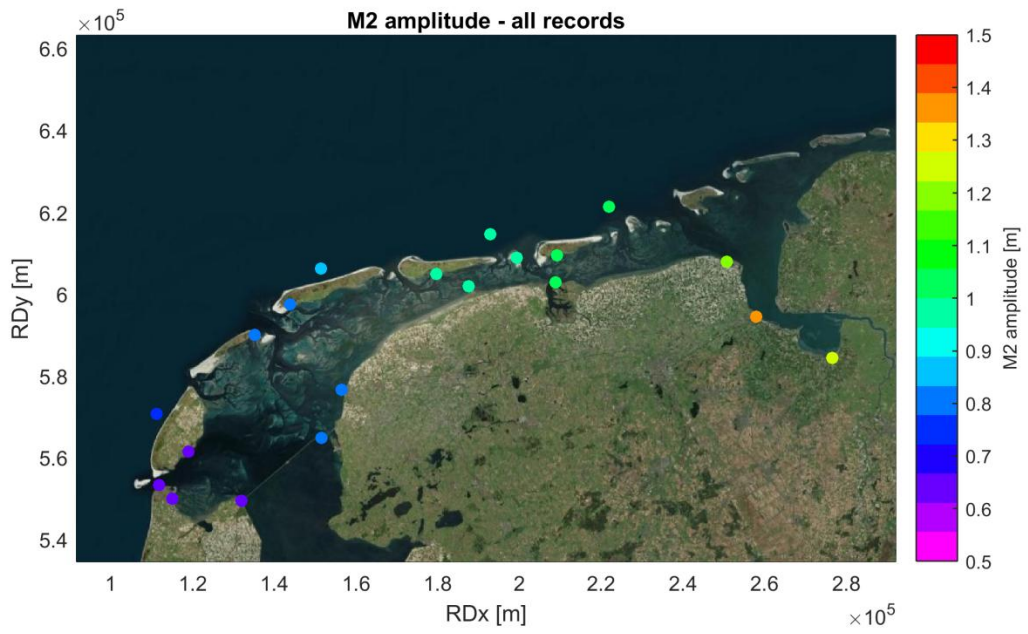
Het resultaat van een harmonische analyse over de gehele tijdseries is een algemeen beeld van de getijkarakteristieken in en rondom de Waddenzee. In deze paragraaf worden de resultaten voor de  $M_2$  en  $M_4$  amplitude en getijasymmetrie weergegeven. Definities staan beschreven in Hoofdstuk 4.

Over het algemeen, neemt de  $M_2$  amplitude toe van west naar oost. (Figuur 5.22). De  $M_2$  amplitude bij Den Helder is 0.65 m en neemt toe tot 1.05 m bij Huibertgat. Daarnaast vindt er getijamplificatie plaats in de Waddenzee. Getijamplificatie vindt plaats door onder andere reflectie in het bekken. Bijvoorbeeld bij het Amelander Zeegat neemt de  $M_2$  amplitude toe van 0.97 tot 0.99 m tussen Wierumergronden naar Nes. De amplificatie in de Eems is veel groter (1.05 m op zee en 1.39 m bij Delftzijl). De amplitude van het  $M_2$  getij neemt toe met ongeveer 1.6 mm per kilometer (km) van west naar oost. De fase van het  $M_2$  getij neemt toe met ongeveer 0.65 graden per km. Dit komt overeen met een gemiddelde voortplantingssnelheid van ongeveer 45 km per uur. Dit is ongeveer vergelijkbaar met de propagatiesnelheid van de getijgolf op +/- 16 meter waterdiepte ( $c \approx \sqrt{gh}$ ).

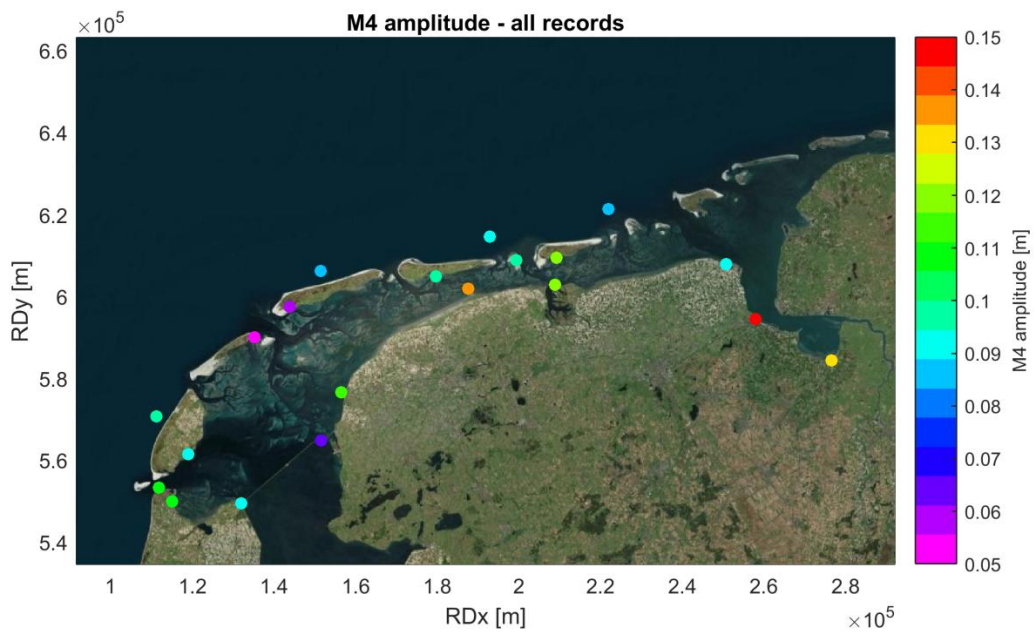
Voor de  $M_4$  amplitude is er een minder duidelijk patroon (Figuur 5.23). Voor sommige zeegaten is de  $M_4$  amplitude vrij klein (bijvoorbeeld voor het Zeegat van het Vlie; amplitude van 0.05 meter), terwijl voor andere zeegaten de  $M_4$  amplitude twee tot drie keer zo groot kan zijn (bijvoorbeeld voor het Zeegat van Texel; amplitude van 0.10-0.13 meter).  $M_4$  is een ondiepwatergetij, in tegenstelling tot de  $M_2$  die een astronomisch oorsprong heeft.  $M_4$  wordt gegenereerd door de vervorming van de getijgolf tijdens de voortplanting. Deze vervorming is sterk afhankelijk van de morfologie en kan dus sterk variëren per zeegat.

De  $M_4/M_2$  amplitudeverhouding en het relatief faseverschil  $2M_2-M_4$  kunnen worden gebruikt voor de kwantificatie van de getijasymmetrie die belangrijk is voor het netto sedimenttransport (Friedrichs en Aubrey, 1988). Het relatief faseverschil bepaalt de aard van de asymmetrie: vloeddominant als het tussen 0 en 180 graden is en ebdominant als het tussen 180 en 360 graden is. De grootte van de amplitudeverhouding is een indicator voor de sterkte van de asymmetrie.

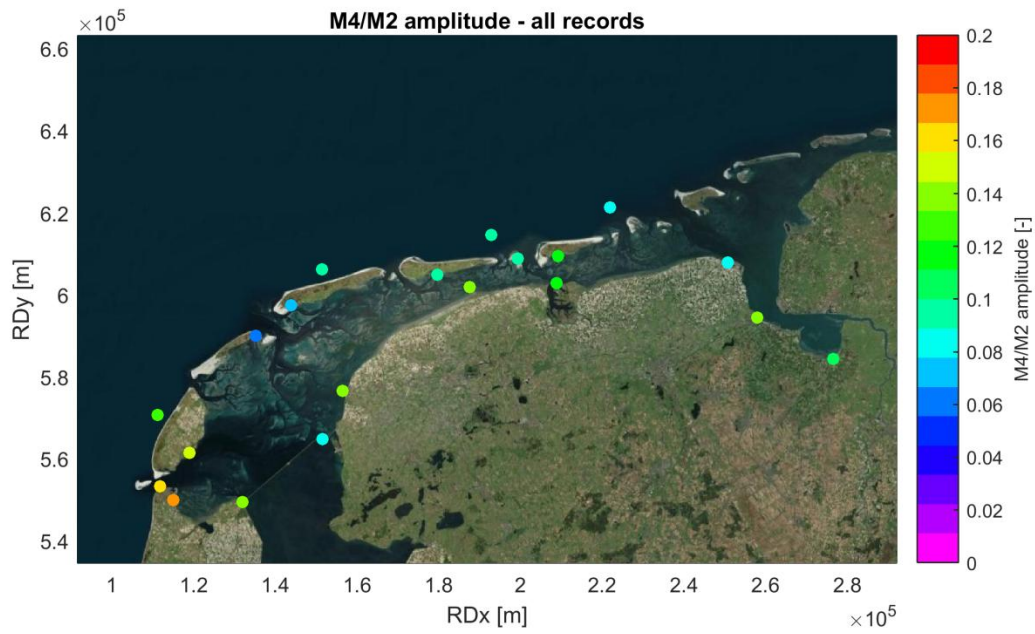
De verhouding tussen de  $M_4$  en  $M_2$  amplitude varieert behoorlijk tussen verschillende zeegaten, maar zijn vrij vergelijkbaar per zeegat (Figuur 5.24). Dit in tegentelling tot het relatief faseverschil (Figuur 5.25) wat locatie specifiek is. Het merendeel van de stations in de Waddenzee zijn vloeddominant of hebben een symmetrisch getij (i.e. niet vloed of eb dominant).



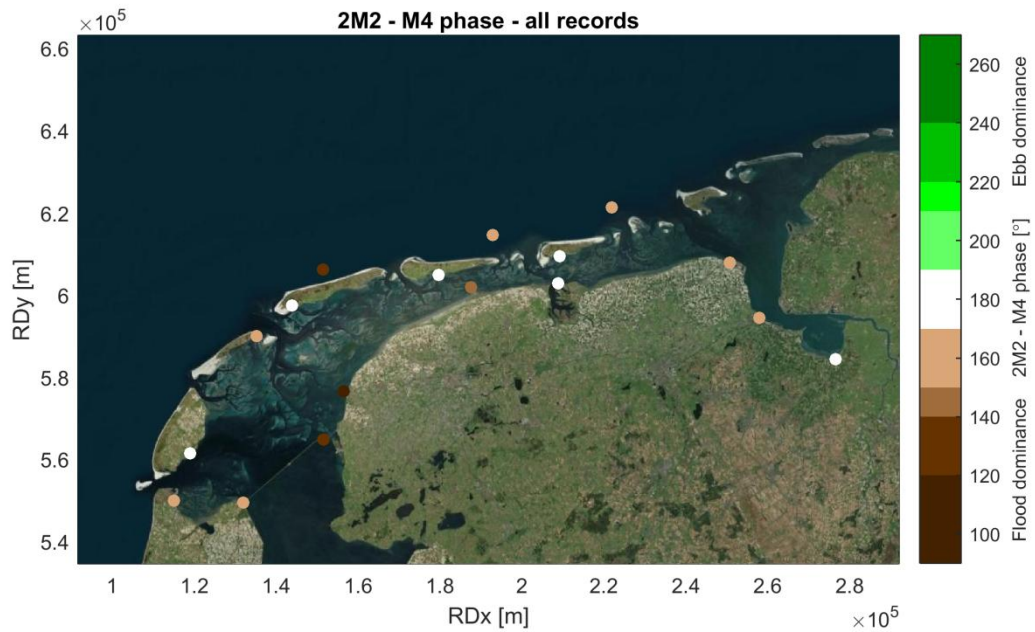
Figuur 5.22  $M_2$  amplitude bij 21 getijstations in en rondom de Waddenzee



Figuur 5.23  $M_4$  amplitude bij 21 getijstations in en rondom de Waddenzee



Figuur 5.24  $M_4/M_2$  amplitude bij 21 getijstations in en rondom de Waddenzee



Figuur 5.25  $2M_2 - M_4$  faseverschil bij 21 getijstations in en rondom de Waddenzee

## 5.2.2 Specifieke patronen op basis van jaarlijkse periodes

De specifieke patronen op basis van jaarlijkse patronen worden vervolgens per zeegat besproken. Voor ieder zeegat wordt de amplificatie en getijasymmetrie weergegeven. Voor de dagelijkse patronen wordt men verwezen naar Appendix A. Belangrijk om te onthouden dat voor de dagelijkse patronen de tijdsperiode te kort is om onderscheid te maken tussen twee beperkte in de frequentie verschillende dubbeldaagse of viermaaldaagse getijcomponenten (e.g. M<sub>2</sub> en S<sub>2</sub> of M<sub>4</sub> en MS<sub>4</sub>) en vandaar spreken we daar over dubbeldaagse (D<sub>2</sub>) en viermaaldaagse (D<sub>4</sub>) getijden.

### 5.2.2.1 Zeegat van Texel

De getijamplificatie wordt voor dit zeegat bepaald door stations in het bekken te delen door de M<sub>2</sub> amplitude bij Den Helder. Den Helder ligt in principe niet in de Noordzee, maar juist net in het bekken, maar gezien de erg lange tijdseries bij Den Helder is ervoor gekozen deze toch te gebruiken als vergelijkstation. NB: De data analyse is uitgevoerd vanaf 1945 of vanaf het eerste moment dat er data beschikbaar is, zie ook Hoofdstuk 4 voor de methode van de getij analyse, dat betekent dus dat de grote veranderingen van het getij na afsluiting van de Zuiderzee niet zijn gekwantificeerd in deze analyse. Door Den Helder te gebruiken als referentiestation wordt de totale amplificatie in het zeegat onderschat, immers een deel van de amplificatie is al zichtbaar bij Den Helder. Figuur 5.26 laat zien dat de M<sub>2</sub> amplitude (bovenpaneel) en getijamplificatie (onderpaneel) in het Zeegat van Texel. De M<sub>2</sub> amplitude fluctueert iets over de tijd als gevolg van de 18,6 jarige getijcyclus. De amplificatie bij Kornwerderzand buiten is in het begin licht afgenomen en sinds midden jaren 1960 constant over de tijd (ongeveer 1.2). Bij station Den Oever buiten lijkt er een licht afnemende trend zichtbaar tussen 1970-1990. Over de gehele tijdsperioden neemt de amplificatie het meeste af bij Den Oever buiten ( $-0.85 \cdot 10^{-3}$  per jaar) en juist beperkt toe bij Oudenschild ( $+0.14 \cdot 10^{-3}$  per jaar). Alle trends in M<sub>2</sub> en amplificatie zijn statistisch significant (p-waarde < 0.05; zie Tabel 5.6).

De amplitudeverhouding M<sub>4</sub>/M<sub>2</sub> is maximaal bij Den Helder en juist het kleinste bij Kornwerderzand buiten (Figuur 5.27 - bovenpaneel). Voor Oudenschild is er geen statistische trend zichtbaar, maar voor de overige stations zijn de trends in amplitudeverhouding dit wel. Het relatief faseverschil tussen M<sub>2</sub> en M<sub>4</sub> lijkt voor Den Helder en Kornwerderzand buiten te zijn afgenomen tussen 1940-1970. Vanaf 1970 is het faseverschil voor alle stations ongeveer constant in de tijd (Figuur 5.27 - benedenpaneel). Het getij is symmetrisch bij Oudenschild en voor de andere stations (licht) vloeddominant. De toename van de amplitudeverhouding en afname relatief faseverschil (meer vloed-dominant) bij Den Helder en visa-versa bij Den Oever Buiten zijn statistisch significant en hebben de grootste temporale trends ten opzichte van de overige stations (Tabel 5.6).

Tabel 5.6 Overzicht van de temporale lineaire trends voor het Zeegat van Texel van de M<sub>2</sub>, amplificatie, M<sub>4</sub>/M<sub>2</sub> ratio en 2M<sub>2</sub> – M<sub>4</sub> faseverschil. Het eerste getal is de trend en is weergegeven in 10<sup>-3</sup> per jaar. Het tweede getal is de p-waarde om nul hypothese van geen trend te testen. Tijdsperiode is 1945-heden of korter wanneer er minder data beschikbaar was.

Stations	M <sub>2</sub> [m/jaar]	p [-]	Ampl. [-/jaar]	p [-]	M <sub>4</sub> /M <sub>2</sub> [-/jaar]	p [-]	2M <sub>2</sub> - M <sub>4</sub> [-/jaar]	p [-]
Den Helder	0.62	0.00	0.00	0.00	0.38	0.00	-157	0.00
Oudenschild	0.26	0.03	0.14	0.00	0.14	0.06	15	0.61
Den Oever buiten	-0.38	0.00	-0.85	0.00	-0.40	0.00	141	0.00
Kornwerderzand buiten	0.59	0.00	-0.24	0.00	0.09	0.00	-105	0.00

## 5.2.2.2 Zeegat van het Vlie

De getijamplificatie wordt voor dit zeegat bepaald door de  $M_2$  amplitude in het bekken te delen door de  $M_2$  amplitude bij West-Terschelling. Technisch-gesproken ligt West-Terschelling niet in de Noordzee, maar juist net in het bekken, maar gezien een gebrek aan langlopende stations is ervoor gekozen om toch West-Terschelling te gebruiken als referentiestation. Figuur 5.28 geeft weer de  $M_2$  amplitude (boven) en getijamplificatie (onder) in het Vlie. De  $M_2$  amplitude fluctueert iets over de tijd als gevolg van de 18,6 jarige getijcyclus en neemt voor alle stations statistisch-gezien toe tussen 0.42 en 0.798 mm per jaar.

De amplificatie bij Vlieland haven en Harlingen variëren sterk over de tijd. De amplificatie bij Vlieland neemt consequent af sinds 1960 ( $-0.50 \cdot 10^{-3}$  per jaar). Bij Harlingen is er geen statistisch significante trend te ontdekken (Tabel 5.7). Hoewel tussen 1960 – 1980 de amplificatie bij Harlingen tijdelijk kleiner was. Strikt gezien vindt er geen amplificatie plaats bij Vlieland Haven, aangezien dit station, net zoals West-Terschelling, in de monding ligt. Op basis van Tabel 5.7 kan wel worden geconcludeerd dat de verandering van de amplificatie bij Vlieland het gevolg is voor de minder grote toename van  $M_2$  ten opzichte van West-Terschelling (0.79 mm versus 0.42 mm per jaar).

De  $M_4/M_2$  amplitudeverhouding is maximaal bij Harlingen en juist het kleinste bij Vlieland Haven (Figuur 5.29 - bovenpaneel). De amplitudeverhouding neemt af bij West-Terschelling en Vlieland haven en juist toe bij Harlingen (Tabel 5.7). Het relatief faseverschil tussen  $M_2$  en  $M_4$  neemt voor West-Terschelling en Vlieland haven consequent af (wordt meer vloeddominant, c.q. minder ebdominant, Figuur 5.29 - benedenpaneel). Bij Harlingen neemt het faseverschil juist toe.

Tabel 5.7 Overzicht van de temporale lineaire trends voor het Zeegat van het Vlie van de  $M_2$ , amplificatie,  $M_4/M_2$  ratio en  $2M_2 - M_4$  faseverschil. Het eerste getal is de trend en is weergegeven in  $10^{-3}$  per jaar. Het tweede getal is de p-waarde om nul hypothese van geen trend te testen. Tijdsperiode is 1945-heden of korter wanneer er minder data beschikbaar was.

Stations	$M_2$ [m/jaar ]	p [-]	Ampl. [-/jaar]	p [-]	$M_4/M_2$ [-/jaar]	p [-]	$2M_2 - M_4$ [-/jaar]	p [-]
West-Terschelling	0.79	0.00	0.00	0.00	-0.23	0.00	-536	0.00
Vlieland haven	0.42	0.00	-0.50	0.00	-0.14	0.00	-339	0.00
Harlingen	0.85	0.00	0.04	0.50	0.42	0.00	67	0.00



### 5.2.2.3 Amelander Zeegat

De getijamplificatie wordt voor dit zeegat bepaald door stations in het bekken te delen door de  $M_2$  amplitude bij Huibertgat. Huibertgat ligt in principe niet in de nabijheid van het Amelander Zeegat, maar verder oostwaarts bij het Friesche Zeegat, echter gezien een gebrek aan langlopende waterstandstations op zee nabij Ameland is ervoor gekozen om Huibertgat te gebruiken. De  $M_2$  amplitude bij Huibertgat is altijd hoger dan de  $M_2$  amplitude in het bekken van het Amelander Zeegat. Dit komt omdat de  $M_2$  amplitude op de Noordzee toeneemt van west naar oost (zie Hoofdstuk 5.2.1). Hierdoor kan je eigenlijk niet spreken van een amplificatie in het getijdebekken. Het is echter wel mogelijk op basis van Figuur 5.30 te concluderen dat amplificatie tussen 1975 – 1990 toe nam waarna er een consequente afname van de getijamplificatie is ingezet tot 2005. Een mogelijke reden voor de afname van de amplificatie is meer wrijving in het zeegat als het gevolg van sedimentatie. Trends in  $M_2$  zijn voor Nes echter niet statistisch significant. Bij Holwerd is de toename in  $M_2$  en amplificatie zijn wel statistisch-gesproken significant (Tabel 5.8)

Voor de getijasymmetrie worden stations Terschelling Noordzee, Nes en Holwerd geanalyseerd. De  $M_4/M_2$  amplitudeverhouding is groter bij Holwerd dan bij Nes en Terschelling Noordzee (Figuur 5.31 - bovenpaneel). Trends bij Terschelling Noordzee en Nes zijn niet statistisch significant, bij Nes neemt de amplitudeverhouding wel statistisch-gesproken significant af. (Tabel 5.8). Het relatief faseverschil tussen  $M_2$  en  $M_4$  neemt voor Nes tussen 1980 - 2000 af (wordt dus meer vloeddominant, Figuur 5.31- benedenpaneel). Bij Terschelling Noordzee en Holwerd neemt het faseverschil toe over de tijd en ook vloeddominant. De trend bij Terschelling Noordzee is echter niet significant (p-waarde van 0.07; Tabel 5.8)

Tabel 5.8 Overzicht van de temporale lineaire trends voor het Amelander Zeegat van de  $M_2$ , amplificatie,  $M_4/M_2$  ratio en  $2M_2 - M_4$  faseverschil. Het eerste getal is de trend en is weergegeven in  $10^{-3}$  per jaar. Het tweede getal is de p-waarde om nul hypothese van geen trend te testen. Tijdsperiode is 1945-heden of korter wanneer er minder data beschikbaar was.

Stations	$M_2$ [m/jaar ]	p [-]	Ampl. [-/jaar]	p [-]	$M_4/M_2$ [-/jaar]	p [-]	$2M_2 - M_4$ [-/jaar]	p [-]
Huibertgat	0.10	0.61						
Terschelling Noordzee	-0.30	0.37	0.00	0.00	-0.03	0.72	120	0.07
Nes	-0.34	0.20	-0.67	0.00	-0.24	0.00	-120	0.00
Holwerd	1.20	0.00	0.55	0.00	0.19	0.15	390	0.00

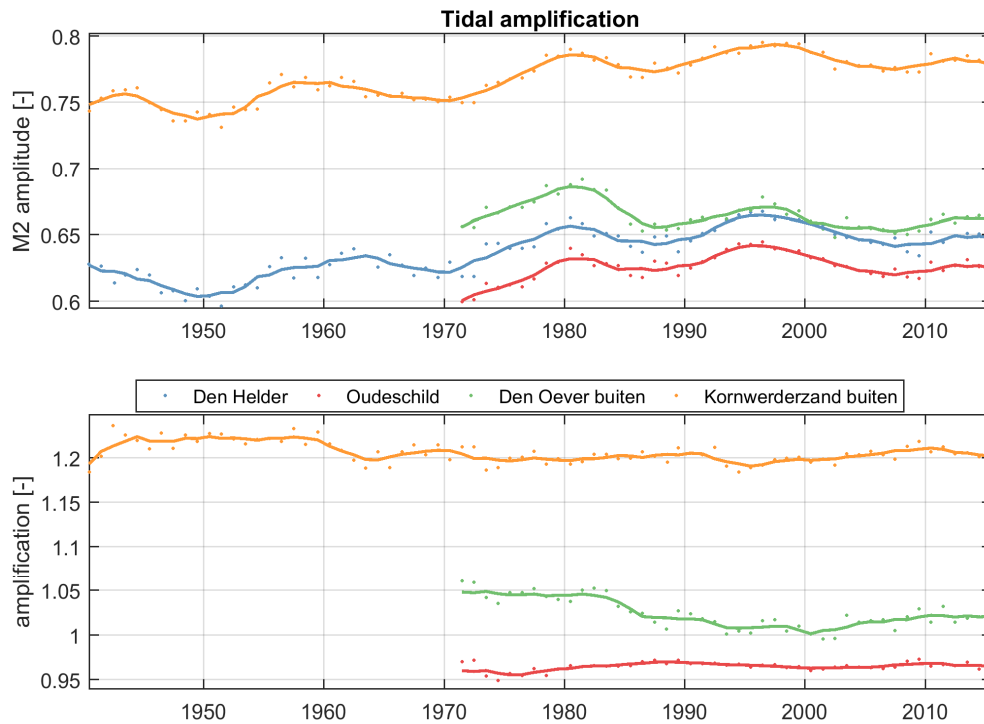
## 5.2.2.4 Het Friesche Zeegat

De getijamplificatie wordt voor dit zeegat ook bepaald door stations in het bekken te delen door de  $M_2$  amplitude bij Huibertgat. Huibertgat is gebruikt in plaats van Wierumergronden, aangezien Huibertgat een langere tijdserie heeft wat het mogelijk maakt om de getijamplificatie van voor 1980 te bepalen. De  $M_2$  amplitude fluctueert iets over de tijd als gevolg van de 18,6 jarige getijcyclus (Figuur 5.32 - bovenpaneel). De  $M_2$  amplitude bij Lauwersoog en Schiermonnikoog is altijd hoger dan bij Huibersgat als gevolg van amplificatie. Over de tijd neemt de amplificatie echter af (Figuur 5.32 –benedenpaneel) af met meer dan  $0.80 \cdot 10^{-3}$  per jaar als gevolg van de afname de  $M_2$  amplitude van 0.5 mm per jaar. Een mogelijke reden voor de afname van de amplificatie is meer wrijving in het bekken als het gevolg van sedimentatie

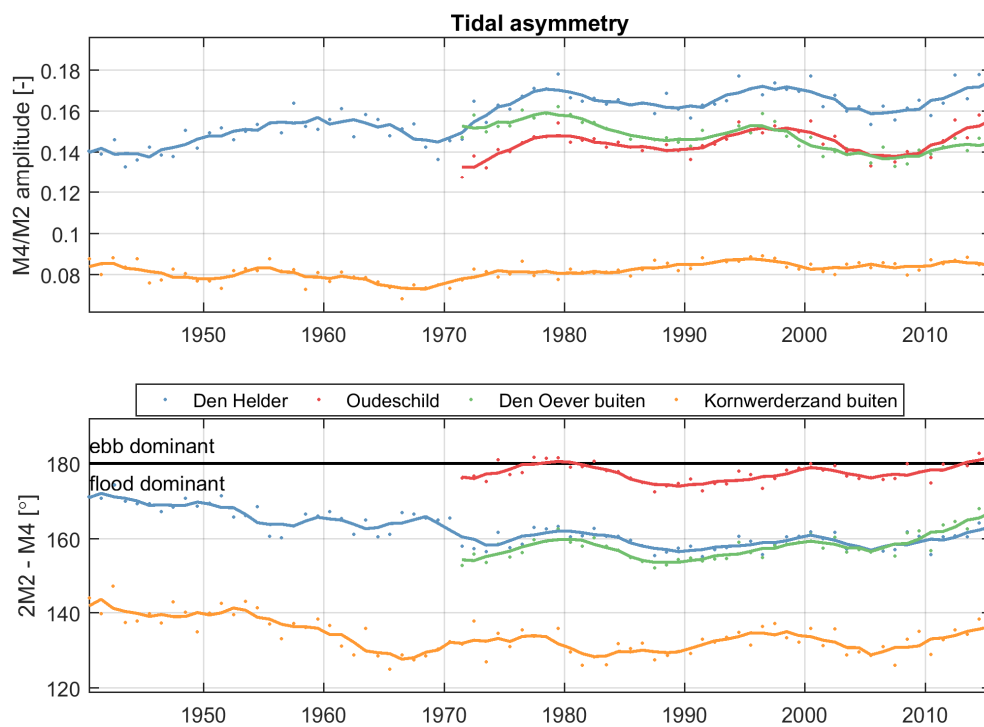
De  $M_4/M_2$  amplitudeverhouding is vergelijkbaar bij Schiermonnikoog en Lauwersoog en neemt voor alle stations statistisch significant toe (Figuur 5.33 – bovenpaneel en Tabel 5.9). Voor het relatief faseverschil tussen  $M_2$  en  $M_4$  is er geen statistische significante trend zichtbaar voor Huibertgat en Lauwersoog (Tabel 5.9), hoewel het relatief faseverschil voor Schiermonnikoog wel is toegenomen (Figuur 5.33 - benedenpaneel). Het getij bij Schiermonnikoog is symmetrisch en bij Lauwersoog vloeddominant.

Tabel 5.9 Overzicht van de temporale lineaire trends voor het Friesche Zeegat van de  $M_2$ , amplificatie,  $M_4/M_2$  ratio en  $2M_2 - M_4$  faseverschil. Het eerste getal is de trend en is weergegeven in  $10^{-3}$  per jaar. Het tweede getal is de p-waarde om nul hypothese van geen trend te testen. Tijdsperiode is 1945-heden of korter wanneer er minder data beschikbaar was.

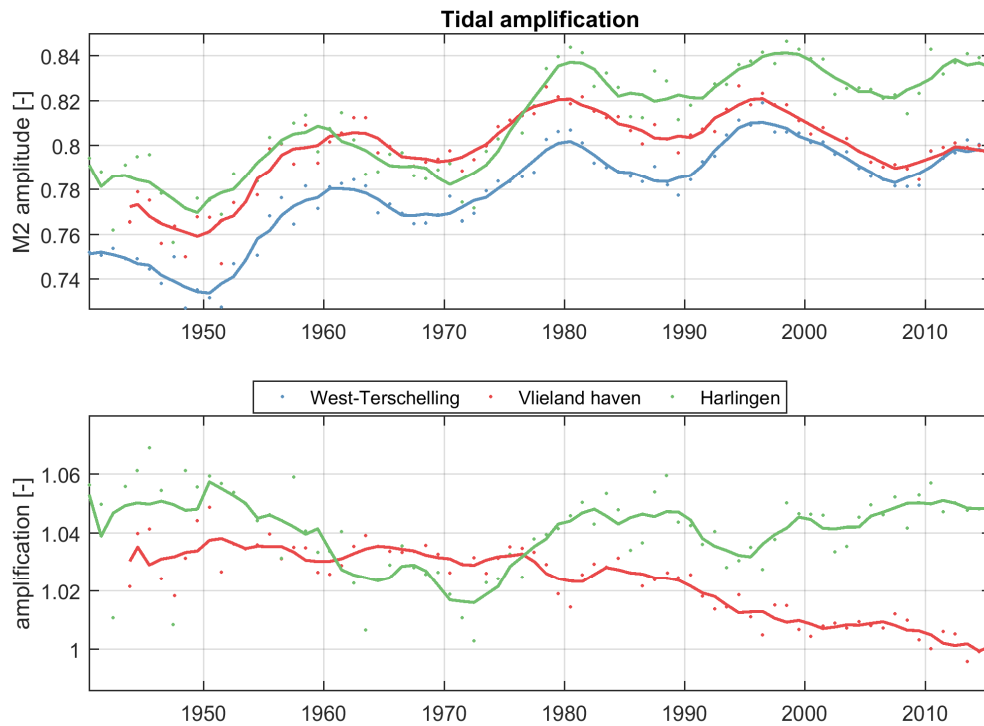
Stations	$M_2$ [m/jaar ]	p [-]	Ampl. [-/jaar]	p [-]	$M_4/M_2$ [-/jaar]	p [-]	$2M_2 - M_4$ [-/jaar]	p [-]
Huibertgat	0.10	0.61	0.00	0.00	0.29	0.00	61	0.09
Schiermonnikoog	-0.52	0.04	-0.84	0.00	0.37	0.00	167	0.00
Lauwersoog	-0.57	0.01	-0.89	0.00	0.36	0.00	-31	0.31



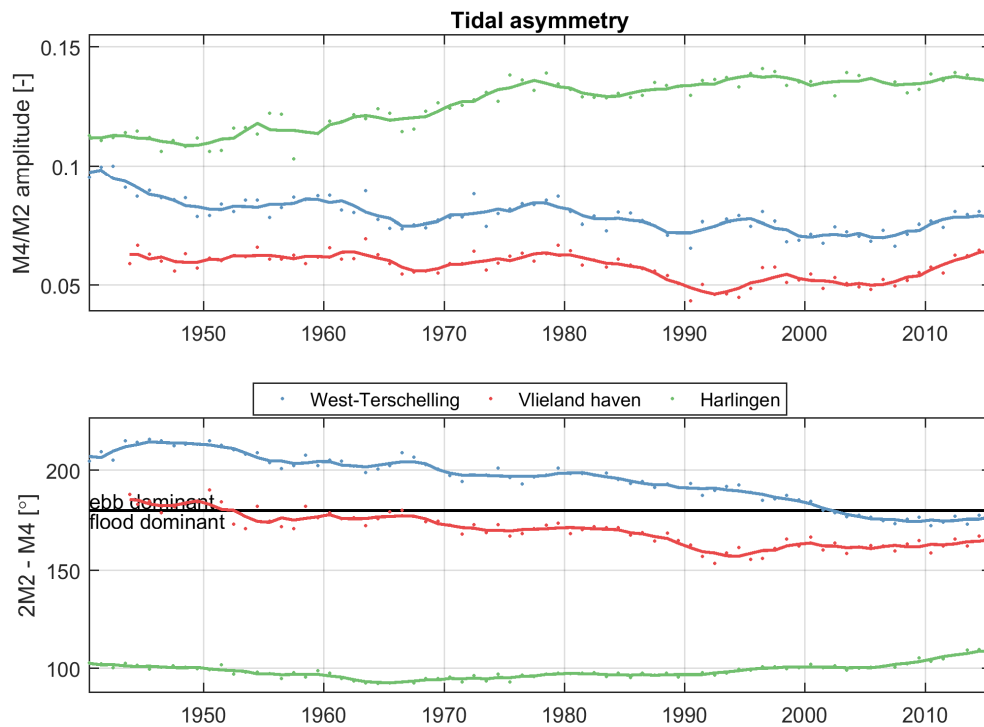
Figuur 5.26 Getijamplificatie voor het Zeegat van Texel. Stippen zijn originele punten. Lijnen zijn gebaseerd op het glijdend gemiddelde van 5 jaar.



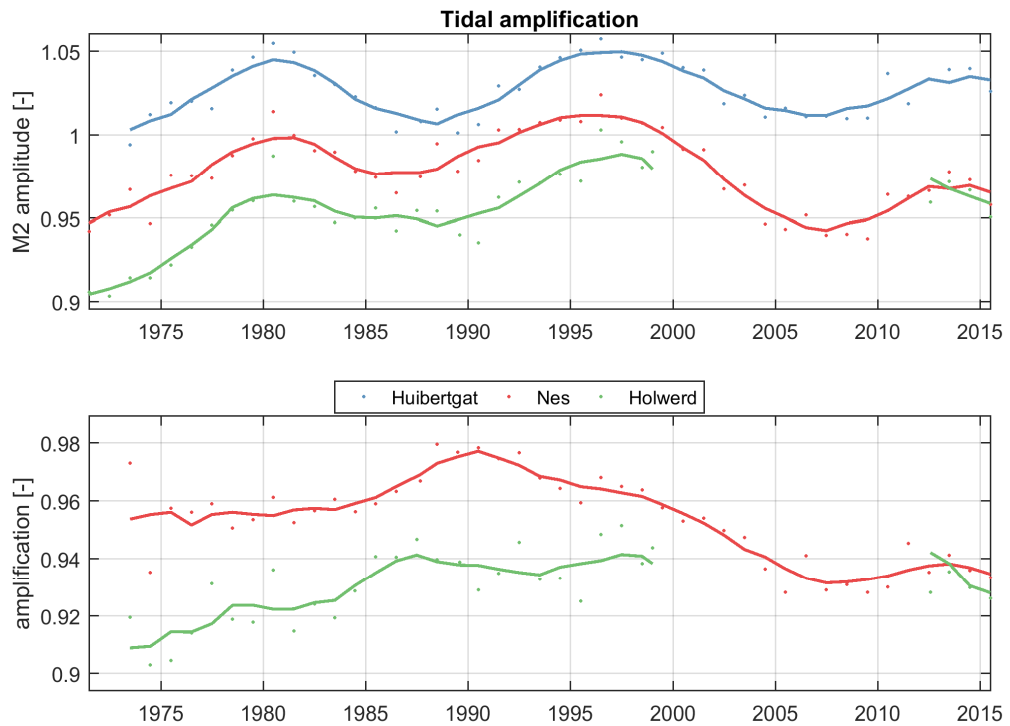
Figuur 5.27 Getijasymmetrie voor het Zeegat van Texel



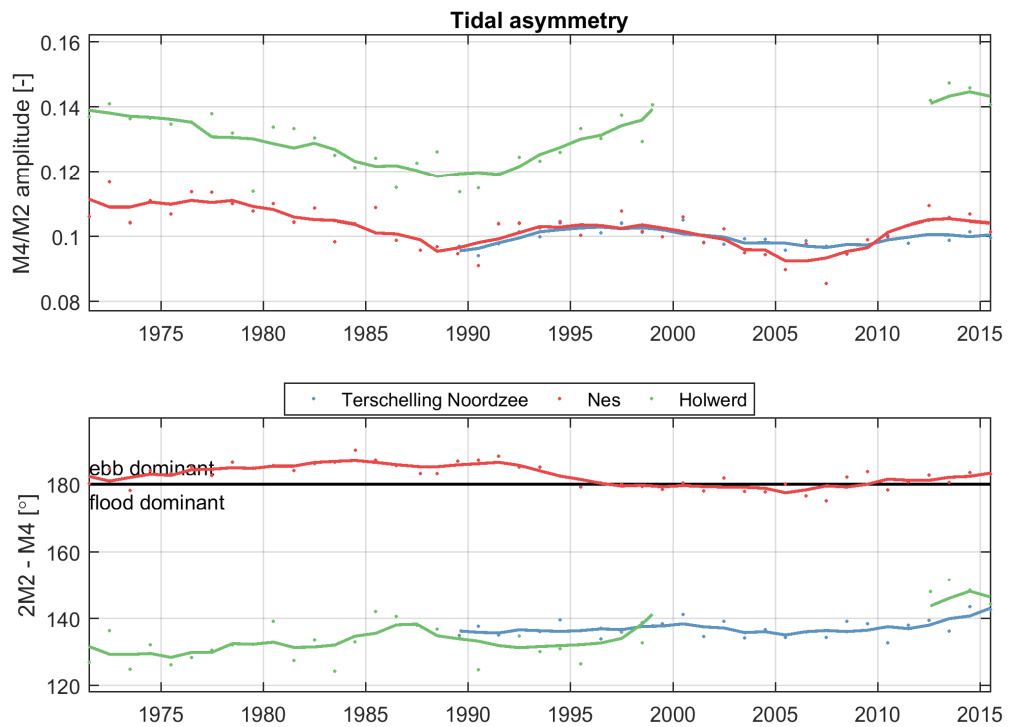
Figuur 5.28 Getijamplificatie voor het Zeegat van het Vlie



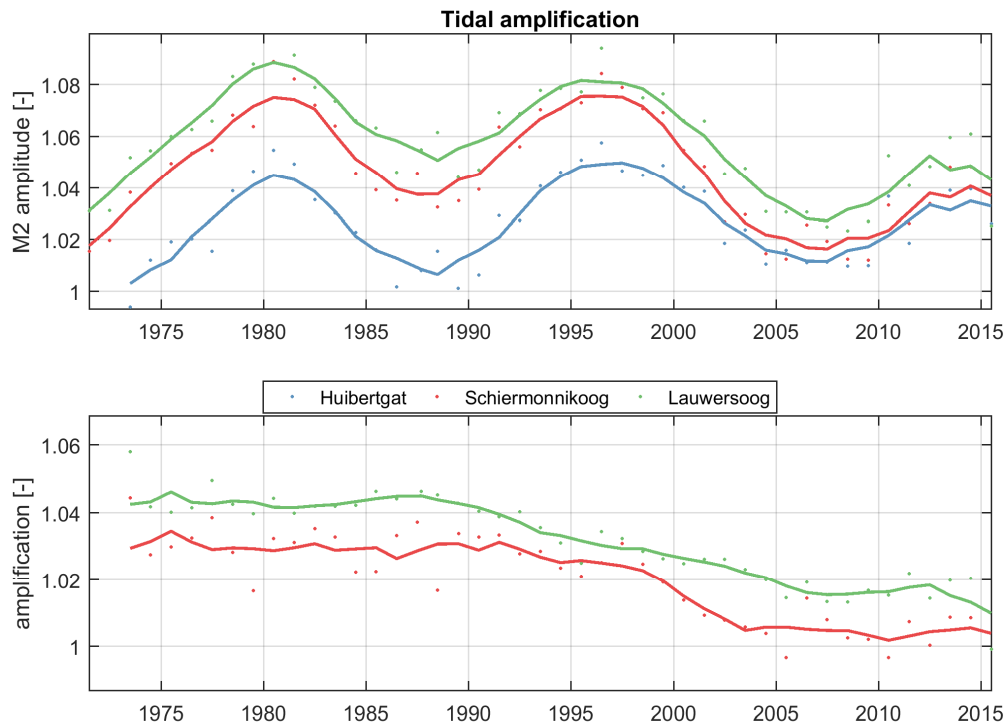
Figuur 5.29 Getijasymmetrie voor het Zeegat van het Vlie



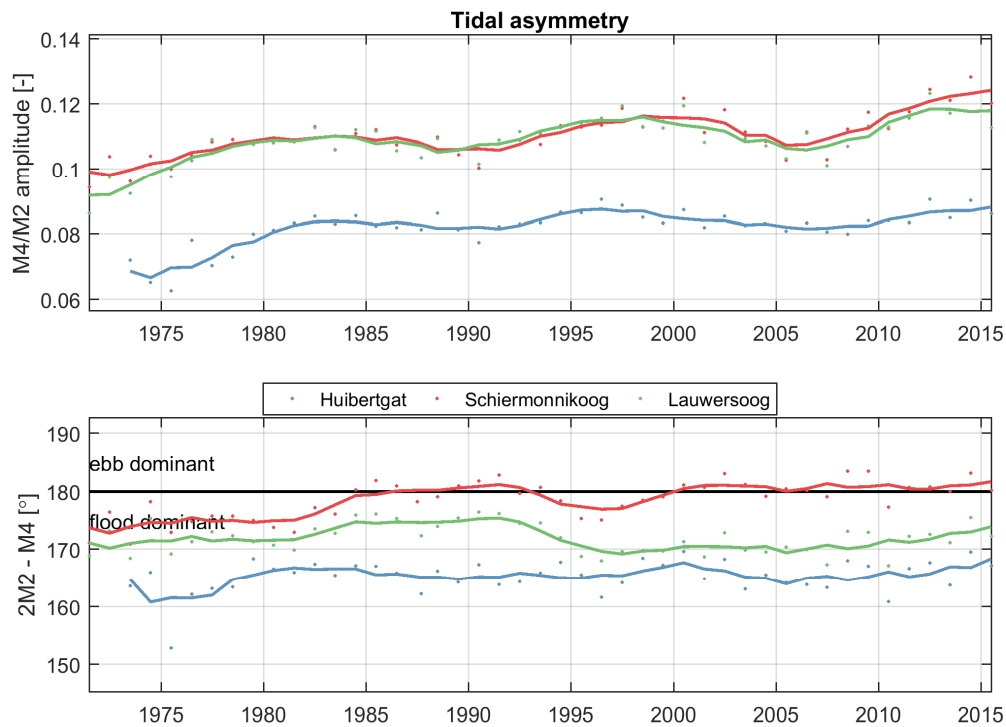
Figuur 5.30 Getijamplificatie voor het Ameland Zeegeat



Figuur 5.31 Getijasymmetrie voor het Ameland Zeegeat



Figuur 5.32 Getijamplificatie voor het Friesche Zeegat



Figuur 5.33 Getijasymmetrie voor het Friesche Zeegat

## 6 Samenhang ontwikkelingen van morfologie en getij

### 6.1 Veranderingen van getijamplificatie en morfologie

Amplificatie van het getij binnen een bekken wordt beïnvloed door de morfologie van het zeegatsysteem. Kijken wij naar het zeegat en het bekken dan zijn er twee factoren van belang: het stroomvoerende vermogen van de geulen (i.e. vermogen van de geul om een bepaalde hoeveelheid water per tijdseenheid door te laten) en het kombergingsvolume van het bekken (dat beïnvloed wordt door de veranderingen van de platen). Bij verruiming van de geulen neemt het stroomvoerende vermogen toe, wat een sterkere amplificatie van het getij tot gevolg heeft. Omgekeerd leidt verkleining van geulen tot zwakkere amplificatie van het getij. Uitbreiding en/of verhoging van platen leidt tot verkleining van het kombergingsvolume bij gelijkblijvend hoogwater en laagwater, en heeft daarom een sterkere getijamplificatie tot gevolg. Omgekeerd leidt erosie van platen tot vergroting van het kombergingsvolume en zwakkere getijamplificatie.

Behalve de morfologische veranderingen heeft ook zeespiegelstijging invloed op de getijamplificatie. Zeespiegelstijging leidt tot ruimere geulen en groter kombergingsvolume. De gevolgen van deze twee effecten op de getijamplificatie zijn tegenovergesteld (zie Hoofdstuk 6.2). Het netto effect van zeespiegelstijging op de getijamplificatie hangt daarom af van de morfologie van een specifiek bekken.

In het Zeegat van Texel en Zeegat van het Vlie is sedimentatie opgetreden, vooral in het subgetijdedeel en platen. Dit leidt tot minder komberging en dus meer getijamplificatie. De verruiming van de geulen resulteert ook in een toename van de amplificatie. Dit verklaart niet dat de veranderingen van de getijamplificatie bij verschillende stations in de twee bekkens geen eenduidig beeld vertonen. Mogelijk is er sprake van ruimtelijke variaties in verandering stroomvoerende vermogen en/of komberging. Bijvoorbeeld, de verzwakking van de getijamplificatie bij Den Oever is goed te verklaren door de sterke sedimentatie van het Balgzand (zie ook Elias et al., 2012).

Achterin de bekkens (stations Kornwerdzand en Harlingen) werd de getijamplificatie eerst zwakker, tot eind jaren 1960. Klaarblijkelijk was het effect van ondiepere geulen in de eerste periode na de afsluiting van de Zuiderzee sterker dan het effect van de uitbreiding van het subgetijdedeel en de platen. Daarna is de verandering van het subgetijdedeel en de platen belangrijker geworden en wordt de getijamplificatie juist sterker (Zeegat van het Vlie) of blijft gelijk (Kornwerdzand). Bij Oudeschild is de getijamplificatie min of meer gelijk gebleven sinds dat er gemeten is (sinds begin jaren 70). Het kan zijn dat dit station ook wat invloed ondervindt van het bekken van het (erosieve) Eierlandse Gat, aangezien Oudeschild onder de invloed staat van zowel het Zeegat van Texel als het Eierlandse Gat.

De verzwakking van de getijamplificatie in het Friesche Zeegat (Schiermonnikoog en Lauwersoog) sinds de jaren 70 zijn goed te verklaren door de uitbreiding van het plaataeraal. Ook in het Amelander Zeegat vindt de verzwakking van de amplificatie in dezelfde periode als de waargenomen sedimentatie plaats (vanaf 1990).

### 6.2 Veranderingen van getijasymmetrie en morfologie

Getijasymmetrie wordt veroorzaakt door vervorming van de getijgolf tijdens de voortplanting in ondiep water. Verandering van de getijasymmetrie in een getijdebekken is daarom direct gerelateerd aan de morfologische verandering in het bekken. Er zijn verschillende theorieën

over de relatie tussen getijasymmetrie en de morfologie in een getijdebekken (bijvoorbeeld Dronkers, 1986; Friedrichs en Aubrey, 1988). Friedrichs en Aubrey (1988) gebruiken twee parameters om te bekijken of het getij in een bekken eb- of vloeddominant wordt:  $a/h$  en  $V_s/V_c$ , waarbij  $a$ =getijamplitude,  $h$ =waterdiepte in de geul,  $V_s$ =kombergingsvolume boven de intergetijdengebieden,  $V_c$ =geulvolume. In een bekken met grotere waarde van  $a/h$  en kleinere waarde van  $V_s/V_c$  wordt het getij vloeddominant.

In het westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee (Zeegat van Texel en Zeegat van het Vlie) is het getij vloeddominant geworden. Dit valt te verklaren door de toegenomen amplitude-diepte verhouding ( $a/h$ ) ten gevolge van de toegenomen getijamplitude. De waarde van  $V_s/V_c$  is ook toegenomen in de tijd door de uitbreiding van het plaataeraal, maar blijkbaar heeft deze ontwikkeling minder invloed gehad op de verandering van de getijasymmetrie. Ook volgens de theorie van Friedrichs en Aubrey (1988) heeft de verandering van deze parameter weinige invloed als  $a/h$  grote waarden heeft. Opvallend is verder dat het getij bij Oudeschild afwijkend gedrag vertoont t.o.v. de andere stations in het Zeegat van Texel. Het getij daar is min of meer symmetrisch met een relatief faseverschil tussen  $M_2$  en  $M_4$  van rondom 180 graden. Dit kan komen doordat het getij bij dit station ook invloed ondervindt van het bekken Eierlandse Gat.

In het oostelijke deel van de Nederlandse Waddenzee is de getijasymmetrie weinig veranderd in de tijd. Voor het Amelandse Zeegat is dit te verklaren aangezien de morfologische veranderingen relatief klein zijn en bovendien wordt de opgetreden verandering grotendeels gecompenseerd door de zeespiegelstijging. Opvallender is dat de getijasymmetrie in het Friesche Zeegat ook weinig is veranderd sinds 1970. Klaarblijkelijk is het effect van de vergroting van de waarde  $a/h$  gecompenseerd door de vergroting van  $V_s/V_c$ .

### 6.3 Veranderingen van getijasymmetrie en sedimentimport

De Waddenzee als geheel sedimenteert als gevolg van menselijk ingrijpen en zeespiegelstijging. Getijasymmetrie is één van de mechanismes voor netto sedimenttransport door de zeegaten. Vloeddominant getij leidt tot import van sediment. In de Waddenzee is het getij in de bekkens vloeddominant of symmetrisch. Een hypothese is dat getijasymmetrie in de vorm van ( $M_4$  en  $M_2$  amplitudeverhouding en relatief faseverschil) het transport van sediment kan verklaren.

De temporele veranderingen van de getijasymmetrie bieden echter geen verklaring voor de waargenomen veranderingen van de sedimentimport. In het westelijke deel van de Waddenzee is de import in de tijd afgenomen maar de vloeddominantie van het getij is juist toegenomen. In het oostelijke deel is er weinige verandering in de getijasymmetrie maar er zijn wel grote veranderingen van de sedimentimport door de zeegaten opgetreden in de tijd. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de getijasymmetrie van het verticale getij, weergegeven door de  $M_2 - M_4$  verhouding, blijkbaar niet het dominante mechanisme voor het netto sedimenttransport door de zeegaten vertegenwoordigt. Dit kan twee dingen betekenen: (1) getijasymmetrie is niet het dominante mechanisme voor het netto transport, en/of (2)  $M_2$  en  $M_4$  van het verticale getij samen niet voldoende informatie bevatten van de asymmetrie van het horizontale getij.



## 7 Discussie

Alle bodemdata gebruikt voor het construeren van de hoogtekarten van de Waddenzee is afkomstig van Rijkswaterstaat. Elke bodemdataset heeft echter meetfouten. De meetfouten hebben invloed op de nauwkeurigheid van een individueel punt en daarmee de uitgevoerde data analyse. In deze rapportage is er gerekend met een onzekerheidsmarge op basis van de meetfout in bodemhoogte van 15 cm (2 standaarddeviaties: 95% van de datapunten wijkt minder af). Dit maakt het niet mogelijk om jaar-tot-jaar bodemvariaties te kwantificeren. Het is echter wel mogelijk om sedimentatie en/of erosie trends voor decennia te bepalen.

De analysemethode voor de morfologische analyse is erg vergelijkbaar met Elias et al. (2012), maar verschilt op een aantal plekken. Het belangrijkste verschil is dat in deze methode consequent een tijd-ruimte interpolatie wordt gebruikt. Dit maakt de interpolatietechniek volledig objectief en daarmee reproduceerbaar. Het nadeel hiervan is echter dat deze studie niet consistent is met Elias et al. (2012) en daarom ook net andere resultaten heeft.

In dit rapport zijn hypsometrische curves bepaald en opgedeeld in drie hoogteklassen wat het mogelijk maakt om de ontwikkeling van het bekken beter te kunnen kwantificeren. De gekozen hoogteklassen zijn echter niet noodzakelijkerwijs correct. In realiteit zou een plaat bijvoorbeeld moeten worden gedefinieerd tussen hoog- en laagwater (in MSL en niet NAP) en de grenswaarden moeten bijvoorbeeld meegroeien met zeespiegelstijging. Het voordeel van deze methode is echter dat geulen, subgetijdedeel en platen beter konden worden gekwantificeerd en deze rapportage geeft bijvoorbeeld al een idee of het plaataeraal en/of hoogte toe of afneemt per bekken.

Voor de getijamplificatie -asymmetrie namen we aan dat het voldoende was om alleen naar  $M_2$  (en  $M_4$ ) te kijken. Dit maakte het mogelijk om met beperkte inspanning voor de gehele Waddenzee temporale veranderingen in getijamplificatie en -asymmetrie te kunnen kwantificeren. Het was echter niet mogelijk om veranderingen in asymmetrie van het verticale getij te relateren aan sedimentimport. Dit kan zowel kan betekenen dat de methode ontoereikend is als dat getijasymmetrie niet het dominante mechanisme voor het netto transport is.



## 8 Conclusies en aanbevelingen

### 8.1 Conclusies

Het doel van deze studie is driedelig. Het aanvullen van het sedimentbudget tot 2012 (doelstelling 1) en verbeteren inzicht in de morfologische ontwikkeling (doelstelling 2) staan beschreven in Hoofdstuk 8.1.1. De kwantificatie en analyse van getijkarakteristieken (doelstelling 3)) staat beschreven in Hoofdstuk 8.1.2

#### 8.1.1 Morfologische analyse

De ontwikkeling van het sedimentvolume van de getijdebekkens Zeegat van Texel, Eierlandse Gat, Zeegat van het Vlie en Friesche Zeegat uit de huidige analyse komt goed overeen met de ontwikkeling zoals berekend door Elias et al. (2012). Kleine afwijkingen zouden veroorzaakt kunnen zijn door het verschil in interpolatietechniek (zoals beschreven in paragraaf 3.2).

Dit geldt niet voor het Amelander Zeegat, waar de verschillen tussen Elias et al. (2012) en deze rapportage veel groter zijn. De berekende volumeveranderingen van het Amelander Zeegat in de periode 1935-1990 zijn veel kleiner dan berekend door Elias et al. (2012) en vertonen niet dezelfde opwaartse trend. In het nieuwe resultaat is een duidelijke trendbreuk aanwezig vanaf het jaar 1990, wat overigens wel goed overeen komt met eerdere resultaten van Walburg (2006). Er is nog geen verklaringen voor deze grote verschillen.

In alle bekkens behalve Eierlandse Gat is sedimentatie opgetreden. Het bekken van Eierlandse Gat vertoont echter juist een netto erosie (i.e. geulen verruimen, maar platen verhogen wel). In alle bekkens is het subgetijdedeel en/of platen uitgebreid en/of verhoogd. Dit geldt ook voor Eierlandse Gat waarvan het bekken als geheel wel erosie vertoont, maar de plaathoogte desondanks toeneemt. De gebruikte analysemethode is niet geschikt om beslissend te bepalen of platen meegroeien met de zeespiegelstijging, aangezien zowel het plaatareaal als -volume varieert over de tijd. Daarnaast is het intergetijdengebied gedefinieerd met een vaste begrenzing tussen -1 en +1 ten opzichte van NAP, hoewel het eigenlijk gedefinieerd moet worden tussen gemiddeld hoogwater en laagwater (en dus ook ten opzichte van MSL).

De invloeden van de afsluitingen van Zuiderzee en Lauwerszee zijn goed terug te zien in de ontwikkelingen van Zeegat van Texel, Zeegat van het Vlie en Friesche Zeegat. Beide afsluitingen hebben sedimentatie in het subgetijdedeel veroorzaakt. Opvallend is wel dat de afsluiting van de Zuiderzee sedimentatie in vooral de ondiepere delen heeft veroorzaakt, terwijl de afsluiting van de Lauwerszee sedimentatie ook in de diepere delen van de geulen heeft veroorzaakt. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de verschillende invloeden van de afsluitingen op de getijprisma's. In tegenstelling tot de afsluiting van de Zuiderzee, heeft de afsluiting van de Lauwerszee een grote afname van het getijprisma van het Friesche Zeegat veroorzaakt, met als gevolg dat sedimentatie in de geul Zoutkamperlaag vanaf de keel van het zeegat over de volle lengte optreedt.

#### 8.1.2 Getij analyse

In het westelijke deel van de Nederlandse deel van Waddenzee is de getijslag toegenomen. Dit blijkt uit de ontwikkelingen van de amplitude van het  $M_2$  getij bij alle stations binnen de bekkens van het Zeegat van Texel en het Zeegat van het Vlie. Den Oever is hierop echter een uitzondering. Qua amplificatie is er geen eenduidig beeld. Voor het Zeegat van Texel is

amplificatie licht verzwakt (Kornwerdzand tot 1965, Den Oever) of gelijk gebleven (Kornwerdzand vanaf 1965, Oudschild). In het Zeegat van het Vlie (Harlingen) fluctueert de amplificatie factor sterk en er lijkt een afnemende trend te laten zien tot 1970. Over de hele periode is er relatief weinig veranderd. Merk wel op dat de amplificatie in beide bekkens is bepaald met een referentiestation binnen de bekkens, gezien de afwezigheid van een lange termijn referentie station voor deze zeegaten. Een mogelijke reden voor de afname van de amplificatie is meer wrijving in het zeegat als het gevolg van sedimentatie (en vice-versa voor een toename).

De getijslag in het Amelander Zeegat (Nes) en in het Friesche Zeegat (Schiermonikoog en Lauwersoog) zijn licht gedaald. Alle stations in deze twee bekkens zijn na 1970 in werking gebracht. Kijken wij naar de amplificatie van het getij (t.o.v. Huibertgat) dan is de dalende trend in beide bekkens duidelijker te zien. De afname van de amplificatiefactor is voor beide bekkens vooral opgetreden in de periode 1990-2005.

Het getij binnen het Nederlandse deel van de Waddenzee is (volgens de definitie  $2M_2 - M_4$ ) vloeddominant (Den Helder, Den Oever, Kornwerderzand, Harlingen, Holwerd, Lauwersoog) of min of meer neutraal (Oudschild, West Terschelling, Vlieland Haven, Nes, Sciermonnikoog). In het westelijke deel van de Waddenzee (Zeegat van Texel en Zeegat van het Vlie) is het getij meer vloeddominant geworden. In het oostelijke deel (Amelander Zeegat en Friesche Zeegat) hebben er geen tot beperkte veranderingen plaatsgevonden.

## 8.2 Aanbevelingen

Deze rapportage beschrijft een data analyse studie van zowel de morfologie als het getij. In Hoofdstuk 6 zijn beide onderdelen wel aan elkaar gerelateerd (i.e. samenhang van ontwikkelingen), maar er is geen expliciete analyse gedaan tussen veranderingen van getijamplificatie, -asymmetrie en morfologie/sediment transport. Om de wisselwerking tussen getij en morfologie beter te begrijpen, verdient het de aanbeveling om in een volgende studie deze koppeling wel expliciet te maken. Dit zou bijvoorbeeld kunnen door sedimentatievolumes te relateren aan veranderingen in amplificatie en/of asymmetrie. Een andere mogelijkheid is om juist getijasymmetrie te gebruiken om sediment import naar de Waddenzee te verklaren.

Daarnaast is de morfologische analyse per zeegat uitgevoerd. Het voordeel hiervan is dat dit het mogelijk maakt om de morfologische ontwikkelingen op zeegat-niveau te aggregeren. Echter, om bijvoorbeeld in nauwkeurig te kunnen nagaan in welke mate platen meegroeien met zeespiegelstijging, is er een detailanalyse nodig waar ten eerste verschillende in deelgebieden de morfologische ontwikkelingen worden geanalyseerd. Ten tweede dient de analyse te worden uitgevoerd ten opzichte van MSL in plaats van NAP (i.e. ruimtelijk verschil tussen MSL en NAP), dienen platen te worden gedefinieerd tussen gemiddeld hoogwater en laagwater, en dient zeespiegelstijging (i.e. veranderingen MSL over de tijd) te worden meegenomen.

## 9 Referenties

Bars, Le, D., Drijfhou, S. & de Vries, H., 2017: A high-end sea level rise probabilistic projection including rapid Antarctic ice sheet mass loss, *Environmental Research Letters*: Vol 12, Nr 4. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aa6512>

Cleveringa, J., Mulder, S., & Oost, A., 2004: Kustverdediging van de koppen van de Waddeneilanden: de dynamiek van de kust nabij buitendelta's en passende maatregelen voor het kustbeheer. Rapport RIKZ/2004.017.

URL: <http://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:8593505b-53d4-4f18-bdfa-a8fcc0112c52/?collection=research>

Davis, Jr., R.A., and Hayes, M.O., 1984: What is a wave dominated coast? *Marine Geology* 60, 313-329.

Dronkers, J., 1986: Tidal asymmetry and estuarine morphology. *Netherlands Journal of Sea Research*. 20, 117 – 131.

Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B., De Ronde, J., 2012: Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. *Netherlands Journal of Geosciences* 91-3. 293-310.

Friedrichs, C. T., Aubrey, D. G., 1988: Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 27, 521-545

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. Report RIKZ/2004.025. Rijkswaterstaat, National Institute for Coastal and Marine Management RIKZ (Haren): 138 pp.

KNMI, 2017: Extreme zeespiegelstijging in de 21e eeuw. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). News item 06-04-2017. URL: <http://knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/extreme-zeespiegelstijging-in-de-21e-eeuw>.

Louters, T. & Gerritsen, F., 1994: The Riddle of the Sands. A Tidal System's Answer to a Rising Sea Level. Report RIKZ-94.040. Rijkswaterstaat, National Institute for Coastal and Marine Management RIKZ (The Hague), 69 pp.

Meehl, G., Stocker, T.F., Collins, W.D., Friedlingstein, P., Gaye, A.T., Gregory, J.M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J.M., Noda, A., Raper, S.C.B., Watterson, I.G., Weaver, J. & Zhao, Z.-C., 2007. Global climate projections. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Mille, H.L. (eds): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge. University Press (Cambridge, UK and New York, USA), 996 pp.

Pawlowicz R., Beardsley B., Lentz S., 2002: Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. *Computers & Geosciences* 28:929-937.

Rijkswaterstaat, 2005: Vaklodgingen: de inwintechnieken en hun combinaties. Vergelijking tussen verschillende inwintechnieken en de combinaties ervan. Rapportnummer: AGI-2005-GSMH-012. Auteurs: Wiegman, N., Perluca, R., Oude Elberink, S., & Vogelzang, J.

Rijkswaterstaat, 2007: Meetopstellingen in de Waddenzee: Sterkte & Belastingen Waterkering

Roskam, A.P., 1988: Golfklimaten voor de Nederlandse Kust. Report GWAO-88.046. Rijkswaterstaat, Tidal Waters Department (The Hague), 69 pp.

Walburg, L., 2006: Zandbalans van het Nederlandse kuststelsel. Werkdocument RIKZ/KW/2005.133w, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ. Zee.

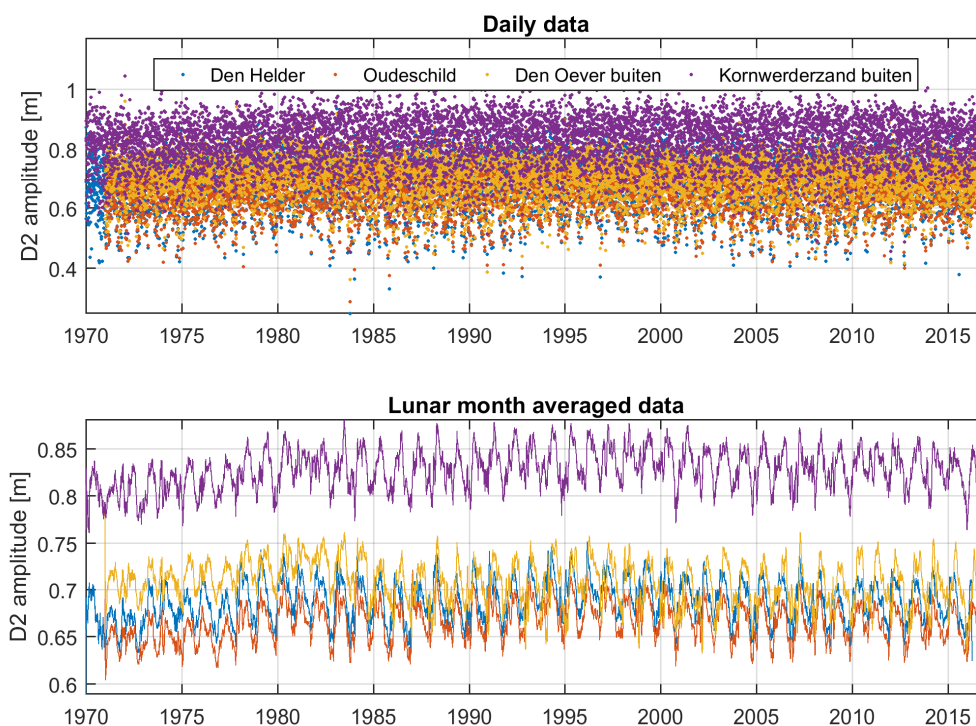
Wang, Z. B., Winterwerp, J. C., & He, Q., 2014: Interaction between suspended sediment and tidal amplification in the Guadalquivir Estuary. *Ocean Dynamics*, 64(10), 1487–1498. URL: <http://doi.org/10.1007/s10236-014-0758-x>.

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 Journal of Sediment Research*, Vol. 28, No. 2 162–171.

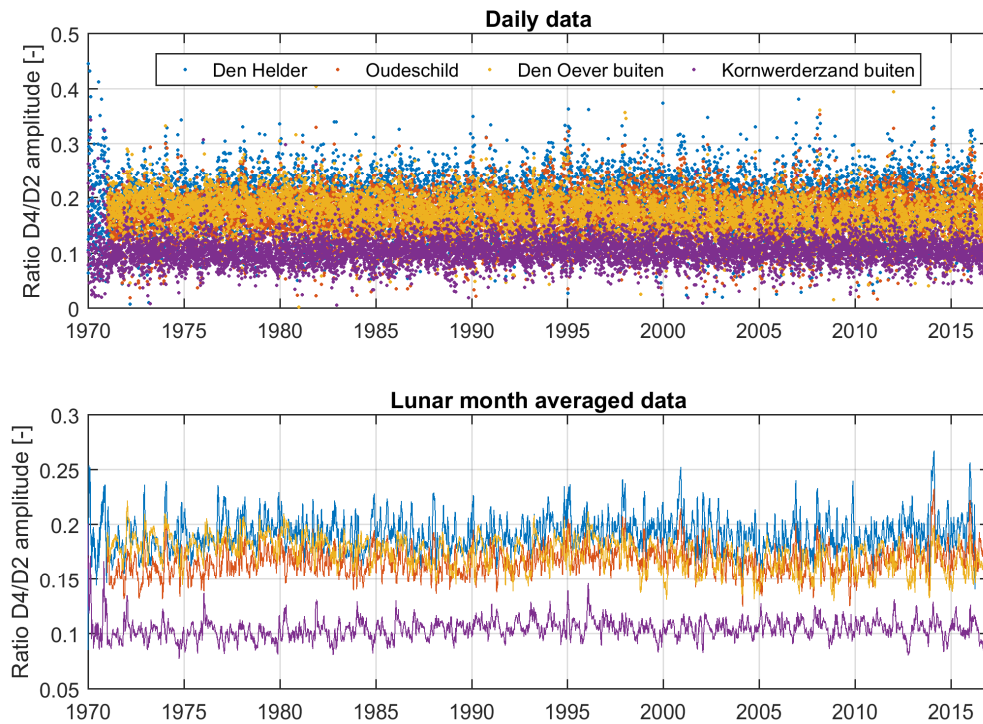
Wijnberg, K.M., 1995: Morphologic Behavior of a Barred Coast over a Period of Decades. Ph.D. thesis, University Utrecht, Faculty of Geographical Sciences (Utrecht), 245 p.

## A Korte termijn dagelijkse patronen

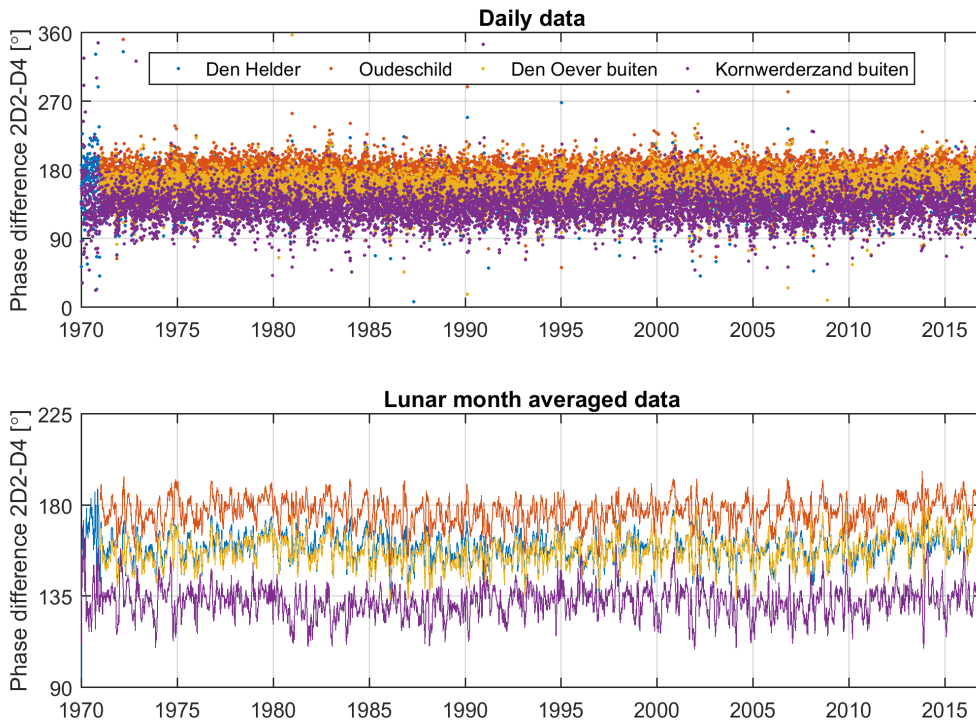
### A.1 Zeegat van Texel



Figuur A.1 D2 amplitude voor het Zeegat van Texel op basis van een dagelijks uitgevoerde analyse. Bovenpaneel: ongefilterd. Benedenpaneel: glijdend gemiddelde van een lunaire maand.



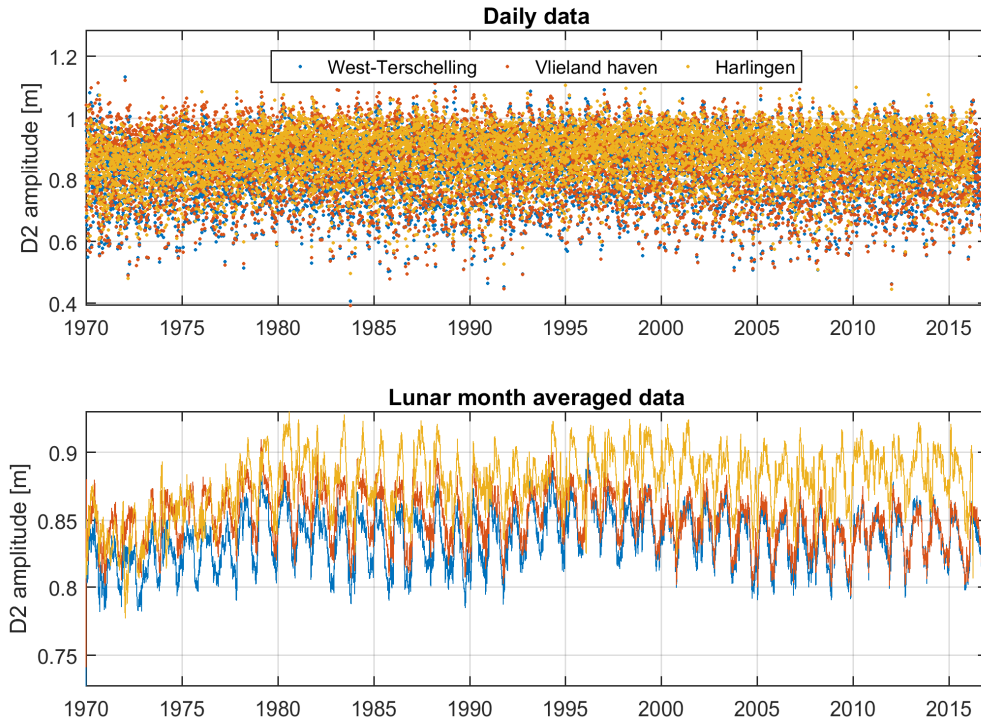
Figuur A.2 Amplitudeverhouding M4/M2 voor het Zeegat van Texel op basis van een dagelijks uitgevoerde analyse. Bovenpaneel: ongefilterd. Benedenpaneel: glijdend gemiddelde van een lunaire maand.



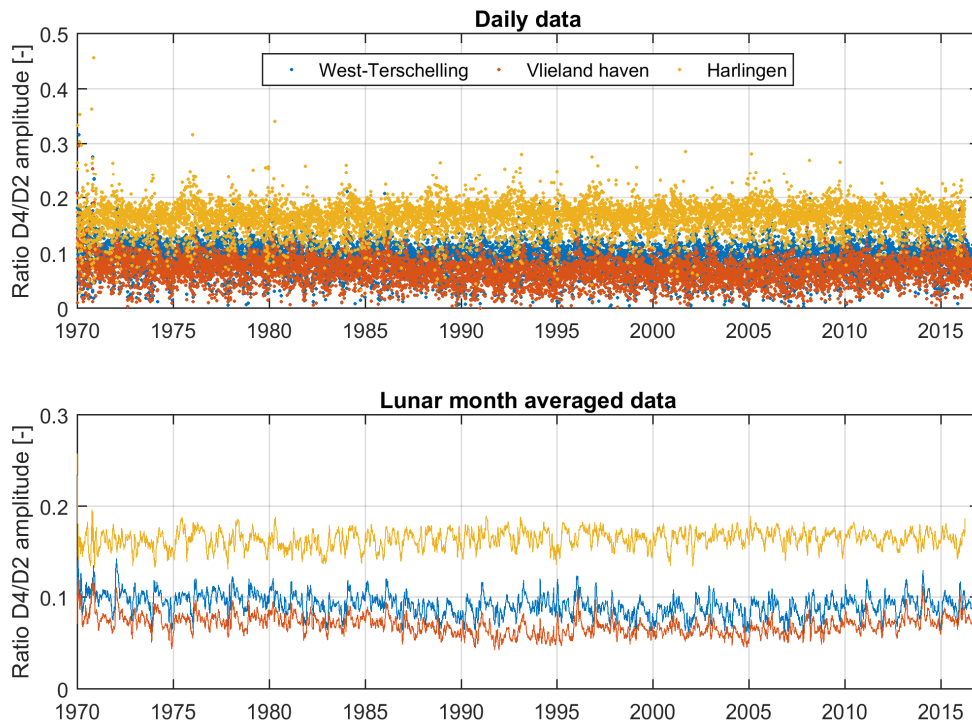
Figuur A.3 Relatief faseverschil M4/M2 voor het Zeegat van Texel op basis van een dagelijks uitgevoerde analyse. Bovenpaneel: ongefilterd. Benedenpaneel: glijdend gemiddelde van een lunaire maand.



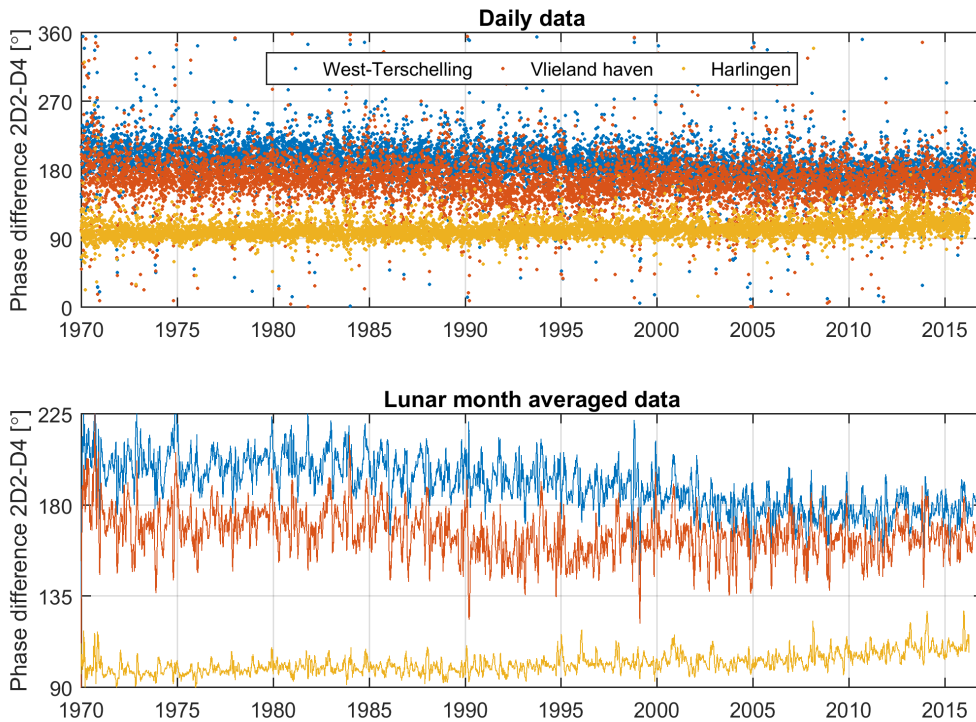
## A.2 Zeegat van het Vlie



Figuur A.4 D2 amplitude voor het Zeegat van het Vlie op basis van een dagelijks uitgevoerde analyse.  
Bovenpaneel: ongefilterd. Benedenpaneel: glijdend gemiddelde van een lunaire maand.

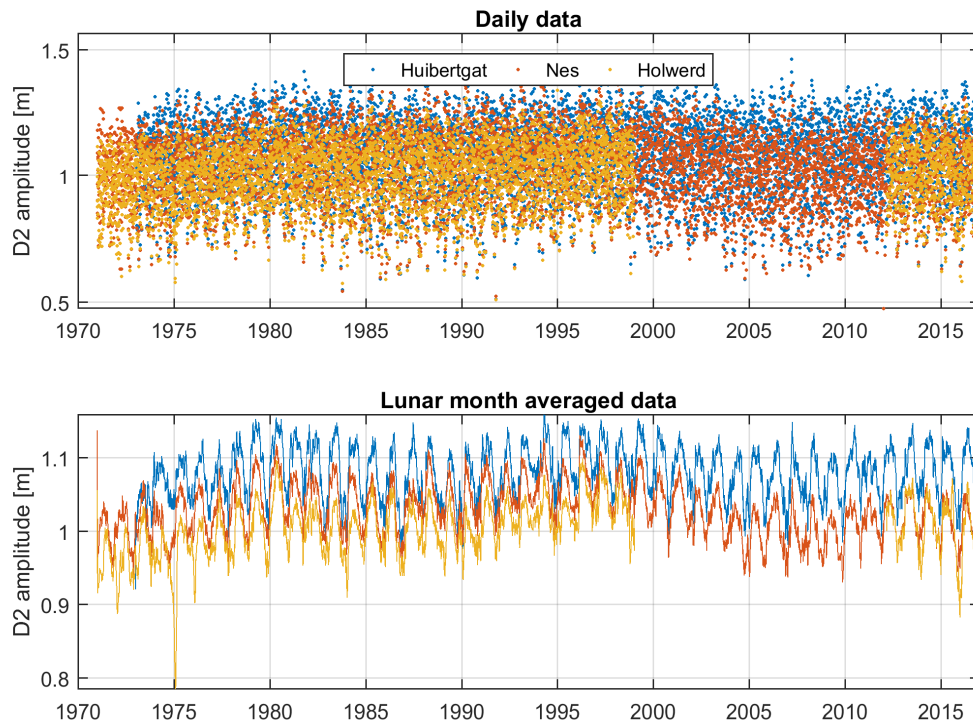


Figuur A.5 Amplitudeverhouding M4/M2 voor het Zeegat van het Vlie op basis van een dagelijks uitgevoerde analyse. Bovenpaneel: ongefilterd. Benedenpaneel: glijdend gemiddelde van een lunaire maand.

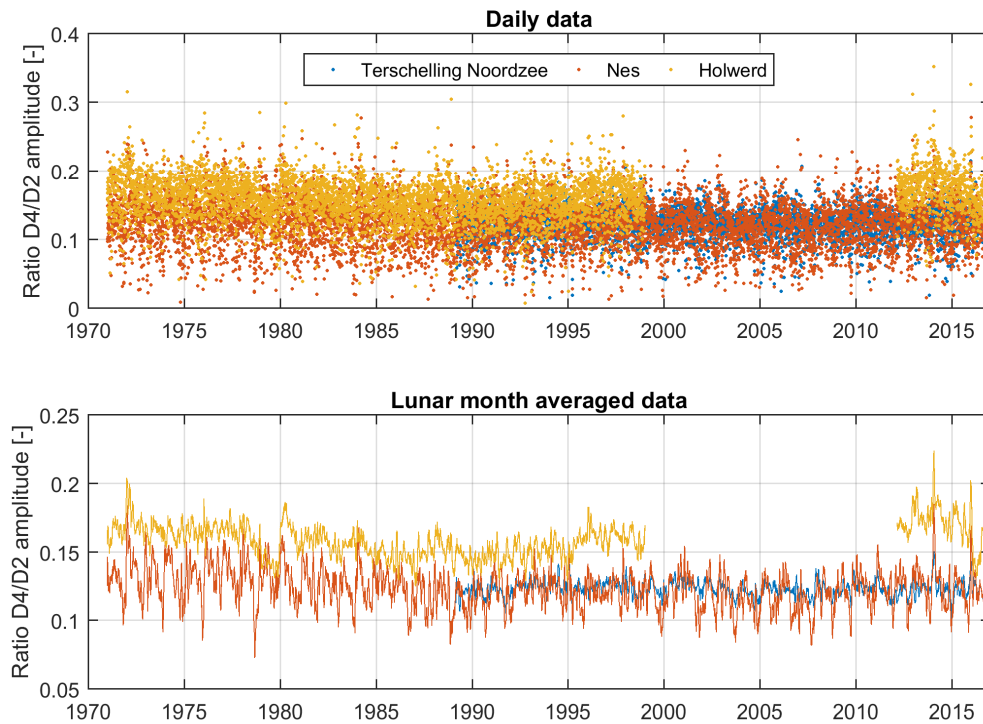


Figuur A.6 Relatief faseverschil M4/M2 voor het Zeegat van het Vlie op basis van een dagelijks uitgevoerde analyse. Bovenpaneel: ongefilterd. Benedenpaneel: glijdend gemiddelde van een lunaire maand.

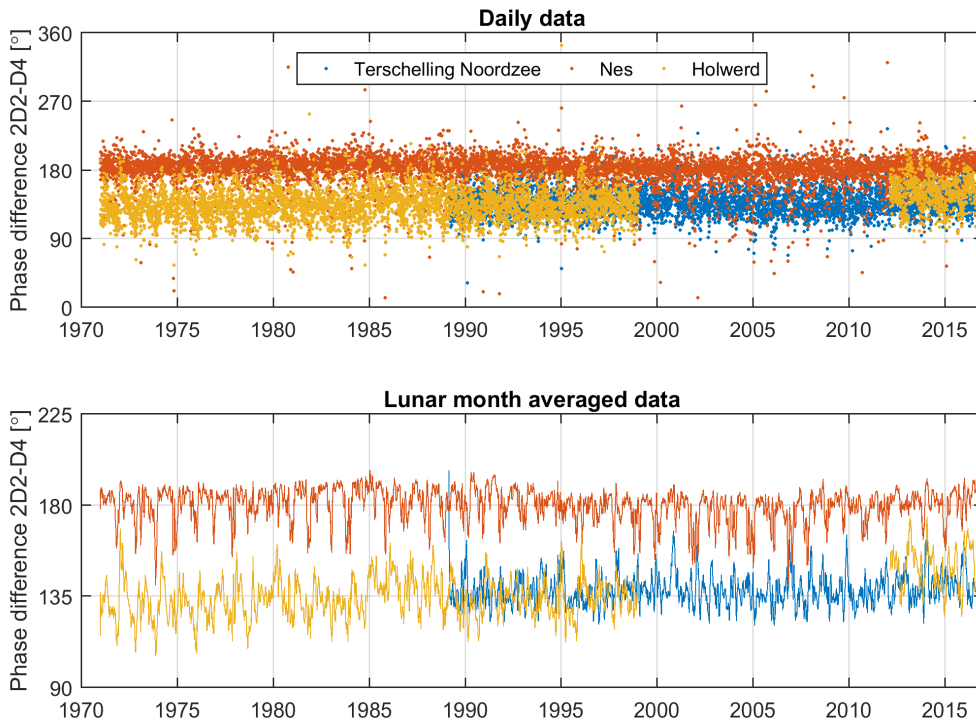
### A.3 Amelander Zeegat



Figuur A.7 D2 amplitude voor het Amelander Zeegat op basis van een dagelijks uitgevoerde analyse.  
Bovenpaneel: ongefilterd. Benedenpaneel: glijdend gemiddelde van een lunaire maand.

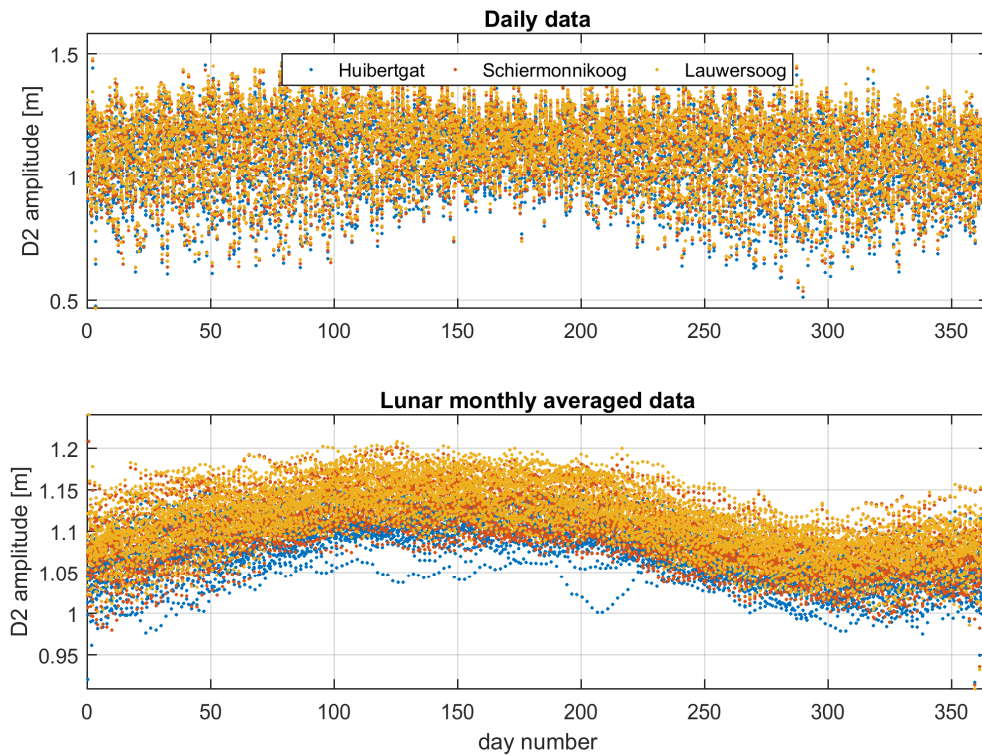


Figuur A.8 Amplitudeverhouding M4/M2 voor het Ameland Zeegat op basis van een dagelijks uitgevoerde analyse. Bovenpaneel: ongefilterd. Benedenpaneel: glijdend gemiddelde van een lunaire maand.

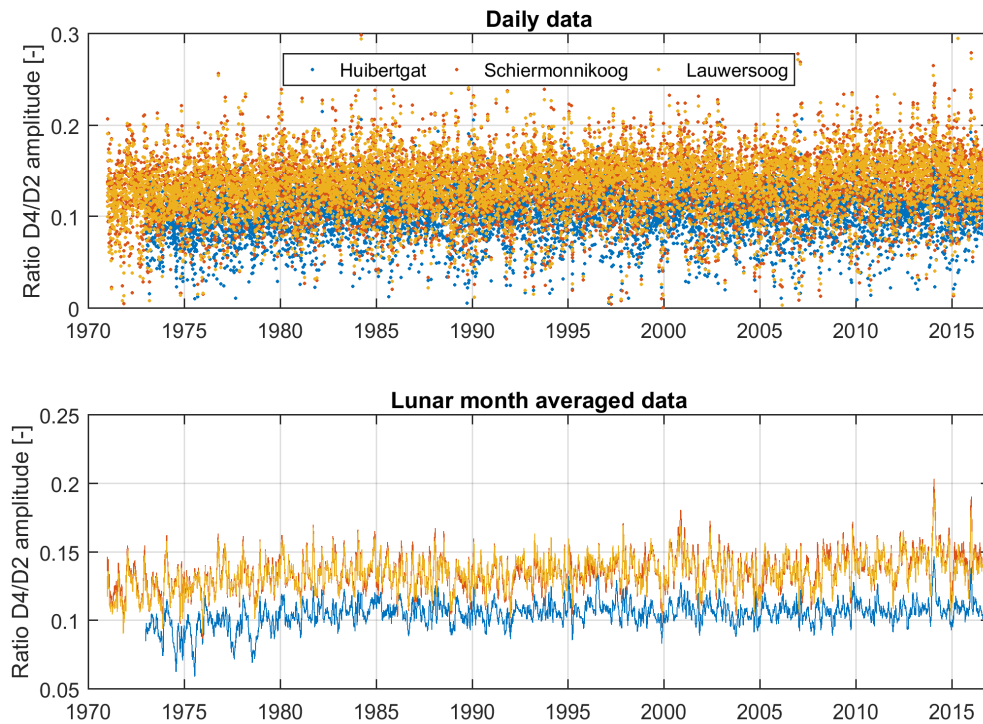


Figuur A.9 Relatief faseverschil M4/M2 voor het Ameland Zeegat op basis van een dagelijks uitgevoerde analyse. Bovenpaneel: ongefilterd. Benedenpaneel: glijdend gemiddelde van een lunaire maand.

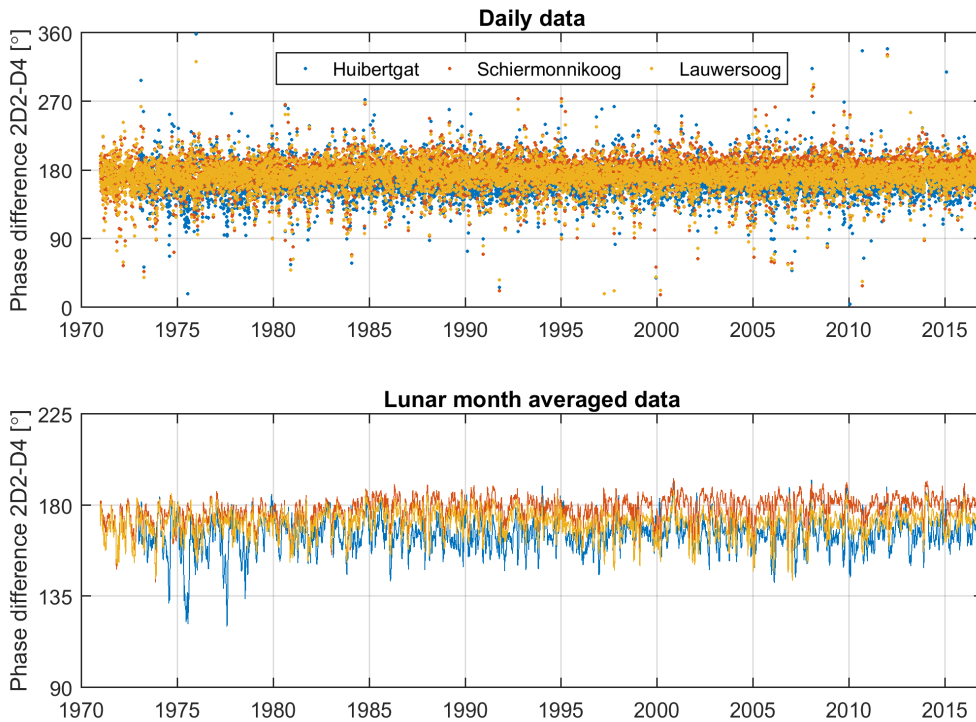
#### A.4 Friesche Zeegat



Figuur A.10 D2 amplitude voor het Friesche Zeegat op basis van een dagelijks uitgevoerde analyse. Bovenpaneel: ongefilterd. Benedenpaneel: glijdend gemiddelde van een lunaire maand.



Figuur A.11 Amplitudeverhouding M4/M2 voor het Friesche Zeegat op basis van een dagelijks uitgevoerde analyse. Bovenpaneel: ongefilterd. Benedenpaneel: glijdend gemiddelde van een lunaire maand.



Figuur A.12 Relatief faseverschil M4/M2 voor het Friesche Zeegat op basis van een dagelijks uitgevoerde analyse. Bovenpaneel: ongefilterd. Benedenpaneel: glijdend gemiddelde van een lunaire maand.

## B Repository voor de data en analyse scripts

Voor KPP-Waddenzee is er een besloten SVN repository aangemaakt. Een repository een centrale plaats waar data, analyse scripts en andere computerinformatie opgeslagen is. Vooral voor grote projecten, met veel verschillende gebruikers, informatie en lange doorlooptijd, is het heel belangrijk om een goed georganiseerde repository te hebben.

Voor deze data analyse rapportage is er een aparte folder op de KPP Wadden repository aangemaakt (URL: <https://repos.deltares.nl/repos/KPP-Wadden/trunk/11200521-000-ZKS-0002>). Het doel van deze repository is tweedelig. Allereerst, om de reproduceerbaarheid van de studie te garanderen. Ten tweede, maakt het overzichtelijk opslaan van de studie het eenvoudig om in een aantal jaar de analyse te herhalen wanneer er nieuwe data beschikbaar is.

Op de repository van de data analyse rapportage (11200521-000-ZKS-0002) zijn drie onderdelen te vinden:

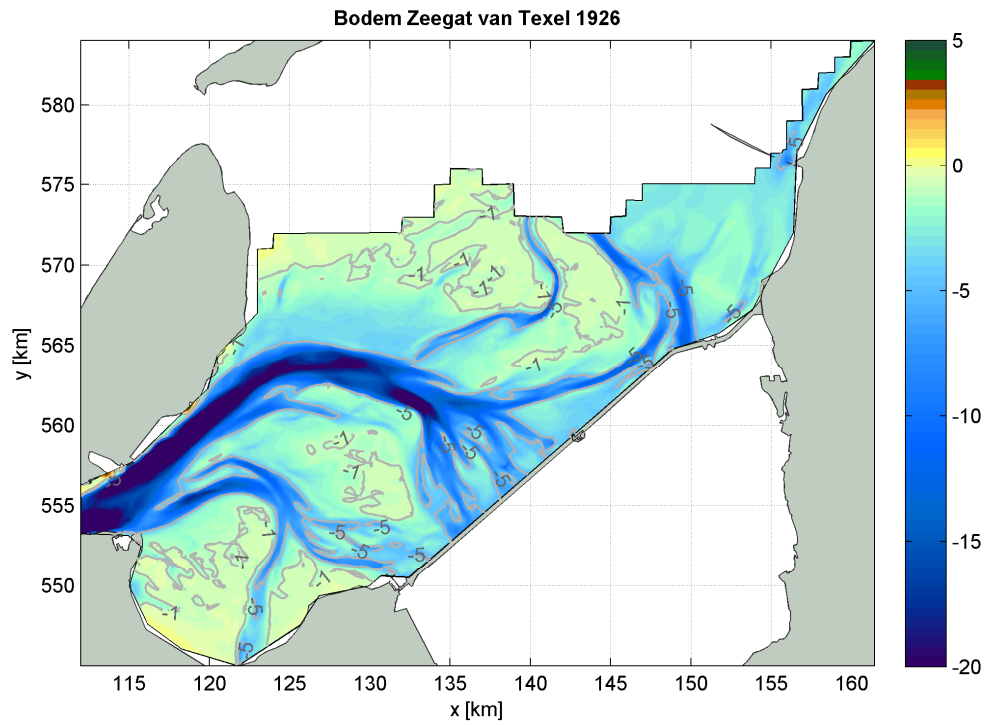
- 1 **De rapportage:** concept en definitieve rapportage
- 2 **Morfologische analyse**
  - 2.1 **Data:** de polygonen die gebruikt zijn voor de gebiedsbegrenzings van de zeegaten. De data die gebruikt is komt uit de oorspronkelijke vaklodingen datasets en is dan ook zodanig te verkrijgen. Tevens zijn er visualisaties van de beschikbare data per jaar als figuren toegevoegd aan de repository. Aanvullende data van SBW en landbegrenzings voor de visualisatie zijn ook aan de repository toegevoegd.
  - 2.2 **Analyse methode:** Er is een vijf scripts gebruikt voor de morfologische analyse. Drie scripts zijn gebruikt voor de data-analyse en twee voor visualisatie van de data.
    - Data analyse: 'vaklodingen.m' wordt gebruikt om de oorspronkelijke vaklodingendata in te laden, te plotten op een kaart en op te slaan per zeegat; 'preprocess\_rasters.m' verwerkt de originele data naar geïnterpoleerde bodems met 100% cover. Dit betekent dat er overall (tijd en ruimte) bodemhoogte data beschikbaar is. Voor een gedetailleerde beschrijving van de stappen in het script, zie Hoofdstuk 3.
    - Data visualisatie: 'hypsom\_curve.m' plot de hypsometrische curve voor een specifiek locatie en jaar; 'plot\_multiple\_curves.m' plot de hypsometrische curve voor alle jaren op een specifieke locatie in dezelfde figuur; plot\_bathy plot de volledig gedekte bathymetrie.
    - Data inspectie: gedurende het proces zijn de bodemkaarten met 100% cover zijn visueel gecontroleerd op fouten om zo het algoritme te verbeteren, zie ook Appendix C.
  - 2.3 **Figuren:** de visualisatie van de geïnterpoleerde bodems met 100% cover zijn ook te vinden op de repository. Een impressie voor het eerste en laatste jaar is weergegeven in Appendix C.
- 3 **Getij analyse**
  - 3.1 **Waterstands-informatie:** waterstanden gemeten bij 21 stations t/m begin 2017 in de Waddenzee. Tijdseries van waterstanden zijn verkregen via Waterbase. De data is "dubbel opgeslagen" (naast de bestaande database van Waterbase), maar heeft als vooral dat de dataset is geïsoleerd van eventuele veranderingen in de toekomst in Waterbase.
  - 3.2 **Analyse methode:** er zijn twee analyse scripts gebruikt. Het eerste script controleert de algemene patronen voor alle verschillende stations en zijn bepaald doormiddel van een

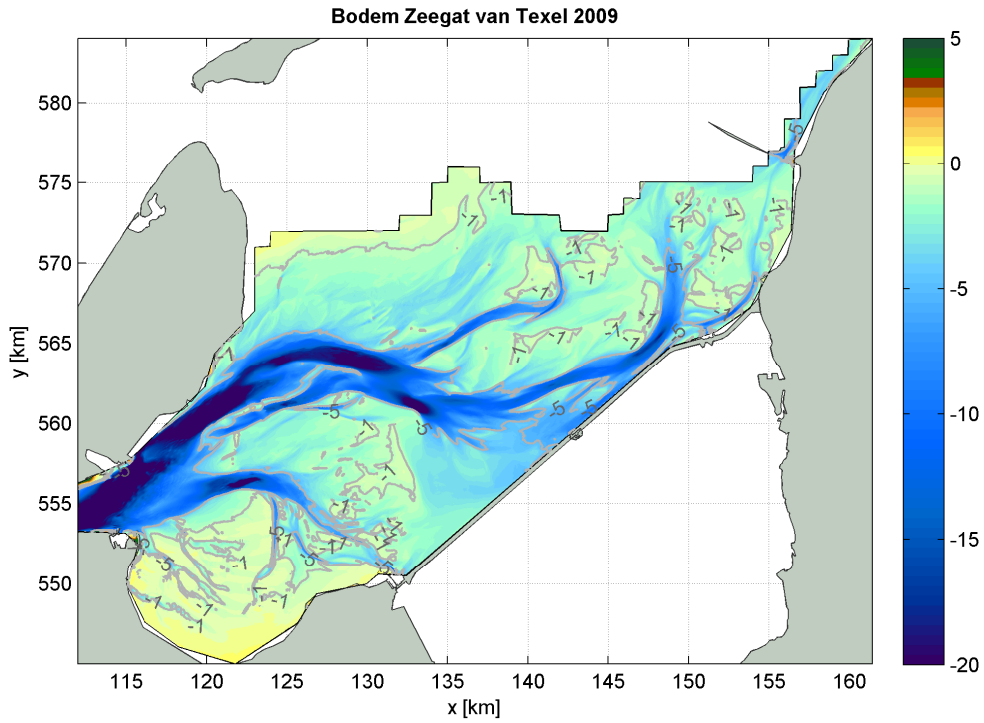
harmonische analyse voor de gehele beschikbare tijdseries. Het tweede script voert voor verschillende tijdsperiodes een klassieke harmonische analyse met `t_tide` (Pawlowicz et al., 2002).



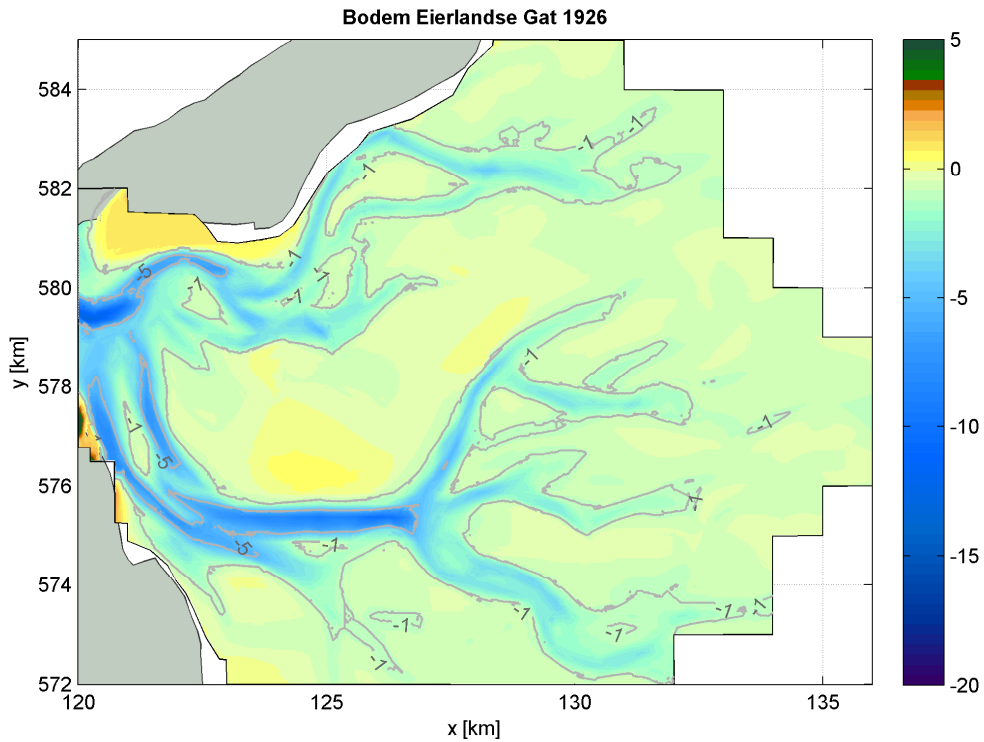
## C Bathymetrische kaarten

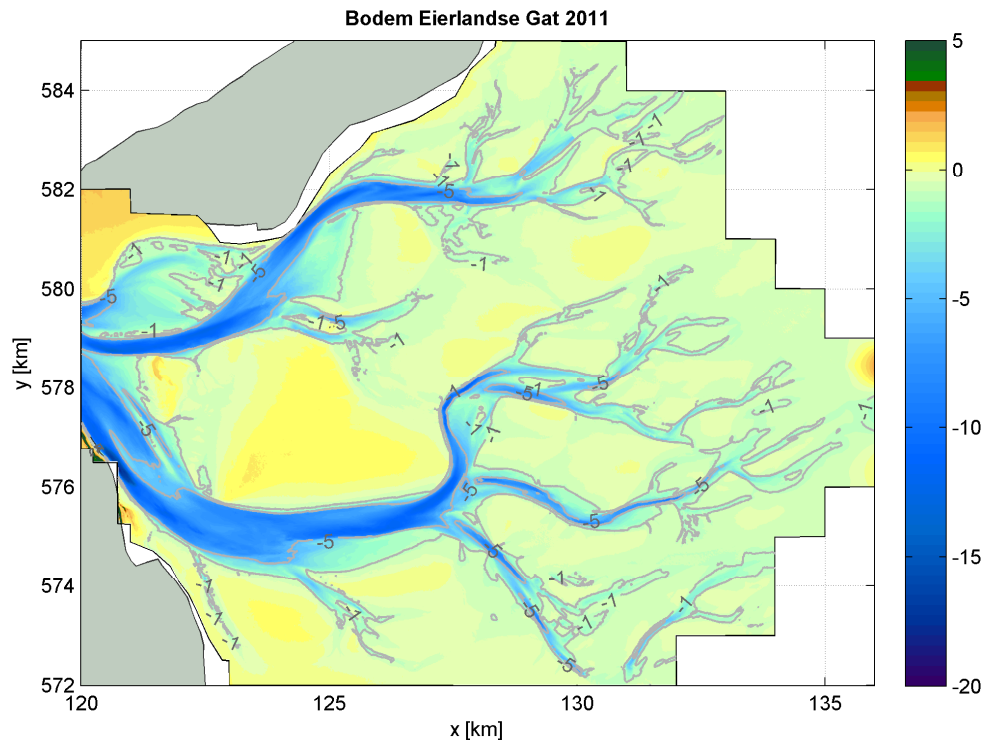
### C.1 Zeegat van Texel



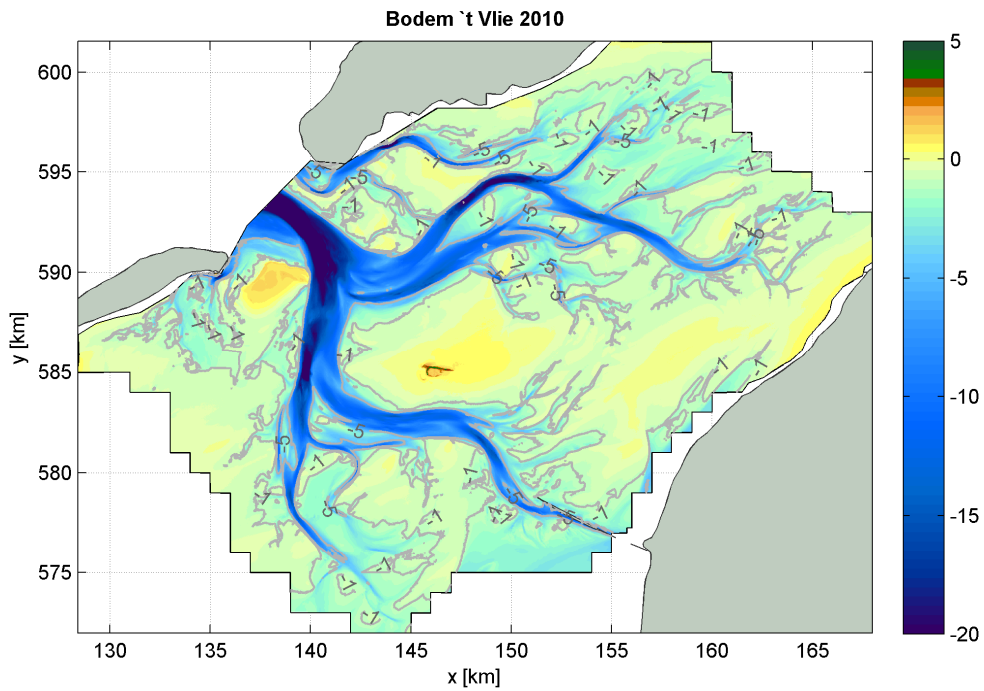
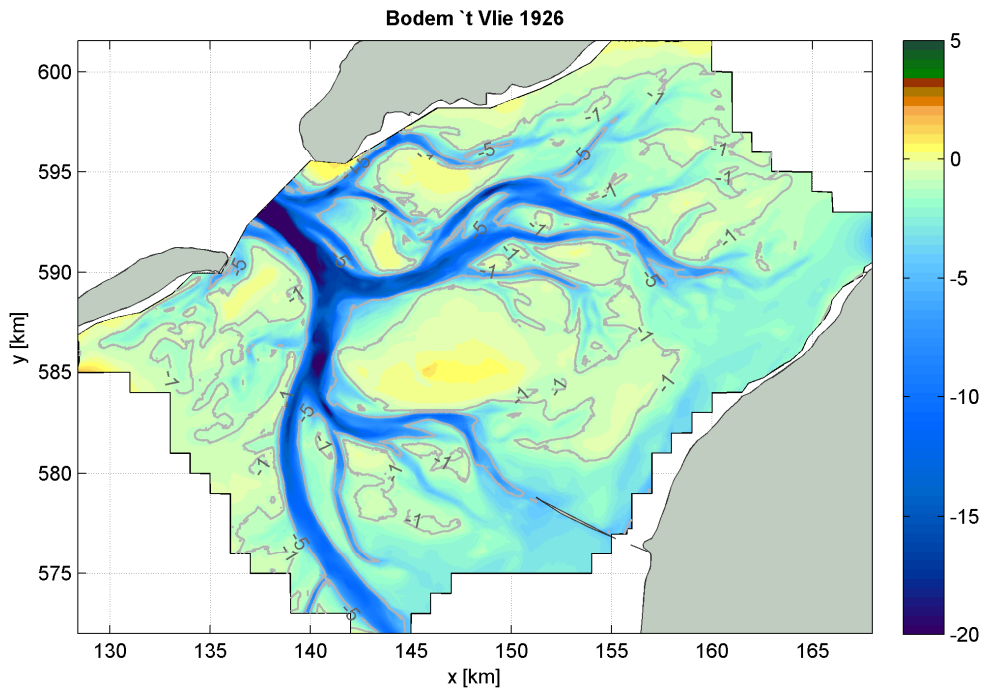


## C.2 Eierlandse Gat

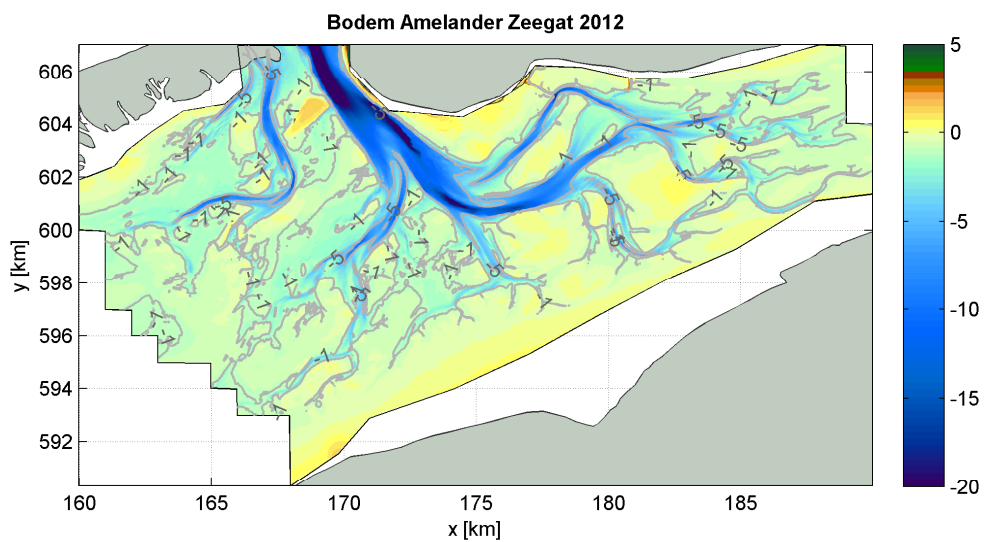
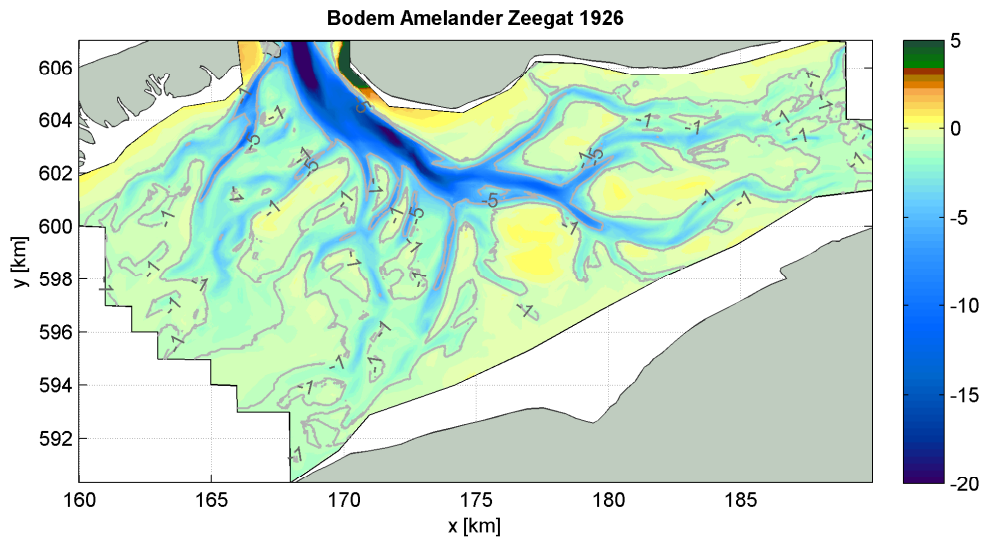




## C.3 Zeegat van het Vlie



### C.4 Amerlander Zeegat



## C.5 Friesche Zeegat

