

## De morfologische ontwikkeling van de Boschplaat - Terschelling



## De morfologische ontwikkeling van de Boschplaat - Terschelling

**Auteur(s)**

Edwin Elias

## De morfologische ontwikkeling van de Boschplaat - Terschelling


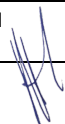
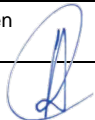
|                       |                                      |
|-----------------------|--------------------------------------|
| <b>Opdrachtgever</b>  |                                      |
| <b>Contactpersoon</b> | Stefan Pluis                         |
| <b>Referenties</b>    | -                                    |
| <b>Trefwoorden</b>    | De Boschplaat, Waddenzee, Morfologie |

### Documentgegevens

|                      |              |
|----------------------|--------------|
| <b>Versie</b>        | 1.0          |
| <b>Datum</b>         | 19-01-2021   |
| <b>Projectnummer</b> | 11205236-003 |
| <b>Document ID</b>   |              |
| <b>Pagina's</b>      | 49           |
| <b>Status</b>        | definitief   |

### Auteur(s)

|  |             |  |
|--|-------------|--|
|  | Edwin Elias |  |
|  |             |  |

| Doc. Versie | Auteur   | Controle   | Akkoord   | Publicatie |
|-------------|--|--|---|------------|
| 1.0         | Edwin Elias<br> | Marcel Taal<br> | Toon Segeren<br> |            |

# Samenvatting

De Boschplaat is de eilandstaart van Terschelling. Al decennia is zichtbaar dat de kust ter plekke aan het afkalven is. Hier zijn al veel studies naar gedaan. Bekend is dat de erosie gerelateerd is aan de uitwisseling met het zeegat van Ameland. Of en hoelang deze erosie zich doorzet is niet duidelijk. Eerdere voorspellingen stellen dat de erosie af gaat nemen (Israël, 1998; Israël en Dunsbergen, 1999). Dit lijkt echter nog niet het geval te zijn.

Binnen Kustgenese 2.0 zijn frequente metingen gedaan in en rondom het Amelander Zeegat. Deze metingen zijn gebruikt in verschillende studies die nieuwe inzichten geven omtrent de morfologische ontwikkeling van het Amelander Zeegat (Elias, 2017b; Elias et al, 2019; Elias en Pearson, 2019). In deze rapportage wordt de morfologische ontwikkeling van de Boschplaat samengevat en geactualiseerd. Recente meetdata laten nog geen afname van de terugtrekking van de Boschplaat zien. Zowel de dieptecontourlijnen als de MKL verplaatsingen geven een doorgaande trend van erosie.

Er zijn drie conceptuele modellen opgesteld om het morfologische gedrag van de Boschplaat te vergroten, gebaseerd op de notie dat de erosie en sedimentatie van de Boschplaat zowel een incidentele als structurele component heeft. De incidentele component zorgt instantaan voor een grote uitbouw (door bankaanlanding) of afbraak (vorming van een kortsluitgeul) van de kust. Dit is in het verleden geobserveerd. De huidige ontwikkelingen worden echter gedreven door structurele processen: de afvoer van sediment aan de kop van de Boschplaat naar het Amelander Zeegat is groter dan de aanvoer van sediment vanaf de centrale eilandkust van Terschelling. Deze grote afvoer wordt gedreven door de getijstroming en door relatief grote golfgedreven transporten in het zeegat. De voorliggende buitendelta was de afgelopen jaren relatief diep waardoor golven ver het zeegat kunnen binnendringen.

Het is mogelijk dat de structurele erosie in de toekomst afneemt. De huidige vorming van een meer westelijk gerichte uitstroming van het Borndiep kan de banken aan de westzijde van het zeegat verder uitbouwen, zodat meer golfafscherming ontstaat. Een grotere golfafscherming reduceert de golfgedreven afvoer van sediment langs de Boschplaat en in het zeegat, waardoor spitvorming kan leiden tot groei van de oostzijde van de Boschplaat. Ook bij een dergelijke uitbouw zal het gedrag geen herhaling zijn van het verleden. Dat gedrag werd bepaald door de aanleg van een stuifdijk waardoor de plaat stabiel kon uitgroeien. Zonder deze stuifdijk zal de Boschplaat kwetsbaar blijven voor incidentele erosie zoals het ontstaan van kortsluitgeulen tijdens storm condities. Hierdoor zal een uitbouwende Boschplaat een veel grotere (natuurlijke) dynamiek vertonen dan in het verleden.

# Inhoud

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
|          | <b>Samenvatting</b>  | <b>4</b>  |
| <b>1</b> | <b>Inleiding</b>   | <b>6</b>  |
| 1.1      | Doelstelling   | 6         |
| 1.2      | Leeswijzer   | 6         |
| <b>2</b> | <b>Het zeegat van Ameland en de Boschplaat</b>                                 | <b>7</b>  |
| <b>3</b> | <b>Morfologische ontwikkeling van de Boschplaat.</b>                           | <b>11</b> |
| 3.1      | Lange termijn en grote schaal  | 11        |
| 3.2      | Middellange termijn  | 15        |
| 3.2.1    | Ontwikkeling van het zeegat en buitendelta                                     | 15        |
| 3.2.2    | Analyse van Jarkus metingen (1965-2019)  | 19        |
| <b>4</b> | <b>Een analyse van de kustlijnontwikkeling in detail</b>                       | <b>21</b> |
| 4.1      | Recente ontwikkeling (sinds 1997) aan de hand van de Lidar Kusthoogte metingen | 21        |
| 4.2      | Verandering van TKL en MKL   | 25        |
| <b>5</b> | <b>Discussie; de samenhang tussen Boschplaat en het Zeegat en Eiland</b>       | <b>28</b> |
| 5.1      | Cyclische Voorspelbaarheid?  | 28        |
| 5.2      | Wat bepaalt de morfologische ontwikkeling van de Boschplaat?                   | 29        |
| <b>6</b> | <b>Conclusies &amp; Aanbevelingen</b>  | <b>33</b> |
| 6.1      | Conclusies   | 33        |
| 6.2      | Aanbevelingen  | 33        |
| <b>7</b> | <b>Referenties</b>   | <b>34</b> |
| <b>A</b> | <b>Een overzicht van de vaklodingen</b>  | <b>35</b> |
| <b>B</b> | <b>Overzicht van Jarkus metingen</b>   | <b>39</b> |
| <b>C</b> | <b>Kusthoogtemetingen</b>  | <b>47</b> |
| <b>D</b> | <b>Verandering MKL (Terschelling)</b>  | <b>50</b> |

# 1 Inleiding

## 1.1 Doelstelling

Het onderzoeksprogramma Kennis Primaire Processen Beheer & Onderhoud Kust (KPP B&O Kust) ondersteunt Rijkswaterstaat bij het onderhoud en beheer van de kust. Het beter begrijpen van het morfologische systeem en de sedimentuitwisselingen tussen kust, zeegat en bekken is een belangrijk onderdeel van het deelproject Zeegaten. Deze kennis heeft altijd als doel het suppletieprogramma te ondersteunen door (1) Systeemkennis te ontwikkelen over de werking van zeegatsystemen en (2) Kennis te ontwikkelen ten behoeve van het beheer van en onderhoud aan eilandkoppen.

In het verleden zijn al vele studies gedaan naar de eilandstaart van Terschelling, de Boschplaat (o.a. Israël, 1998; Israël en Dunsbergen, 1999; Elias en Bruens, 2012; Elias, 2017a). De Boschplaat is al enkele decennia aan erosie onderhevig. Dat deze erosie gerelateerd is aan de uitwisseling met het zeegat van Ameland is ook wel bekend, maar of en hoelang deze erosie zich in de toekomst doorzet is niet bekend. Op basis van eerdere voorspellingen (o.a. Israël, 1998; Israël en Dunsbergen, 1999) is de verwachting dat de erosie af gaat nemen. Dit lijkt echter nog niet het geval te zijn. Recent is er in het kader van KustGenese 2 veel onderzoek verricht naar het zeegat van Ameland. Hierdoor is veel (bodem)data verzameld en zijn er nieuwe inzichten in het morfologische gedrag verkregen. Met doorgaande metingen kunnen de onderliggende processen die bijdragen aan de morfologische veranderingen beter worden begrepen. Een samenvattend verhaal wat deze inzichten nu betekenen voor de Boschplaat is nog niet gemaakt.

De doelstelling van deze studie is een analyse van de morfologische ontwikkeling van de Boschplaat op basis van literatuur, recente data, met een doorkijk naar de toekomstige morfologische ontwikkeling en effectbepaling op kustindicatoren.

## 1.2 Leeswijzer

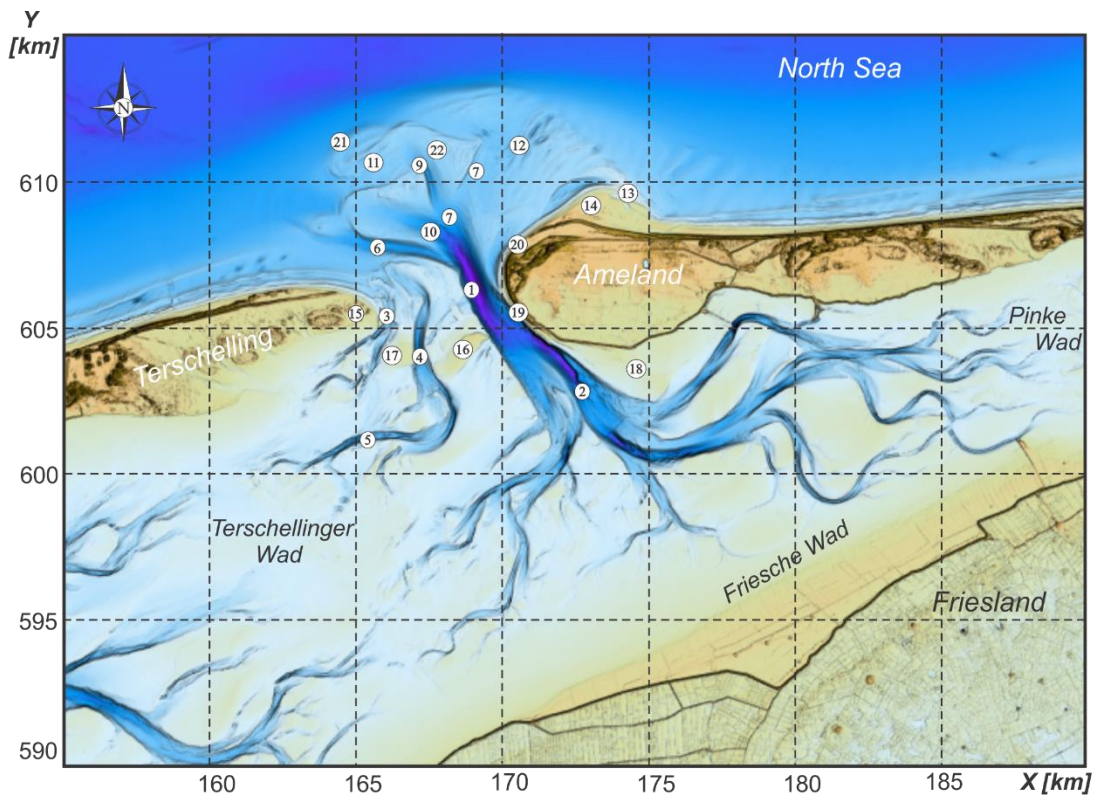
Dit rapport actualiseert de kennis omtrent de morfologische ontwikkeling van de Boschplaat. Hoofdstuk 2 begint met een beschrijving van het Amelandse zeegat op basis van de meest recente Vaklodging (2020). In Hoofdstuk 3 beschrijft de morfologische ontwikkeling van de Boschplaat. Deze beschrijving behandelt de grootschalige, lange termijn ontwikkeling (vanaf 1850) op basis van de Hydrografische Kaarten zoals eerder gepresenteerd in Elias et al (2019). De middellange termijn beschrijving is gebaseerd op zowel de Vaklodgingen (1975-2020) en de Jarkus datasets (1965-2020). Deze datasets illustreren de overgang van een aangroeiende Boschplaat (tot 1974) naar een terugtrekkende Boschplaat. Hoofdstuk 4 presenteert nieuwe analyses van het recente gedrag. Deze analyse gebruikt de Lidar metingen om de ontwikkeling van het droogvallende strand en duinen in detail weer te geven. Daarnaast is er een koppeling naar de kustindicatoren gemaakt middels de MKL ontwikkeling.

Hoofdstuk 5 bevat de conclusies en een discussie over de samenhang tussen de Boschplaat en het Amelandse Zeegat. Deze discussie bevat een doorvertaling van de nieuwe inzichten in het buitendelta gedrag opgedaan in het KustGenese 2 onderzoek. Op basis van de inzichten zijn conceptuele modellen opgesteld om het morfologische gedrag te verklaren en beter te begrijpen en wordt ook een doorkijk naar de toekomstige ontwikkeling gemaakt. Een exacte voorspelling van een terugtrekkende naar een aangroeiende eilandstaat is op basis van de huidige kennis echter nog niet te maken. Het is wel duidelijk dat een Boschplaat zoals die vroeger aanwezig was in de toekomst niet kan voorkomen.

## 2 Het zeegat van Ameland en de Boschplaat

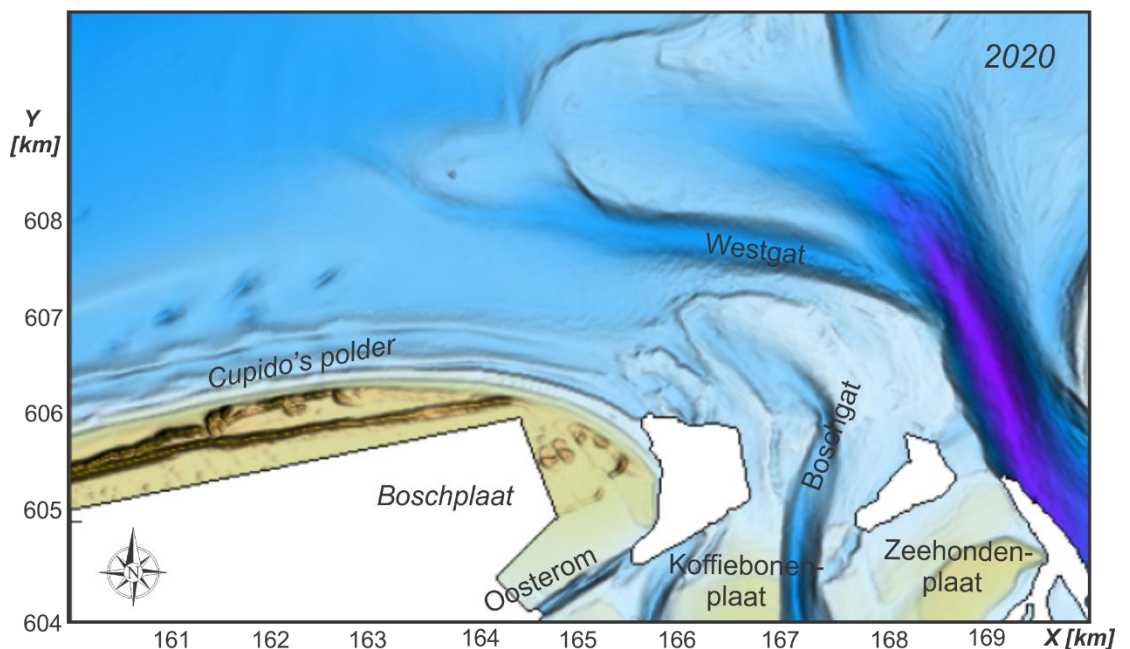
De Boschplaat, de oostelijke punt, ofwel de eilandstaart, van Terschelling, grenst aan het Zeegat van Ameland. De veranderingen van de geulen en platen in dit zeegat zijn sturend voor de morfologische ontwikkeling van de eilandstaart. De belangrijkste geulen en platen van het Amelandse Zeegat worden weergegeven in Figuur 2-1 aan de hand van de bodemopname uit 2020. Deze bodem vertoont een duidelijke hoofdgeul aan de oostzijde van het zeegat, langs de westkust van Ameland: het Borndiep [1]. Het Borndiep ging in het verleden op de buitendelta over in het Akkepollegat [7]. Deze geul is in de bodem van 2020 echter nog nauwelijks te onderscheiden. De hoofdgeul buigt nu noordwestelijk af richting een voormalige ebschaar [10].

De Boschplaat [15] is in meer detail weergegeven in de onderste deelfiguur van Figuur 2-1. Aan de zeewaartse zijde bevindt zich de vloedgedomineerde geul Westgat [6]. Tussen de Boschplaat en het Borndiep ligt een ondiep platform waarop diverse kleinere geulen zichtbaar zijn. De meest landwaartse geul is het Oosterom [3]. Deze geul strekt zich in zuidwestelijke richting langs de waddenzijde van de Boschplaat uit. Richting het Borndiep is nog een tweede geul zichtbaar, het Boschgat [4] en zijn er nog verschillende naamloze kleine geultjes te onderscheiden. De grootte van de geulen varieert sterk door de tijd. Als er een duidelijke geul vormt dan ontstaat er een verbinding tussen de geulen in het bekken en het Westgat (zoals in de jaren 1975 en 1989). Deze verbinding is in het verleden vaak Boschgat [4] genoemd. Naast de geulen zijn er ook een aantal grotere plaat of bankgebieden zichtbaar. Langs het Borndiep bevindt zich de wat hogere Zeehondenplaat [16]. Deze plaat vormt min of meer een scheiding tussen het oostelijke en westelijke deel van het achterliggende bekken. Het oostelijke deel van het bekken draineert dan vooral via het geulenstelsels die in verbinding staan met het Borndiep, het westelijke deel van het bekken draineert door het Boschgat en het Oosterom. Het Boschgat en het Oosterom worden gescheiden door de Koffiebonenplaat [17]. Ook de Waddenzijde van de Boschplaat wordt Koffiebonenplaat genoemd. Dit komt doordat de voorloper van de huidige Koffiebonenplaat in is aangeland op de Boschplaat in de jaren zestig.



|                   |                                  |  |  |
|-------------------|----------------------------------|--|--|
| (1). Borndiep     | (8). ebb-chute 1<br>(not on map) | (14). Bornrif Strandhaak                       | (20). Location of beach<br>nourishments          |
| (2). Dantziggat   | (9). ebb-chute 2                 | (15). Boschplaat                               | (21). Location of ebb-tidal<br>delta nourishment |
| (3). Oosterom     | (10). ebb-chute 3                | (16). Zeehondenplaat                           | (22). Kofmansplaat                               |
| (4). Boschgat     | (11). Kofmansbult                | (17). Koffiebonenplaat                         |  |
| (5). Blauwe Balg  | (12). Bornrif platform           | (18). Vrijheidsplaat                           |  |
| (6). Westgat      | (13). Bornrif Bankje             | (19). Coastal protection<br>works Ameland West |  |
| (7). Akkepollegat |                                  |  |  |

Translations of Dutch names: 'plaat' = shoal; 'bankje' = (sand) bar; 'geul' = channel; 'gat' = channel or creek; 'diep' = deep (channel); 'strand' = beach; 'haak' = 'hook', 'eiland' = island.



Figuur 2-1: Overzicht van de geulen en platen op de buitendelta van het Zeegat van Ameland. In de bovenste figuur is de buitendelta is gebaseerd op de 2020 Vakloding, het bekken op de 2017 opname en zijn de eilanden opgevuld met het AHN bestand. De onderste figuur toont alleen de 2020 opname.



De Boschplaat is een uitgestrekt natuurgebied aan de oostzijde van Terschelling (Figuur 2-2). In totaal heeft het een oppervlakte van zo'n 4400 ha waarvan het merendeel kweldergebied. Een belangrijk element op de Boschplaat vormt de stuifdijk. Deze kaarsrechte stuifdijk is duidelijk zichtbaar in de bodemopname (Figuur 2-1) en splitst de Boschplaat eigenlijk in twee delen met verschillende karakteristiek. De stuifdijk vangt het merendeel van het zand op en zeewaarts van de dijk bevindt zich dan ook een zandig gebied bestaande uit een duinenrij en het strand. Deze studie richt zich op het zandige deel van de Boschplaat en wordt daarbij afgebakend als het stuk kust ten oosten van RSP 20 en zeewaarts van de stuifdijk.

Landwaarts van de stuifdijk is er grote variatie in landschapstypen. Aansluitend op de grote duincomplexen van het Parapluduin en het Jan Thijssenduin is een groot bos gevormd, de Berkenvallei. Oostelijk hiervan bevinden zich uitgestrekte kwelders door de bezinking van slib die door de slenken vanuit de Waddenzee worden aangevoerd. Op de wadplaten vestigen zich eerst kwelderpioniersvegetaties van zeekraal en schorrenkruid gevolgd door kweldergras. Ook komen er vier grote losliggende duincomplexen voor. Deze worden de Eerste Duintjes tot de Vierde Duintjes genoemd (Figuur 2-2).

In de jaren zestig groeit de oostpunt van het eiland aan door aanlanding van de Koffieboonplaat. Hierdoor ontstond een brede strandvlakte en ontwikkelde tussen paal 25 en 29 een reeks losliggende, nieuwe duinen. Door aanleg van stuifdijken in de jaren '90 ontstaat hier een aaneengesloten gebied, de Cupido's Polder. Door erosie van de Boschplaat is er nu nog slechts een kleine deel van de Cupido's Polder aanwezig.



Figuur 2-2: Een overzicht van het natuurgebied De Boschplaat. Uit: De Boschplaat, Europees natuurgebied. Folder Staatsbosbeheer Terschelling.

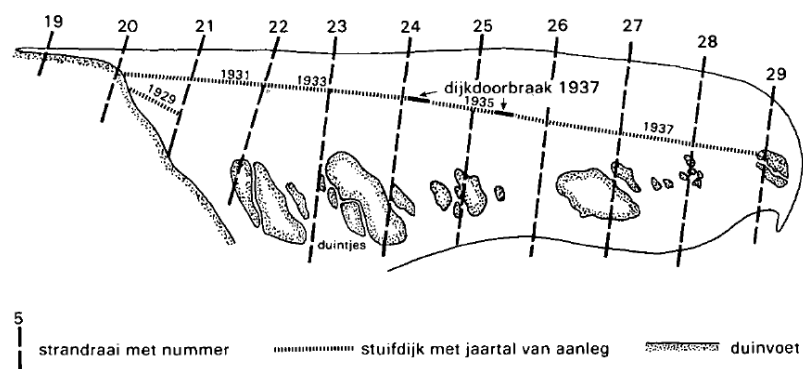


*Figuur 2-3: De Boschplaat Terschelling gezien van de Waddenzee richting de Noordzee op (21 maart 2015). Aan de waddenzijde van de Boschplaat bevinden zich grote kweldergebieden gescheiden door verscheidene geulen en kreken. De oostpunt en Noordzeekant bestaat uit uitgestrekte stranden en een grote strandvlakte aan de oostpunt. De Stuifdijk en verscheidene duincomplexen scheiden de kwelders en het strand. Bron: <https://www.flickr.com/photos/ikreis/20319295221/>.*

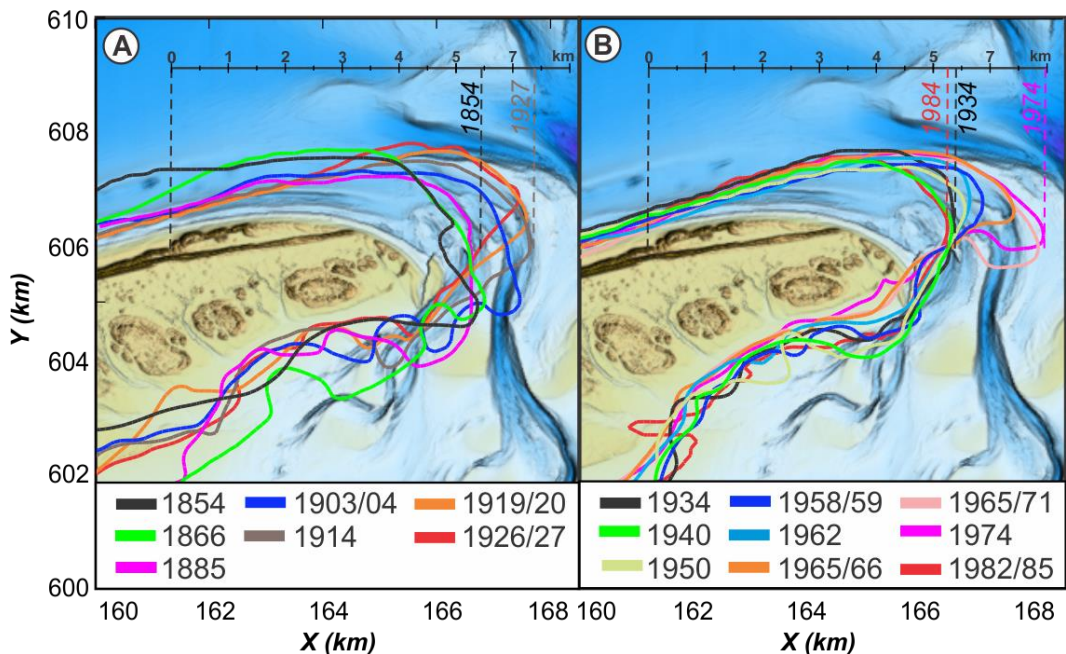
# 3 Morfologische ontwikkeling van de Boschplaat.

## 3.1 Lange termijn en grote schaal

Eind 17<sup>de</sup> eeuw zat de Boschplaat al aan Terschelling vast. In die tijd is de Boschplaat een ruim zeven kilometer lange, vrijwel onbegroeide strandplaat. Door de lage ligging kan de zee hier tijdens stormen makkelijk overheen en doorheen stromen. Rond die tijd ontstonden de eerste duincomplexen, genaamd 'Eerste Duintjes' (Figuur 2-2). In de daaropvolgende 200 jaar ontwikkelt zich een hele keten van losliggende duincomplexen, ook wel oog- of ringduincomplexen (Figuur 2-2, Eerste tot Vierde duinen). Tot eind 19<sup>de</sup> eeuw kon de Boschplaat zich natuurlijk ontwikkelen. Bij hoge vloed overstromde wel de vlakte en tussen de duinen ontstonden diepere geulen. Deze geulen dreigden de plaat geheel te doorsnijden. Om dit te voorkomen werd tussen 1929 en 1937 een 9 km lange vrijwel rechte stuifdijk aangelegd. Deze loopt van paal 20 tot het Amelanderduin bij paal 29 (Figuur 3-1).



Figuur 3-1: Stuifdijken op de Boschplaat.

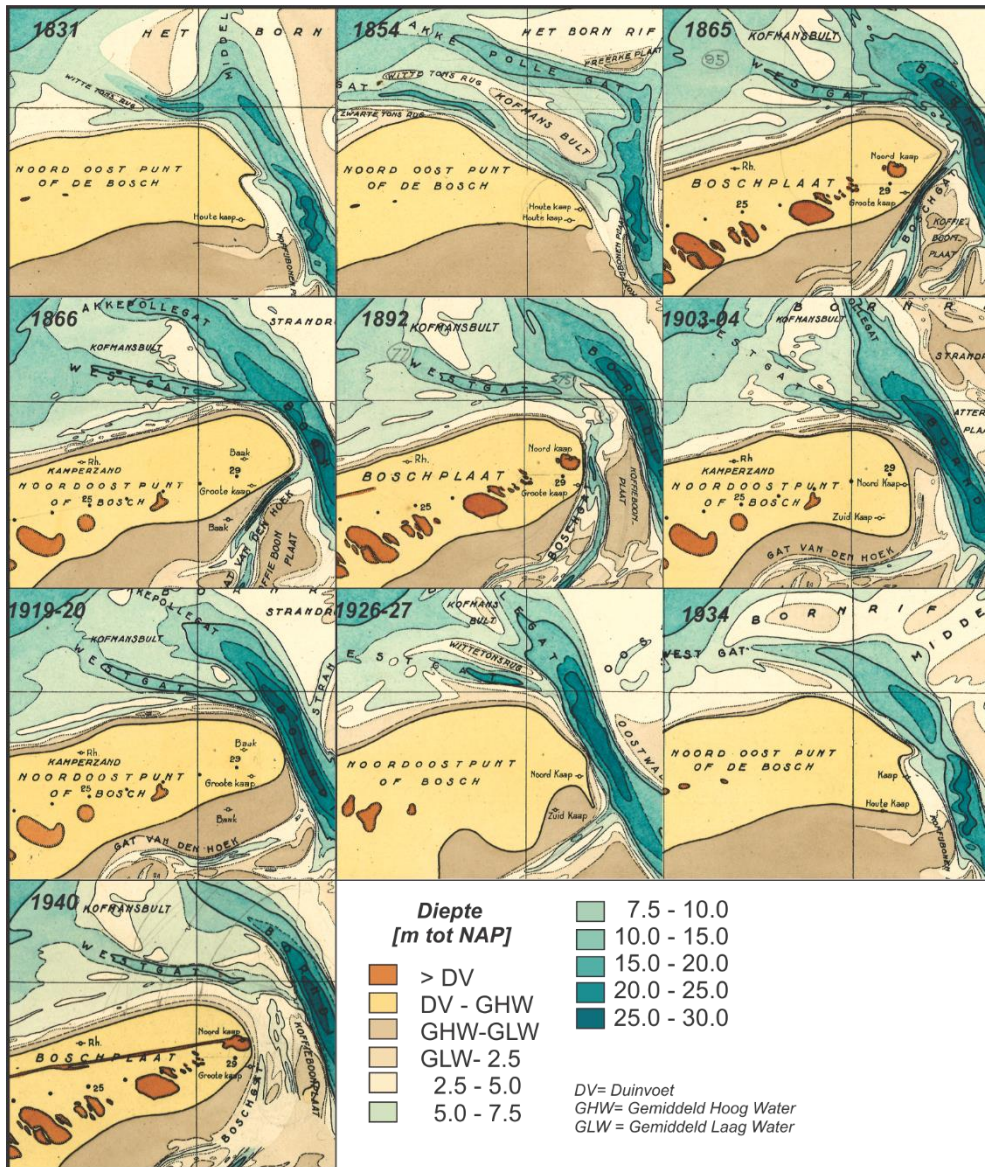


Figuur 3-2: Een schatting van de ligging van de kustlijn over de periode 1854 tot 1982 op basis van de Hydrografische kaarten weergegeven in Figuur 3-3 en Figuur 3-4.

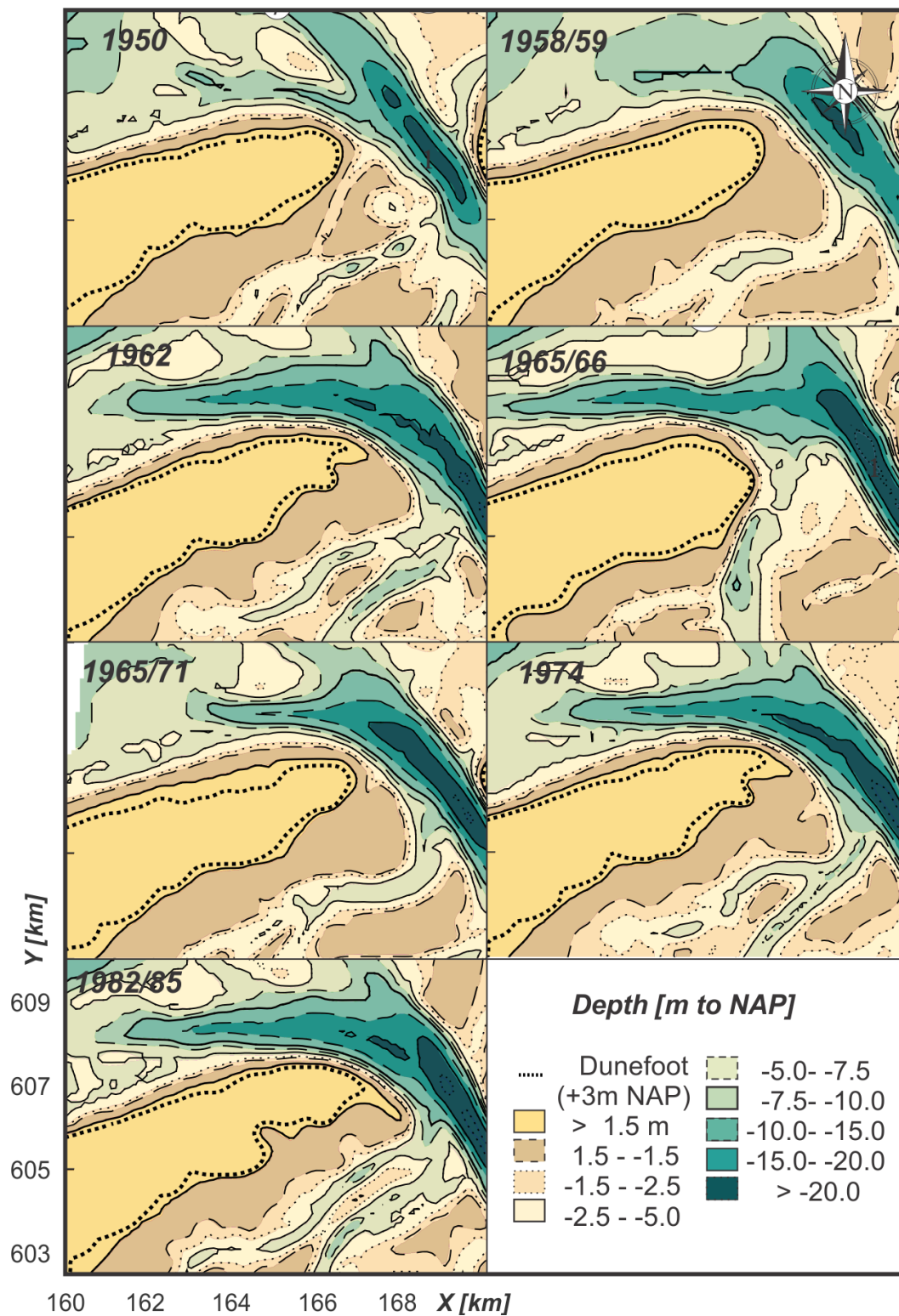
Tot 1831 zijn de beschikbare kaarten beperkt geschikt voor analyse van het gedrag van de Boschplaat. Over de periode 1831 – 1958 werd het Zeegat van Ameland en de naastliggende eilandstaart van Terschelling opgenomen door de Koninklijke Marine. Daarna zijn de metingen doorgezet door Rijkswaterstaat. Deze kaarten geven een beeld van de veranderingen in de Boschplaat. In Figuur 3-2 is op basis van deze kaarten een schatting gemaakt van de verandering in kustlijnligging van de Boschplaat over de periode 1854 – 1982/85. Deze schatting is gebaseerd op de ligging van 0 m NAP contour. Deze liggingen zijn zeker niet 100% accuraat, maar geven wel een grootschalig beeld van de veranderingen die zich bij de Boschplaat hebben voorgedaan.

Tussen 1854 en 1927 vervormde de oostzijde van de Boschplaat van een breed gebied naar een langere, dunnere plaat. De punt verplaatste hierbij een kleine 2 km oostwaarts het zeegat in. Deze verandering vindt niet alleen plaats op de staart van het eiland, maar de gehele eilandkust van Terschelling lijkt zich terug te trekken. Vanaf 1903 blijft de eilandstaart stabiel in positie liggen.

Aan de punt van de Boschplaat heeft zich tussen 1903 en 1927 een spit gevormd. De vorming van een geul door deze spit heen zorgt ervoor dat de Boschplaat zich tussen 1927 en 1934 weer meer dan 1 km terugtrekt. Vanaf 1940 vindt dan weer een sterke uitbouw plaats. De aanleg van de stuifdijk speelt hier een belangrijke rol. De stuifdijk vangt zand aan de zeezijde in waardoor zich kleine duintjes kunnen vormen. Daarnaast zorgt de stuifdijk ervoor dat er tijdens stormen geen water meer over de Boschplaat stroomt. De stroming moet dan in zijn geheel door het zeegat heen. Naast de stuifdijk heeft ook de aanlanding van de Koffiebonenplaat, tussen 1962 en 1965 de zandvolumes van de Boschplaat vergroot. De Boschplaat bereikt dan een maximale westelijke positie rond 1974. Sindsdien vertoont de Boschplaat een continue terugtrekking (zie Hoofdstuk 3.2.2).



Figuur 3-3: Ontwikkeling van de Boschplaat tussen 1831 en 1940 op basis van de Hydrografische kaarten van de Marine.



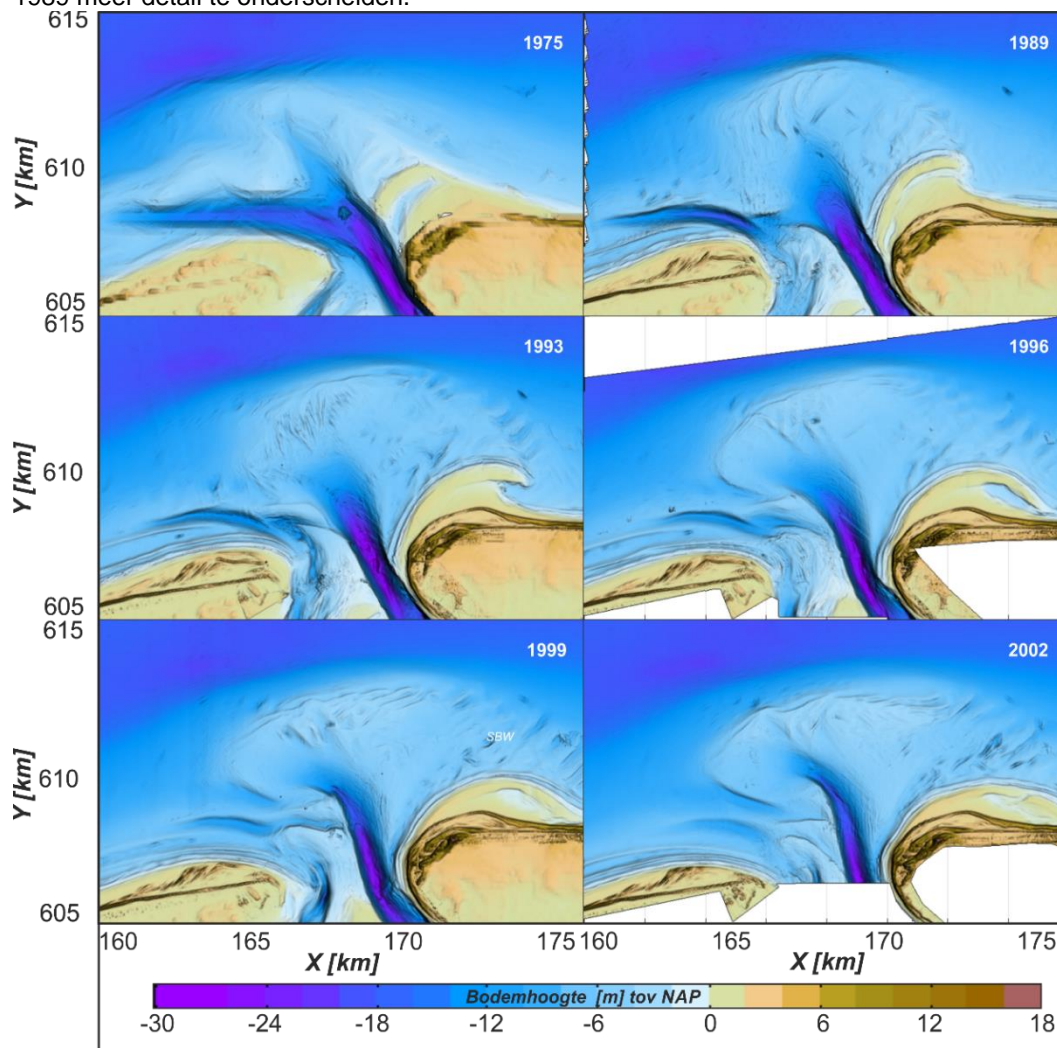
Figuur 3-4: Ontwikkeling van de Boschplaat tussen 1950-1985 op basis van gedigitaliseerde Hydrografische kaarten van de Marine. Zie Verhoeff (2018) voor details.

## 3.2 Middellange termijn

### 3.2.1 Ontwikkeling van het zeegat en buitendelta

De grootschalige ontwikkeling van de buitendelta en de aanliggende kusten sinds 1975 wordt in Figuur 3-5, Figuur 3-6 en Figuur 3-7 weergegeven aan de hand van de Vaklodingen, de SBW meetcampagne (Zijderveld en Peters, 2006) de Kustgenese 2 metingen. In Appendix A zijn aanvullende Vaklodingen kaarten van het geheel zeegat weergegeven. Deze metingen worden in detail besproken in Elias (2017), Elias et al. (2019) en Elias en Pearson (2019). In dit hoofdstuk worden alleen de belangrijkste inzichten met betrekking tot de Boschplaat samengevat.

De 1975-bodem wijkt sterk af van de overige bodemopnamen. In 1975 is de Boschplaat ver oostelijk uitgebouwd. Het oostelijk deel van de Boschplaat is nu een ver uitgebouwde droogvallende strandvlakte. Aan de oostzijde hiervan ligt het Borndiep tegen de kust van Ameland aan. Het centrale, diepe deel van Borndiep blijft over de hele periode langs de kust van Ameland liggen. Het zeewaartse deel, de uitstroming van het Borndiep de buitendelta op, is in de 1975 bodem duidelijk anders dan in de overige bodems. In 1975 heeft het Borndiep zowel een westelijke als een noordwestelijk uitstroming. De westelijke uitstroming (het Westgat) vormt echter de dominante geul. Doordat deze geul ver westelijk is uitgebouwd is ook de buitendelta hier sterk ontwikkeld. Aan de noordzijde van de Westgat bevindt zich een groot bankenoppervlakte. Tussen 1975 en 1989 doen zich grote veranderingen voor. Enerzijds komt dit door de langere periode (14 jaar), maar ook het verschil in opname resolutie van 250m naar 20m speelt een rol, hierdoor is in de bodems vanaf 1989 meer detail te onderscheiden.

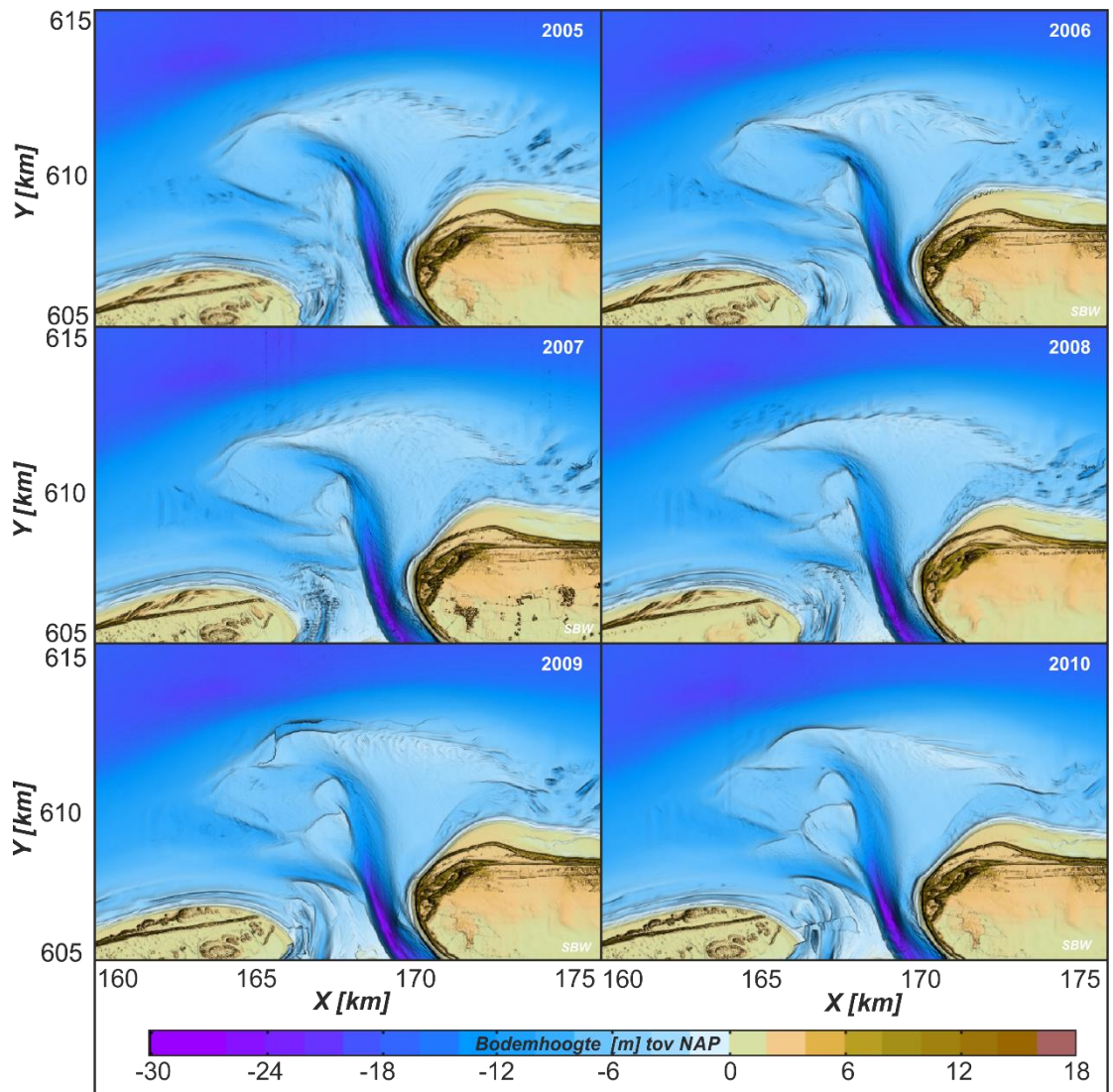


Figuur 3-5: Buitendelta van het Zeegat van Ameland over de periode 1975-2002.

In 1989 heeft het Westgat zijn directe verbinding met het Borndiep al verloren en neemt dan snel in grootte en diepte af (zie bijvoorbeeld de bodem in 2005). Doordat de geulen en banken vóór de Boschplaat afnemen ontstaat een vrij diepe en uniforme vooroever. Pas ver zeewaarts ligt de ondiepte van de Kofmansbult. Het Borndiep heeft nu een noordelijke uitstroming en het Akkepollengat vormt de dominante uitstroomegul. Dit geeft niet alleen een geulontwikkeling, maar ook de buitendelta banken ontwikkelen zich verder zeewaarts en het grootste volume bevindt zich in de Bornrif banken. De oppervlakte van de banken nabij het Westgat is dan flink afgenomen.

Ook in de keel van het zeevat zijn grote veranderingen. In 1989 had het Westgat verbinding gemaakt met het Boschgat en ontstaat er een relatief grote geul langs de oostpunt van de Boschplaat. In de periode 1989-2002 neemt deze geul dan in diepte en grootte af. Er ontstaat een ondiep platform met vele kleine, dynamische geulsystemen. Deze situatie blijft tot op heden zichtbaar.

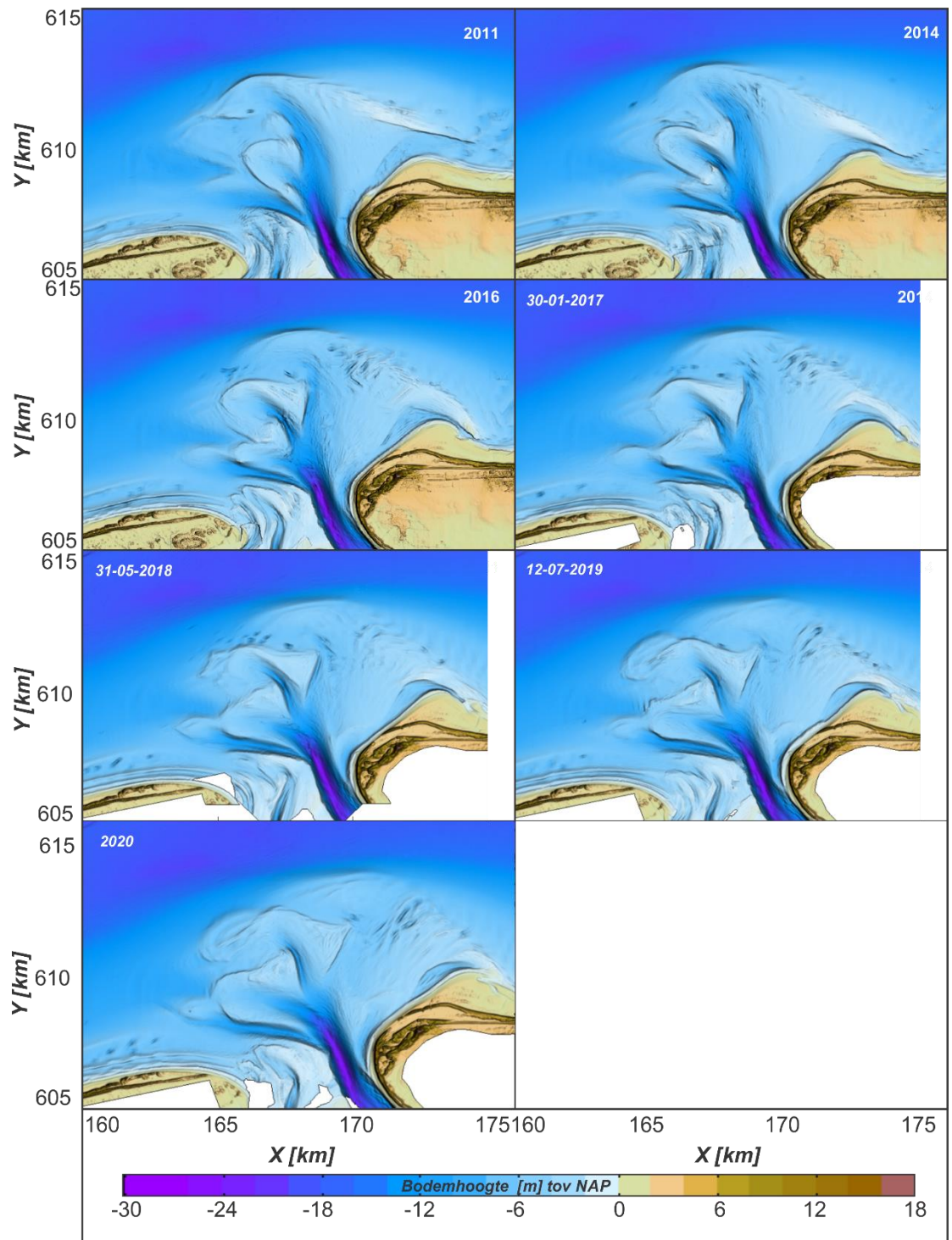
De hoofdgeul, het Akkepollengat, blijft tot ongeveer 2014 zeewaarts, noordelijk, gericht, maar wordt steeds meer beïnvloed door de grote ebschilden die aan de westzijde zijn gevormd. Het zeevaartse ebschild verplaatst langzaam in oostelijke richting en duwt het meest zeevaartse deel van de geul hierbij dicht. De uitstroming van het Borndiep gaat dan weer in een meer westelijke richting optreden.



Figuur 3-6: Buitendelta van het Zeegat van Ameland over de periode 2005-2010.



In de 2017-2019 bodems is de vorming van een nieuwe westelijke uitstroming, net boven het Westgat duidelijk zichtbaar. De vorming van deze geul zorgt er ook voor dat de bankgroei in het landwaartse gelegen, westelijke deel van de buitendelta weer toeneemt. Op dat aspect begint de huidige bodem dan weer de kenmerken van de 1975 bodem aan te nemen. Hoe dit precies verder gaat is niet duidelijk, maar door bankgroei dicht op de kust is de kans wel groter dat dit een positief effect teweegbrengt door golfafscherming en doordat er is meer sediment beschikbaar dat hier herverdeeld kan worden. Modellsimulaties met behulp van Delft3D (Elias, 2017) laten zien dat met een westelijke uitbouw (1975 bodem) de Boschplaat sterk afgeschermd is van golfenergie, terwijl de 2014 bodem veel minder golfafscherming biedt. Golven kunnen dan ver het zeegat in propageren en een golf-gedreven transport vanaf de Boschplaat richting het Borndiep initiëren. De aangroei van de banken in westelijke richting zou de golfenergie langs de Boschplaat weer kunnen reduceren.



Figuur 3-7: Buitendelta van het Zeegat van Ameland over de periode 2011-2020.

### 3.2.2 Analyse van Jarkus metingen (1965-2019)

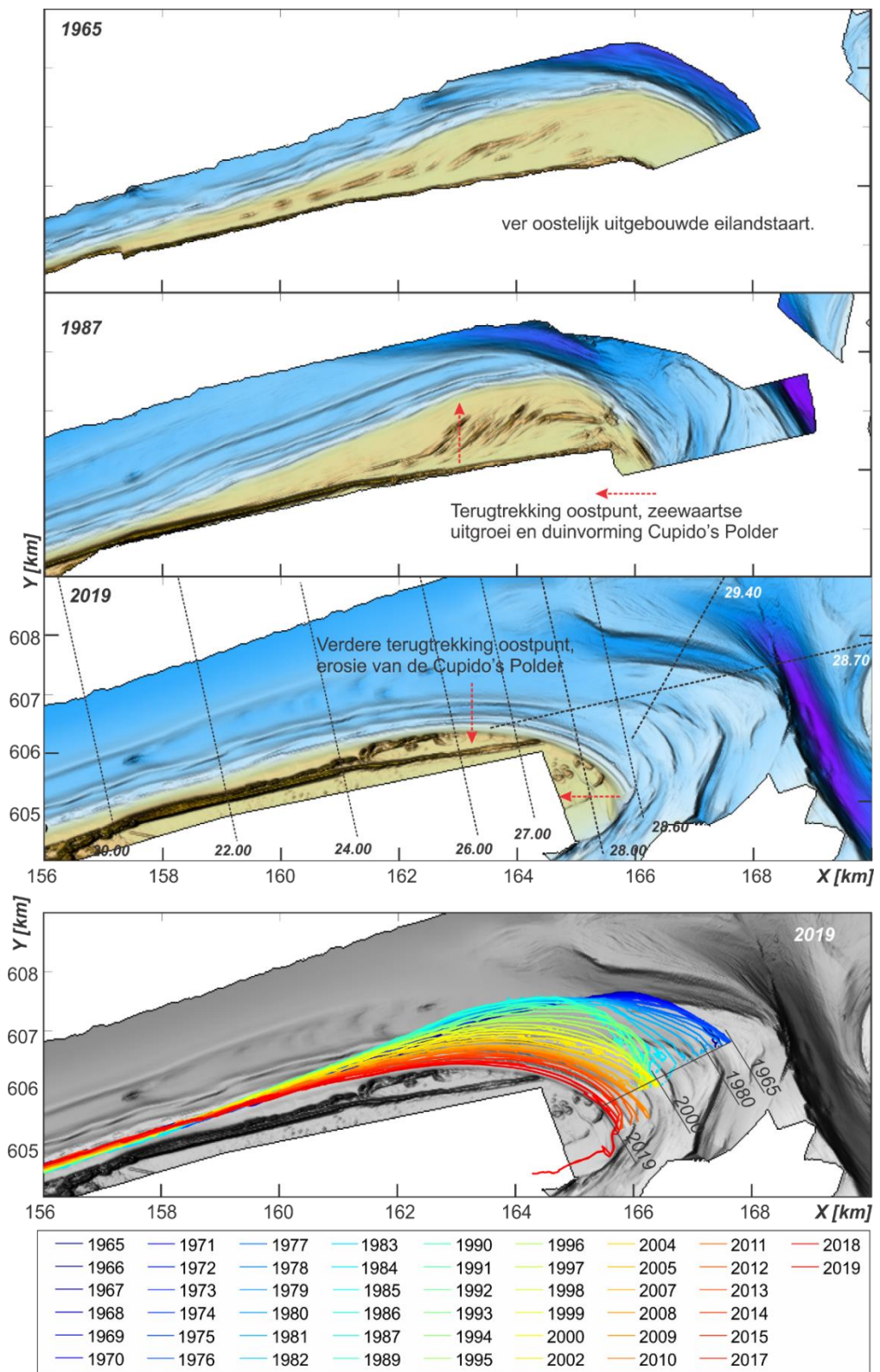
Met behulp van de Jarkus (Jaarlijkse Kustmetingen) is de ontwikkeling van de Boschplaat sinds 1965 in detail te volgen (voor de ligging van de raaien zie Figuur 3-8). In 1965 is de Boschplaat nog ver oostelijk uitgebouwd. Op de Cupido's polder zijn de eerste duinen dan al zichtbaar. De Boschplaat blijft tot ongeveer 1975 stabiel liggen, maar trekt sindsdien sterk terug. Initieel had dit nog weinig invloed op de Cupido's polder. In 1987 was de Cupido's polder nog duidelijk zichtbaar in de metingen. Maar in deze bodem is wel al te zien dat de erosie de oostzijde van de Cupido's polder nadert. In de daaropvolgende jaren erodeert de Cupido's polder sterk. In de 2019 bodem resteert dan nog slechts een klein stukje van de duinenrij. Wat ook opvalt in de figuur is dat de kustlijn een tweedeling in gedrag vertoont. Ten westen van km 159 (ongeveer raai 21-22) blijft de kustlijn eigenlijk stabiel of bouwt zelfs iets zeewaarts uit. Ten oosten van km 159 trekt de kustlijn zich sterk terug. Deze trends worden duidelijk zichtbaar in de ontwikkeling van de Jarkus raaien. Voor de raaien 2200, 2400 en 2800, weergegeven in Figuur 3-8, zijn timestacks en dwarsprofielen weergegeven in Appendix B.

*Raai 2200* geeft een goed beeld van de nog relatief ongestoorde kustlijn (Appendix B, Figuur B-1 en B-2). Structurele terugtrekking van de kustlijn in deze raai nog niet zichtbaar. Wel varieert de 0 m NAP ligging door de tijd. In de periode 1965-1990 vindt er een zeewaartse verplaatsing plaats van 3 m/jaar en sindsdien een landwaartse verplaatsing van 3 m/jaar. Uiteindelijk resulteert dit in een 2019 positie van de 0 m contour die vrijwel gelijk is aan die van 1965. De duinen liggen in 2019 nog wel duidelijk zeewaarts van de 1965 positie. Duingroei treedt over de gehele periode op. Rond 1990 is dit duidelijk zichtbaar in de vorm van een nieuw duin aan de voorzijde van de oude duinen. Het grootste verschil in dynamiek is zichtbaar in de vooroever. De vooroever wordt gekenmerkt door een flauw kustprofiel met een aantal (2 tot 4) brekerbanken. In de periode 1962-2000 zijn 3 bank cycli te observeren van ontstaan, zeewaartse migratie en uitdempen. Na 2000 is dit gedrag echter niet meer te onderscheiden. De buitenste bank blijft dan stabiel in positie liggen. De binnenste banken tonen een ongestructureerd gedrag met een verschillend aantal banken en zowel perioden met zeewaartse als landwaartse migratie.

*Raai 2400* (Appendix B, Figuur B-3 en B-4) ligt net ten westen van de Cupido's polder. Deze raai vertoont lange tijd een breed uitgebouwd strand. Op de vooroever zijn 2 duidelijke brekerbanken zichtbaar. In 2019 ligt er een kleine bank op een afstand van ongeveer 750m tot de RSP. Een tweede zeewaartse bank ligt rond de 1250 m tot de RSP. Deze bank is sinds 2001 zeewaarts gemigreerd en in hoogte afgenomen. Tot 1990 bouwt de 0 m contour nog uit met gemiddeld 6m/jaar. Sindsdien trekt de kustlijn zich echter sterk terug met een trendwaarde van 10 m/jaar. Deze trend zet zich ook in 2019 nog door. Naast erosie van het strand wordt het profiel ook gekenmerkt door duinvorming. Deze duinvorming begint rond 1980 en de duinhoogte neemt toe tot meer dan 10m. Het 2019 profiel laat echter wel zien dat het strand hier nu vrijwel geheel verdwenen is. Een doorgaande kustlijninterugtrekking zal hier dan ook gaan leiden tot duinerosie. Dat deze duinerosie dan heel snel kan plaatsvinden in de raaien 26 en 28 duidelijk terug te zien.

*Raai 2600* (Appendix B, Figuur B-5 en B-6) Dit profiel doorsnijdt het centrale deel van de Cupido's polder. Ondanks de sterke terugtrekking van de punt van de Boschplaat vindt hier eerst nog een vooruitgang van de kustlijn plaats. Tot 1987 was deze zeewaartse uitbouw gemiddeld van 9 m/jaar. Sindsdien vindt er echter sterke terugtrekking plaats met een snelheid van 24 m/jaar. Ook in dit profiel worden duinen gevormd. Rond 1976 vormen de eerste duinen deze nemen dan tot 2010 sterk in hoogte toe met een maximum van 8m NAP. Vanaf 2005 is het voorliggende strand verdwenen en worden de duinen geërodeerd. De verliezen zijn hier dan zeer groot, binnen een periode van 10 jaar zijn de duinen dan vrijwel geheel verdwenen. Een soortgelijk verloop in kustlijnligging is ook in *raai 2800* te zien (Appendix C, figuur C.7 en C.8. km 28 (Appendix C, Figuur C-3a, b). Tot 1987 lag de kustlijn hier eigenlijk stabiel en vertoonde zelfs een kleine uitbouw van ongeveer 5 m/jaar. Landwaarts wordt de grote duinenrij van de Cupido's polder gevormd. Tot 1990 is het kustprofiel nog steil door de voorliggende geul. Deze diepe geul (bijna 20 m) vormt de verbinding tussen het Westgat op de buitendelta en het geulenstelsel van het Boschgat in het

bekken. De geul blijft tot 1985 stabiel in diepte, maar vult daarna snel op (zie Figuur 3-5). Vanaf 2005 is de geul dan niet meer terug te zien in het profiel. Er ontstaat nu een ondiep platform met een diepte tussen de -6 en -8 m.



Figuur 3-8: Ligging van de Boschplaat in de jaren 1965, 1987 en 2019. Onderste figuur geeft de terugtrekking van de Boschplaat geïllustreerd door de 0 m NAP contourlijn afgeleid uit de Jarkus metingen. Onderliggende bodem is gebaseerd op de 2019 meting.

## 4 Een analyse van de kustlijnontwikkeling in detail

### 4.1 Recente ontwikkeling (sinds 1997) aan de hand van de Lidar Kusthoogte metingen

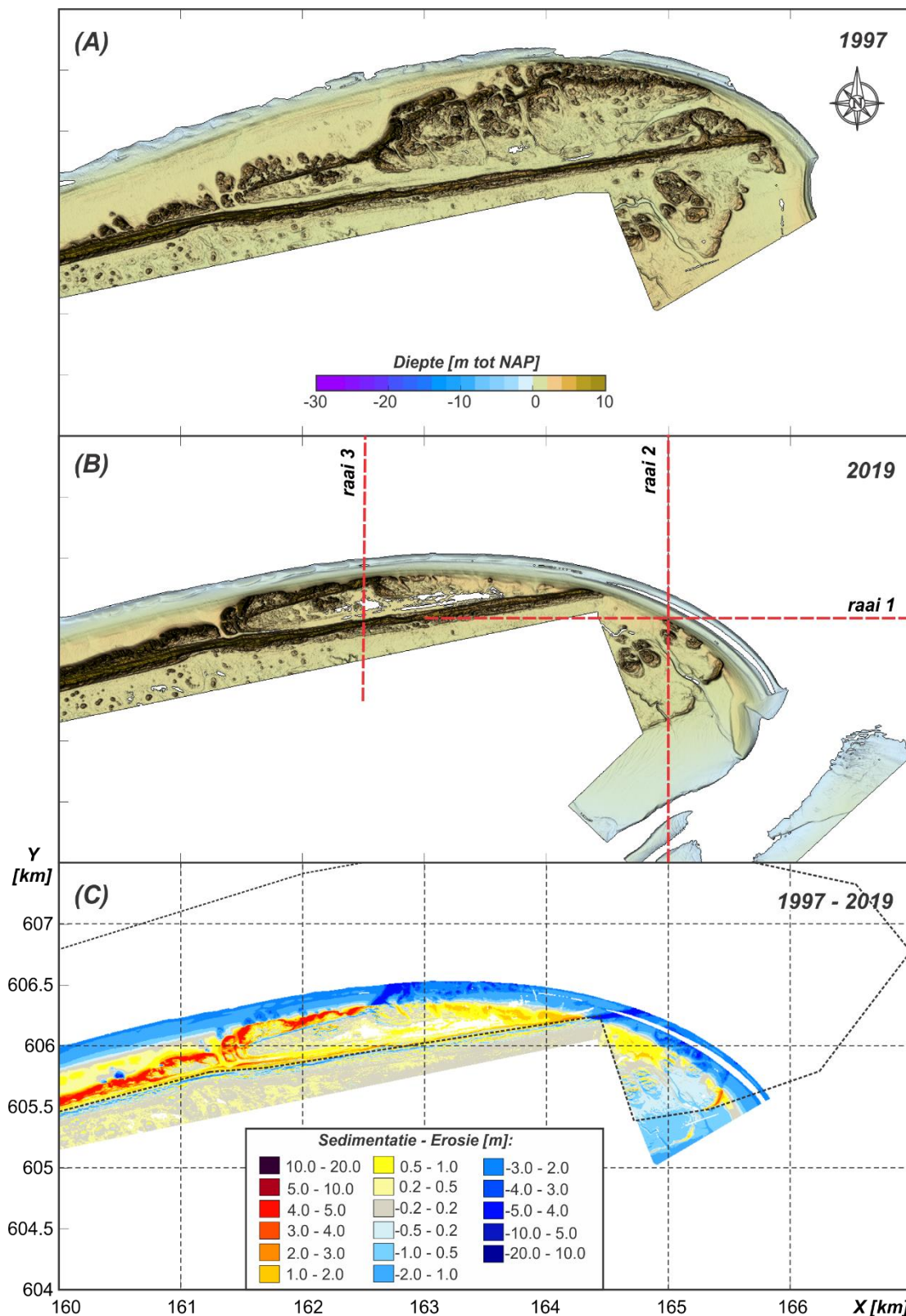
Een goed beeld van de recente morfologische ontwikkeling van de kustlijn van de Boschplaat kan worden verkregen met behulp van de Kusthoogte (LIDAR) datasets. Als onderdeel van de Jarkus metingen, worden de hoogtewaarnemingen van het strand en de duinen sinds 1996 opgenomen met een laserscanner (LIDAR) aan boord van een vliegtuig. Na analyse van de resultaten wordt een Digitaal Terrein Model (DTM) verkregen. De DTM wordt verwerkt in de Jarkus metingen maar wordt ook in 5 m rasterresolutie gearhiveerd. Deze 5 m resolutie geeft een veel beter beeld van het droogvallende strand en de duinen. De analyses zijn hier beperkt omdat de geobserveerde ontwikkelingen zo groot zijn dat de Jarkus deze ook weer geeft. De uitgevoerde analyses zijn hier dan ook beperkt. De meerwaarde van de Lidar data zijn vooral de zeer gedetailleerde kaarten. Ook is het met de Lidar data mogelijk een schatting van de duinverliezen te maken.

Voor de Boschplaat zijn er dan 21 DTM 's beschikbaar voor de periode 1997 – 2019 (Figuur 4-3). Iedere DTM bevat ten minste het droogvallende strand van de Boschplaat tussen de stuifdijk en een diepte van ongeveer -1.5 m NAP. De meting strekt zich uit tot net om de oostelijke eilandpunt. De oostzijde van het eiland is slechts beperkt opgenomen alleen in de metingen tussen 2006-2008 is er data van (een deel van de) Koffiebonenplaat beschikbaar. Met behulp van deze Lidar data kan vooral de erosie van de Cupido's polder en de terugtrekking van de Boschplaat in detail worden gevisualiseerd (Figuur 4-1 en Figuur 4-2). In Figuur 4-3, Figuur 4-4 en Figuur 4-5 is de bijbehorende raai-ontwikkeling weergegeven.

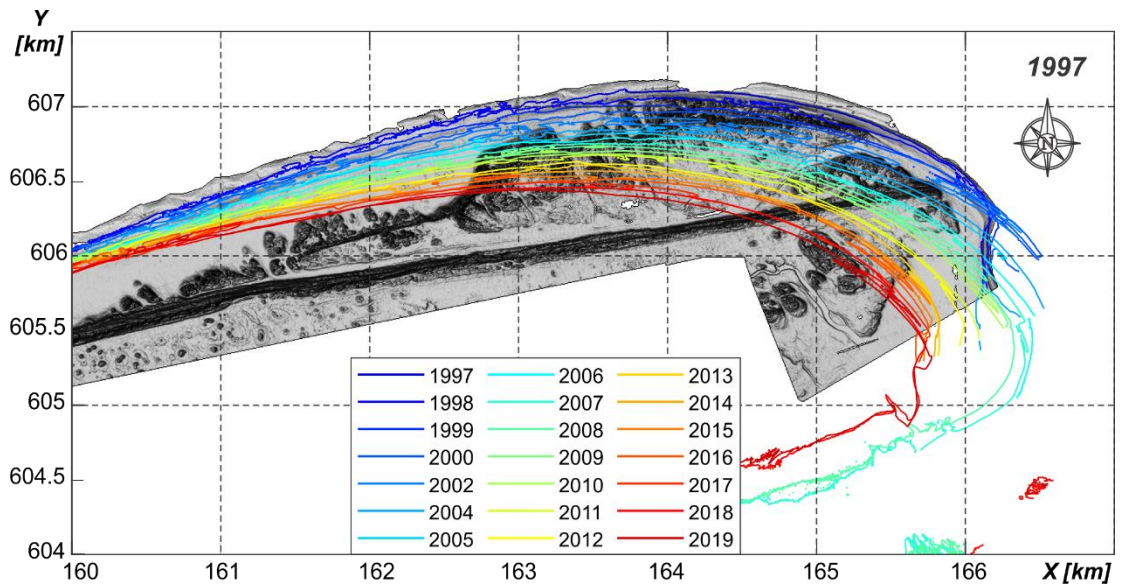
Een vergelijking tussen de 1997 en 2017 bodemligging (Figuur 4-1 en Figuur 4-2) illustreert de grote terugtrekking van de kustlijn die hier heeft plaatsgevonden. Het duinencomplex van de Cupido's polder strekt zich in 1997 nog zo'n 2 km uit op zijn breedste punt. De Polder bestond dan nog uit een zeewaartse duinenrij en tussen deze duinenrij en de Stuifdijk een uitgebreid kweldergebied. Aan de oostzijde is er een opening richting de zee. In 2019 blijft hier slechts een kleine, smalle strook van over. Het merendeel van de duincomplexen is daarbij opgeruimd. In de sedimentatie-erosie kaart (Figuur 4-1, onder) is deze opruiming goed te zien in de vorm van de blauwe kleuren. Het droge strand, met name aan de zuidkant van de Cupido's Polder is wel in hoogte en volume toegenomen. Deze toename komt door duingroei langs de stuifdijk.

Raai 1 (Figuur 4-3), gelegen in west-oost richting over de kop van de Boschplaat geeft een terugtrekking van 1385m sinds 1997. Dit is een gemiddelde achteruitgang van meer dan 60 m/jaar. Deze terugtrekking zit zich vrijwel onveranderd door. Ook de meest recente data laten geen vermindering in snelheid zien. Ook in dwarsrichting zijn deze grote verliezen terug te zien (raai 2 en raai 3, Figuur 4-4 en Figuur 4-5). In raai 2 is de kust met 925 m teruggetrokken waardoor de duinen hier vrijwel geheel verdwenen zijn. Dit is een gemiddeld verlies van meer dan 40 m/jaar. In Raai 3 zijn de verliezen met 500 m nog iets kleiner (22m/jaar).

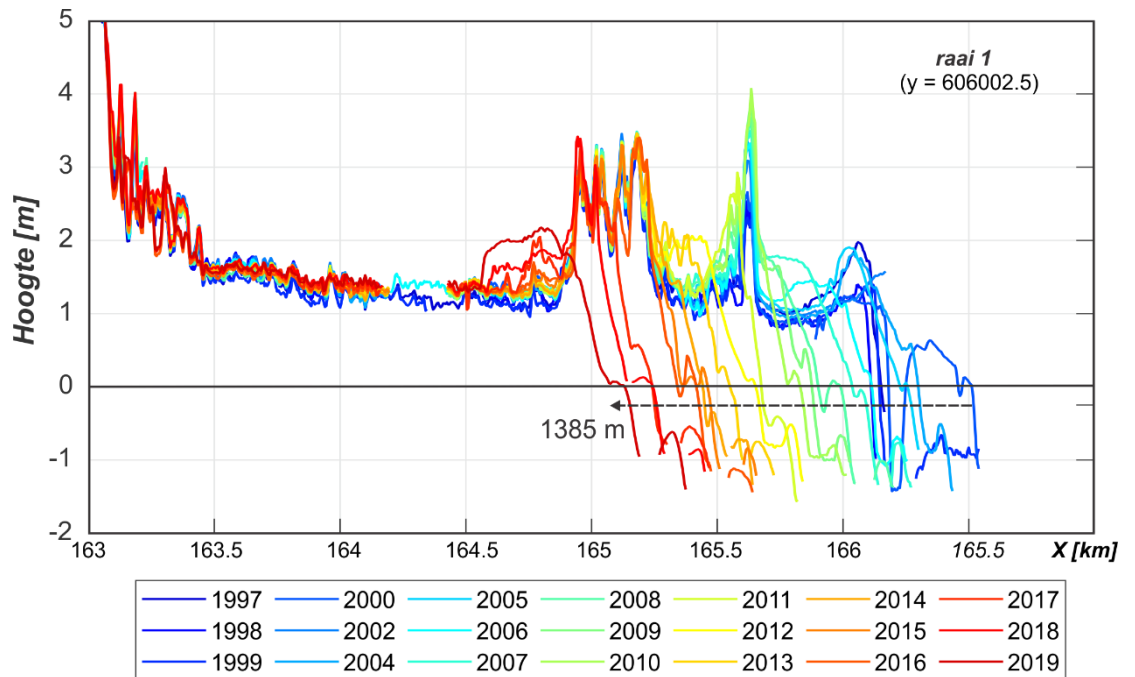
Een schatting van het verlies van areaal en volume is gebaseerd op de weergegeven polygoon in Figuur 4-1C. In totaal is het oppervlakte tussen de stuifdijk en boven de -1.50 m NAP lijn afgenomen van 6.4 miljoen m<sup>2</sup> in 1997 naar 2.79 miljoen m<sup>2</sup> in 2019 ((bijna 400 hectare afname). Het bijbehorende zandvolume is dan afgenomen van 21.21 miljoen m<sup>3</sup> naar 9.61 miljoen m<sup>3</sup>. Deze afname zet zich vrijwel lineair door. Op basis van de geobserveerde trend wordt een gemiddelde afname van -510.000 m<sup>3</sup>/jaar geobserveerd. Let op dat in deze deze volumebepaling het verlies in de vooroever, onder de -1.50 m NAP, niet is meegenomen.



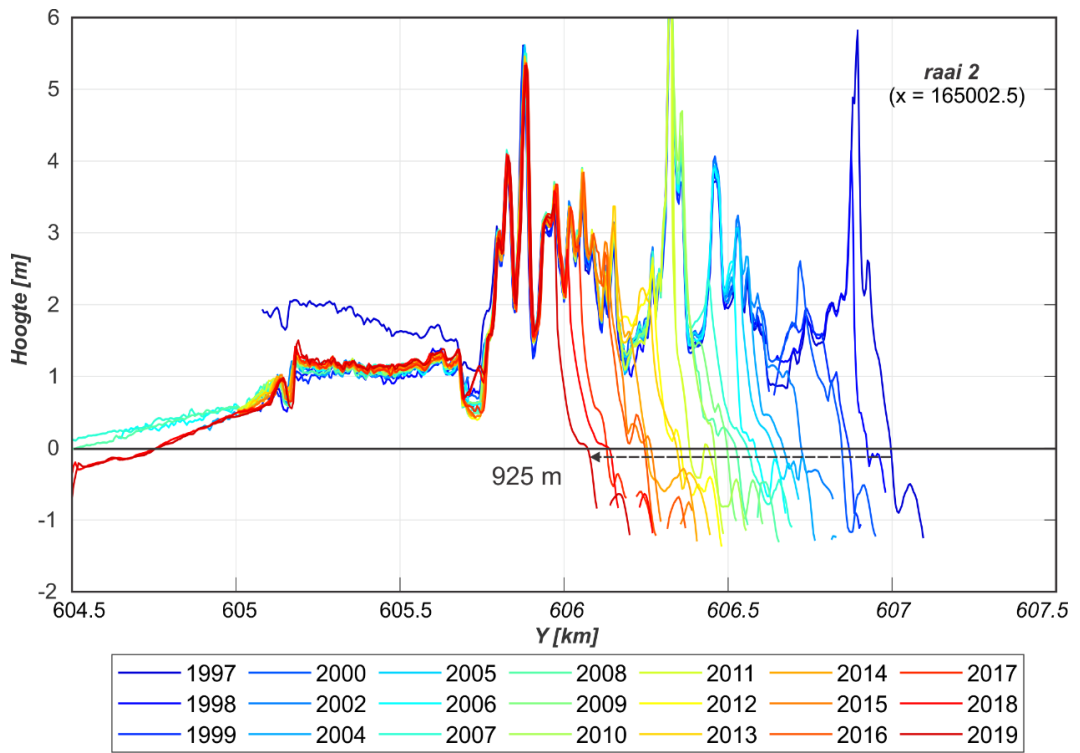
Figuur 4-1: Een overzicht van de vervorming van de Boschplaat over de periode 1997-2017. (A) Lidar DTM voor het jaar 1997 en (B) 2019. De rode gestreepte lijnen geven de ligging van dwarsraaien die weergegeven worden in Figuur 4-3, Figuur 4-4 en Figuur 4-5. (C) Verschil in hoogteligging tussen de 1997 en 2019 meting. De zwarte gestippelde lijn geeft de begrenzing aan voor de oppervlakte en volumebepaling.



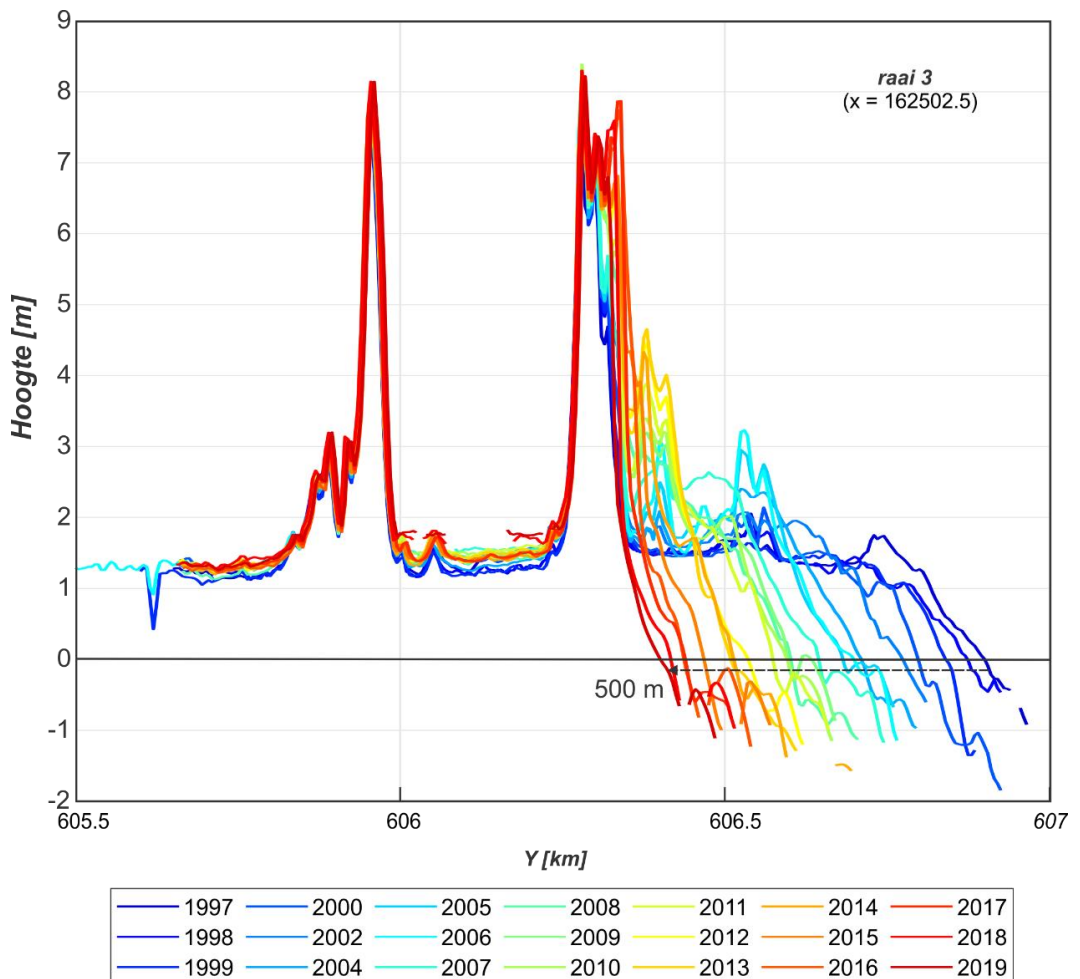
Figuur 4-2 (boven): Verandering in kustlijnligging over de periode 1997-2017 aan de hand van de 0m contour. Onderstaande bodem geeft de 1997 ligging weer.



Figuur 4-3: Hoogteontwikkeling van raai 1.



Figuur 4-4: Hoogteontwikkeling van raai 2.

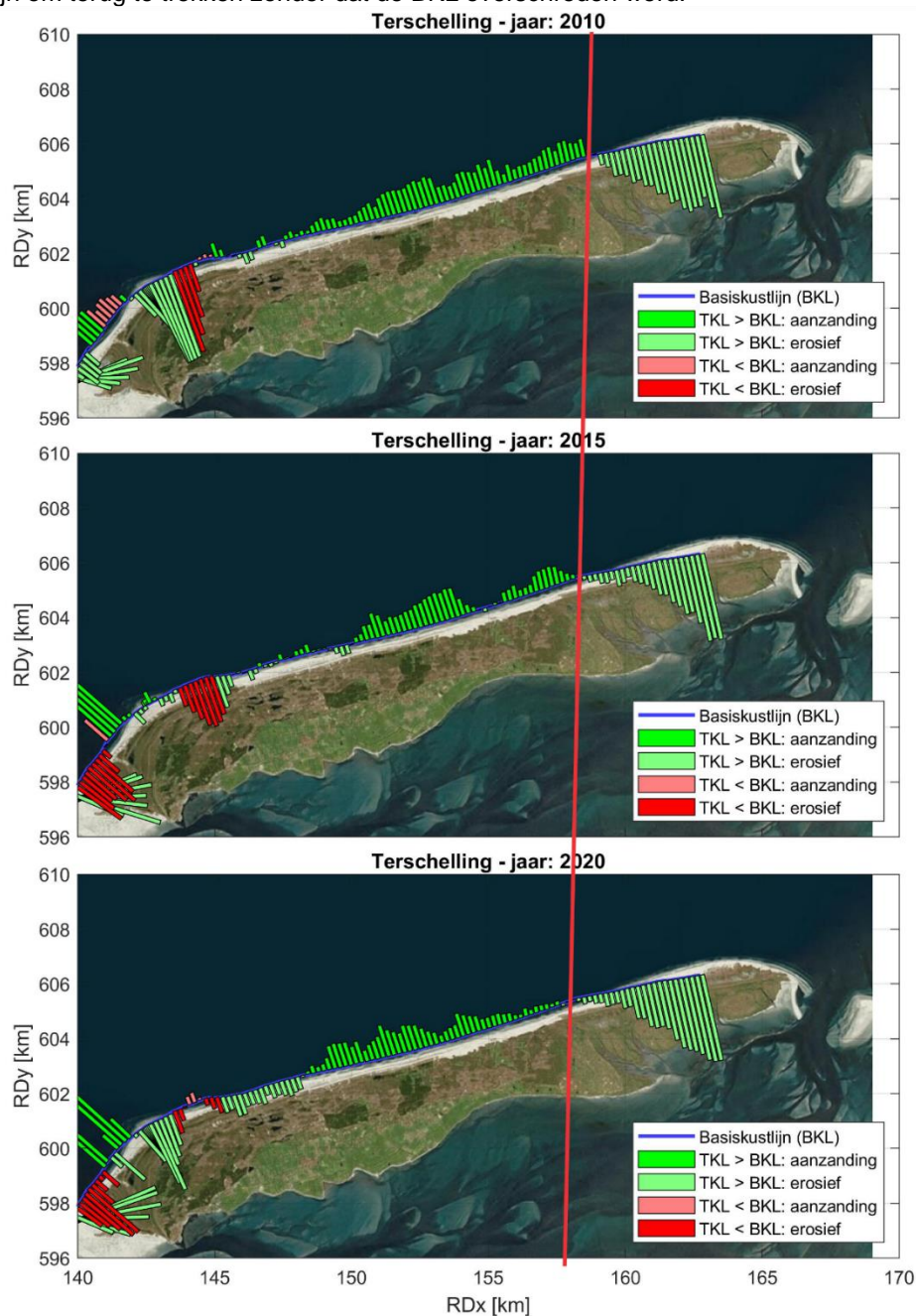


Figuur 4-5: Hoogteontwikkeling van raai 3.



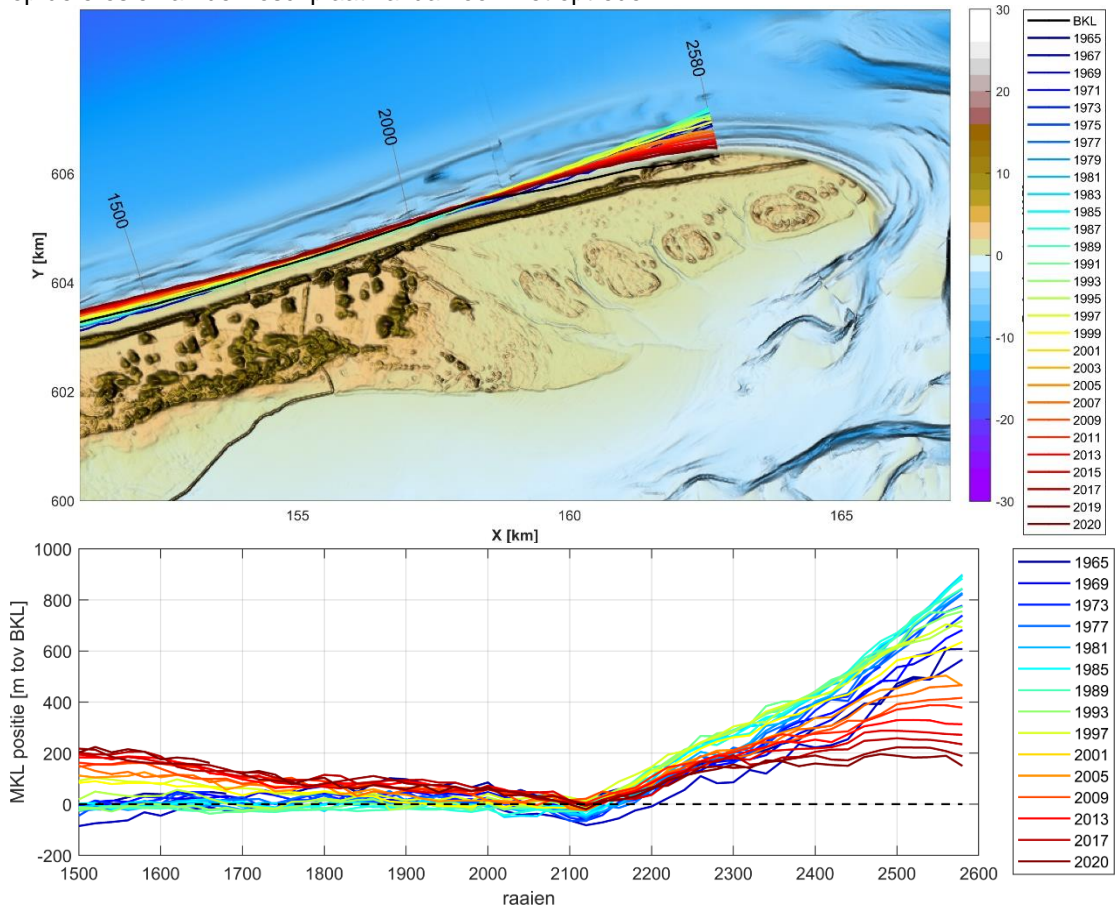
## 4.2 Verandering van TKL en MKL

De positie van de TKL (Toetsen Kustlijn) en MKL (Momentane kustlijn) positie worden weergegeven in respectievelijk Figuur 4-6 en Figuur 4-7. De TKL positie is hierbij geïllustreerd voor de jaren 2010, 2015 en 2020. Het TKL verloop laat eigenlijk identieke trends zien over de laatste 10 jaar. Ten oosten van raai 2100 -2200 is de trend overwegend erosief. Hier trekt de kustlijn sterk terug. De BKL is vastgelegd tot raai 2600 en niet tot het einde van het eiland doorgetrokken. Oostelijk van raai 2600 is er geen BKL vastgesteld en leidt de kustlijnerosie dan ook niet tot een BKL overschrijding. Ook tussen raai 2200 en 2600 wordt de BKL nog nergens overschreden wat komt door het feit dat de BKL nét voor de stuifdijk is vastgelegd en niet op de kustpositie in 1990. De voorliggende Cupido's polder gaf lange tijd een grote bufferzone. Hier was voldoende ruimte voor de kustlijn om terug te trekken zonder dat de BKL overschreden werd.



Figuur 4-6 – Ontwikkeling van de TKL voor de jaren 2010, 2015 en 2020. Rode lijn geeft de overgang tussen aanzandend en erosieve TKL trend van de eilandstaart. Deze overgang ligt in 2010 bij raai 2200 en in 2020 bij raai 2120

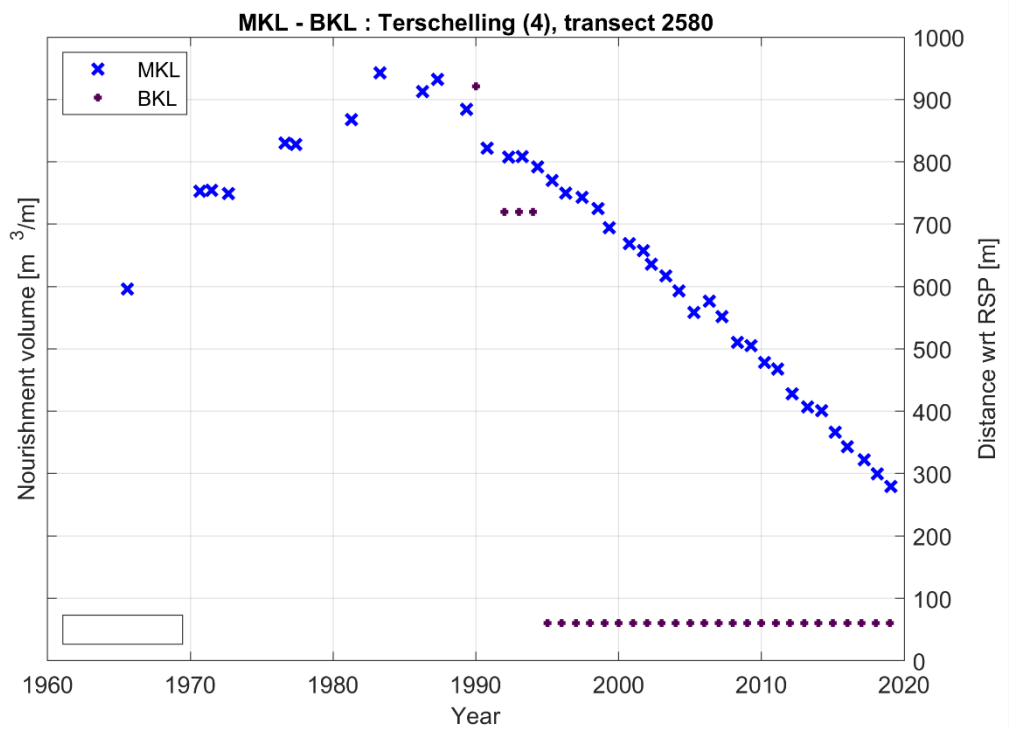
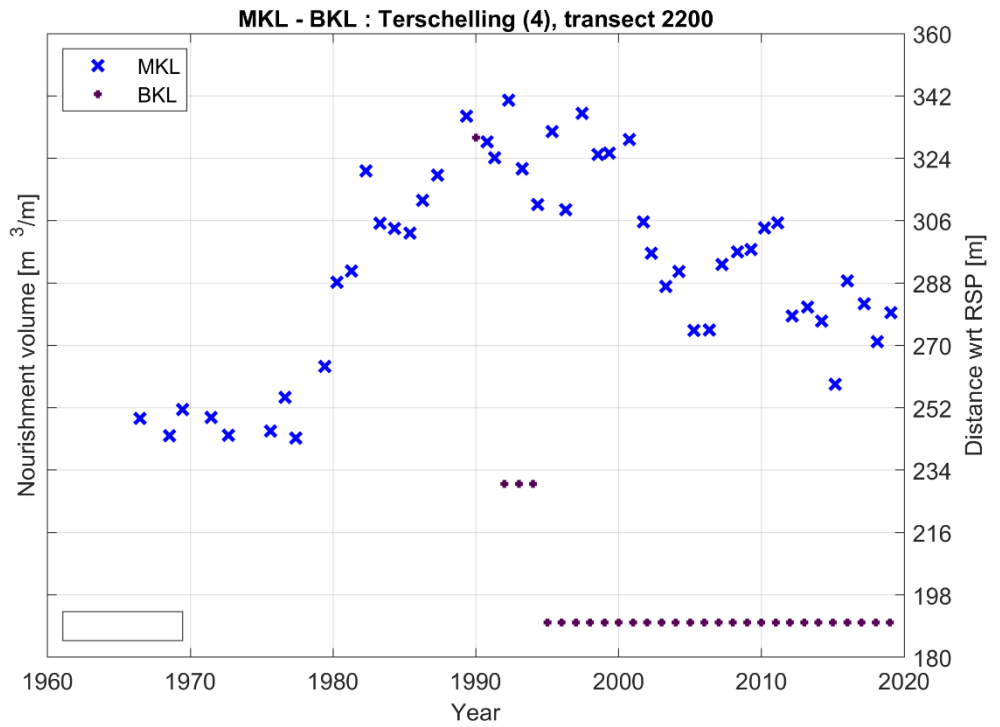
Een overzicht van de MKL liggingen langs de kustlijn (Figuur 4-7) bevestigt dit gedrag. Het centrale deel van het eiland, tussen raai 800 en 2100 vertoont zelfs een zeewaartse uitbouw van de MKL. Deze uitbouw is maximaal tussen raai 1000 en 1500 en neemt sterk af tussen raai 1500 en raai 2100. Deze uitbouw wordt ook wel beschreven als een zandgolf die langs de kust propageert. Op basis van de MKL volumes is deze propagatie eigenlijk niet heel duidelijk terug te zien. Een invloed op de erosie van de Boschplaat zal dan ook niet optreden.



Figuur 4-7 – Ontwikkeling MKL voor de periode 1965 – 2019 langs de Boschplaat.

De tijdsontwikkeling van de MKL is weergegeven in Figuur 4-8 voor raai 2200. (boven) en raai 2580 (onder). Tussen raai 2100 en 2200 vindt de overgang plaats van een stabiel naar een eroderend kustprofiel. Ter plaatse van raai 2200 is deze erosie nog beperkt. De MKL vertoont hier een trend van zeewaartse uitbouw, bijna 100m tussen 1978 en 1990 en sindsdien vindt er een kleine afname plaats. Deze afname gaat gepaard met fluctuaties van zeewaartse en landwaartse verplaatsingen maar netto is de trend kustwaarts gericht: een kleine 50 m tussen 1990 en 2020. In oostelijke richting neemt deze erosie sterk toe.

In oostelijke richting neemt de kustlijn terugtrekking sterk toe. In raai 2300 verplaatst de kustlijn sinds 1997 met 20m/jaar terug. In raai 2400 is de gemiddelde terugtrekking 9m/jaar sinds 1993. Een maximale terugtrekking treedt op in raai 2580 (Figuur 4-8, onder). Hier verplaatst de MKL sinds 1988 vrijwel lineair af met een snelheid van 33 m/jaar. Ten oosten hiervan is de terugtrekkingsnelheid nog hoger, maar hiervoor zijn geen MKL volumes bepaald.



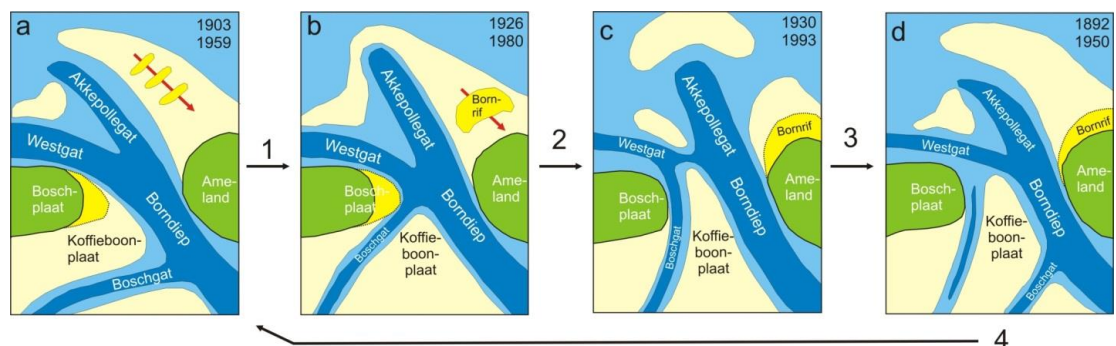
Figuur 4-8: Ontwikkeling van de MKL voor raaien km 22 (boven) en km25.80 (onder).

# 5 Discussie; de samenhang tussen Boschplaat en het Zeegat en Eiland

## 5.1 Cyclische Voorspelbaarheid?

In voorgaande hoofdstukken is de ontwikkeling van de Boschplaat besproken. De groei en terugtrekking van de Boschplaat worden in hoge mate gestuurd door de ontwikkelingen van het naastgelegen zeegat. Zo geeft Loffler et al. (2008) als beschrijving voor het gedrag van de Boschplaat “De oostpunt van de Boschplaat heeft een ‘kwispelende’ staart, waarbij aangroei en afslag elkaar afwisselen. Vanaf 1974 heeft de oostpunt, inclusief Cupido’s Polder, sterk te lijden onder afslag, door verplaatsing van de geul ‘Boschgat’. Sinds die tijd verdween ongeveer twee kilometer van de eilandpunt in de golven. Het is duidelijk dat dit proces zich zal doorzetten, totdat de cyclische ontwikkeling van de geul weer aangroei mogelijk maakt.”

De cyclische ontwikkeling waarnaar gerefereerd wordt is gebaseerd op het onderzoek van Israël (1998) en Israël en Dunsbergen (1999). In dit onderzoek wordt het gedrag van het zeegat als een cyclische ontwikkeling samengevat. Binnen deze cyclus wisselen 1 en 2 geulen geulconfiguraties elkaar af (Figuur 5-1) en groeit of erodeert de Boschplaat. De geobserveerde cyclus ligt daarbij op 50 tot 60 jaar. In de 1-geul configuratie zit de Boschplaat ruim in het zand en steekt relatief diep in het zeegat met een west-oost oriëntatie. Een 2-geul configuratie ontstaat door de vorming van een kortsluitgeul tussen Westgat en Boschgat door de Boschplaat heen. In deze configuratie is de Boschplaat sterk teruggetrokken. De studie van Elias et al. (2019) laat echter zien dat een echte cyclische ontwikkeling niet optreedt. Er zijn wel perioden met een verschillende oriëntatie van de hoofdgeul te onderscheiden, maar een cyclische voorspelbaarheid ontbreekt. Deze twee studies zijn niet met elkaar in tegenspraak, maar laten vooral zien dat de processen die ten grondslag liggen aan het ontstaan van geulen of de groei en terugtrekking van de Boschplaat nog niet voldoende begrepen worden.



Figuur 5-1: Conceptueel model van cyclische morfologische ontwikkelingen in het Amelander zeegat zoals opgesteld door Israël en Dunsbergen (1999). In de cyclus zijn 4 karakteristieke stadia te onderscheiden. In fase 1 (a) van de cyclus is er sprake van een 1 geul systeem. Er ligt 1 hoofdgeul tussen de eilandkoppen die verbonden is met een grote westelijke geul (Westgat) en een iets kleinere zeewaartse geul (Akkepollegat). Boschplaat zit hier ruim in het zand en steekt relatief diep in het zeegat met een west-oost oriëntatie. Dit systeem gaat geleidelijk over in een 2 geulen systeem (fase 2, b). Het Boschgat migreert dichterbij de Boschplaat toe. Hierbij bouwt de Boschplaat oostwaarts uit in een lange spitvorm. De spit wordt doorsneden (c) door een kortsluitgeul die het Westgat en het Boschgat met elkaar verbindt. Er is nu sprake van een 2-geulen systeem in het zeegat (fase 3 en 4, c en d). Het Boschgat is in het 2 geulen systeem relatief klein ten opzichte van het Borndiep. Op de buitendelta heeft de hoofdgeul (Akkepollegat) een zeewaartse richting terwijl het Westgat kleiner is. Gebaseerd op de cyclus geven Israël en Dunsbergen als prognose voor 2010: ‘Op basis van de 50-60 jarige cyclus ontwikkelt het zeegat van een 2 naar 1 geul systeem. Hierdoor neemt de erosiedruk af. Tijdens de overgangsfase roteert het Borndiep ter plaatse van de keel tegen de klok in.’

Een belangrijke reden waarom Elias et al. (2019) concluderen dat cyclische voorspelbaarheid ontbreekt is de grootschalige verandering van de hoofdgeul Borndiep. Het Borndiep lag voor 1926 nog aan de oostzijde van het zeegat, langs de Boschplaat. Sinds 1926 ligt de geul juist aan de westzijde van het zeegat, tegen de kust van Ameland aan. De geul heeft zich daar diep ingesleten in de bodem en blijft stabiel liggen in positie. Doordat de geul nu aan de westzijde van het zeegat ligt ontstaat er een ondiep gebied tussen de Borndiep geul en de Boschplaat. In deze ondiepe zone overheersen dan soms de geulen en soms de banken. Afhankelijk van de aanvoer versus afvoer van sediment kan de Boschplaat zich dan ontwikkelen. Dit gaat gepaard met perioden van erosie en sedimentatie. In dat opzicht kunnen de processen zoals geobserveerd in het model van Israël en Dunsbergen zeker voorkomen. Het is echter onwaarschijnlijk dat de morfologische ontwikkelingen vóór en ná geulmigratie van het Borndiep gelijk zijn. Een schatting van de cyclus lengte door gebruik te maken van de oude bodemkaarten (van vóór 1926) lijkt dan ook niet geldig.

In het algemeen kan een vraagteken gezet worden bij het concept cyclische voorspelbaarheid. Het cyclische denkmodel is een deterministisch denkmodel, waarbij de opeenvolgingen van uitkomsten een causaal verband hebben. Elias et al (2019) en Elias en Oost (2020) concluderen op basis van onderzoek bij Ameland en het Friesche Zeegat dat een deterministische aanpak wel geldig is als een ontwikkeling in gang gezet is, maar niet voor het initiëren van de ontwikkeling. Als voorbeeld wordt hier bijvoorbeeld de vorming van sediment-bypassing banken op de buitendelta gegeven (Elias et al. 2019). Deze banken ontstaan vanuit kleine instabiliteiten die soms wel en soms niet uitgroeien tot ebschild- en ebschaar systemen. Zodra zo'n ebschild en -schaar vormt, wordt de verdere groei gestuurd door het getij en de golfenergie en is de ontwikkeling wel met enige zekerheid voorspelbaar. Het voorspellen van de instabiliteit en of deze wel of niet groeit is echter een stochastische proces, dat met de huidige kennis (nog) niet te voorspellen is.

Ook de groei en terugtrekking van de Boschplaat vertoont zowel een deterministisch als een stochastisch verloop. Zo kunnen we wel verklaren waarom de periodes van groei en terugtrekking optreden, maar wanneer een kentering optreedt is niet voorspelbaar. Het frequent monitoren van de buitendelta's en het zeegat lijkt dan ook een vereiste om zo'n kentering vroegtijdig te identificeren. Alleen zo kan zowel het deterministische gedrag worden begrepen als eventuele stochastische verstoringen worden opgemerkt.

## 5.2 Wat bepaalt de morfologische ontwikkeling van de Boschplaat?

Groei of terugtrekking van de Boschplaat hangt logischerwijs samen met de aan- en afvoer van sediment. Bij een grotere aanvoer dan afvoer is er groei en visa versa bij een grotere afvoer dan aanvoer is er terugtrekking. Het begrijpen van de transporten is cruciaal om het morfologisch gedrag van de Boschplaat te begrijpen. De conceptuele modellen van Israël en Dunsbergen (1999), Elias et al. (2019) en de model resultaten gepresenteerd in Elias (2017) geven hier al veel inzicht in. Deze studies laten zien dat zowel de aanvoer als de afvoer van sediment een incidentele en een structurele component hebben.

De aanvoer van sediment bestaat uit:

- de langstransporten langs de kust van Terschelling (structureel)
- transporten vanuit het geulstelsel in het bekken (structureel)
- het aanlanden van banken (incidenteel).

De afvoer van sediment bestaat uit:

- de getijgedreven transporten door de geulen voor de Boschplaat (structureel)
- de golfgedreven transporten over de ondiepten in het zeegat (structureel) en
- geulvorming (kortsluitgeul Boschgat - Westgat).

De incidentele processen zorgen eigenlijk altijd voor een grote aangroei (bankaanlanding) of een sterke erosie (geulvorming). De structurele processen kunnen zowel voor aangroei als terugtrekking zorgen, hierin is de configuratie van de omliggende buitendelta van belang. Bijvoorbeeld, afhankelijk

van de aanwezige buitendelta banken kan er meer of minder golfenergie het zeegat binnendringen, waardoor de balans van sedimentatie naar erosie kan omslaan. Hetzelfde geldt voor de geulen. Het wel of niet vormen van een geultje kan net het verschil geven tussen netto aanvoer en afvoer van sediment. Ter verduidelijking zijn in Figuur 5-2 deze processen conceptueel weergegeven op basis van 3 bodemconfiguraties (1975, 1989 en 2014) die in het verleden zijn opgetreden.

*Concept A (Figuur 5-2): Incidentele & structurele aangroei*

De 1975-configuratie wordt gekenmerkt door een landwaarts gelegen, westelijk uitgebouwde buitendelta en een enkele hoofdgeul in het bekken. Essentieel hierin is de ligging van het Westgat met een duidelijke verbinding naar het Borndiep. Deze ligging zorgt ervoor dat er sediment vanuit het zeegat naar het westelijke en landwaartse deel van de buitendelta kan worden getransporteerd. De vorming van banken en ondiepten zorgt vervolgens voor een duidelijke golfafscherming van de achterliggende kust (de Boschplaat). Het maatgevende golfklimaat zorgt ervoor dat er langs de kust van Terschelling een (noord)oostwaarts, naar het zeegat toe, gericht transport staat. Door golfdissipatie van de voorliggende banken neemt de golfenergie nabij het zeegat af. Dit zorgt in afname van de transport gradiënt wat resulteert in een aanvoer van sediment richting de Boschplaat. De Boschplaat wordt hier gevoed door zowel het sedimenttransport aan de zeezijde, maar ook door transport vanaf de bekkenzijde. Ook aan de Waddenzee kant van Terschelling staan de getijgedreven transporten, door de geul Oosterom, naar het zeegat toe gericht. Op de punt van de Boschplaat bevindt zich een convergentiepunt in sediment transport; hier treedt spitvorming op. Vanuit het eiland is er dus een voeding van de Boschplaat. Net ten oosten van de Boschplaat ligt wel een grote getijgeul (Westgat, die overgaat in het Boschgat). Deze getijgeul kan in potentie sediment wegvoeren, via het Borndiep in de richting de buitendelta, waar het de voorliggende buitendeltabanken voedt, en richting het bekken. Deze afvoer van zand hoeft niet per definitie een verlies voor de Boschplaat te betekenen. Zand dat door het Westgat in zuidelijke richting wordt weggevoerd zal de banken rond het Westgat voeden. Als deze banken zich als ebschild voor de geul vormen, zal er door golfbreking een landwaarts transport optreden op dit ebschild, waardoor het zand weer richting het eiland wordt getransporteerd en kan bijdragen tot het in stand houden van de aanvoer. Sedimenttoevoer richting het bekken zorgt voor de opbouw van platen in het zeegat en het bekken (bijv. de Koffiebonenplaat). Er zijn nu 2 mechanismen die voor uitbouw van de Boschplaat kunnen zorgen. Ten eerste, als de golfgedreven toevoer van sediment maar groter is dan de netto afvoer door de geul (Westgat) dan kan de Boschplaat al direct uitbouwen. Ten tweede, maakt deze configuratie het ook mogelijk dat banken vanuit het bekken aanlanden op de Boschplaat. De aanlanding van zo'n bank, bijvoorbeeld de Koffiebonenplaat in de jaren '60, heeft incidenteel het volume van de Boschplaat dan nog extra vergroot.

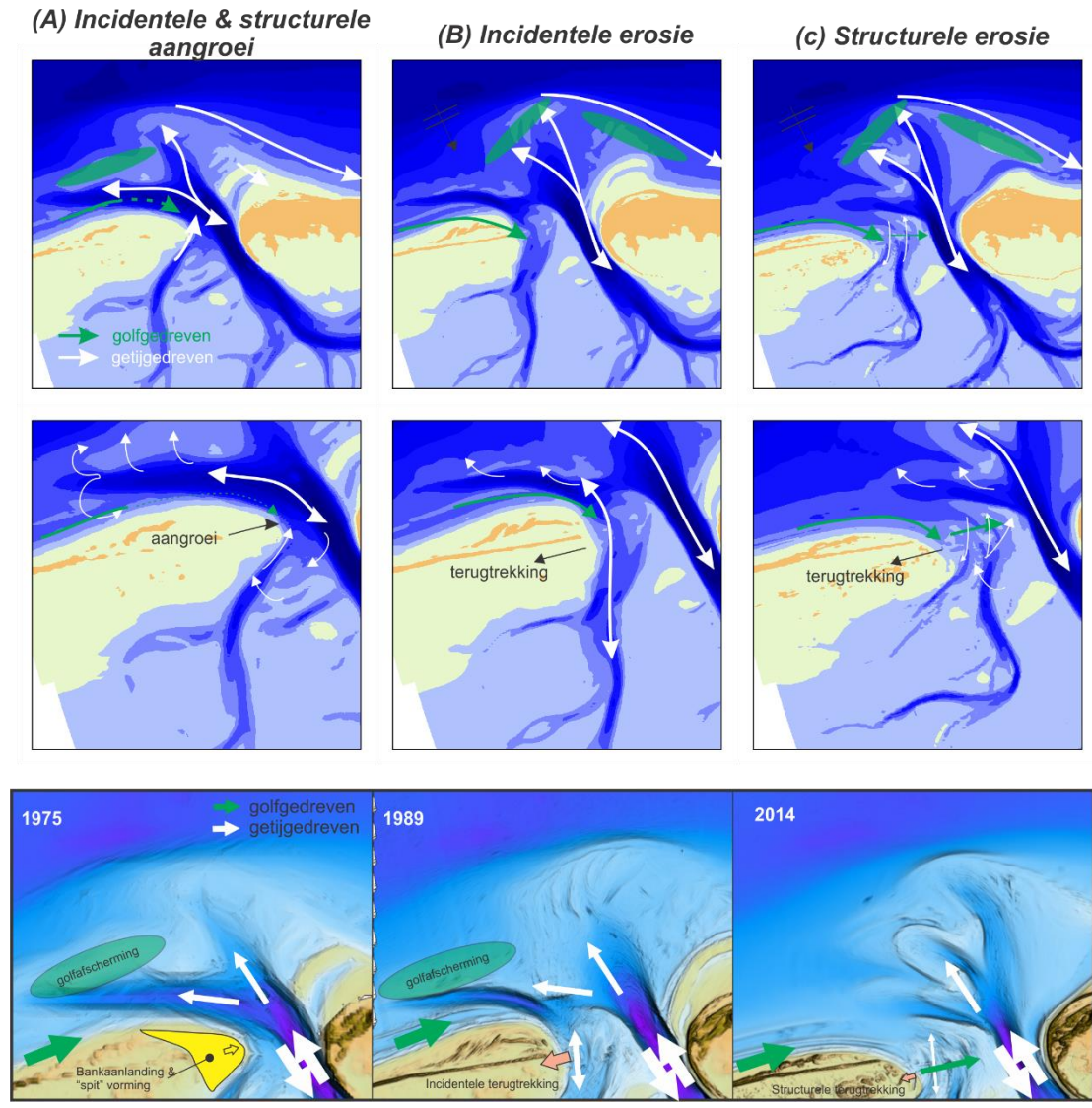
*Concept B (Figuur 5-2): Incidentele erosie*

Incidenteel kan de Boschplaat sterk in omvang afnemen als er een kortsluitgeul ontstaat tussen de geulen in het bekken (Boschgat) en de geulen op de buitendelta (Westgat). Aan de bekkenzijde blijft het geulstelsel van de Boschplaat altijd aanwezig. De kortste route is hydraulisch ook de meest efficiënte route tussen dit geulstelsel en de Noordzee. Als de Boschplaat ver is uitgebouwd is deze relatief laag en gevoelig voor doorbreken. Als er bijvoorbeeld tijdens een storm een kleine verbinding vormt door de Boschplaat heen kan deze snel groeien. Deze kortsluitgeul neemt dan de afwatering van het westelijke deel van het bekken over en groeit dan snel in omvang en diepte. De vorming van zo'n kortsluitgeul is een stochastisch proces, waarvan niet exact te voorspellen is wanneer deze optreedt. Een vorming van een grote getijgeul aan de kop van de Boschplaat kan veel sediment afvoeren. Deze geul kan dan ook voor langere tijd een structurele erosie veroorzaken.

*Concept C (Figuur 5-2): Structurele erosie*

In deze configuratie van de buitendelta is een hele grote getijgeul, zoals het Westgat, de Oosteroms en het Boschgat nabij de Boschplaat niet zichtbaar. Het gebied tussen de Boschplaat en het Borndiep wordt gekenmerkt door een ondiepe vlakte waarop zich kleine dynamische banken en geulen hebben gevormd. Eigenlijk lijkt dit een ideale situatie voor groei van de Boschplaat. De aanvoer vanaf Terschelling zal niet anders zijn dan in voorgaande concepten en een grote

getijgedreven afvoer lijkt niet aanwezig. Toch vertoont de kust een continue terugtrekking. Deze structurele terugtrekking is gerelateerd aan de golfwerking die hier ver het zeegat binnendringt. Het westelijke deel van de buitendelta is relatief diep. Er zijn weinig ondiepe banken aanwezig. Hierdoor kunnen de golven ver het zeegat binnen dringen en vindt er golfbreking en opwoeling plaats op het ondiepe bankengebied tussen de Boschplaat en het Borndiep. De golven zorgen voor een toevoer van sediment die door de het getij makkelijk verspreid wordt richting het Westgat en richting het bekken. Het sediment wordt in dwarsrichting verspreid en belandt uiteindelijk in het Borndiep. Vanuit het Borndiep gaat het sediment ver de buitendelta op en komt dan niet terug naar de Boschplaat. Hier ontstaat een structureel zandtekort en erosie van de eilandpunt.



Figuur 5-2: Conceptuele beschrijving van de sedimenttransport patronen voor verschillende bodemconfiguraties: (A) 1975, Incidentele & structurele aangroei, (B) 1989, Incidentele erosie en (C) 2014, Structurele erosie.

### ***Een vooruitblik naar de toekomst***

Op basis van de meetdata kan nog geen afname van de terugtrekking van de Boschplaat worden gezien. Zowel de contourlijnen als de MKL-verplaatsingen laten een doorgaande trend van erosie zien. De huidige morfologische veranderingen volgen dan ook nog het conceptuele model C Structurele erosie. Wel zijn er een aantal kenmerken zichtbaar die er op duiden dat er een transitie naar model A aan het optreden is.

Een omslag van erosie naar sedimentatie van de Boschplaat kan eigenlijk alleen als de onbalans tussen aanvoer en afvoer van sediment wordt doorbroken. Een incidenteel event zoals de aanlanding van een bank lijkt op korte termijn niet waarschijnlijk. Wel zijn er grote ontwikkelingen op de buitendelta te zien die mogelijke de structurele processen kunnen beïnvloeden. De uitstroom van het Borndiep heeft zich recent (sinds 2017) verlegt in een westelijke richting. Hierdoor vindt er meer voeding plaats richting het westelijke deel van de buitendelta. Het verder uitbouwen van de reeds aanwezige eb-schilden in westelijke richting zou zodoende de golfindringing het zeegat in kunnen beperken. Hierdoor neemt de transportcapaciteit langs de Noordzeekust van de Boschplaat af, waardoor de balans tussen aanvoer en afvoer weer kan omdraaien met als gevolg mogelijke spit groei aan de kop van de Boschplaat.

Ook bij een uitbouw van de Boschplaat zal het gedrag zeker niet meer zoals in het verleden zijn. De aanleg van een stuifdijk heeft er in het verleden toe gezorgd dat de Boschplaat groot uit kon groeien. Zonder deze stuifdijk zal de Boschplaat kwetsbaar blijven voor incidentele erosie. Als er een spitvormige uitbouw optreedt blijft deze kwetsbaar voor doorbreken tijdens storm condities. Dus ook in de toekomst zal dynamiek de eilandstaart blijven beheersen.



## 6 Conclusies & Aanbevelingen

### 6.1 Conclusies

- Door het samenvatten van inzichten en het actualiseren van deze inzichten met recente meetdata kan het gedrag van de Boschplaat goed worden beschreven en begrepen.
- De erosie en sedimentatie van de Boschplaat vertonen zowel een incidentele als structurele component. De structurele component zijn de vorming van kortsluitgeulen (erosie) en bankaanlandingen (sedimentatie).
- De huidige terugtrekking is een structureel proces. De afvoer van zand is groter dan de aanvoer. Deze afvoer komt door het getij, maar ook door de golfdoordringing het zeegat in.
- Grote veranderingen doen zich voor op de buitendelta. Deze zouden de structurele processen in de toekomst kunnen beïnvloeden. Hoe dat zich uitwerkt voor de Boschplaat is nog onzeker. Een prognose van de toekomstige ontwikkeling, of en wanneer er een kentering in gedrag van erosie naar sedimentatie gaat optreden dan ook nog niet met grote zekerheid te maken.
- Op basis van de meetdata kan nog geen afname van de terugtrekking van de Boschplaat worden gezien. Zowel de contourlijnen als de MKL verplaatsingen laten een doorgaande trend van erosie zien ten oosten van raai 2200.
- Rond raai 2100-2200 vindt de overgang plaats van een aangroeiende/stabiele eilandkust naar een eroderende eilandstaart. Dit overgangspunt ligt stabiel in positie en vertoont geen westelijke verplaatsing.

### 6.2 Aanbevelingen

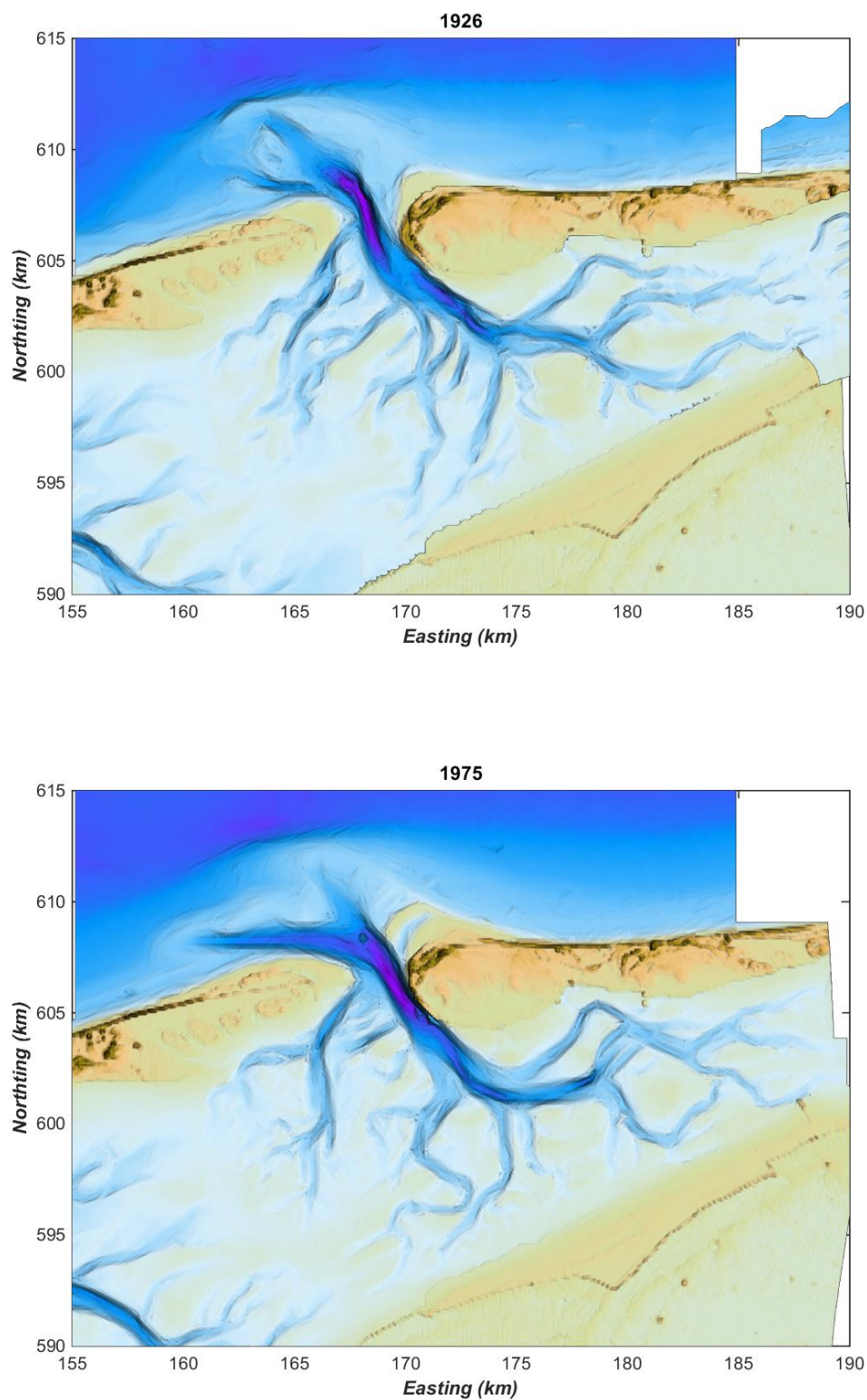
Een belangrijke observatie in deze studie is de ligging van een omslagpunt tussen raai 2100 en 2200. Hier vindt de overgang plaats van een aangroeiende/stabiele eilandkust van Terschelling naar een sterk eroderende eilandstaart. Dit overgangspunt ligt vrij stabiel in positie en verplaatst zich niet in westelijke richting. Hoe en waarom dit omslagpunt bestaat is niet bekend of direct te verklaren uit de processen. Hiervoor is aanvullend onderzoek benodigd.

Ook de groei en terugtrekking van de Boschplaat vertoont zowel een deterministisch als een stochastisch verloop. Deterministisch gedrag is aanwezig en dus voorspelbaar, maar treedt op in reactie op een stochastische verstoring. Het deterministische gedrag is dus alleen voorspelbaar als de initiële verstoring wordt waargenomen. Het frequent monitoren van de buitendelta's lijkt dan ook een vereiste om de initiële verstoring vroegtijdig te identificeren.

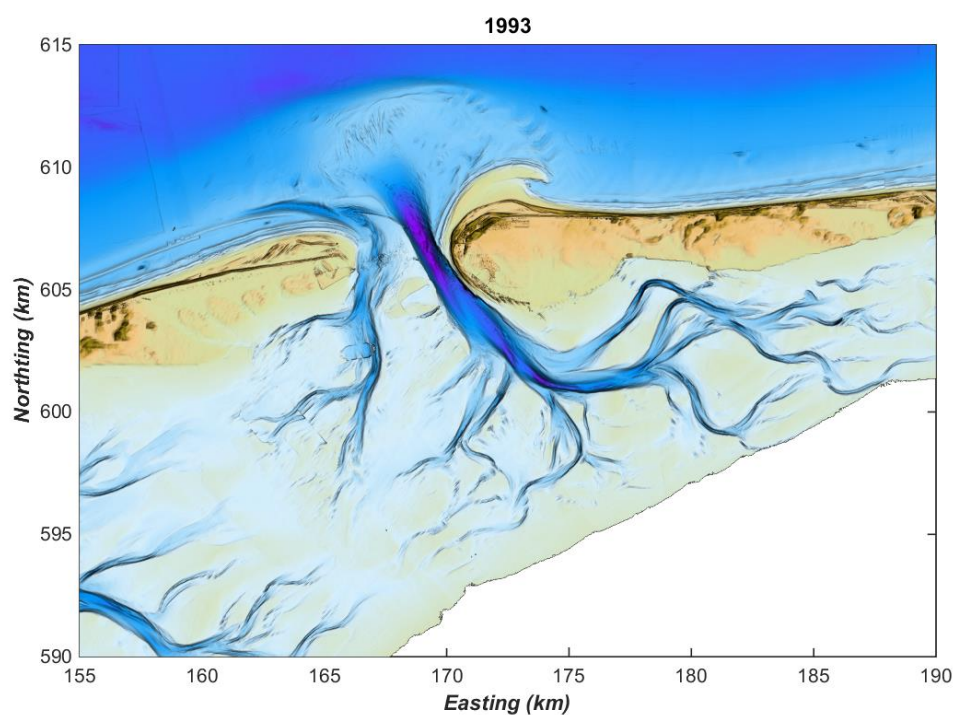
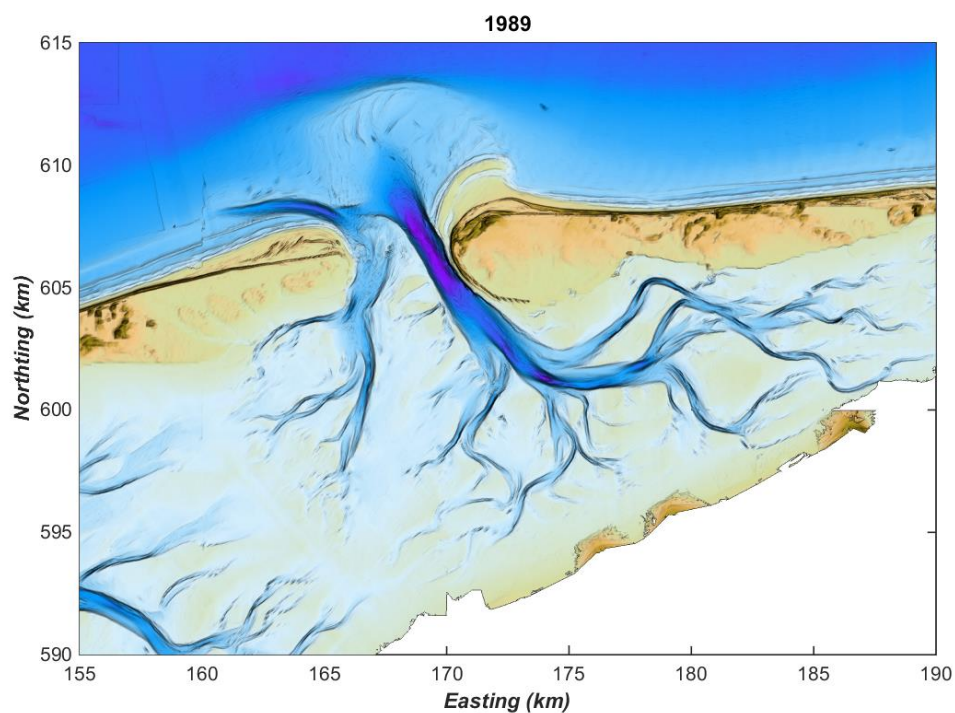
## 7 Referenties

- Cheung, K. F., F. Gerritsen, et al. (2007). "Morphodynamics and sand bypassing at Ameland Inlet, The Netherlands." *Journal of Coastal Research* 23(1): 106-118.
- Elias, E.P.L. en Bruens, A., 2012. *Morfologische Analyse Boschplaat (Terschelling)*. Quicksan. Rapport 1206171-001. Deltares, Delft.
- Elias, E.P.L., 2017. *Stroming en sedimenttransport langs de Boschplaat op Terschelling*. Rapport 11200878-000, Deltares, Delft, 52p.
- Elias, E.P.L., 2017. *Understanding the present day morphodynamics of Ameland inlet Kustgenese 2.0, product ZG-A02*. Report 1220339-006, Deltares, Delft: 58 p.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Pearson, S., Cleveringa, J., 2019. *Understanding sediment bypassing processes through analysis of high frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands*. *Marine Geology*, 415.
- Elias, E.P.L. en Pearson, S. 2019. *Understanding the meso-scale processes at Ameland Inlet; a synthesis*. Rapport 1220339-008, Deltares, Delft.
- Elias E.P.L. en Oost, A.P. 2020. *Morfologische processen van het Friesche Zeegat. Een conceptueel model*. Rapport 11205236-003. Deltares, Delft (concept).
- Israël, C.G., Dunsbergen, D.W., 1999. *Cyclic morphological development of the Ameland Inlet, The Netherlands*. *Proceedings of Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Genova, Italy, Volume 2*, pp. 705-714.
- Israël, C.G., 1998. *Morfologische Ontwikkeling Amelander Zeegat*. Report RIKZ/OS-98.147x (in Dutch), Rijkswaterstaat, National Institute for Coastal and Marine Management RIKZ, The Hague.
- Loffer, M.A.M., de Leeuw, C.C., ten Haaf, M.E., Verbeek, S.K., Oost, A.P., Grootjans, A.P., Lammerts, E.J., Haring, R.M.K. 2008. *Het Tij Geleerd*. Waddenvereniging, Harlingen. ISBN/EAN 978-90-70322-304.
- Quataert, E, Oost, A., Hijma, M, Elias, E.P.L., 2020. *Beheerbibliotheek Terschelling. Beschrijving van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust*, Rapport 11205236-001, Deltares, Delft.
- Van der Spek, A.J.F., Noorbergen, H.H.S., 1992. *Morfodynamica van Intergetijdegebieden*. Report 92-03, Beleidscommissie Remote Sensing BCRS, The Hague.
- Verhoeff, S., 2018. *Het zeegat van Ameland. Het digitaliseren van historische zeekaarten*. Master Thesis (in Dutch), Maritiem Institute Willem Barentsz, Ocean Technology, Terschelling.

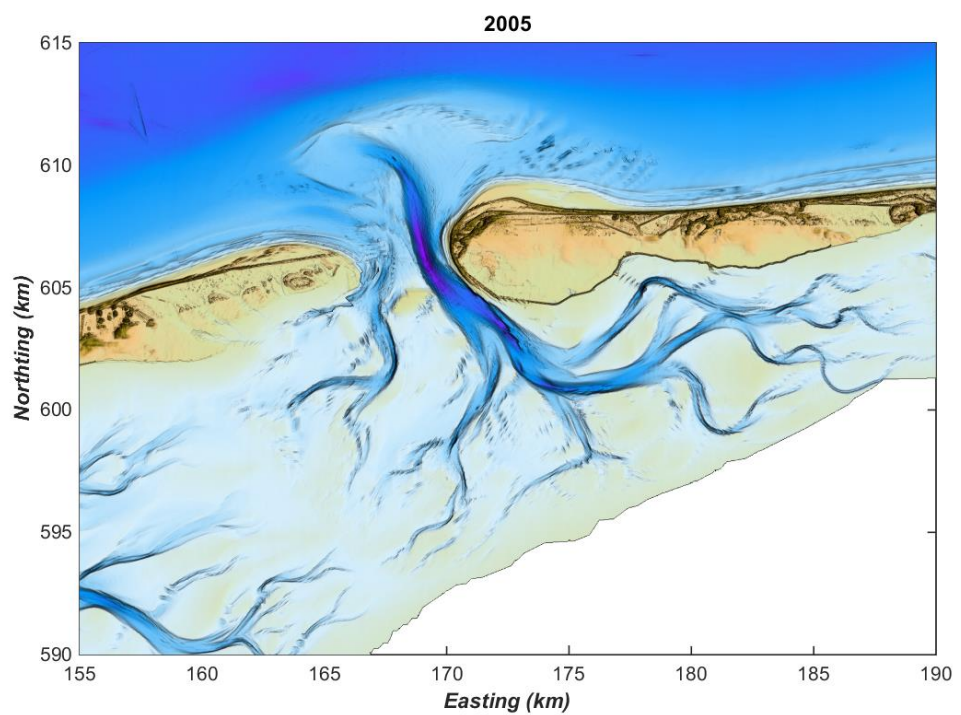
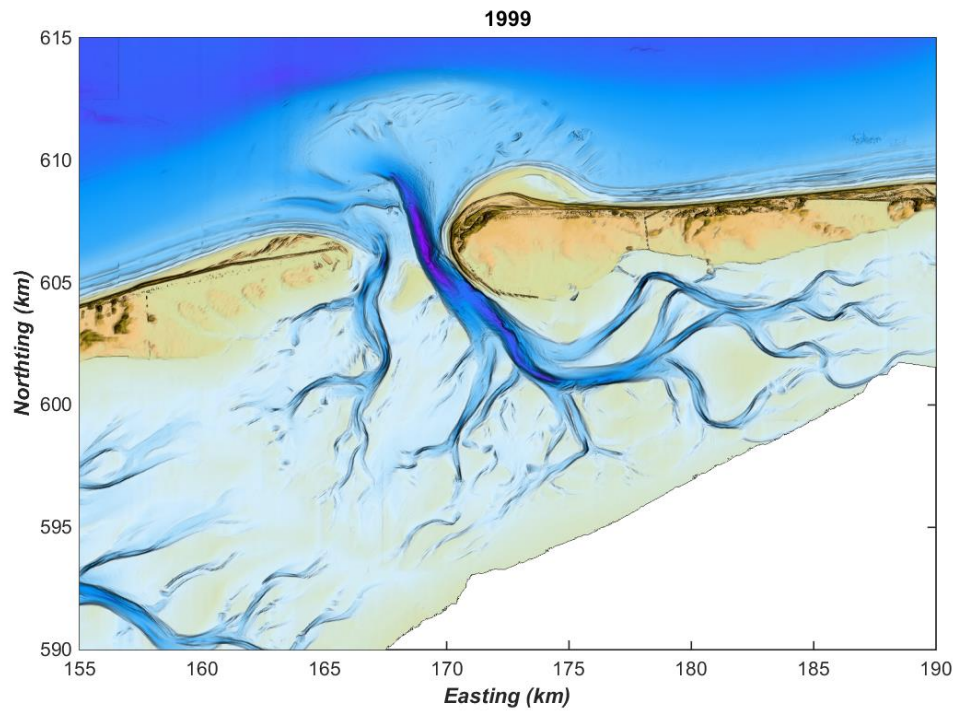
## A Een overzicht van de vaklodingen



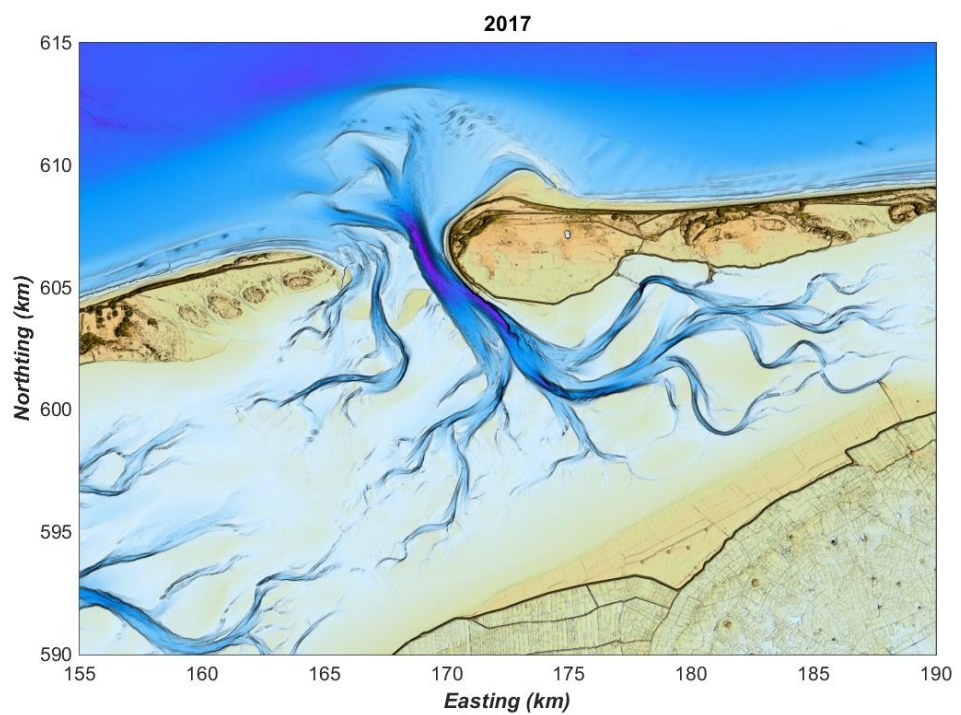
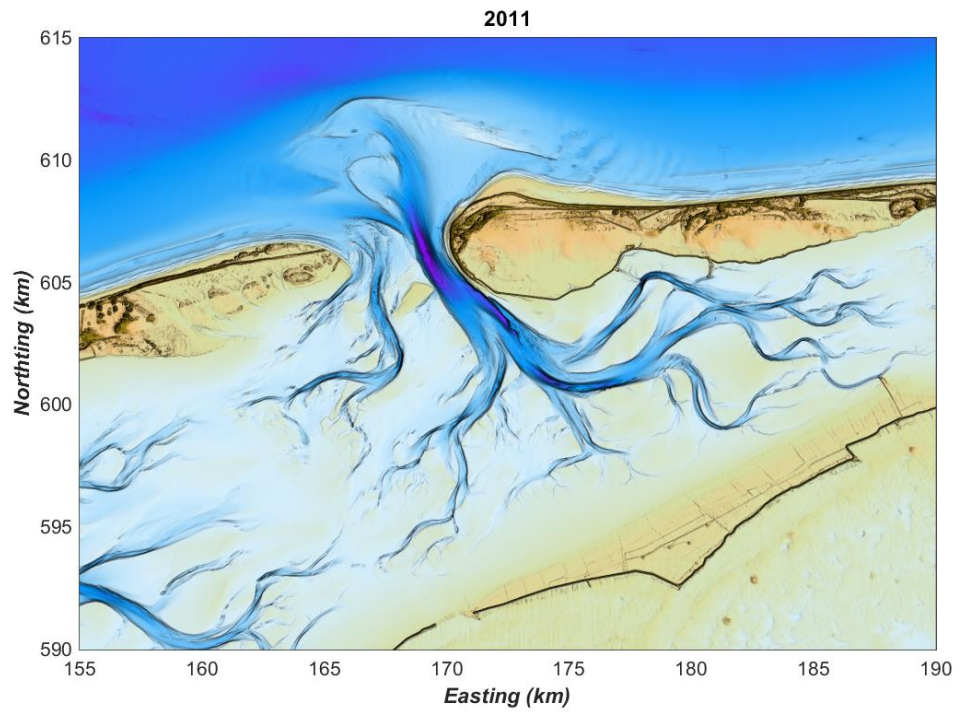
*Figuur A-1: Vaklodingen van het Zeegat van Ameland voor de jaren 1926-1975.*



*Figuur A-2: Vaklodgingen van het Zeegat van Ameland voor de jaren 1989-1993.*

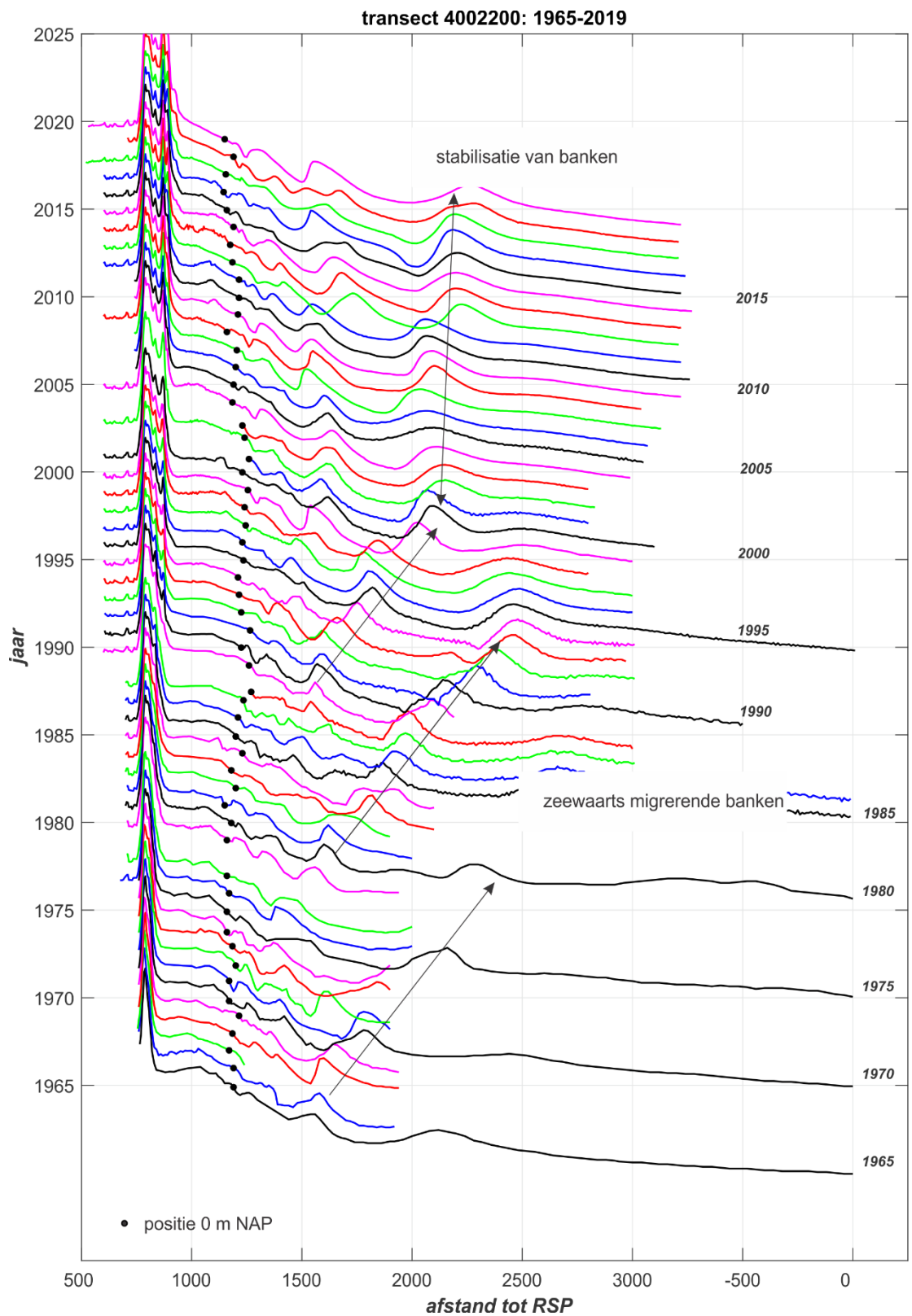


*Figuur A-3: Vaklodgingen van het Zeegat van Ameland voor de jaren 1999-2005.*

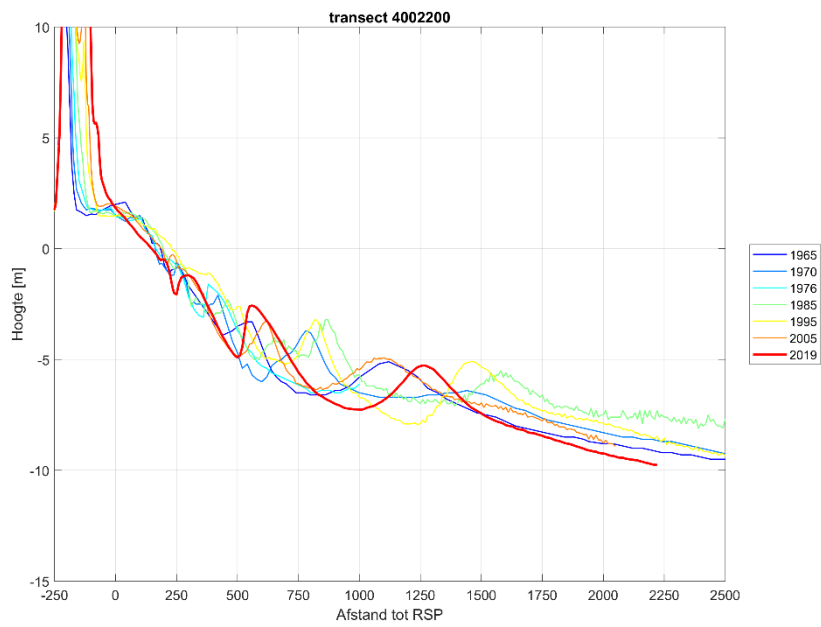
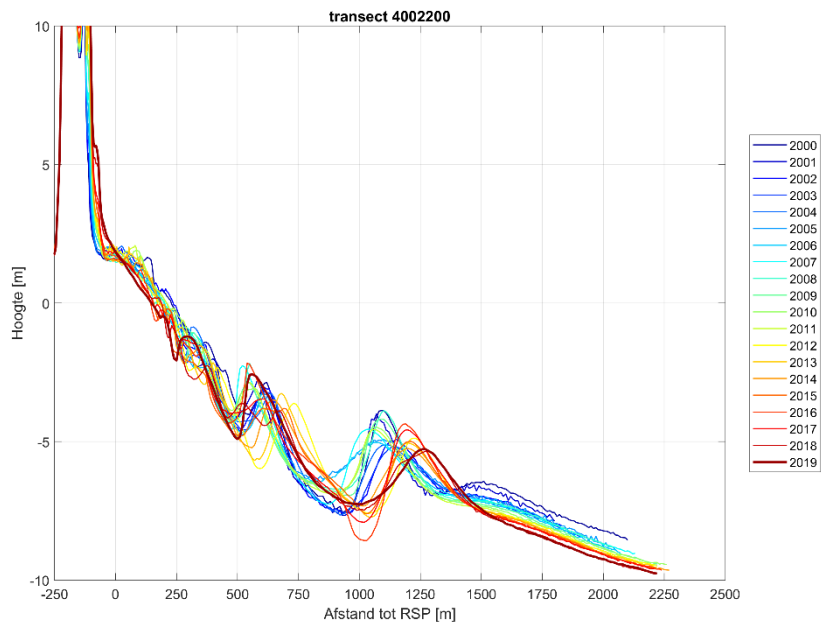


*Figuur A-4: Vaklodingen van het Zeevat van Ameland voor de jaren 2011-2017.*

## B Overzicht van Jarkus metingen

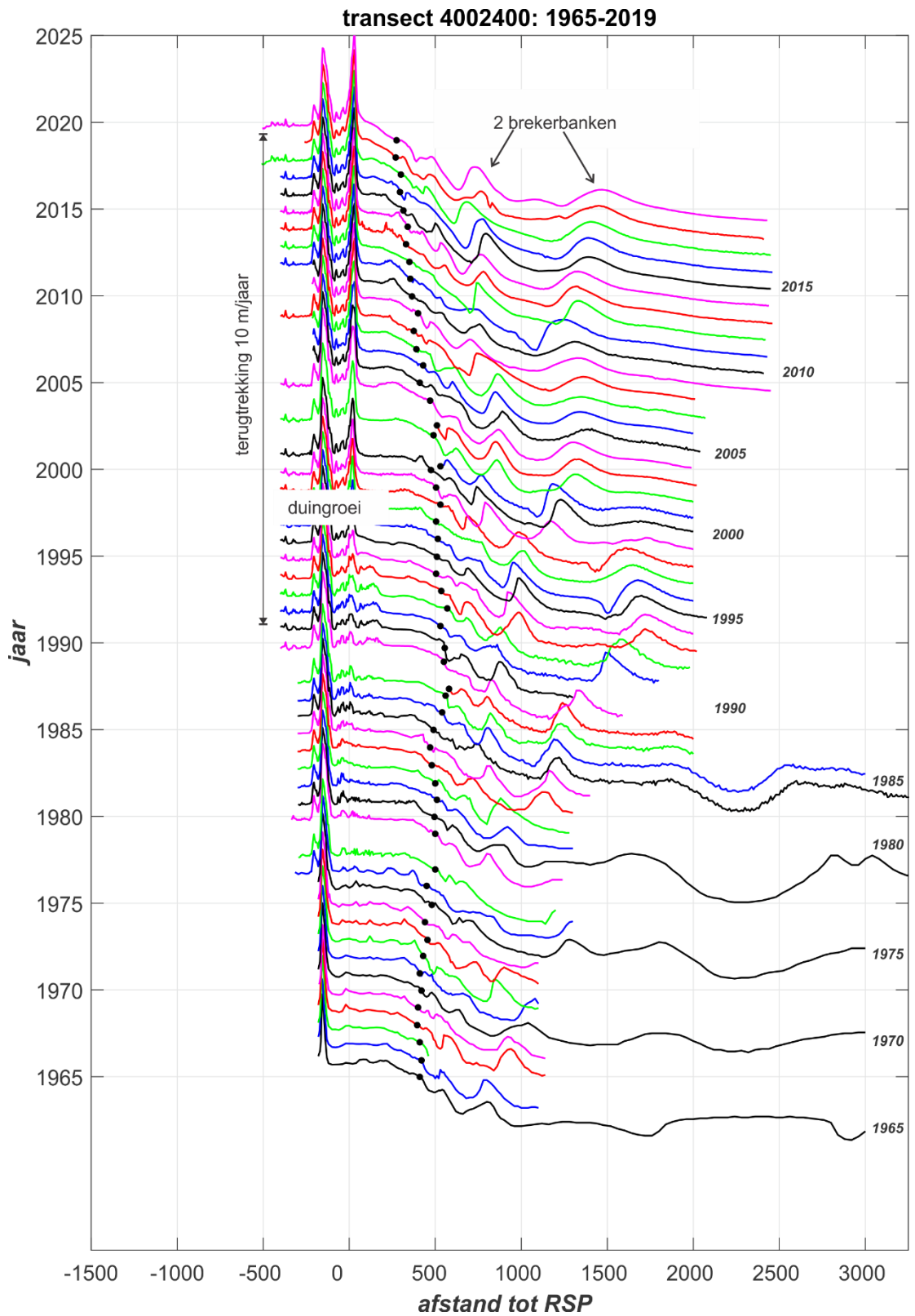


Figuur B-1: Timestack van raai 2200.

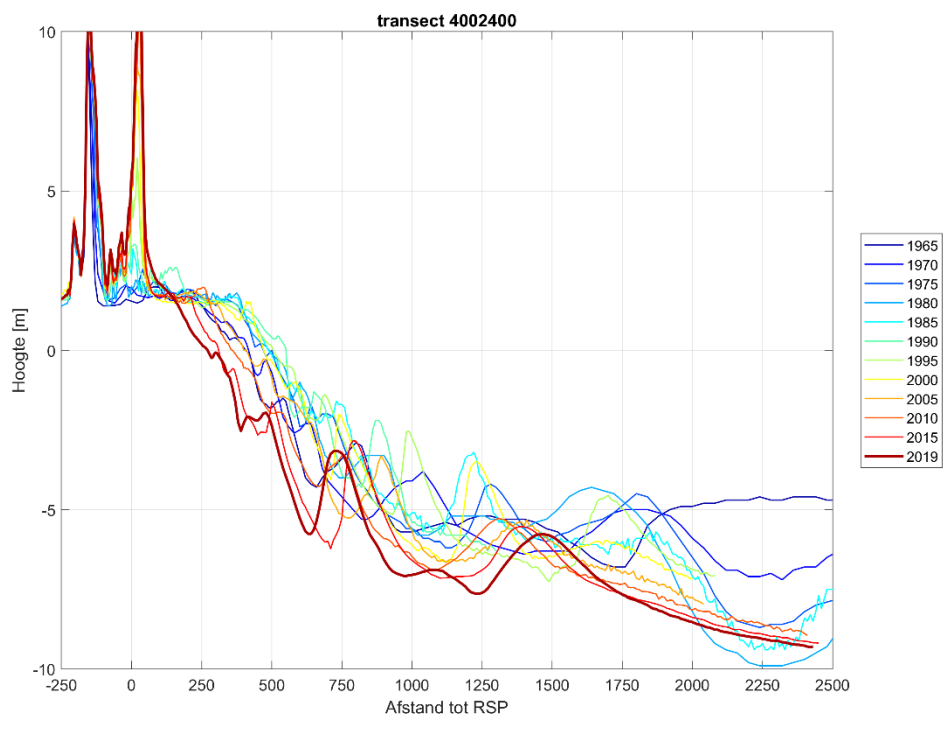
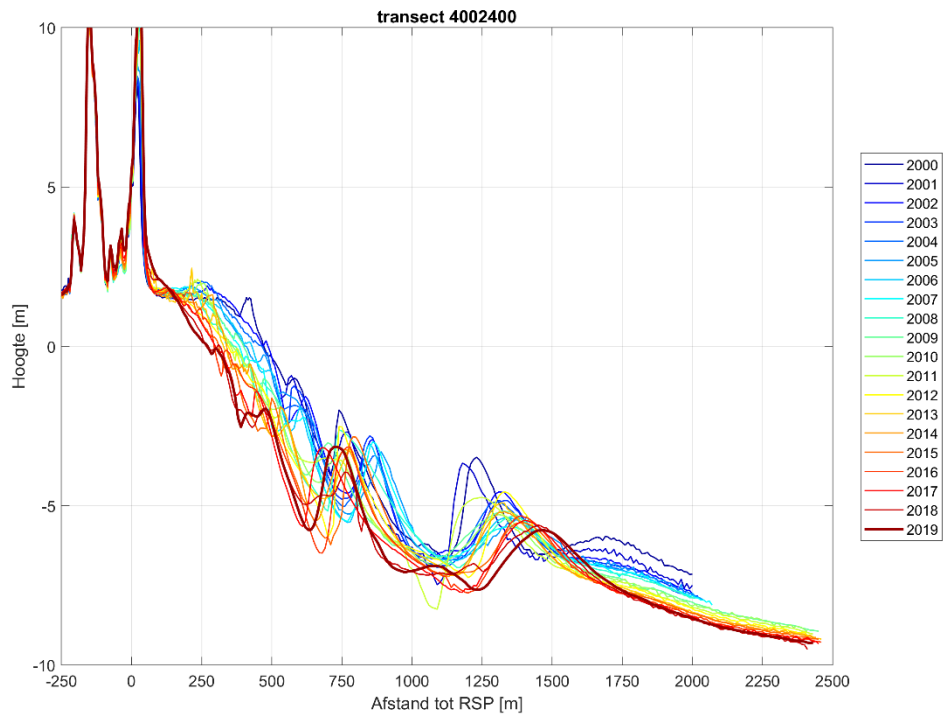


Figuur B-2: Profielontwikkeling van raai 2200 over de periode 1965-2019 in 5-jaars interval (boven) en de jaarlijkse veranderingen over de periode 2000-2019 (onder).

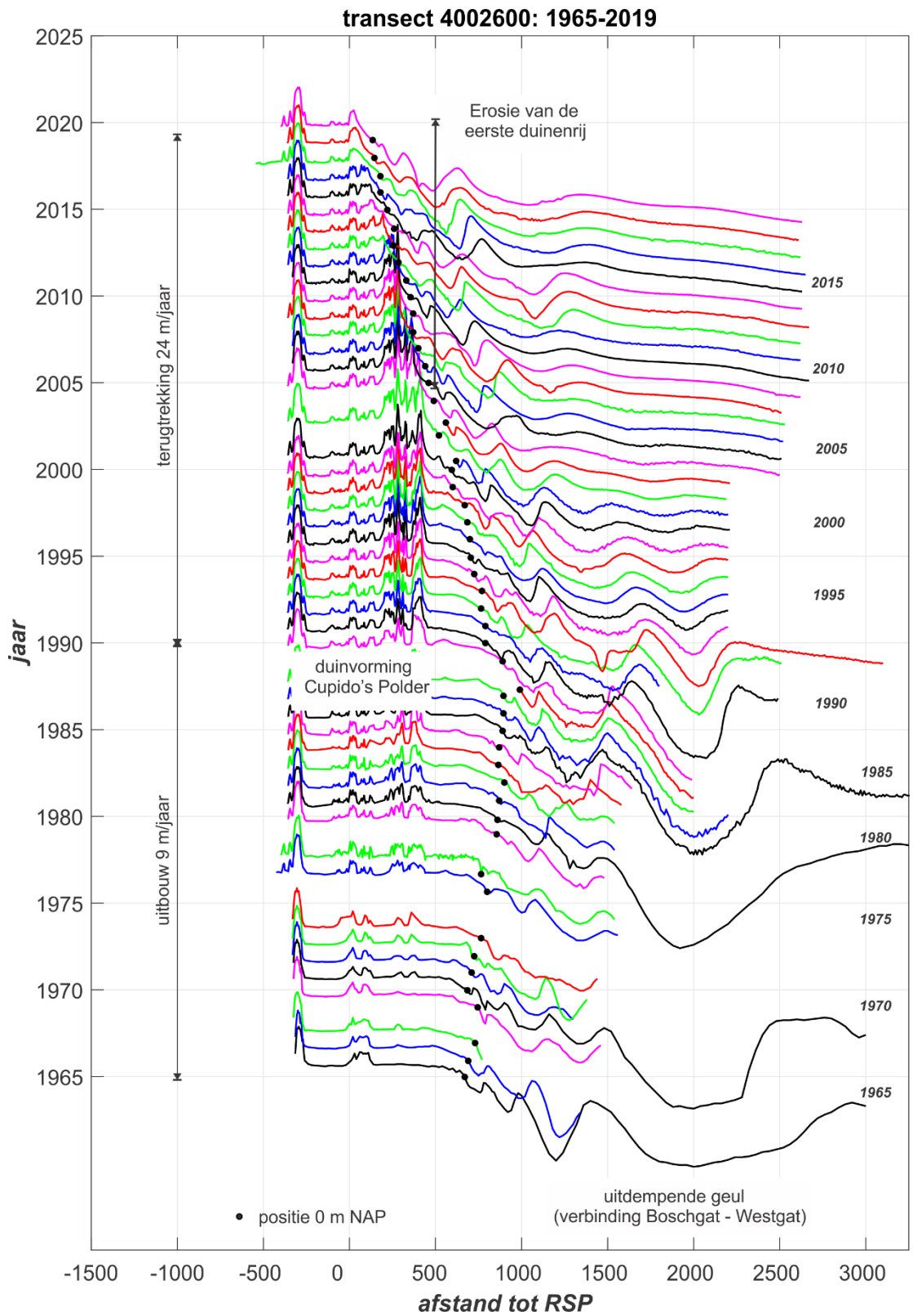




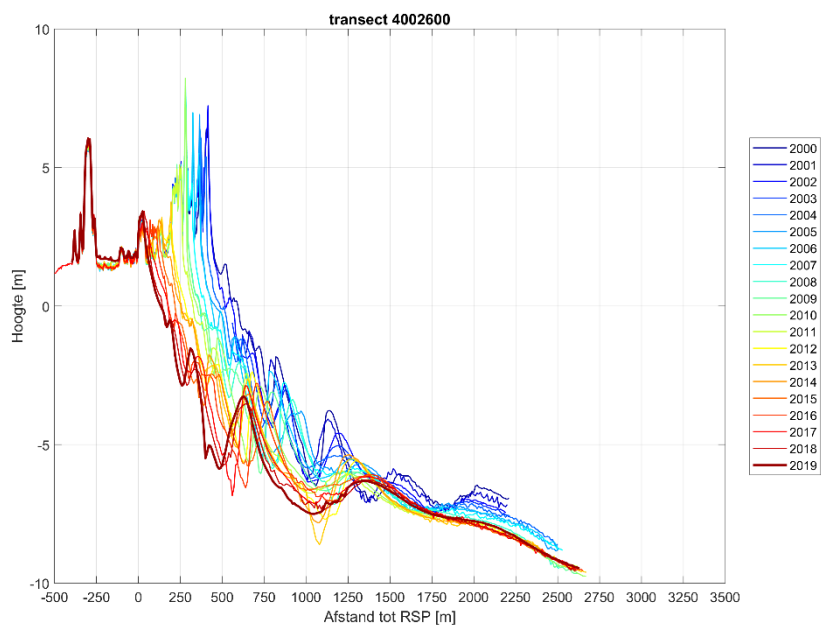
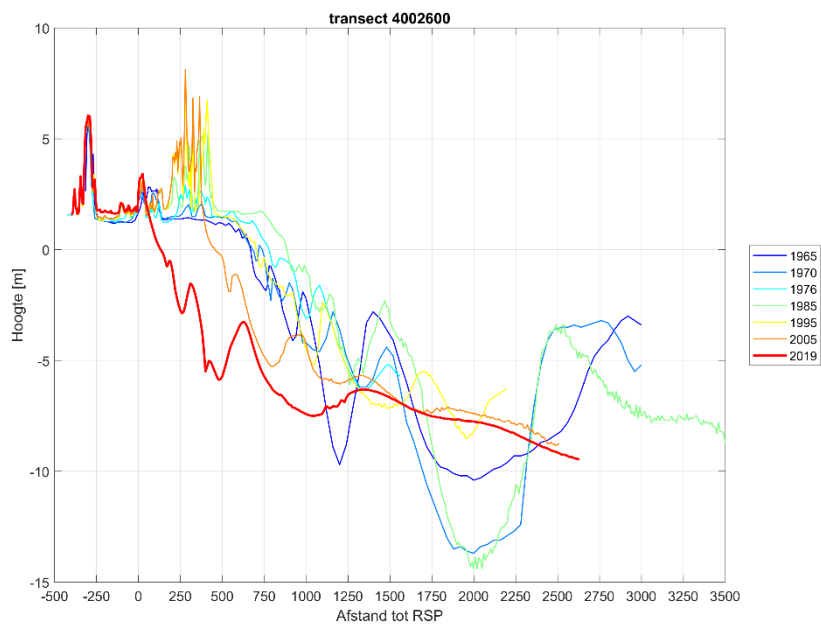
Figuur B-3: Timestack van raai 2400.



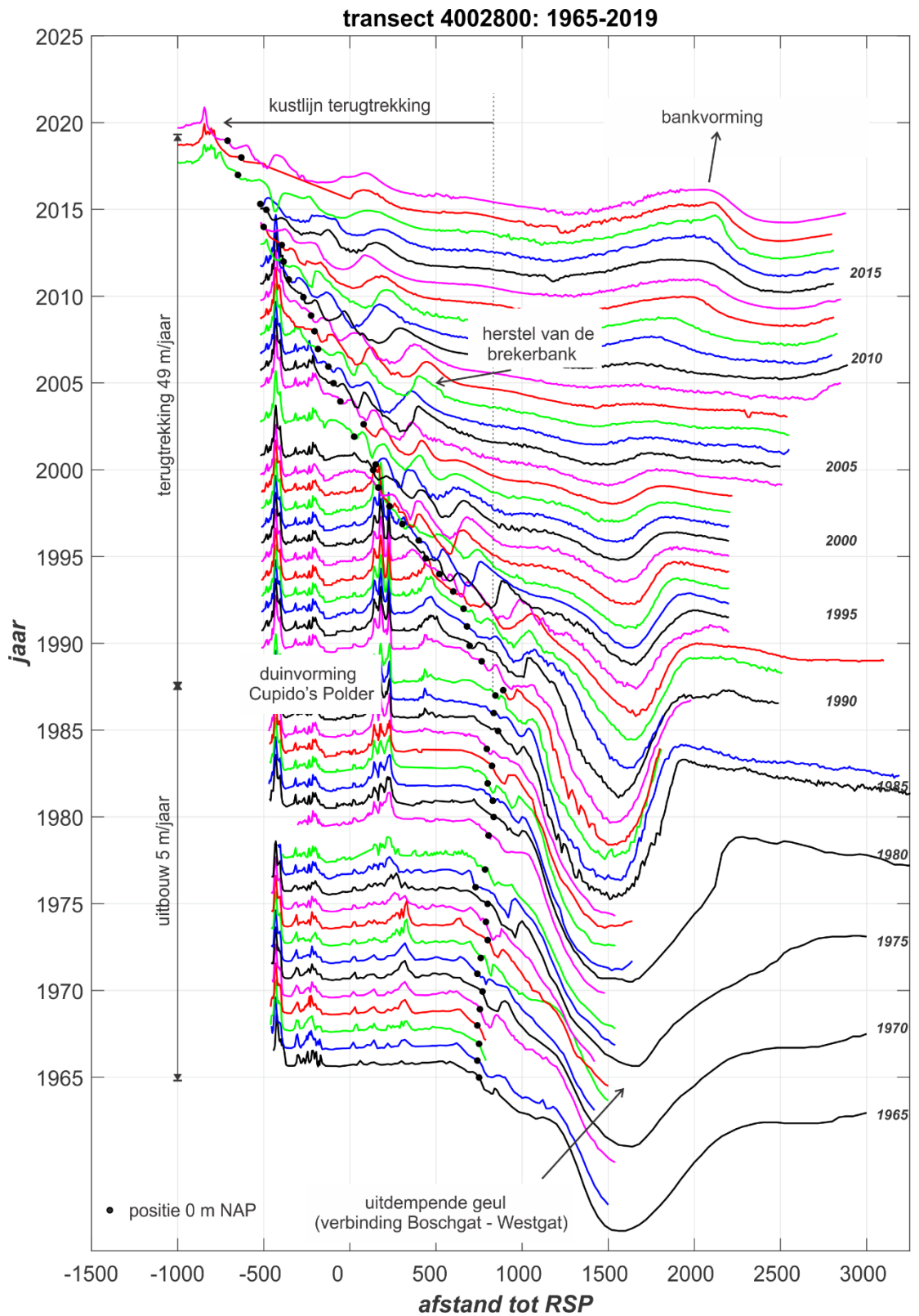
Figuur B-4: Profielontwikkeling van raai 2400 over de periode 1965-2019 in 5-jaars interval (boven) en de jaarlijkse veranderingen over de periode 2000-2019 (onder).



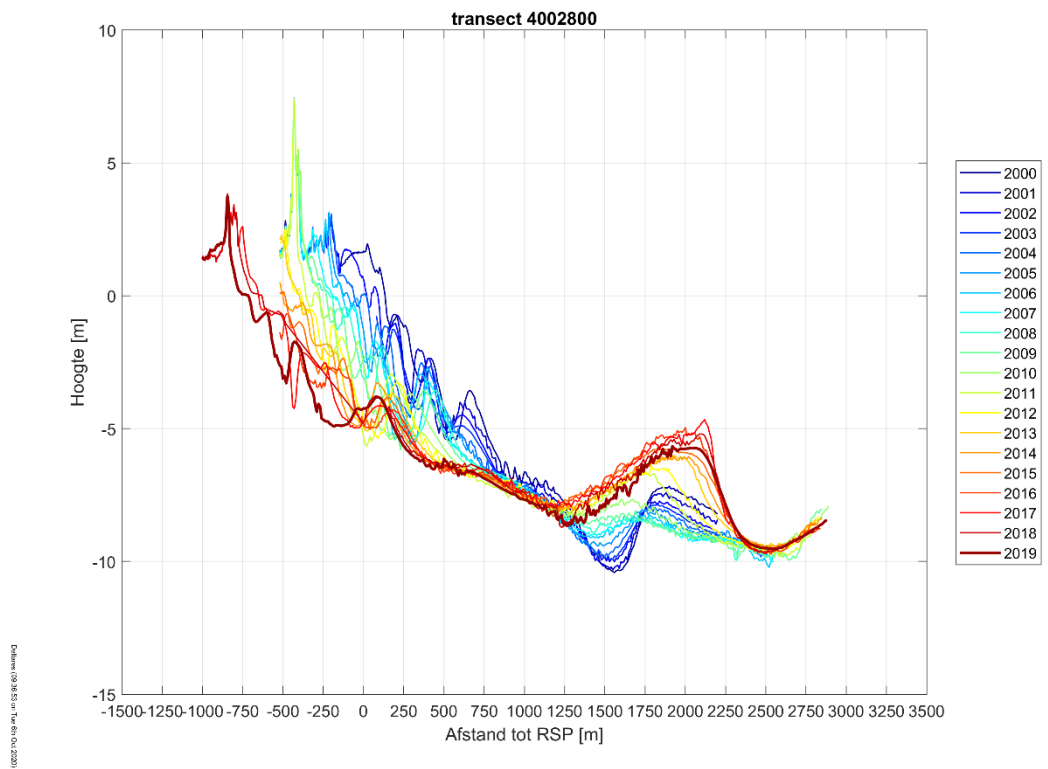
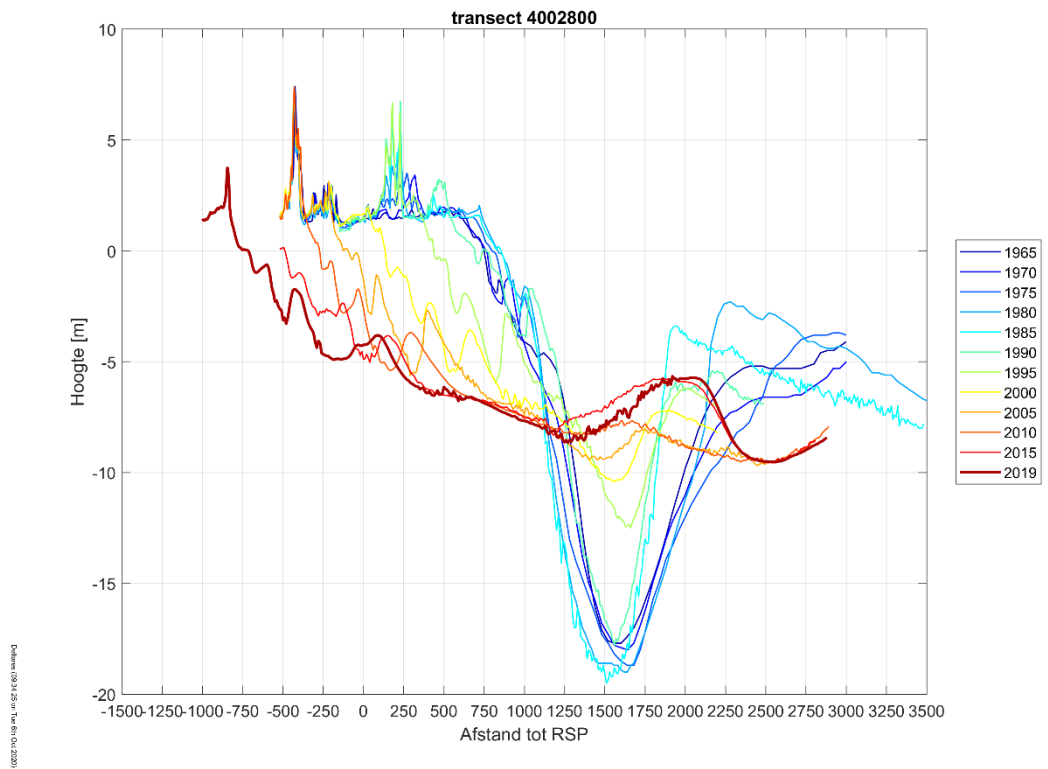
Figuur B-5: Timestack van raai 2600.



Figuur B-6: Profielontwikkeling van raai 2600 over de periode 1965-2019 in 5-jaars interval (boven) en de jaarlijkse veranderingen over de periode 2000-2019 (onder).

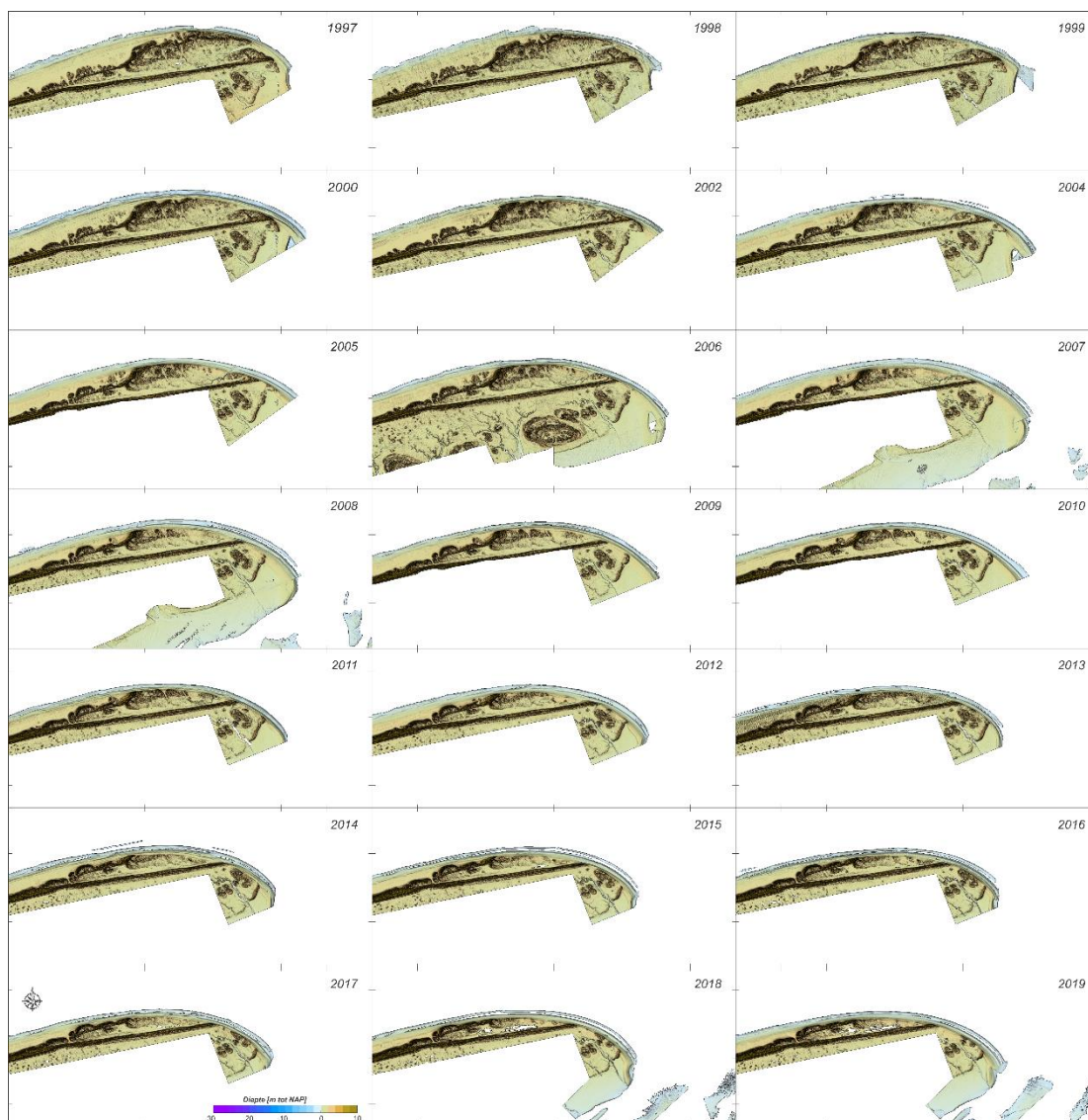


Figuur B-7: Timestack van raai 2800.

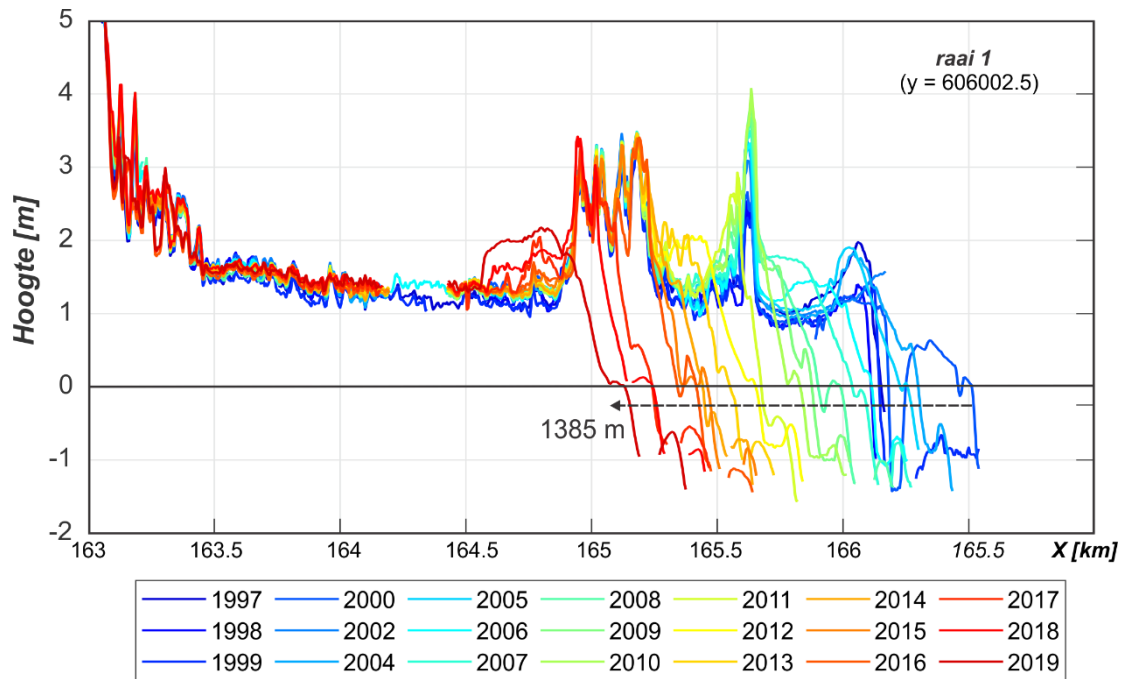


Figuur B-8: Profielontwikkeling van raai 2800 over de periode 1965-2019 in 5-jaars interval (boven) en de jaarlijkse veranderingen over de periode 2000-2019 (onder).

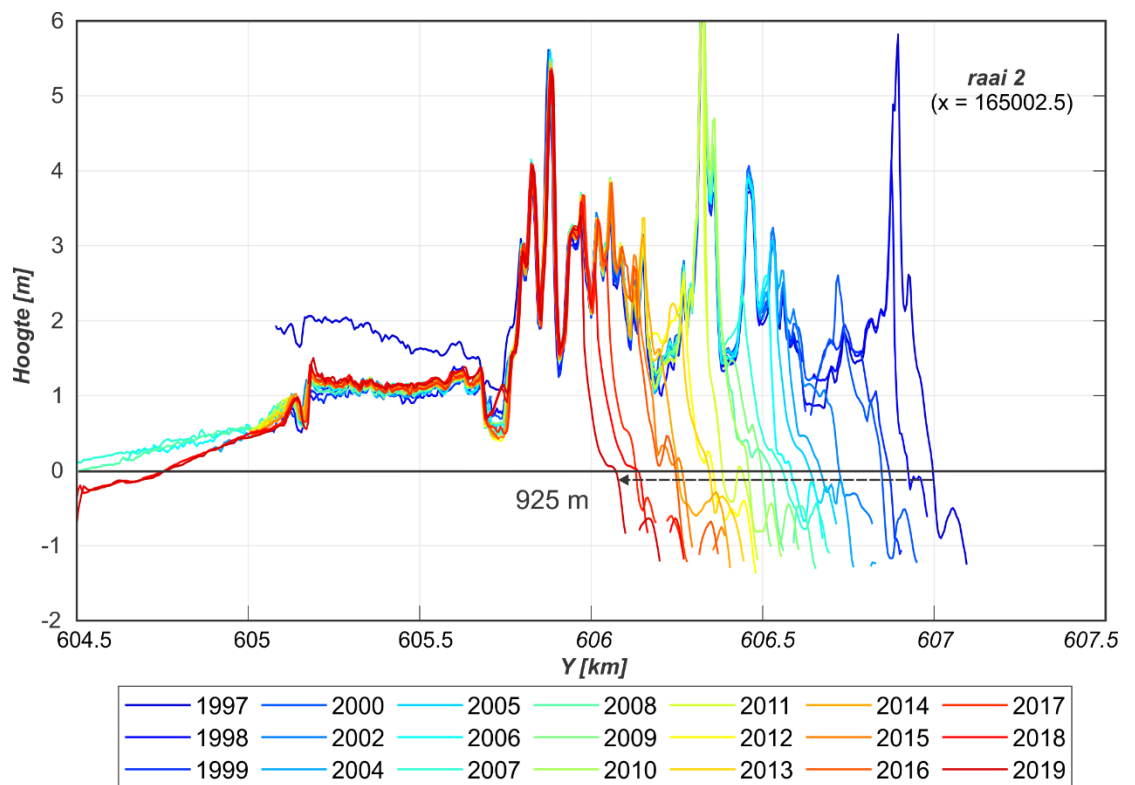
## C Kusthoogtemetingen



Figuur C-1: Een overzicht van alle beschikbare Kusthoogtemetingen voor de eilandstaart van Terschelling.

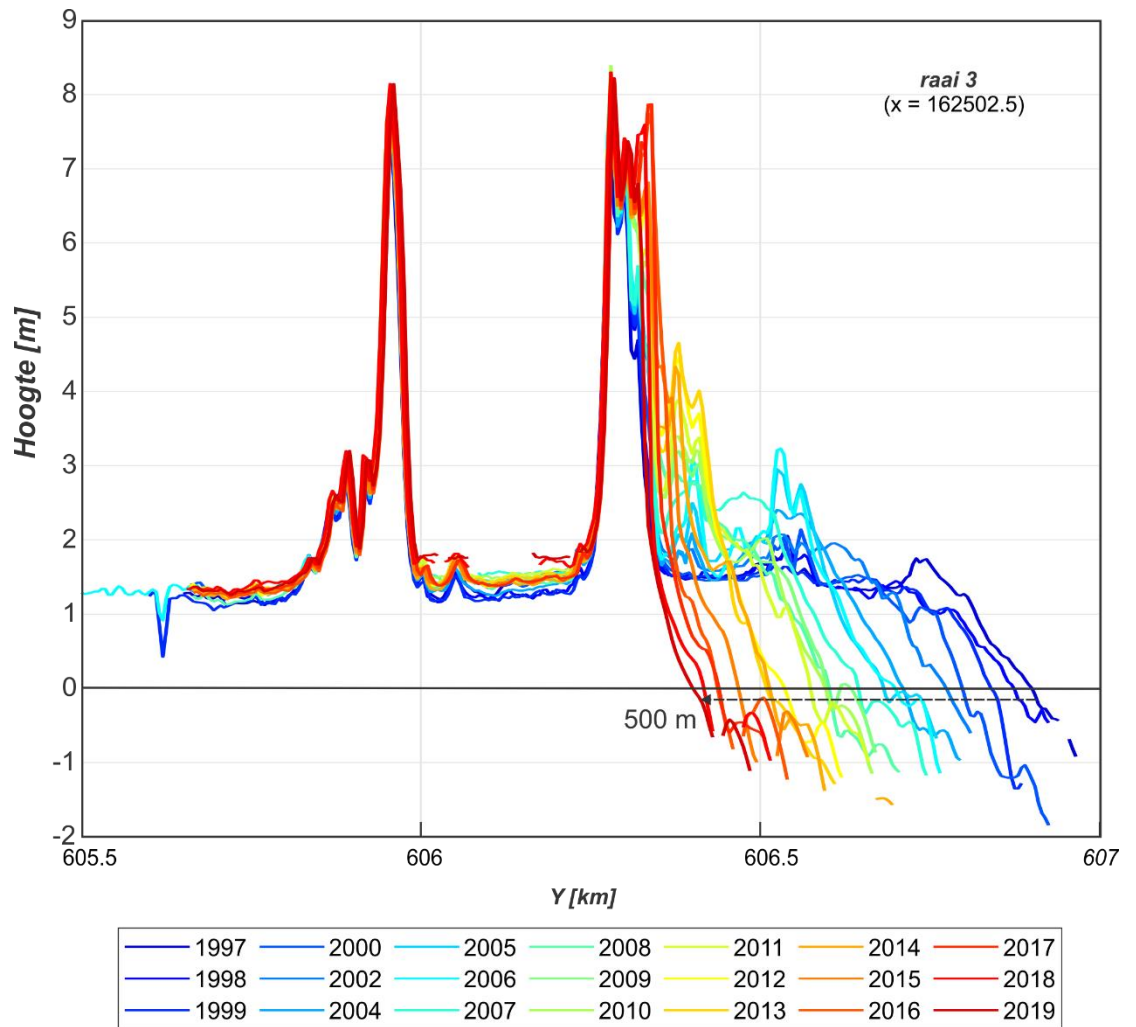


Figuur C-2: Hoogteontwikkeling van raai 1.



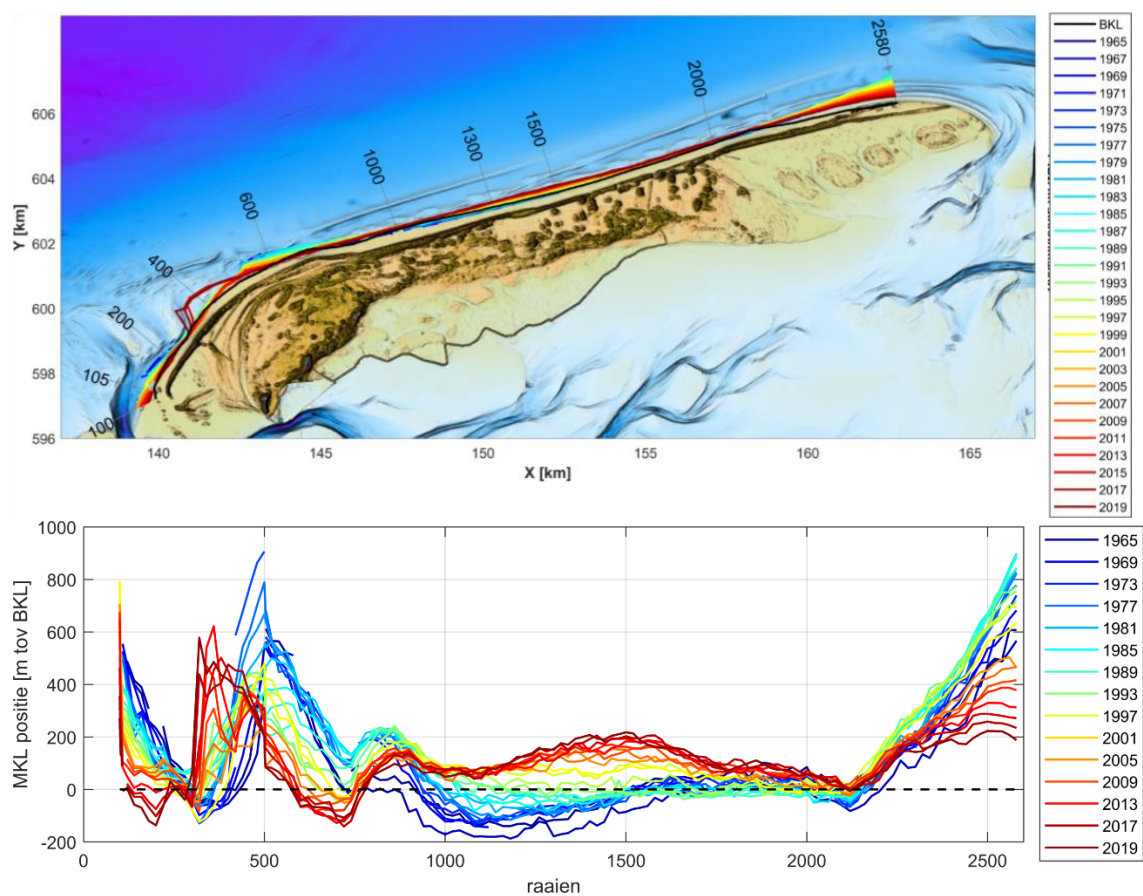
Figuur C-3: Hoogteontwikkeling van raai 2.





Figuur C-4: Hoogteontwikkeling van raai 3.

## D Verandering MKL (Terschelling)



Figuur D-1: Ontwikkeling MKL voor de periode 1965 – 2019 langs de kust van Terschelling. De BKL is weergegeven met de zwarte lijn. Uit Beheerbibliotheek Terschelling (Quataert et al. 2020).

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

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)