

# GETIJDEMEANDERS IN KOMBERGINGSGEBIED BORNDIEP

28 SEPTEMBER 2018



## Contactpersonen

**S.W. VAN TIL**  
Junior Coastal Engineer

M +31(0) 611587625  
E [sjoerd.vantil@arcadis.com](mailto:sjoerd.vantil@arcadis.com)

Arcadis Nederland B.V.  
Postbus 137  
8000 AC Zwolle  
Nederland

---

# INHOUDSOPGAVE

<b>1</b>	<b>MANAGEMENT SAMENVATTING</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUCTIE</b>	<b>7</b>
2.1	Inleiding	7
2.2	Probleemomschrijving	7
2.3	Vaargeulontwikkeling	8
2.4	Vragen en aanpak	10
2.4.1	Vragen	10
2.4.2	Aanpak en afbakening van de studie	10
2.5	Leeswijzer	12
<b>3</b>	<b>GETIJDEGEULEN</b>	<b>13</b>
3.1	Inleiding	13
3.2	Meanderende geulen	13
3.3	Vergelijking van geulen in rivieren en getijdegebieden	16
3.4	Geulclassificatie methodes	18
<b>4</b>	<b>CLASSIFICATIE GEULEN KOMBERGINGSGEBIED BORNDIEP</b>	<b>20</b>
4.1	Inleiding	20
4.2	Gegevensomschrijving	20
4.3	Bepaling geuldimensies	21
4.4	Geuldimensies Macro-schaal	26
4.5	Geuldimensies Meso-schaal	27
4.6	Ontwikkelingen per geul	37
4.7	Vloedscharen	44
4.8	Conclusies	48
<b>5</b>	<b>WATERBEWEGING</b>	<b>49</b>
5.1	Inleiding	49
5.2	Methode waterstromingen	51
5.3	Dieptegemiddelde stroomsnelheid	51

5.4	Ontwikkeling meanders	54
5.5	Secundaire stroming	56
5.5.1	Kikkertgat	56
5.5.2	Noorderspruit	58
5.5.3	Andere geulen	60
5.6	Conclusies	62
<b>6</b>	<b>CONCLUSIES</b>	<b>63</b>
6.1	Inleiding	63
6.2	Algemene ontwikkeling geuldimensies	63
6.3	Het ontstaan en het effect van vloedscharen	64
6.4	Consequenties voor het beheer	65
<b>7</b>	<b>REFERENTIES</b>	<b>66</b>
	<b>BIJLAGEN</b>	
	<b>BIJLAGE A VAKLODINGEN KAARTEN</b>	<b>68</b>
	<b>BIJLAGE B GOLFLENGTE ONTWIKKELING</b>	<b>76</b>



# 1 MANAGEMENT SAMENVATTING

## Inleiding in de problematiek

Diverse getijdegeulen in de Waddenzee worden gebruikt als vaarweg en zo nodig onderhouden op een bepaalde diepte en breedte door baggeren. Het gebruik en het benodigde onderhoud van de geulen wordt beïnvloed door morfologische veranderingen in het kombergingsgebied en van de getijdegeulen zelf. In de afgelopen decennia zijn bij de vaarweg Ameland veranderingen in de morfologie opgetreden, waardoor de bevaarbaarheid van de vaargeul in het geding kwam. Ingrepen voor het beheer van deze vaargeul hebben vervolgens ook invloed gehad op de morfologische ontwikkelingen.

In deze studie zijn twee aspecten van morfologische veranderingen en het beheer beschouwd van de vaarweg Ameland, namelijk (1) het uitbochten en daarmee verlengen van de geul en; (2) kortsluiten via vloedscharen. Daarnaast spelen (3) drempelvorming en (4) verandering (met name de afname) in het getijvolume een rol bij de veranderingen en het beheer van de vaarweg Ameland, die in deze studie niet aan de orde komen. Ook bij andere beheervraagstukken, zoals bij het Schuitengat nabij Terschelling en de Groote Siege bij Schiermonnikoog, spelen de eerste twee aspecten, het uitbochten en het kortsluiten via vloedscharen een rol.

## Wat wisten we al?

Uitbochten van geulen is nog beperkt beschreven voor situaties met getij en daarom is de gebruikte basisfysica gebaseerd op die van rivierbochten. De fysica van getijdemeanders en eb- en vloedscharen is nog niet volledig begrepen. In vergelijking met rivieren is sprake van een wezenlijk andere situatie, want bij getijdemeanders is sprake van bi-directionele stroming en dus ook sedimenttransport in twee richtingen. Het sedimenttransport in getijdemeanders kan daarbij ook beïnvloed worden door de aan- en afstroming naar en van de wadplaten. Voor het proces van kortsluiting via vloedscharen zijn alleen de denkmodellen van Van Veen over eb- en vloedschaardynamiek bekend. De informatie over eb- en vloedschaardynamiek is hierbij kwalitatief verkregen, op basis van waarnemingen en bodemveranderingen. De beschikbare gedragsmodellen missen nog een expliciete koppeling met de basale fysische mechanismen.

## Wat is geleerd in deze studie?

Op basis van waarnemingen aan de bathymetrie is gevonden dat het uitbochten van de beheerde geul Holwerd-Ameland verder doorgaat dan bij niet-beheerde geulen. In niet-beheerde geulen wordt de uitbochting begrensd doordat het beginpunt van de geul verplaatst, of een kortsluiting ontstaat. Het vaststellen van relaties tussen andere geulstatistieken (breedte, diepte en lengte) blijkt lastig. Uit de analyse van de data volgt dus “gedrag”, dat voor de gebaggerde geulen anders is dan voor natuurlijke geulen.

Numerieke modelsimulaties van de waterbeweging zijn gebruikt om inzichtelijk te maken hoe de waterbeweging bij eb- en vloed plaatsvindt in de geulbochten. In de sterker uitgebochte geulen is de waterbeweging anders dan in de ‘gewone’ geulbochten, er treedt daar een verschuiving op naar eb-dominantie. De betekenis daarvan is dat in de beheerde geulbochten het mechanisme voor de vorming van vloedscharen verdwijnt.

Naast dieptegemiddelde stroming is ook de secundaire stroming berekend, ingegeven door het idee dat dit een belangrijk proces kan zijn voor de uitbochting. Secundaire stroming is een ordegrrootte kleiner dan de ‘gewone’ stroming en blijkt niet de factor die bepalend is voor het verschil in de geulontwikkelingen. De mechanismen achter het gedrag van de geulen zijn in deze studie nog niet verklaard. Mogelijk zijn andere mechanismen, zoals de aan- en met name afstroming van de wadplaten, belangrijke factoren voor de veranderingen van de geulen.

## Wat weten we nu en hoe draagt dat bij aan het beheer?

Deze studie brengt een aanvullend kwalitatief model op de bestaande denkmodellen van Van Veen, voor de wijze waarop vloedscharen ontstaan. Het denkmodel omschrijft het splitsen van een eb- en vloedgeul, uitbochting en het herstel van de ebgeul, waarna een ebgeul met vloedschaar overblijft. Dit denkmodel helpt om de impact van het baggeren op de vloedschaarontwikkeling beter te begrijpen. Er moet rekening mee worden gehouden dat baggeren het ontstaan van nieuwe kortsluitingen en/of vloedscharen tegengaat. De consequentie hiervan is dat zo een geul steeds langer wordt. Zolang er wordt gebaggerd, is er dus geen

beperking op de mate van uitbochten. Het beleid dat is geformuleerd voor het baggeren (in de Structuurvisie Waddenzee en eerder de PKB Waddenzee) is als volgt: "...waterstaatswerken, waaronder het vaargeulonderhoud ten behoeve van de scheepvaart, ....., volgen de natuurlijke morfologische ontwikkelingen...".

*Uit deze studie komt naar voren dat het verregaande uitbochten geen natuurlijke ontwikkeling is, omdat van nature een kortsluiting zou optreden.*

### **Wat weten we nog niet en aanbevelingen voor vervolgactiviteiten**

De geuldynamiek en het baggerbezwaar dat hieruit voortkomt is het belangrijkste vraagstuk voor het vaargeulbeheer van de Waddenzee. Geuldynamiek omvat naast het uitbochten en de vorming van kortsluitingen ook eb- en vloed-schaarvorming en dynamiek met de daarbij horende drempels. Er is nog geen kwantitatief model beschikbaar voor het voorspellen van de ontwikkelingen van eb- en vloed-scharen. Het ontbreekt aan begrip over de doorslaggevendende factoren in de ontwikkeling. Bijvoorbeeld: is verandering van patronen een intrinsiek proces van eb- en vloed-scharen? Of zijn externe aandrijvende krachten van wezenlijk belang voor de overgang van het ene naar het andere patroon van geulen en hun eb- en vloed-scharen (en daarmee voor het ontstaan of verdwijnen van beheervraagstukken?) Fundamenteel begrip van basale fysische mechanismen en het gedrag is gewenst. Daarom is gericht onderzoek naar eb- en vloed-schaardynamiek à la Kustgenese 2.0 gewenst. Denk hierbij aan frequente bodemopnamen, in samenhang met metingen van stromingen en sedimenttransporten en hindcasts met een numeriek model. Door het combineren van gerichte metingen, numerieke modelsimulaties en denkmodellen van vloed-schaardynamiek is het mogelijk om de kennis van de eb- en vloed-schaardynamiek te vergoten en daarmee de voorspellingen voor het beheer van de vaargeulen in de Waddenzee te verbeteren.

## 2 INTRODUCTIE

### 2.1 Inleiding

De vaargeul tussen Holwerd en Nes vormt de reguliere verbinding tussen Ameland en het vaste land (Figuur 1). Een goede verbinding is daarom van groot belang voor de eilandbewoners en voor het toerisme. De vaargeul is echter een dynamische, meanderende geul die sedimenteert nabij Holwerd. In de afgelopen decennia is de sedimentatie in de geul significant toegenomen, wat resulteerde in een grote toename van het baggeren. Door de ontwikkeling van de bochten in de vaargeul is de vaarroute sinds 1990 circa één kilometer langer geworden. Eerdere studies (bijv. Steijn, 2005; Alkyon, 2008; Herman e.a., 2016) suggereren een relatie tussen de uitbochting van de geulen en de baggerwerkzaamheden. In dit rapport wordt deze correlatie verder uitgewerkt door de geulevolutie in en rond de vaargeul te bestuderen. De analyse van de geulontwikkeling wordt gepresenteerd op verschillende ruimtelijke schaalniveaus. In deze inleiding wordt eerst de probleemomschrijving en vervolgens de bevindingen omtrent de vaargeulontwikkeling uitgewerkt. Daarna wordt de afbakening van de studie gepresenteerd en wordt een overzicht gegeven van de vragen die met dit rapport beantwoord worden.



Figuur 1: Kaart van het kombergingsgebied van het Borndiep, inclusief de vaarroute en de wantijen. Bron van de kaart: (RWS, 2016).

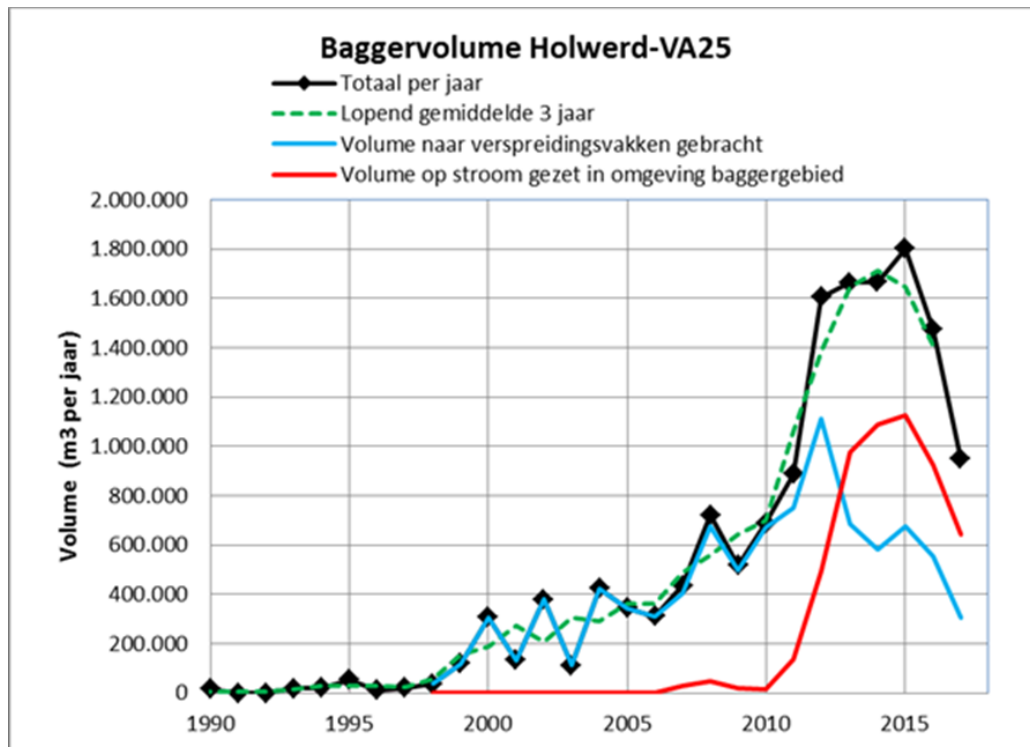
### 2.2 Probleemomschrijving

Het kombergingsgebied van het Borndiep is begrensd door het vaste land, de eilanden en twee wantijen. De veerdienst vormt de voornaamste vorm van transport tussen Ameland en het vasteland. De veerdienst maakt gebruik van de vaargeul, welke verschillende getijdegeulen volgt. In 2015 werden circa 650.000 passagiers, 79.000 voertuigen en 93.000 vrachtwagens vervoerd van en naar het eiland (Wagenborg, 2015). Ook nooddiensten, zoals de ambulance maken van de veerboot gebruik, wat benadrukt hoe belangrijk de veerdienst voor het eiland is.

Als gevolg van de sedimentatie nam de bevaarbaarheid van de geul af, wat de reden is geweest om de geul te gaan baggeren. Zoals te zien is in Figuur 2 is het volume gebaggerd materiaal in de periode 2005-2015 met een factor 4 toegenomen is (Herman e.a., 2016a). Daarnaast is de vaarroute een kilometer langer geworden sinds 1990 en dat resulteert in een extra reistijd van circa 5 minuten. In combinatie met beperkingen die optreden tijdens laagwater zorgt de langere reistijd ervoor dat vertragingen optreden. De vertraagde afvaarten van de veerboot (25,5% in 2014 (Wagenborg, 2014) en 34,9% in 2015 (Wagenborg, 2015)) zorgde voor vragen in de Tweede Kamer. De (socio-) economische impact van deze aspecten

vormen de aanleiding voor het onderzoeken van de toename van het gebaggerd volume en de lengte van de vaargeul. Het hoofddoel van dit rapport is daarom:

*Verklaar de geulontwikkeling voor de 'door baggeren beïnvloede' en 'niet-beïnvloede' getijdemeanders om de toekomstige ontwikkelingen in- en rond gebaggerde geulen beter te kunnen voorspellen.*



Figuur 2: De groei van het baggerbezuur over de jaren heen, Bron data: Rijkswaterstaat, Figuur afkomstig uit: Herman e.a., 2016, aangevuld met de data tot en met 2017.

## 2.3 Vaargeulontwikkeling

De ontwikkeling van de vaargeul is in het verleden al bestudeerd door Steijn (2005), Alkyon (2008), Cleveringa (2012) en Herman (2016b) en de hoofdconclusies van die studies zullen in deze paragraaf samengevat worden. In Steijn (2005) was het doel om de oorzaak te vinden van de toename van het gebaggerde volume en om een voorspelling te doen over de toekomstige gebaggerde volumes. De relatie tussen het doorstroomoppervlak en het volume water dat door de geul heen stroomt werd daarom naar voren gebracht. Deze relatie komt uit (Eysink, 1979), waarin het doorstroomoppervlak wordt beschreven als het geuloppervlak onder de gemiddelde laagwaterlijn en het getijdeprisma is het watervolume dat verplaatst wordt door de geul per halve getijdencyclus (Bosboom & Stive, 2015). Een vereenvoudiging van deze relatie wordt beschreven door:

$$A \propto P^b \quad 2.1$$

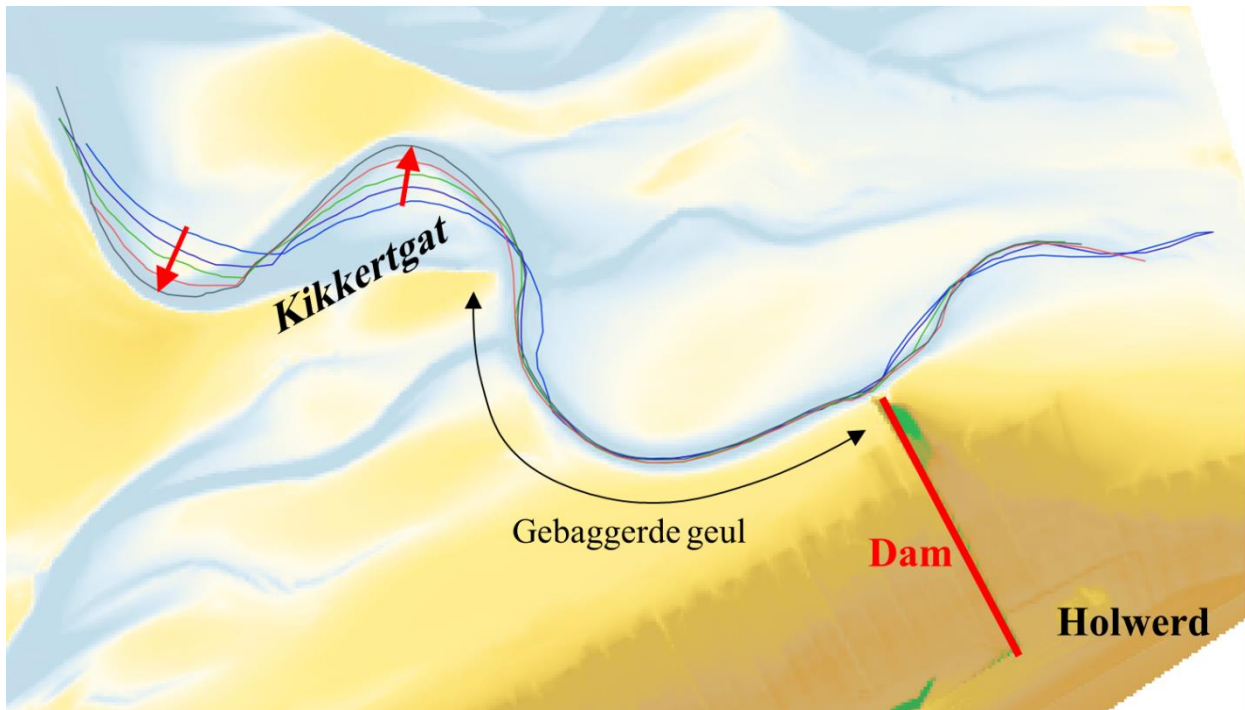
waarin  $A$  de doorstroomoppervlakte is  $P$  het getijdeprisma en  $b$  een waarde is van rond de 1. De getijgemiddelde stroomsnelheid kan een indicatie geven van de geuldimensies en vice versa. De vereenvoudigde formule

$$\bar{u} = \frac{P}{A \cdot T} \quad 2.2$$

beschrijft deze gemiddelde snelheid als verhouding tussen  $P$  en  $A$ , waarbij  $T$  is de getijdeperiode  $T$ . Als het getijdeprisma vermindert zullen de stroomsnelheden ook verminderen en wordt de breedte en diepte van de geul aangepast. Op deze manier streeft de geul naar een evenwichtstoestand tussen de getijdeprisma en het doorstroomoppervlakte. Met andere woorden, het streeft naar een bepaalde getijgemiddelde stroomsnelheid ( $\bar{u}$ ). Twee mechanismes werden in (Steijn, 2005) geïdentificeerd die de ontwikkelingen van de vaargeul nabij de veerdam beïnvloeden (zie Figuur 3). Het eerste mechanisme is de reductie van het



getijdeprisma en dit mechanisme verklaart ongeveer 1/3 van de sedimentatie in de vaargeul nabij de veerdam (zie Figuur 1). Ook is de oriëntatie van het Dantziggat veranderd, wat zorgt voor een herverdeling van het water naar het Kikkertgat en de andere geulen. Dit heeft een negatief effect op de hoeveelheid water dat door de vaargeul stroomt.



Figuur 3: De uitbochting van het meanderende Kikkertgat in de periode 1993-2016.

Het tweede mechanisme wordt geacht de resterende 2/3 van het probleem te verklaren en omvat de verplaatsing van het wantij. Een toename in de uitbochting van alle geulen zorgt voor een westwaartse verplaatsing van het wantij. Deze beweging wordt versterkt door de morfologische ontwikkeling in het Pinkegat en het verminderde getijdeprisma van het gehele kombergingsgebied van het Borndiep. In de studie van Alkyon (2008) zijn de wantijverplaatsingen over de tijd geëvalueerd. Hydrodynamische modelsimulaties zijn uitgevoerd om de locatie van het wantij te bepalen en een oostwaartse verplaatsing werd gevonden. Omdat verschillende bronnen tegenstrijdige ontwikkelingen van het wantij beschrijven, kunnen er geen uniforme conclusies getrokken worden uit de wantijverplaatsing. De morfologische analyse (Alkyon, 2008) leverde verschillende andere mechanismes op die van invloed kunnen zijn op de verkleining van het getijdeprisma.

Buiten de hierboven beschreven mechanismes wordt de sedimentatie op de wadplaten en kwelders, de veranderingen in het lokale wantij tussen de geulen Noorderkikkertgat en Zuiderkikkertgat (een overzicht van de geulnamen wordt in Figuur 11 gepresenteerd), en de scheiding van de eb- en vloedstromingen bij de eb- en vloedscharen beschreven als invloedrijke factoren op het reduceren van het getijdeprisma. De invloed van deze mechanismes op de uitbochting is echter moeilijk te bepalen.

De toename van het baggerbezwaar kan ook beïnvloed zijn door de baggerwerkzaamheden zelf. Een deel van het baggervolume wordt op stroom gezet nabij de baggerlocatie. Voor meer details omtrent het baggeren en het op stroom zetten van het baggervolume wordt verwezen naar Herman e.a. (2016) en Villars e.a. (2016).



## 2.4 Vragen en aanpak

### 2.4.1 Vragen

Waarom en hoe de getijdegeulen zich ontwikkelen in de tijd vormen de voornaamste vragen in deze studie. In het eerste deel van deze studie, *Classificatie geulen kombergingsgebied Borndiep*, wordt de lodingsdata van verschillende jaren bestudeerd om de geulontwikkeling te onderzoeken. De drie ruimteschalen die hiervoor gebruikt worden dragen bij aan het analyseren van trends en hypothesen voor het onderdeel *Waterbeweging*. De volgende vraag dient beantwoord te worden voor het onderdeel *Classificatie geulen kombergingsgebied Borndiep*:

*Vraag A: Wat zijn de trends in de ontwikkeling van de getijdegeulen die een natuurlijke uitbochtiging karakteriseren in het kombergingsgebied van het Borndiep?*

Om vraag A te specificeren zijn de volgende deelvragen opgesteld:

- a.1. *Welke geulen kunnen gebruikt worden voor het vergelijken van 'door baggeren beïnvloede' en 'niet-beïnvloede' uitbochtende geulen?*
- a.2. *Welke geuldimensie is het meest beïnvloedt door de veranderingen in het systeem?*
- a.3. *Hoe veranderen de geuldimensies in een bocht en worden deze dimensies beïnvloed door de aanwezigheid van een geulsplitsing of een vloedshaar?*
- a.4. *Hoe is de gebaggerde geul en de naastliggende geul anders dan de 'niet door baggeren beïnvloede' geulen?*

Wind, golven en stromingen veroorzaken de hydrodynamische en morfodynamische veranderingen in het kombergingsgebied. Om een indicatie te geven hoe de stromingen de uitbochtiging beïnvloeden worden modelsimulaties toegepast. In rivieren hebben de bochtstromingen een sterk driedimensionaal karakter en een circulaire waterbeweging (secundaire stroming) ontwikkelt zich (Leopold & Wolman, 1960). De invloed van de secundaire en dieptegemiddelde stromingen op de uitbochtiging zijn voor getijdemeanders in de Waddenzee nog niet geanalyseerd, wat in dit rapport gedaan wordt. De volgende vraag dient beantwoord te worden in het onderdeel *Waterbeweging* (Vraag B):

*Vraag B: Welke trends in dieptegemiddelde- en secundaire stroomsnelheden kunnen onderscheiden worden die van invloed kunnen zijn op de uitbochtiging van getijdegeulen?*

De antwoorden op de volgende deelvragen zullen vraag B helpen beantwoorden:

- b.1. *Hoe is de dieptegemiddelde stroming gerelateerd aan de veranderende geuldimensies?*
- b.2. *Hoe is de secundaire stroming gerelateerd aan de veranderende geuldimensies?*
- b.3. *Hoe zijn de getijdestromingen gerelateerd aan de geulopsplitsingen?*

### 2.4.2 Aanpak en afbakening van de studie

De meeste analyses in dit onderzoek zijn uitgevoerd in het kader van een afstudeeronderzoek (Van Til, S.W., 2017). In dit rapport worden de processen geanalyseerd die de ontwikkeling van de getijdegeulen beschrijven vanuit twee perspectieven. Eerst worden beschikbare bodemkaarten gebruikt om trends en karakteristieke dimensies van de getijdegeulen te bepalen. Vervolgens wordt een hydrodynamische modelleerstudie gebruikt om de gevonden trends te verklaren. Het model Delft3D wordt gebruikt om te zien hoe de stromingen in de geulen zich ontwikkelen door de tijd, door dit met de bathymetrie van verschillende jaren te berekenen. De twee onderdelen "*Classificatie geulen kombergingsgebied Borndiep*" en "*Waterbeweging*" worden hieronder nader toegelicht:

#### a. *Classificatie geulen kombergingsgebied Borndiep*

Classificaties van getijdegeulen zijn onder andere toegepast voor de Westerschelde (bijv. Jeuken, 2000; Winterwerp e.a., 2001). Voor de Waddenzee zijn correlaties tussen karakteristieke geulafmetingen onderzocht door Cleveringa en Oost (1999). Van Veen (1950) presenteerde een classificatie van getijdegeulen op het niveau van individuele eb- en vloedgeulen. Een generieke classificatiemethode voor de Waddenzee is nog niet beschikbaar en daarom wordt een combinatie van verschillende methodes

gebruikt om de getijdegeulen in het kombergingsgebied van het Borndiep te testen. Hieruit volgt het volgende doel voor dit deel van de studie:

*Classificeer het geulsysteem op basis van de locaties en dimensies van de geulen en vind de karakteristieke eigenschappen die een 'niet door baggeren beïnvloede' geul beschrijven.*

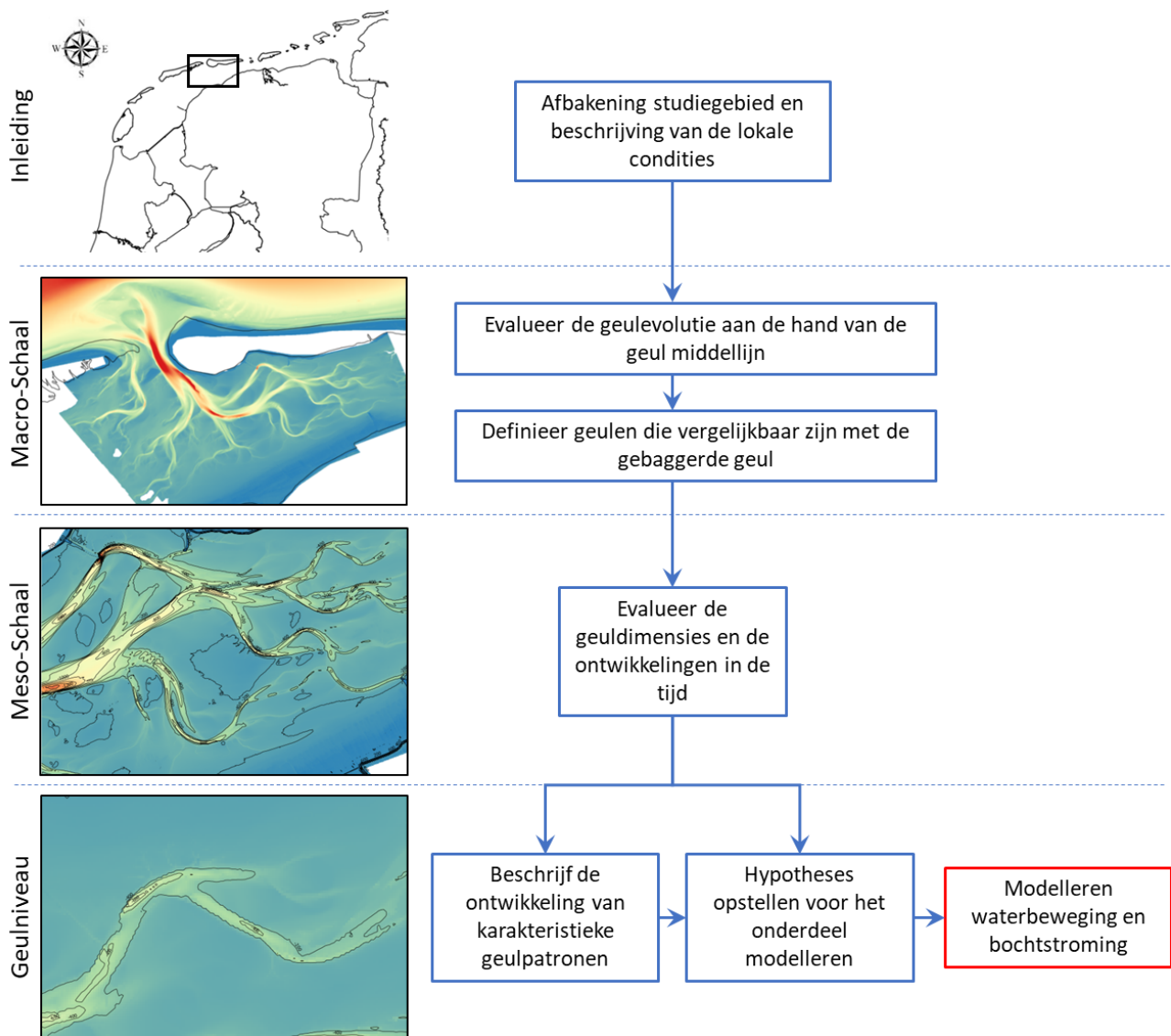
Veel verschillende processen beïnvloeden de evolutie van getijdegeulen, elk op een andere ruimteschaal (zie De Vriend en Struiksma, 1983). Op de schaal van het gehele kombergingsgebied is het getij de meest invloedrijke factor en de in- en uitvoer van sediment bepaalt de grootschalige geulontwikkeling. Individuele geulen zijn meer afhankelijk van het volume water dat elke getijdecyclus door de geul stroomt. Daarnaast splitsen de geulen op en ontstaan er vloedscharen. De lokale ontwikkelingen kunnen beter verklaard worden als meer begrip komt van deze processen. Om de geulontwikkelingen in het kombergingsgebied van het Borndiep in kaart te brengen zullen de verschillende schaalniveaus opeenvolgend van grote naar kleine schaal beschreven worden. De relevante eigenschappen zullen hiermee eenvoudiger te convergeren zijn naar de karakteristieke eigenschappen. Het overzicht in Figuur 4 beschrijft de afbakening en de aanpak van de classificatie van de getijdegeulen.

**b. Waterbeweging**

Als de karakteristieke eigenschappen in het geulensysteem bestudeerd zijn zal de invloed van de hydrodynamica op de geulevolutie bestudeerd worden. De focus van deze paragraaf is gericht op het onderscheiden van trends in de ontwikkeling van de kleinschalige geuldelen. Het doel van dit deel is daarom beschreven door:

*Bepaal de trends in de dieptegemiddelde en secundaire stroomsnelheden die gerelateerd zijn aan het ontstaan en het ontwikkelen van de getijdegeulen in het kombergingsgebied van het Borndiep.*

De invloed van de secundaire stroming wordt bestudeerd met modelsimulaties van de waterbeweging. In de 2DH simulaties wordt de dieptegemiddelde stroming berekend en wordt de secundaire stromingsintensiteit benaderd. In de 3D simulaties worden zowel de dieptegemiddelde als de secundaire stroming berekend en variaties in het bodemprofiel worden hierin meegenomen. Op basis van de modeluitkomsten wordt het effect van de stroomsnelheden op de geulmigratie bediscussieerd.



Figuur 4: Stroomschema dat de aanpak en de procedure van het convergeren van de geulclassificatie analyse weergeeft. De processen weergegeven met een blauwe rand zijn gerelateerd aan de data-analyse en met de rode rand aan het modelleren van de waterbeweging.

## 2.5 Leeswijzer

Om de evolutie van de meanderende getijdegeulen te doorgronden is een literatuurstudie gedaan die in Hoofdstuk 3 gepresenteerd wordt. In Hoofdstuk 4, *Classificatie geulen kombergingsgebied Borndiep*, worden de geuldimensies bepaald voor verschillende jaren en wordt een vergelijking gepresenteerd tussen de resultaten van de door mensen beïnvloede en de niet door mensen beïnvloede geulen. Om uitbocht van specifieke geulen te verklaren zal in Hoofdstuk 5 de zogenoemde “bochtwerking” (ontwikkeling van de stroming in bochten) geanalyseerd worden. Zowel Hoofdstuk 4 als 5 eindigen met een korte samenvatting van de conclusies en de discussiepunten. In Hoofdstuk 6 zijn de conclusies samengevoegd en worden aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek en het beheer van de geulen.

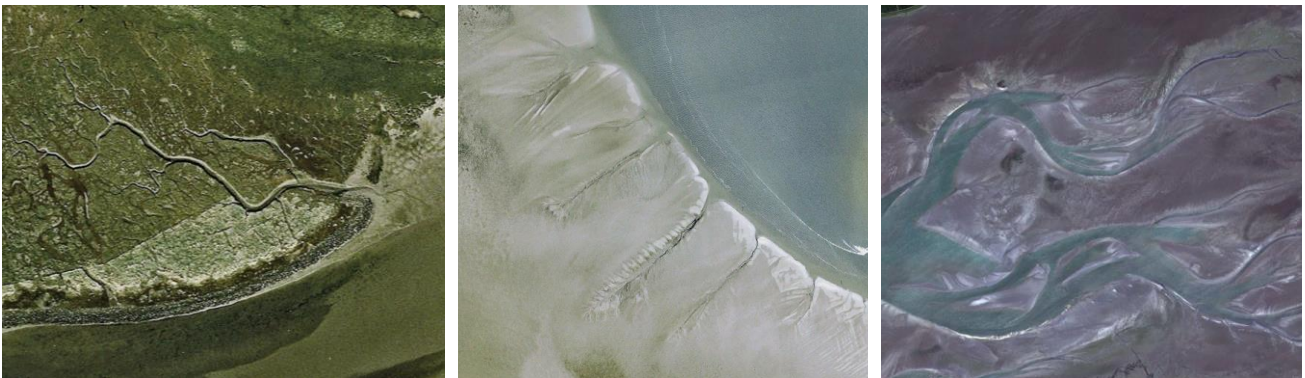
Mocht u voornamelijk geïnteresseerd zijn in de discussie en conclusies, dan wordt aangeraden om eerst de gebruikte definities in Figuur 7 en Figuur 8 te bestuderen. Daarnaast wordt in het hele rapport gebruik gemaakt van geulnamen en hun afkortingen. Een overzicht van de gehanteerde geulnaamgeving is gepresenteerd in Figuur 11.

## 3 GETIJDEGEULEN

### 3.1 Inleiding

Een meander is een synoniem voor een serie bochten in een geul. Zulke geulbochten ontstaan wanneer water door een erodeerbare omgeving stroomt. In rivieren zijn meanders in groter detail bestudeerd dan voor getijdengebieden, mogelijk vanwege de frequent optredende problematiek van erosie van waardevolle gebieden. In getijdegebieden zoals de Waddenzee kunnen meanderende patronen in drie verschillende soorten systemen gevonden worden: 1) krekens in kwelders; supragetijdengebied met vegetatie; 2) prielen op wadplaten: zandige/modderige oppervlaktes die alleen overstromen gedurende hoogwater en 3) in getijdegeulen, de stroomvoerende geulen tussen de wadplaten (zie Figuur 5). In deze studie worden alleen de getijdegeulen beschouwd.

De ontwikkelingen in elk van deze systemen zijn gerelateerd aan stroomsnelheden, bodemsamenstelling en de locatie in het kombergingsgebied. Om de evolutie van getijdemeanders beter te begrijpen, is de theorie van meanderen uitgewerkt in Paragraaf 3.2. In Paragraaf 3.3 is de toepasbaarheid van de beschikbare theorieën op een getijdemeander beschouwd. Uiteindelijk wordt dieper ingegaan op de geulclassificatie methodes die toegepast zijn op de geulen in het studiegebied.



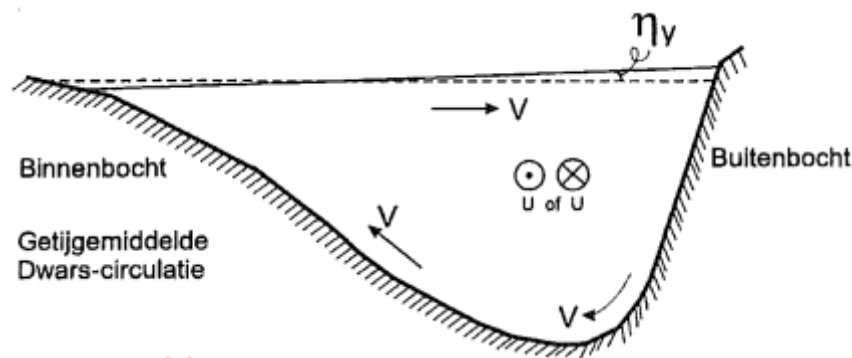
Figuur 5: V.l.n.r. krekens in kwelders (Oost Ameland), prielen op wadplaten (bij het Kikkertgat) en getijdegeulen (Noorden- en Zuiderspruit).

### 3.2 Meanderende geulen

Er is vooralsnog weinig onderzoek gedaan naar het ontstaan en ontwikkelen van meanderende geulen in de Waddenzee. Daarom worden de principes die hiervoor kunnen zorgen ontleend uit de theorie voor meanderende rivierbochten. Hiermee wordt uitgezocht hoe een getijdegeul ontwikkeld en welke van deze basisprincipes daaraan ten grondslag liggen.

#### **Uitbochten en secundaire stroming**

Aan het begin van een bocht veranderen de stromingscondities en ontstaat er een secundaire stroming. De centrifugale kracht stuwt het water naar de buitenbocht en creëert een gradiënt in het waterniveau over de breedte van de geul. Deze gradiënt resulteert in een drukgradiënt die diepte-gemiddeld de centrifugale kracht balanceert, maar niet op elk hoogte in de waterkolom. (Bosboom & Stive, 2015). Als gevolg hiervan ontstaat een circulaire waterstroming aan het wateroppervlak van de binnenbocht naar de buitenbocht bij de bodem. Die circulatie heeft de mogelijkheid om sediment te transporteren. Erosie vindt dan plaats in de buitenbocht en het geërodeerde sediment wordt afgezet in de binnenbocht (zie Figuur 6). Het resultaat is een niet-symmetrisch bodemprofiel in de transversale richting, oftewel haaks op de geul-as.



Figuur 6: Schematische weergave van het ontstaan van dwars-circulatie in een bocht. Bron figuur: Bosboom & Stive (2015).

De circulaire waterstroming is analoog aan de Coriolis-geïnduceerde circulatie. De ondiep water vergelijkingen (Shallow Water Equations, SWE's) kunnen toegepast worden om de transversale krachtenbalans op te stellen (Bosboom & Stive, 2015). Als axiaal-symmetrische stroming wordt aangenomen, dan is de krachtenbalans als volgt:

$$\frac{-u^2}{R} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} v_t \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad 3.1$$

De eerste term in deze vergelijking representeert de centrifugale kracht, die afgeleid is van  $F = \frac{mu^2}{R}$ , waarin massa  $m$  als constant beschouwd wordt,  $u$  de stroomsnelheid is en  $R$  is de radius van de stroomlijn in meters. De tweede term is het effect als gevolg van Coriolis en is beschreven als  $f = 2\omega_e \sin(\varphi)$ , waarin  $\omega_e$  de hoekverdraaiingssnelheid van de aarde is ( $72,9 \cdot 10^{-6}$  rad/s) en de breedtegraad bij Ameland ( $\varphi$ ) is circa  $53^\circ$ . De derde en vierde term zijn de drukgradiënt en de turbulente viscositeit. Hierin is  $\rho$  de waterdichtheid,  $\partial p/\partial y$  de drukgradiënt,  $v$  de transversale stroomsnelheid en  $v_t$  de turbulente viscositeit. Als stratificatie (variatie in de dichtheid) genegeerd wordt en de Coriolis kracht als verwaarloosbaar klein wordt beschouwd, dan wordt de drukgradiënt gevormd door de helling in het waterniveau ( $\partial \zeta/\partial y$ ) welke de centrifugale kracht uitbalanceert:

$$\frac{1}{\rho} \rho g \frac{\partial \zeta}{\partial y} = \frac{\bar{u}^2}{R} \quad 3.2$$

Door vergelijking 3.1 en 3.2 met elkaar te combineren wordt de vergelijking voor het bepalen van  $v$ , de circulatiestroming, verkregen.

De circulaire waterbeweging in een rivier kan sediment van de buiten- naar de binnenbocht verplaatsen. Het van buitenbocht naar binnenbocht transporteren van sediment kan twee dingen veroorzaken: aanpassing dwarsprofiel en erosie van de rand in de buitenbocht. Volgens Thorne (1978) wordt de randerosie veroorzaakt door twee mechanismes: Alluviale erosie en geomechanische instabiliteit. De consequenties van geomechanische instabiliteit wordt aangenomen klein te zijn in een omgeving die op regelmatige basis overstroomt. Daarom wordt alleen erosie als gevolg van de waterstroming beschouwd. Naast de stroming en drukgradiënten zijn er vele andere factoren die van invloed zijn op de migratie en ontwikkeling van meanders. Een overzicht van deze factoren is gepresenteerd door Leopold en Wolman (1960) en wordt hieronder beschreven.

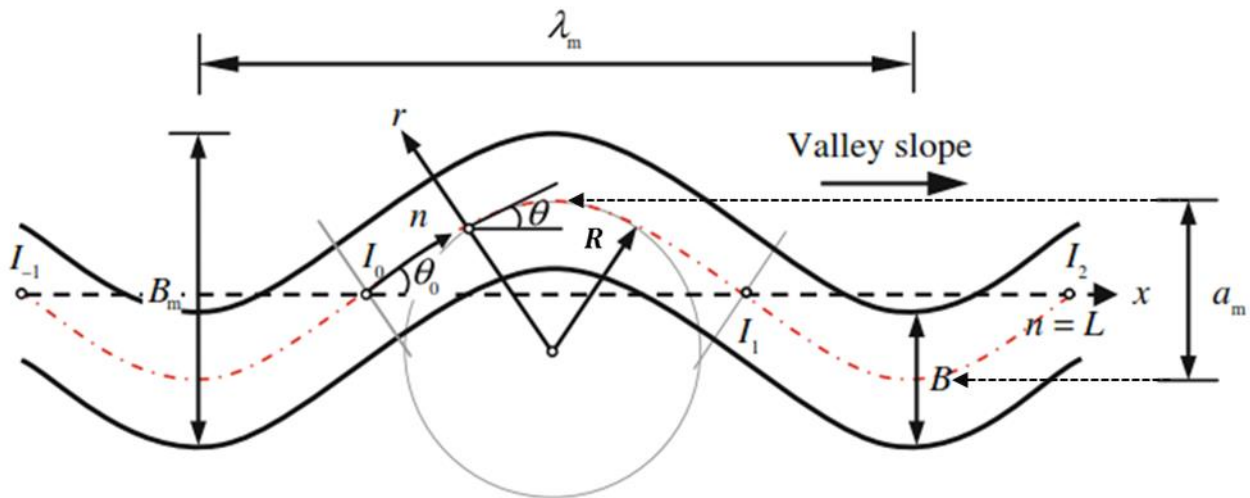
### Definities geuldimensies voor meanderende geulen

Om Vraag A te beantwoorden worden in Hoofdstuk 3 de geuldimensies geanalyseerd. Het geïdealiseerde concept van een meanderende geul van Dey (2014) wordt gebruikt voor de beschrijving van de geuldimensies. Hoewel Figuur 7 een riviergeul beschrijft, zijn de weergegeven definities ook toepasbaar op getijdemeanders.

De x-as in Figuur 7 beschrijft de as van de meander in de stroomafwaartse richting in een rectilineair coördinatenstelsel en de n-as is de geul middellijn in een curvilineair coördinatenstelsel. De omslagpunten voor de kromming worden de cross-overs genoemd, welke zijn weergegeven met  $I_{-1}$ ,  $I_0$ ,  $I_1$  en  $I_2$ . Een meander is gedefinieerd als elk segment van de geul langs de n-as dat drie cross-overs bevat (Marani et al., 2002). De hoek ten opzichte van de x-as,  $\theta$ , is maximaal bij een cross-over ( $\theta_0$ ). De golf lengte, booglengte,



bandbreedte (of meanderende breedte) en amplitude van een meander worden beschreven met  $\lambda_m$ ,  $L$  (of  $L_{arc}$ ),  $B_m$  en  $a_m$ . De bochtstraal wordt weergegeven met  $R$  en de gemiddelde doorstroombreedte is  $B$ .



Figuur 7: Geïdealiseerd concept voor een meanderende geul met daarin de definities van de geuldimensies die in dit rapport gebruikt zullen worden. Origineel figuur komt uit Dey (2014).

### Sinuositeit

In de literatuur worden deze parameters gebruikt om de ontwikkeling van een meander te beschrijven. Vaak wordt dit gedaan door te ratio's van verschillende geuldimensies te bestuderen. Eén ratio in het bijzonder is belangrijk voor de beschrijving van de meander; de sinuositeit,  $S$ . Hoe hoger de sinuositeit, hoe meer de geul meandert. Vanwege het bestuderen van getijdegeulen is sinuositeit in dit rapport beschreven als de ratio tussen de lengte van de geul langs de middellijn en de afstand tussen het begin en einde van de geul (definitie uit Rust (1978)):

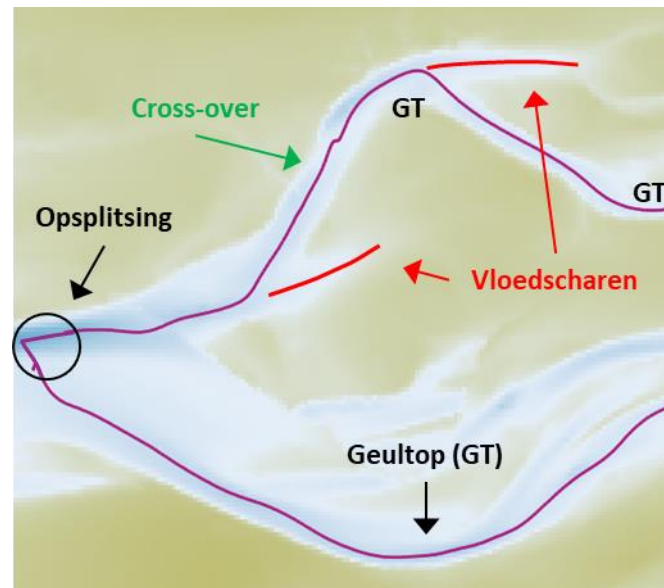
$$S = \frac{L_{arc}}{L_{abs}} \quad 3.3$$

Waarin:

$S$	=	Sinuositeit [-]
$L_{arc}$	=	De booglengte van de geul, i.e. de afstand tussen het start- en eindpunt van de geul langs de geul middellijn.
$L_{abs}$	=	De afstand tussen het begin en einde van de geul.

### Definities specifiek voor getijdemeanders

De secundaire stroming verandert van richting wanneer het water van de ene bocht in de andere stroomt. Rond de *cross-over* vindt deze inversie plaats. Op die locatie worden de stroomsnelheden gelijkmatiger over de breedte van de geul verdeeld, waarna ze in de volgende bocht van richting veranderen. Het punt in de geul waar de maximale geulkromming zich bevindt wordt in dit rapport naar gedefinieerd als *geul top*. Daarnaast kunnen geulen zich splitsen en, in het geval van een getijdegeul, *vloedscharen* of *ebscharen* ontwikkelen. Als een geul na opsplitsen geen meanderende patronen vertoont is sprake van een (vloed)schaar. Een overzicht van deze definities is gepresenteerd in Figuur 8.

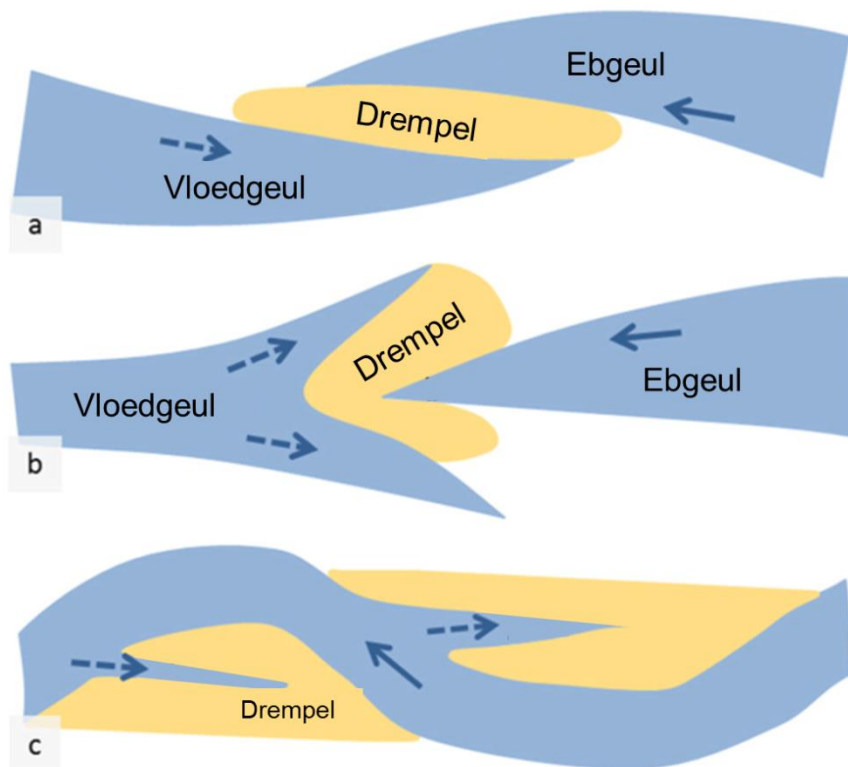


Figuur 8: Een overzicht van de definities geulsplitsing, vloed-schaar, geul top (GT) en cross-over, welke in dit rapport gebruikt zullen worden.

### 3.3 Vergelijking van geulen in rivieren en getijdegebieden

Zoals eerder beschreven zijn de meanders in rivieren en getijdegeulen wezenlijk anders, hoewel hun grootte niet noodzakelijkerwijs verschilt (Leuven et al., 2018). De belangrijkste verschillen zijn de getij-gerelateerde bi-directionele stroming en de afstroom van de wadplaten en kwelders gedurende eb. Daarnaast is in rivieren de korrelgrootte en de hoeveelheid sediment meer gerelateerd aan de afstand van de oorsprong en de erosie van het winterbed. Bij getijdegeulen in de Waddenzee hangt dit af van meerdere factoren, waaronder de sedimentbeschikbaarheid op de binnen- en buitendelta. Waar het winterbed over het algemeen een aantal keer per jaar overstroomt, overstroomt de wadplaten op de Waddenzee elke getijdeperiode, dus tweemaal per dag. Er wordt ook aangenomen dat windgolven van grotere invloed zijn dan in rivieren. Vooral tijdens hoogwater is er een grotere strijklengte beschikbaar voor golven om zich te ontwikkelen. De wadplaten en kwelders kunnen de formatie van windgolven echter ook reduceren, en de Waddeneilanden dempen ook grotendeels de golven vanuit de Noordzee. Golven beïnvloeden de erosie van de geulrand, omdat zij hun energie verliezen in de ondiepere gedeelten van de geulen en op de wadplaten.

Getijdemeanders laten in tegenstelling tot riviermeanders een patroon zien dat door Van Veen (1950) beschreven wordt als eb- en vloed-scharen (zie Figuur 8 en Figuur 9). Deze scharen worden gevormd in een bocht en zien eruit alsof de geul uit de bocht geschoten is. De scharen lijken te ontstaan op de locaties waar de bocht een maximale uitbocht bereikt heeft. Van Veen (1950) beschrijft verder dat de ontstane vloed-schaar (of geul) zelden doorbreekt. Dit komt waarschijnlijk doordat sediment getransporteerd wordt naar het einde van de geul, wat resulteert in de vorming en/of het behoud van de drempel (zie Figuur 9).



Figuur 9: Drie verschillende drempelformaties en de geul opsplitsing volgens Van Veen (1950) is gepresenteerd in a). Origineel figuur afkomstig uit: (Leuven, Kleinhans, Weisscher, & van der Vegt, 2016).

Stroming zorgt voor erosie van de geulranden, voornamelijk in de buitenbocht. Uiteindelijk zal de geul opsplitsen in een eb- en vloedgeul en daar tussenin vormt zich een drempel. De geulsplitsing wordt gezien als een consequentie van een overmatige geulbreedte (Van Veen (1950), zie ook Figuur 9.a). De bochtstraal, de sedimenteigenschappen en de stroomsnelheid zijn ook van invloed op de splitsing in eb- en vloedgeulen. Let wel op, het opsplitsen op deze manier gebeurt alleen in vrij erodeerbare bochten waar sediment transport en erosie van de geulranden voorkomt. In de Waddenzee is dit dus bij alle bochten, behalve waar steenbestortingen liggen. De vloedstromingen worden gedempt door het overstroom van de wadplaten. Met andere woorden, een groter doorstroomoppervlak zorgt voor een reductie van stroomsnelheid. En andersom zorgt een kleiner debiet, veroorzaakt door veranderingen in het bekken, ook voor een reductie van het doorstroomoppervlak (zie Paragraaf 2.3). Omdat het water van de wadplaten afstroomt naar de geulen en de stroming in de ebgeulen geconcentreerd wordt, zal hier de sterkste stroming plaatsvinden. De sterkere stroming in de ebgeulen heeft daarom een grotere potentie om sediment van de geulranden te eroderen en daardoor de uitbocht te stimuleren.

Het ontstaan en ontwikkelen van getijdegeulen is beschreven in een gedetailleerde literatuurstudie door Hughes (2012). Omtrent de geulontwikkeling wordt geconcludeerd dat geulen binnen hetzelfde systeem kunnen ontstaan vanuit verschillende processen en dat ze, afhankelijk van hoe ze ontstaan zijn, ook verschillend kunnen functioneren. Volgens Zeff (1988) kan een onderscheid gemaakt worden tussen “doorstroomgeulen” waar twee geulen aan elkaar verbonden zijn en “doodlopende geulen” die eindigen in een kwelder. Tussen deze twee geultypes zijn duidelijke verschillen gevonden omtrent de dimensies en breedte-diepte ratio. Naast de geuldimensies werd een significant verschil gevonden in de hydrodynamica van de twee typen geulen. Bij de doodlopende geulen wordt de piek stroomsnelheid gevonden vlak voor hoogwater. Volgens Zeff (1988) zijn de stromingen in doorstroomgeulen een orde groter en de piek stroomsnelheden vinden plaats bij gemiddeld tot laagwater. Dit gegeven zal meegenomen worden in de beschrijving van de verschillen in de resultaten van ‘door baggeren beïnvloede’ en ‘niet-beïnvloede’ meanders in het kombergingsgebied van het Borndiep.

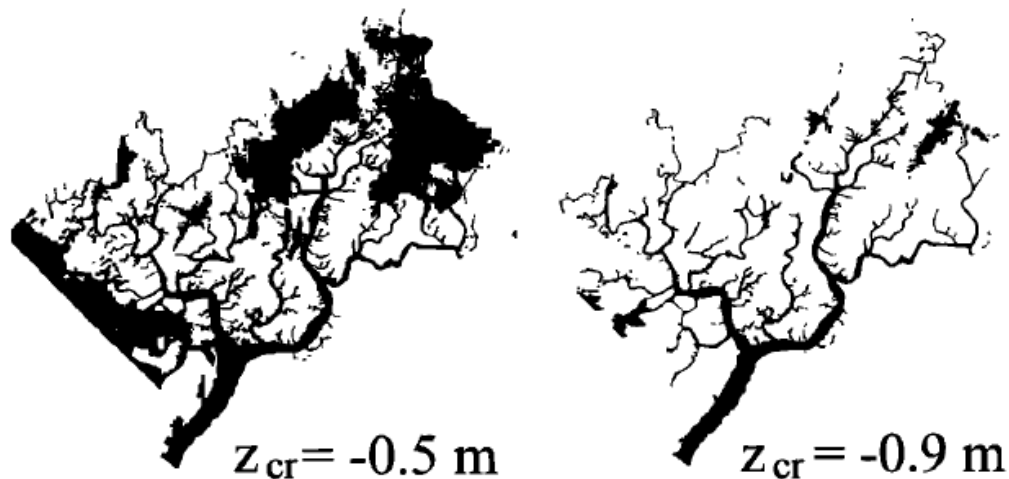
### 3.4 Geulclassificatie methodes

In dit rapport worden de geuldimensies geanalyseerd, waarbij een beter inzicht in de resultaten verkregen kan worden door de geuldimensies te classificeren. Er zijn verschillende classificatiemethodes beschikbaar voor het analyseren van getijdegeulen. Deze verschillende methodes worden gebruikt om een onderbouwde keuze te maken in de classificatie van de geulen in het kombergingsgebied van het Borndiep. Een overzicht van de methodes die gebruikt zullen worden in de analyse van de resultaten is hieronder gegeven.

Getijdegeulen in de Westerschelde zijn geclassificeerd op basis van de geulafmetingen, locatie en oriëntatie (Jeuken, 2000). Tussen de ebgeulen en vloedgeulen zijn kortsluitgeulen (connecting channels) aanwezig die onderscheiden werden in “Bar-connecting channels” (BC, drempelgeulen), “shoal-connecting channels” (CC, dwarsgeulen) en “margin channels” (MC, marginale geulen). De gehanteerde methode verdeelde het estuarium in zes gebieden en voor ieder gebied werden de dimensies van de verschillende geulen beschreven. Daarna werd het morfologische geulgedrag bestudeerd, waarna een vergelijking tussen de geulkenmerken werd gedaan.

Om het aantal geulvertakkingen met verschillende groottes te bepalen werden in Horton (1945) geulen met de kleinste dimensies geïdentificeerd als eerste-orde geulen. Twee eerste-orde geulen komen samen in een tweede-orde geul (enzovoorts). Door de verschillende geul-orde te sommeren werd het vertakkingspatroon bepaald. In de studie van Cleveringa en Oost (1999) werd deze methode voor het eerst toegepast op het Nederlandse deel van de Waddenzee. Er werd ontdekt dat het aantal geulvertakkingen logaritmisch afneemt met een reducerende geul-orde en dat de geometrie van de getijdegeulen vergelijkbaar is met een drie- tot vier-keer vertakkend netwerk. Dit betekent dat de geulen gemiddeld twee tot drie keer vertakken. In deze studie werd ook een fractale analyse toegepast om de lengte van de geulstroom omtrek te identificeren. De omtrek lengte is gerelateerd aan het onderlopen van de wadplaten en afstroom naar de geulen. Daarnaast werd gevonden dat onder de 500 m schaal de omtrek niet meer toeneemt, wat impliceert dat geulen niet meer splitsen onder deze schaal.

Een methode om automatisch de geulsplitsingen en geulgeometrie te onttrekken uit bodemkaarten is beschreven in Fagherazzi e.a. (1999). Een referentieniveau ( $z_{cr}$ ) is gebruikt waaronder de geulen gedetecteerd worden (zie Figuur 10). De verticale hoogte van elk punt wordt beschreven met een gekleurde stip, welke donkerder zijn in de diepere delen en lichter zijn in de ondiepe delen. Door de helderheid en het contrast van de grijschaal te variëren worden de geulen geïdentificeerd. Wanneer de gekleurde stippen die overblijven aan elkaar verbonden werden, konden de geulpatronen onttrokken worden zoals getoond is in Figuur 10. Met deze methode kon de bodemhelling en de geulbreedte berekend worden voor kwelders in de Venetië lagune en verschillende andere lagunes. Marani e.a. (2002) paste deze methode toe om de morfologische kenmerken van meanderende geulen in drie aparte getijdesystemen te beschrijven. Er werd gevonden dat de breedte-diepte ratio van de geulen substantieel varieerde voor elke locatie en voor verschillende condities. Golf lengtes, bochtstralen en breedte van de meanders bleken een sterk non-stationair patroon te laten zien. De lokale breedte-bochtstraal ratio varieerde daarentegen rond vrij constante waarden. Dit is anders dan wat gevonden is in rivier meanders (Leopold & Wolman, 1960). Door deze dimensies ook te analyseren voor het kombergingsgebied van het Borndiep kunnen de ratio's vergeleken worden met die van de andere omgevingen en locaties.



*Figuur 10: De methode van Fagherazzi (1999) past verschillende referentieniveaus toe waaronder de punten gedetecteerd worden. Dit figuur is afkomstig uit Fagherazzi (1999) en toont een voorbeeld van twee referentieniveaus voor een kweldersysteem.*

In Hoofdstuk 4 worden de geulen in het kombergingsgebied van het Borndiep geclassificeerd op basis van de geulvertakkingen (methode Horton, 1945). Aan de hand van de vertakkingen en de identificatie van de meanderende patronen (methode Fagherazzi e.a., 1999) wordt het kombergingsgebied opgedeeld in verschillende segmenten (methode Jeuken, 2000). Door de geuldimmersies per segment te bestuderen worden de ontwikkelingen in geuldimmersies beschreven en vergeleken met de gevonden dimensies in andere intergetijdengebieden (zoals in Marani e.a., 2002).



## 4 CLASSIFICATIE GEULEN KOMBERGINGSGBIED BORNDIEP

### 4.1 Inleiding

Classificatie van de geulen in het kombergingsgebied van het Borndiep draagt bij aan het begrijpen van natuurlijke geulontwikkeling. In Tabel 1 is een overzicht van geuleigenschappen en mechanismes gepresenteerd die in de Waddenzee aanwezig zijn. In dit Hoofdstuk zal de ontwikkeling van de diepte, de lengte, breedte en bochtstraal van de geulen geanalyseerd worden. Andere geuleigenschappen kunnen van invloed zijn op de geulevolutie, maar worden in dit rapport niet verder uitgewerkt. Het doel van deze analyse is om de karakteristieke eigenschappen en trends te vinden die een natuurlijke getijdemeander beschrijven. Het is beoogd om dit doel te bereiken door de geulontwikkelingen op de Macro-schaal, Meso-schaal en op het geulniveau te analyseren, zoals in het overzicht in Figuur 4 gepresenteerd is. De classificatie die gepresenteerd wordt in dit Hoofdstuk omvat de analyse van de geografische aspecten en is afgeleid van de methodes van Jeuken (2000) en Fagherazzi e.a. (1999).

*Tabel 1: Overzicht van de eigenschappen van een getijdegeul en processen en mechanismes die aanwezig zijn in de Waddenzee. Dit overzicht laat zien dat er veel factoren zijn die de ontwikkeling van een getijdegeul kunnen beïnvloeden.*

Geul Eigenschappen		Processen en Mechanismes	
Geul diepte	Bochtstraal	Stromingen	Wind
Geul lengte	Getijdeprisma	Sediment eigenschappen	Getijdeamplitude
Geul breedte	Geologische geschiedenis	Getijdeasymmetrie	Golven
Geul golflengte	Afmetingen kwelders	Menselijke ingrepen	
Bodemhelling	Afmetingen wadplaten		

Voordat de resultaten van de geulontwikkeling gepresenteerd worden zullen eerst in Paragraaf 4.2 de gegevens beschreven worden die als input dienen voor de analyse. Vervolgens is de methode waarop de geuldimensies bepaald zijn uitgewerkt in Paragraaf 4.3. Vervolgens is in Paragrafen 4.4, 4.5 en 4.6 de analyse van de resultaten uitgewerkt volgens de verschillende schaalniveaus zoals die in Figuur 4 gepresenteerd zijn. Voordat een overzicht van de conclusies wordt gegeven in Paragraaf 4.8, zullen in Paragraaf 4.7 nog andere interessante bevindingen uitgewerkt worden omtrent de vloed-schaarontwikkeling in het studiegebied.

### 4.2 Gegevensomschrijving

De geulen worden geclassificeerd aan de hand van hun dimensies welke verkregen worden vanuit de Vaklodings data. Deze dataset van Rijkswaterstaat bestaat uit bodemkaarten van de Nederlandse kustgebieden. Vanaf 1987 worden de Vaklodings-data met een interval van 6 jaar gemeten voor de Nederlandse Waddenzee (Elias & Wang, 2013). Rijkswaterstaat verwerkt, corrigeert en interpoleert de data naar een 20 x 20 m raster. De geïnterpoleerde datasets worden vervolgens openbaar gemaakt als lodingsvak met een oppervlakte van 10 x 12,5 km. Voor 1987 waren alleen hard-copy bodemkaarten beschikbaar en deze zijn gedigitaliseerd met een maximale resolutie van 100 x 100 m. Oost (1995) reconstrueerde historische bodemkaarten van het Friese Zeegat en deze zullen gebruikt worden in de evaluatie van de resultaten. De aanvullende 2016-data is gemeten met echosounders, maar heeft een grotere resolutie (10 x 10 m). Het is namelijk een extra dataset die specifiek ingemeten is voor de analyse van de sedimentatieproblemen in de vaarweg voor Holwerd. Omdat het studiegebied bestaat uit verschillende Vaklodings-cellen van 10 x 12,5 km, zijn de relevante cellen samengevoegd om één bodemkaart van het gebied per jaar te vormen. Er wordt aangenomen dat de data representatief is voor het beoogde jaar. De meetfout in de Vaklodings-data is om verschillende redenen moeilijk te bepalen (Elias en Wang, 2013). Om te beginnen zijn verschillende meettechnieken gebruikt en samengevoegd om de Vaklodings te vormen. De overgang tussen de datasets in dezelfde Vaklodings-cel en de verschillende

methodes voor de waterstandscorrectie kan meetfouten veroorzaken. De zichtbare verschuivingen in de data zullen (zie hiervoor 7Bijlage A) worden meegenomen in de analyse van de geuldimensies. De jaren die geëvalueerd worden in dit rapport en hun resolutie zijn weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2: Een overzicht van de beschikbare data en de ruimtelijke resolutie van de gebruikte bodemkaarten.

Jaar	Data resolutie [m x m]
1971	100 x 100
1975	100 x 100
1981	100 x 100
1989	20 x 20
1993	20 x 20
1999	20 x 20
2005	20 x 20
2011	20 x 20
2016	10 x 10

### 4.3 Bepaling geuldimensies

Zoals beschreven is in Paragraaf 2.4 wordt de ontwikkeling van de getijdegeulen geëvalueerd voor drie detailniveaus. Om de mate van uitbochtiging te vinden, worden de geulmiddellijnen bepaald en geanalyseerd. Vervolgens worden de geulen die vergelijkbaar zijn met de Vaarweg Ameland bestudeerd. Uiteindelijk wordt de scope verkleind door uit te zoeken hoe bepaalde geulsegmenten ontstaan en ontwikkelen. De breedte, bodemniveau, lengte en bochtstraal van de geul geanalyseerd om relaties met het ontstaan en ontwikkelen van een meander en/of geul splitsing.

De eerste stap in het bepalen van deze dimensies is het bepalen van de geul middellijnen. Fagherazzi e.a. (1999) beschreef een methode om automatisch een geulnetwerk te onttrekken, gebaseerd op een digitale bodemkaart. Een soortgelijke methode is beschikbaar in Quantum GIS (in het vervolg: QGIS). Omwille van de tijd zullen in plaats van het reproduceren van de methodes van Fagherazzi (1999) de QGIS modellen gebruikt worden. QGIS is een open source Geographical Information System (GIS) en beschikt over verschillende middelen om geografische data te analyseren. Deze middelen, 'modellen' genoemd in QGIS documentatie, zijn ontwikkeld met de programmeertaal Python. Met Python zijn relevante QGIS modellen gekoppeld om de extractie van de dimensies te automatiseren. Welke QGIS modellen gebruikt zijn, de principes waarop de modellen gebaseerd zijn en de manier waarop ze toegepast zijn op het kombergingsgebied van Borndiep worden hieronder beschreven.

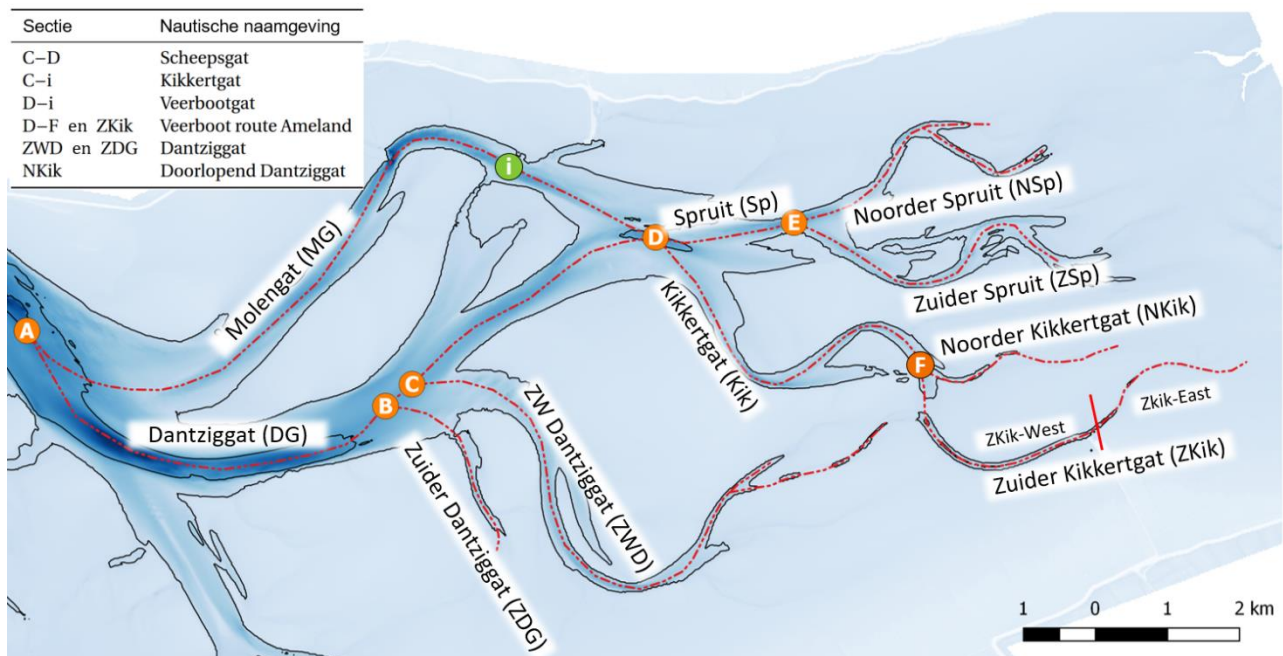
De verschillende modellen zijn toegepast op de Vaklodingen-data. Deze zijn samengevoegd tot een geografische kaart die het hele studiegebied overlapt, waarna dit herhaald is voor ieder jaar dat gepresenteerd is in Tabel 2. Vervolgens zijn drie QGIS modellen gecombineerd om automatisch de geul middellijnen te onttrekken:

1. *Fill Sinks*: (Data leemtes opvullen) Een leemte in data wordt geïdentificeerd als de helling in de bodem tussen twee cellen groter is dan 0,01 graden. Datapunten die geïdentificeerd zijn als *Sinks* worden omgeschreven naar Not-a-Number (NaN) waardes, standaard weergegeven met -999.
2. *Catchment Area*: (Stroomgebied) Dit model wordt gebruikt om de NaN datapunten lineair te interpoleren. De uitkomst van dit model is een GeoTiff bestand, wat een *Tagged Image File* is waarin informatie van het bodemniveau inbegrepen is in de vorm van een grijsschaal (0 – 400.000; wit – zwart). Het bereik van de grijsschaal heeft een grotere variatie dan de metrische data, wat het mogelijk maakt om aan de hand van een kleurschaal de geulen te detecteren. Het interpoleren van de NaN-waardes voorkomt dat het

Channel Network-model alleen de extreme waardes detecteert, wat zorgt voor een grote onnauwkeurigheid zorgt.

3. **Channel Network:** (Geul netwerk) Dit model combineert de uitkomst van de vorige twee modellen en detecteert alleen de datapunten onder een vooraf gespecificeerde grenswaarde. Alle datapunten met een grijschaal waarde onder 50.000 (gekozen op basis van expert judgement) worden gedetecteerd door het model. Door een minimale segmentlengte van 10 verbonden datapunten te gebruiken worden doorlopende lijnen geconstrueerd tussen de gedetecteerde punten.

Omdat deze modellen ontwikkeld zijn voor gebieden waar grotere en uni-directionele gradiënten in de bodemdata aanwezig zijn (stroomgebieden in heuvels en bergen), ontstonden er een aantal moeilijkheden omtrent de nauwkeurigheid van het resultaat. Ieder jaar liet een andere variatie in de grijschaal zien, waardoor de grenswaarde telkens uit een ander percentage van het totale bereik bestond. Omdat de grenswaarde niet gedefinieerd kan worden als percentage van het hele bereik, is gekozen om een vaste waarde van 50.000 te gebruiken en om vervolgens handmatig de ontstane ruis te reduceren. Ruis is gedefinieerd als de lijnsegmenten die niet bijdragen aan de beschrijving van de geulmiddellijn. De grootste ruisreductie is verkregen door het kombergingsgebied te verdelen in kleinere gebieden. Op basis van de locatie, oorsprong en de geul splitsingslocaties zijn deze secties gedefinieerd. Figuur 11 geeft een overzicht van de geulen weer en iedere benoemde geul omvat een gebied. De benaming van de geulen zal in de rest van dit rapport gebruikt worden om te refereren naar de geulen. De geulmiddellijnen worden bepaald voor elk jaar met data en voor elk gebied. Het reduceren van de ruis in het geulen netwerk wordt vervolgens handmatig in vier stappen uitgevoerd: 1) de uitschieters worden handmatig verwijderd door het gecreëerde netwerk over de bodemkaarten heen te leggen; 2) geulsecties met een bodemniveau hoger dan -1 m+NAP worden verwijderd; 3) lijnstukken die niet verbonden zijn worden samengevoegd door extra punten te introduceren en 4) de begin- en eindpunten van de geulen van verschillende gebieden worden verbonden, zodat een ononderbroken lijn ontstaat tussen twee geulen. Na deze aanpassingen zijn er nog steeds opsplitsingen en vloedscharen aanwezig. Voor het automatisch onttrekken van de breedte, bodemniveau en lengte dient één middellijn gekozen te worden. Daarom is steeds het langste ononderbroken lijnsegment gebruikt in de analyse en de andere (mogelijk interessante) geulen worden niet gebruikt. Voor een voorbeeld van een onbewerkt modelresultaat en de methode voor de ruisreductie wordt verwezen naar Van Til (2017).

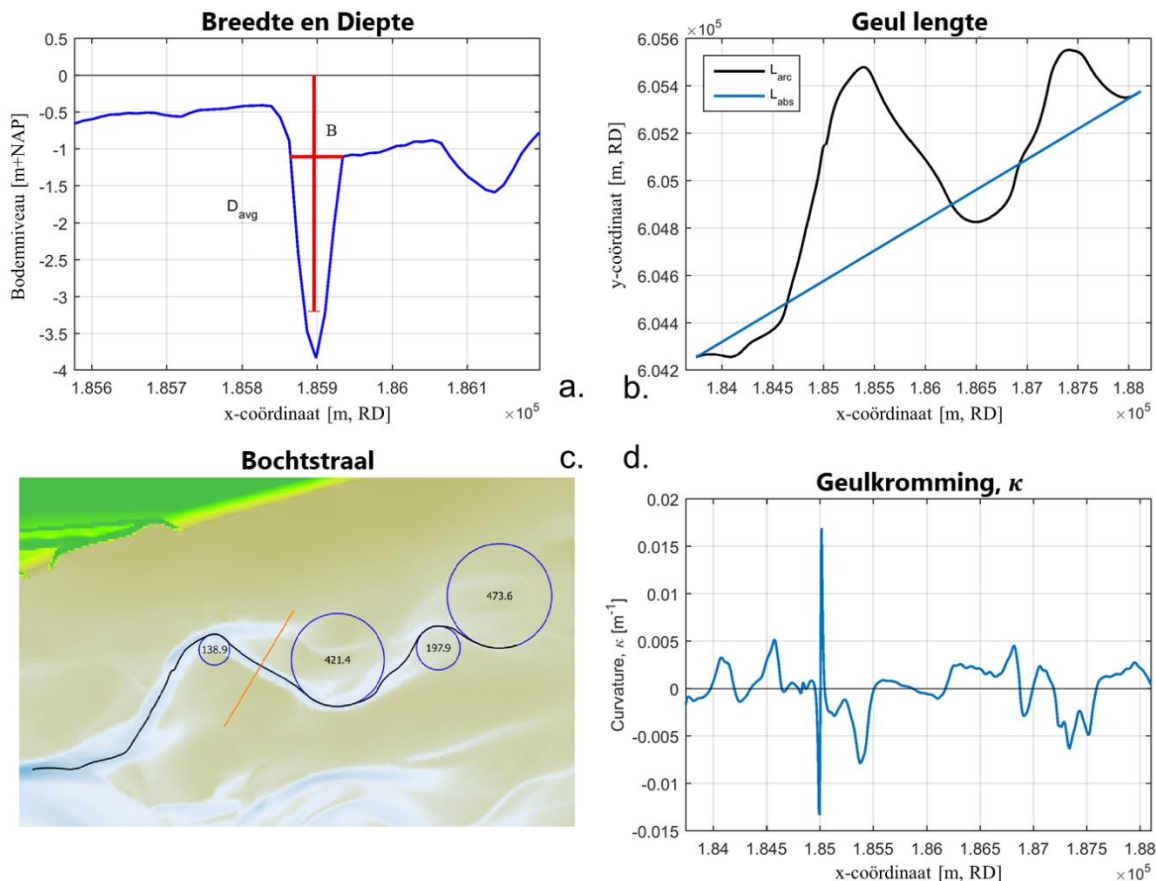


Figuur 11: Overzicht van de bestudeerde geulen in het kombergingsgebied van Borndiep met de naamgeving en afkortingen. De legenda presenteert de nautische naamgeving (Waddenzee, 2008) welke verschilt van de gekozen namen in dit rapport. Zuiderkikkertgat wordt gebaggerd ten westen van de veerdam en omdat het oostelijke deel niet gebaggerd wordt is een onderscheid gemaakt tussen Zuiderkikkertgat-west en Zuiderkikkertgat-oost. Verder is het Dantziggat gedefinieerd als de zuidelijke geulsectie tussen punten A en D.

Omdat geen interpolatiemethode is toegepast om het bodemniveau in het midden van de cellen te bepalen bestaat het onttrokken netwerk uit een onregelmatig patroon. Voor het bepalen van de kromming en de geullengte is een vloeiende middellijn nodig. Daarom is een eendimensionale Gaussian filter toegepast om de middellijn voor verdere analyse toepasbaar te maken. Het eendimensionale filteren voor de x- en y-coördinaten is beschreven door:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \tag{4.1}$$

waarin  $\sigma$  de standaarddeviatie,  $\sigma^2$  de variantie en  $x$  het x- of y-coördinaat van een punt langs de geul is. Voor het filteren wordt een 4-punts window gebruikt. Vanwege verschillende resoluties in de datasets (zie Tabel 2) varieert de afstand tussen de datapunten tussen de 9 en 20 meter. Daarom geeft de  $\sigma$  een hoeveelheid datapunten weer in plaats van een afstand. Door verschillende  $\sigma$ -waarden te gebruiken is gevonden dat een relatief hoge  $\sigma = 4$  (data punten) nodig is voor de meest vloeiende lijn. Voor sommige geulen kan een kleinere  $\sigma$  gebruikt worden, maar voor de uniformiteit van de resultaten is overal dezelfde standaarddeviatie toegepast. Deze variantie zorgt voor een reductie van de geullengte met 20 tot 80 m en dat bedraagt circa 5% van de totale geul booglength. Voor het bepalen van de geulbreedte en bodemniveau zijn dwarsdoorsnedes langs de geul gedefinieerd. De gekozen breedte van de doorsnede is 3000 m, omdat dit de gehele geulbreedte voor de secundaire en tertiaire geulen overlapt (voor geulordes, zie Paragraaf 3.4). Waar de doorsnede niet de volledige breedte van de geul overlapt, werd de doorsnede niet meegenomen in de analyse. Er is gekozen om de dwarsdoorsnedes te evalueren iedere (ca.) 40 m langs de geul. Deze waarde is gekozen omdat de resolutie gemiddeld 20 x 20 m is, waardoor een kleiner interval niet voor betere resultaten zal zorgen.



Figuur 12: Plots a en b presenteren de bepaling van de geulbreedte ( $B$ ) en het gemiddelde bodemniveau ( $D_{avg}$ ),  $L_{boog}$  en  $L_{abs}$ . Plots c en d geven een voorbeeld weer van de gefitte bochtstralen (in meters) en de kromming langs de geul. De locatie van de gebruikte dwarsdoorsnede in plots a en b is gevisualiseerd in plot c met een oranje lijn. In plot d komt naar voren dat de kleinste onregelmatigheid in de geul een uitschieter kan veroorzaken. Daarom is de bochtstraal alleen bepaald in de geultoppen.



Met de dwarsdoorsnedes kunnen de breedte en het bodemniveau berekend worden. Voor het bepalen van de breedte zijn de onderstaande voorwaarden gebruikt:

- Alleen geuldoorsnedes waarbij het bodemniveau lager dan -1 m+NAP is (definitie van een geul), zal gebruikt worden in de analyse.
- Voor iedere meter langs de dwarsdoorsnede wordt het bodemniveau bepaald dat resulteert in 3.000 datapunten per dwarsdoorsnede.
- Vanwege de 20 x 20 m dataresolutie zijn er sprongen zichtbaar (vlakke stukken) in het bodemniveau langs de doorsnede. Om dit te reduceren is het middelste datapunt in een vlak stuk bepaald en de twee punten daarbuiten zijn verwijderd.
- Lineaire interpolatie is vervolgens toegepast om op iedere centimeter in de verticaal een waarde te hebben.
- Het bodemniveau wordt in het midden van de dwarsdoorsnede (op  $x = 1.500$  m) bepaald. De breedte is bepaald voor iedere centimeter in de verticaal. Om te voorkomen dat kleine onzuiverheden in het bodemprofiel gedetecteerd worden, is de onderste 10% van het diepste punt niet meegenomen in de berekening.
- De eerste afgeleide van  $B(z)$  is berekend om een snelle verbreding van de geul te detecteren. Kleine afwijkingen in de bodem worden eruit gefilterd door een grenswaarde van 50 m/m op de eerste afgeleide toe te passen. Dit betekent dat de breedte bepaald wordt op de locatie waar de geulbreedte met meer dan 50 m toeneemt. Op deze manier wordt alleen het diepste gedeelte van de geul gebruikt in de bepaling van de breedte en het bodemniveau.
- Als het bodemniveau in het midden van de geul hoger is dan -1 m+NAP, dan is de middellijn niet in het midden gedefinieerd. In dat geval worden de breedte en het bodemniveau bepaald op de locatie die het dichtst bij het midden ligt en een bodemniveau lager dan -1 m+NAP heeft. De maximale diepte voor die gevonden locatie wordt dan gebruikt voor het bepalen van de breedte en het bodemniveau.

Het bodemniveau van de geul is gedefinieerd als het gemiddelde bodemniveau (in m+NAP) op dezelfde locatie waar ook de breedte bepaald is (zie Figuur 12). Sinuositeit (vergelijking 3.3) beschrijft of de meanderende geullengte toeneemt in vergelijking met de absolute lengte. De gemiddelde sinuositeit wordt hier gebruikt, welke gedefinieerd is als de totale lengte langs de geulmiddellijn gedeeld door de absolute lengte van begin tot eindpunt. Om de mate van meanderen te bestuderen worden de kromming en de bochtstraal berekend. Vanwege onregelmatigheden in de data presenteert het onttrokken netwerk niet altijd duidelijke meanderende patronen. Daarom wordt de gemiddelde sinuositeit gebruikt. Dit was ook de reden waarom alleen de bochtstraal berekend is voor de geulen die meanderende patronen laten zien en van de geulen die aanzienlijke veranderingen in de tijd ondervinden. De kromming is bepaald aan de hand van Kreyszig (1991):

$$\kappa = \frac{d\theta}{dn} \quad 4.2$$

waarin  $\theta$  de hoekverdraaiing en  $n$  de afstand langs de geul middellijn is (zie definities in Figuur 7). De bochtstraal is berekend door de inverse te nemen van de absolute kromming:

$$R \equiv \frac{1}{|\kappa|} \quad 4.3$$

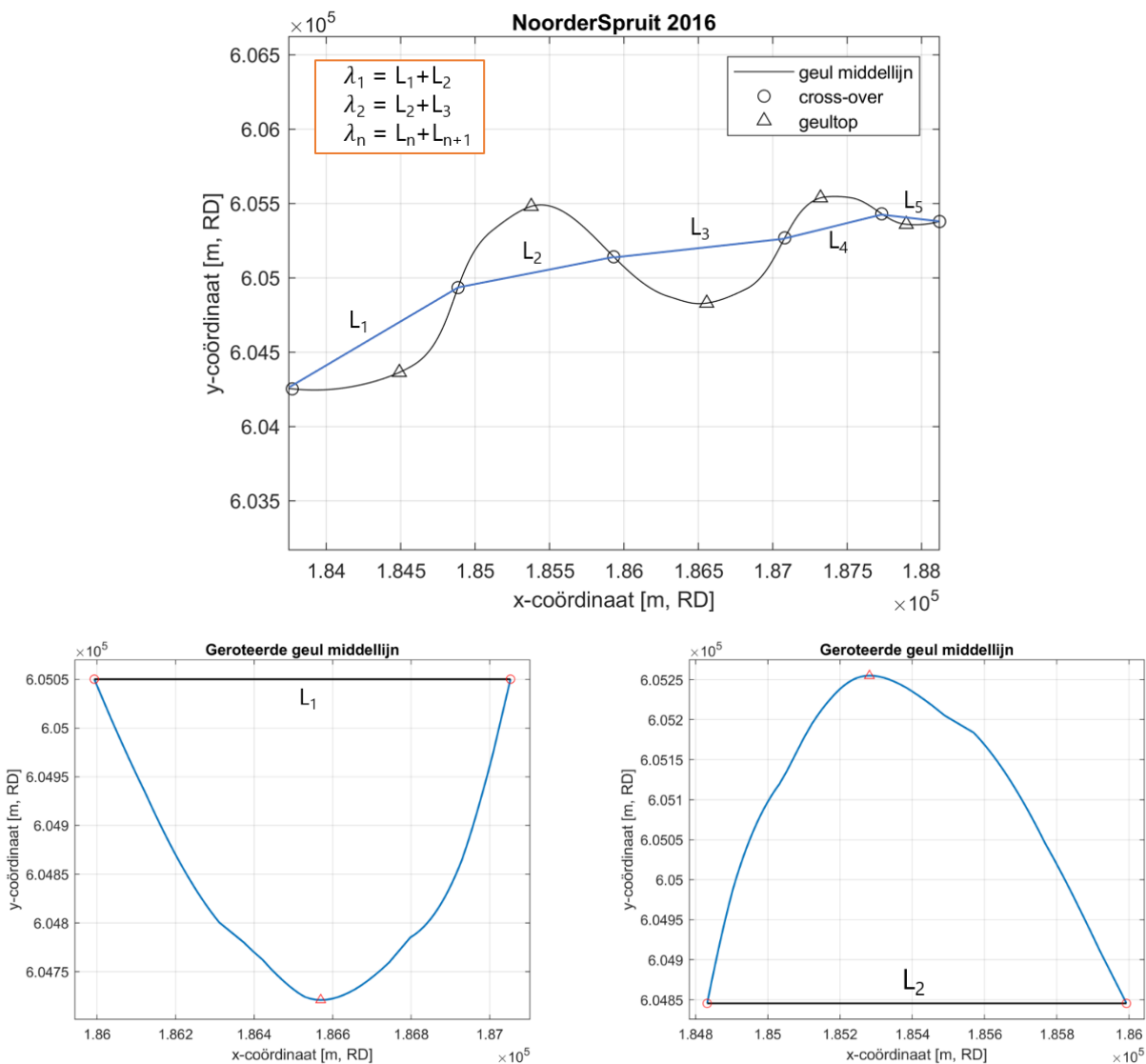
Voor de volledige uitwerking van deze formules wordt verwezen naar Kreyszig (1991). Met de kromming kan de bochtstraal berekend worden voor ieder punt langs de geul. Omdat de meest interessante bochtstraal zich bevindt in de geultop, wordt de bochtstraal daar bepaald. Wanneer de geul geschematiseerd wordt als een golf dan kunnen de maxima en minima berekend worden aan de hand van de eerste afgeleide. De automatisch onttrokken geul middellijnen laten alleen niet altijd een vloeiend golvend patroon zien waardoor sommige maxima en minima niet gedetecteerd worden. Om dit te verhelpen is een ingebouwde PEAK (Polynomial Approximation with Exponential Kernel) smoothing methode in ArcGIS gebruikt (voor meer info zie: (ArcGIS, 2017)). Voor deze methode moet een smoothing tolerantie opgegeven worden, die de maximale afstand tussen de oude en nieuw gecreëerde punten begrenst. Hoe kleiner deze waarde is, hoe meer detail in de geul middellijn behouden wordt. Er is gekozen voor een tolerantie van 30 m, wat resulteerde in een vloeiender resultaat dat gebruikt kon worden om de geultoppen en cross-overs te bepalen.



De cross-overs en de geultoppen kunnen niet direct bepaald worden uit de eerste afgeleide, omdat de geuloriëntatie varieert langs de geul. Daarom zijn de volgende stappen uitgevoerd om deze parameters te bepalen:

- De eerste afgeleide van de meanderende geul middellijn is bepaald. Omdat de as van de meander niet horizontaal is, kunnen geultoppen gemist worden bij het gelijkstellen van de eerste afgeleide aan nul. Daarom is, als eerste inschatting, het gemiddelde van de eerste afgeleide gebruikt om te dienen als nullijn. Waar de eerste afgeleide gelijk is aan deze nieuwe nullijn is een eerste inschatting van een geultop gevonden.
- Voor ieder geulsegment tussen twee geultoppen zijn de (absolute) maxima bepaald van de eerste afgeleide, welke de cross-overs beschrijven. Daarnaast is het begin en eind van de geul ook gedefinieerd als cross-over, wat nodig was voor de laatste stap.
- De definitieve geultop is bepaald voor ieder geulsegment tussen twee cross-overs. Door de geul middellijn te roteren aan de hand van de cross-overs is het mogelijk om opnieuw de eerste afgeleide te bepalen. Het minimum van de absolute eerste afgeleide is berekend en dat is de nieuwe geultop, welke in Figuur 13 gepresenteerd is.

Naast de definitie van de geultoppen en cross-overs, is ook de golflengte bepaald. Deze is gedefinieerd als de lijnstukken tussen drie opeenvolgende cross-overs, zoals tevens aangegeven is in Figuur 13.



Figuur 13: Het bovenste figuur beschrijft de gesmoothte geul middellijn met de automatisch onttrokken cross-overs en geultoppen. Daarnaast is in het bovenste figuur weergegeven hoe de golflengtes van de geul ( $\lambda$ ) gedefinieerd zijn.

## 4.4 Geuldimensies Macro-schaal

Vanuit de mate van meanderen die te zien is in Figuur 14 is besloten om alleen de eerste-orde geulen en het Kikkertgat te bestuderen. Daarnaast wordt het Kikkertgat meegenomen, omdat het een duidelijk meanderend patroon laat zien waarvan verwacht wordt dat deze beïnvloed is door de baggerwerkzaamheden.

In Figuur 14 is te zien dat de meanderende getijdegeulen veel variatie in de tijd vertonen. Sommige onverwachte geulpatronen die waarschijnlijk ontstaan zijn door een onnauwkeurigheid in de data produceren of verwijderen meanders (zie bijvoorbeeld de 2011-lijn in Figuur 14). Omdat het doel van deze studie is om een verklaring te vinden voor de meanderende patronen in het gebied, zullen de figuren en conclusies alleen gericht worden op de geulen die een meanderende ontwikkeling laten zien. Bodemdata van de jaren 2005, 1993 en 1981 worden niet meegenomen in de analyse, omdat hierin verschuivingen in de data zichtbaar waren die de analyse van de meanders bemoeilijkt. Een overzicht van de bodemkaarten die wel gebruikt zijn is getoond in Tabel 3.

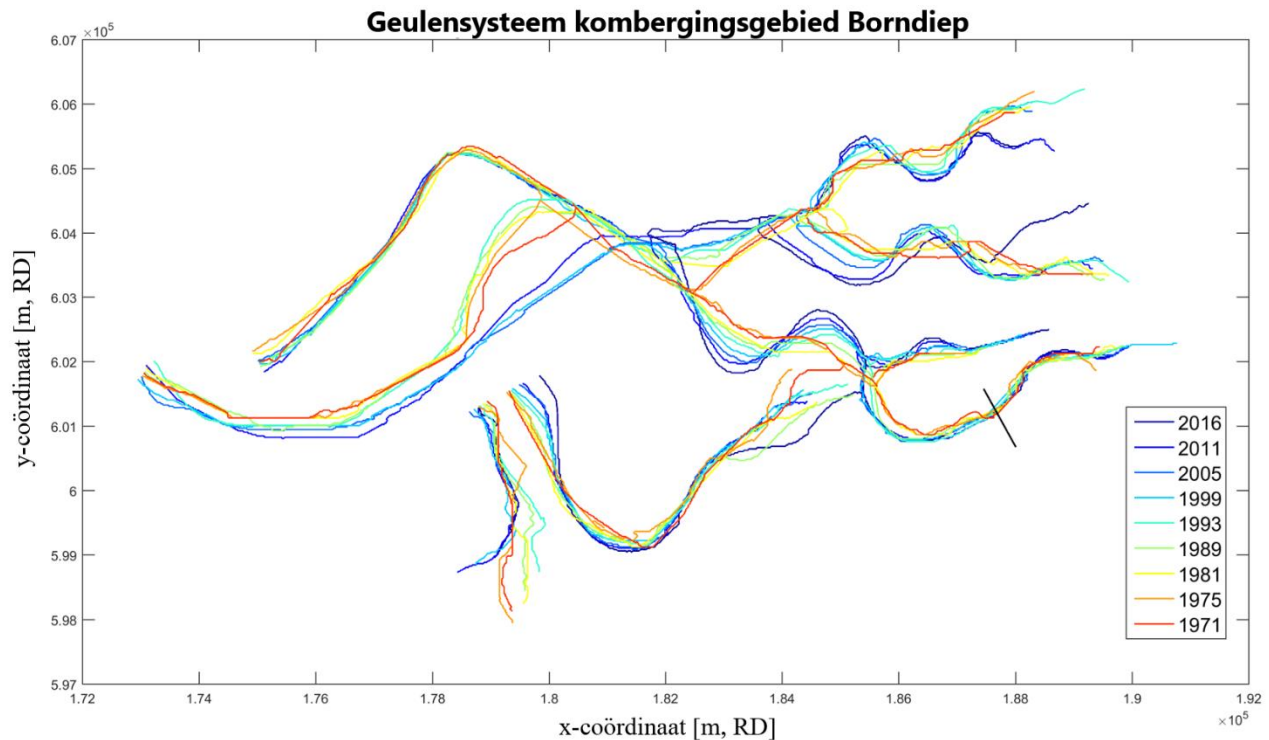
*Tabel 3: Geulen en de bijbehorende jaren die gebruikt zijn in de analyse van de dimensies. De schuingedrukte jaren zijn gebruikt in de analyse, maar bevatten meefouten die de resultaten in deze studie kunnen beïnvloeden.*

Geul	Afkorting	Gebruikte data
Noorderspruit	NSp	2016, 2011, 1999, 1989, 1975, 1971
Zuiderspruit	ZSp	2016, 2011, 1999, 1989, 1975, 1971
Noorderkikkertgat	NKik	2016, 2011, 1999, 1989, 1975, 1971
Zuiderkikkertgat	ZKik	2016, 2011, 1999, 1989, 1975, 1971
Kikkertgat	Kik	2016, 2011, 1999, 1989, 1975, 1971

In de volgende alinea's en paragrafen worden de geuldimensies bepaald voor de drie verschillende schaalniveaus, zoals die gepresenteerd zijn in Figuur 4. Om te beginnen wordt de ontwikkeling op de Macro-schaal bestudeerd om de mate van meanderen te onderscheiden en te bepalen welke geulen in meer detail geanalyseerd zullen worden. Deze details worden op de Meso-schaal verder uitgewerkt, waarin de focus zal liggen op het bepalen van de geullengte, -breedte, -bodemniveau en hoe deze aan elkaar gerelateerd zijn. Uiteindelijk wordt ingezoomd op de ontwikkelingen per geul om de breedte- en bodemniveau- ontwikkeling rond een geullop en/of vloedschaar te beschrijven.

Om te beginnen zijn op de Macro-schaal de globale geulontwikkelingen van alle geulen over een periode van 40 jaar bestudeerd. In Figuur 14 zijn de geul middellijnen gepresenteerd die verkregen zijn met de QGis modellen. De uitbreiding van de bochten in het Kikkertgat kunnen duidelijk worden waargenomen, net als de variatie in het Noorderspruit en Zuiderspruit. In tegenstelling tot de uitbocht van 500 m in het Kikkertgat laat het Molengat weinig variatie zien in de tijd. Verder wordt vanaf  $x = 1,83 \cdot 10^5$  m richting het oosten geen dynamische meanderende ontwikkeling meer gezien en de geulen hebben in dit gebied een meer west-oost oriëntatie.

Sedimentatieproblemen doen zich voor in Zuiderkikkertgat-west, waar in de loop der tijd meer gebaggerd werd en de lengte van de vaargeul met één kilometer toegenomen is. Sinds de start van de baggerwerkzaamheden in 1990 is de ontwikkeling van het Zuiderkikkertgat-west gestopt en is de uitbocht in het Kikkertgat juist toegenomen. Tijdens deze ontwikkeling werd het Noorderkikkertgat gevormd en groeide deze geul van een vloedschaar uit naar een meanderende geul. Daarnaast is in Figuur 14 te zien dat de lengteschaal, oriëntatie en mate van meanderen van het Noorderspruit, Zuiderspruit, Noorderkikkertgat, Zuiderkikkertgat-west en Zuiderkikkertgat-oost vergelijkbaar zijn. De ontwikkelingen van deze geulen zullen bestudeerd worden in de volgende paragraaf om de verschillen in de niet-gebaggerde en gebaggerde geulen te onderscheiden.



*Figuur 14: Overzicht van het geulensysteem, gecreëerd door het Network Extraction Model uit te voeren en de onzuiverheden uit de uitkomst te verwijderen. Elke lijn presenteert een geul middellijn voor een bepaald jaar. Door de grote variatie in het Molengat, Dantziggat, Zuidwester Dantziggat en Zuider Dantziggat is een vaste lijn gekozen om een uniforme startpositie van de geul te krijgen. De locatie van de veerdam bij Holwerd (zwarte lijn bij  $x = 1,88 \cdot 10^5$  m) splitst het Zuiderkikkertgat in een westelijk en oostelijk deel.*

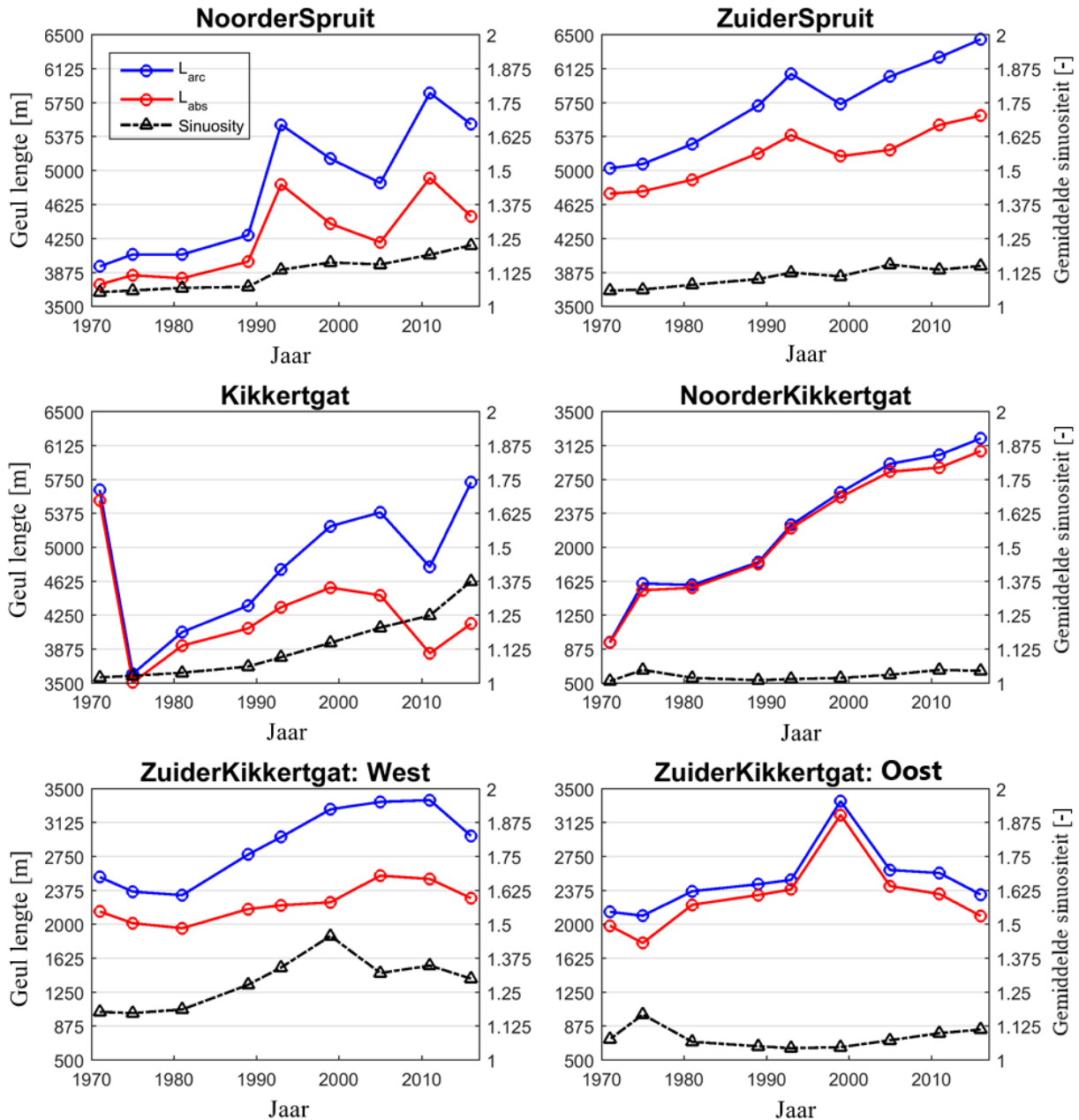
## 4.5 Geuldimensies Meso-schaal

De Meso-schaal ontwikkelingen omvatten de ontwikkelingen op de schaal van individuele geulen. Ontwikkelingen op dit niveau betreffen veranderingen in de geulbreedte, -lengte, bodemniveau en bochtstraal. Een analyse op deze drie dimensies is in deze Paragraaf uitgewerkt voor de geulen Kikkertgat, Noorderkikkertgat, Noorderspruit, Zuiderspruit, Zuiderkikkertgat-west en Zuiderkikkertgat-oost.

### Geul lengte

Voor elke geul kan de golflengte en amplitude bepaald worden op basis van de geulmiddellijn. Zoals beschreven in Paragraaf 3.2 is een golf gedefinieerd als een combinatie van drie opeenvolgende cross-overs (d.i. het overgangsgedebied tussen twee geulbochten). De variatie in het geulpatroon in de tijd is deels veroorzaakt door de resolutie van de data en deels door de geul-netwerk extractie modellen. Daarom is het moeilijk om de golflengte te bepalen en de resultaten te vergelijken. De mate van meanderen is daarom bepaald door de absolute lengte en de booglengte van de gehele geul op elkaar te delen. De resultaten van beide lengtes is gepresenteerd in Figuur 15, waar ook de sinusiteit per jaar geplot is.

Over het algemeen laten de absolute- en booglengte van alle geulen in Figuur 15 tot aan 1990 een toenemende trend zien. Van de Spruit-geulen groeit het Zuiderspruit constanter dan het Noorderspruit. De sinusiteit groeit echter sneller in het Noorderspruit. Er dient wel opgemerkt te worden dat de opsplitslocatie van deze geulen naar het westen verplaatst is met ongeveer 800 m sinds 1993. Als de westwaartse verplaatsing van de opsplitslocaties meegenomen zou worden in de figuren, dan zou de lengte ontwikkeling eerder constant zijn of afnemen. Deze bevinding wordt ondersteund door de Noorderspruit resultaten, waar de eerste twee bochten een maximale uitbochtiging lijken te hebben gevonden (zie ook Figuur 14). Dus de geullengte nam toe tot 1993, waarna het meanderen in Noorderspruit stagneerde. De geul ontwikkelde zich ook aan de oostkant, maar de invloed hiervan op de trends in Figuur 15 zijn verwaarloosbaar klein in vergelijking met de verplaatsing van de opsplitslocatie.

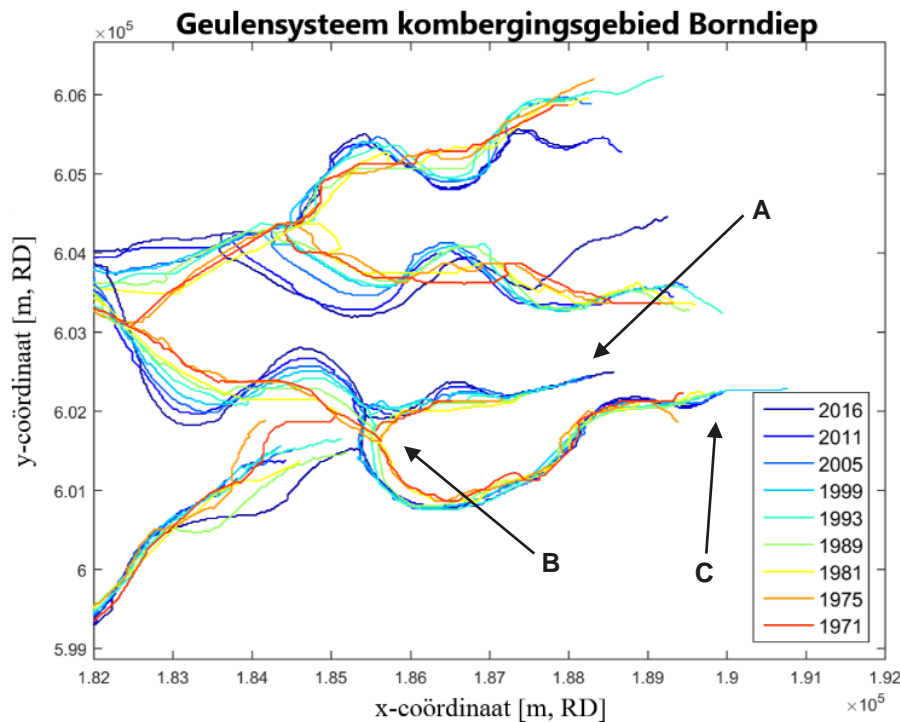


Figuur 15: De absolute en booglengte van de bestudeerde geulen per jaar. De blauwe lijn presenteert de lengte langs de geul middellijn (de booglengte) en de rode lijn presenteert de absolute lengte tussen het begin en einde van de geul. De zwarte lijn met driehoekige markeringen correspondeert met de rechter as en geeft de gemiddelde sinuositeit weer, i.e. de ratio tussen de boog- en absolute lengte. Merk op dat de verticale assen van subplots Noorderkikkertgat, Zuiderkikkertgat-west en -oost een andere schaal hebben.

De verwachting dat het Kikkertgat meer meandert dan de Spruit-geulen is bevestigd in Figuur 14, ondanks dat dat het oostelijke einde (opsplitslocatie) door de jaren heen met circa 500 m noordwaarts is verplaatst. Daarnaast ligt het westelijke uiteinde van de Kikkertgat 1999- en 2005-geul ongeveer 650 m meer naar het oosten dan in de andere jaren. Hiervoor is niet gecorrigeerd in Figuur 14. Als dat wel gedaan wordt, zou dat leiden tot een afnemende  $L_{abs}$  in 1999 relatief tot 1993 en een gelijke  $L_{abs}$  in de periode 1993-2005. Ook in 2016 lieten de start en het einde van de geulen een afwijking van ongeveer 350 m zien in vergelijking met 2011, wat de globale trends in de resultaten niet beïnvloedt.

Van de overgebleven plots in Figuur 15 wordt geobserveerd dat Noorderkikkertgat veel sneller lijkt te groeien dan Zuiderkikkertgat. In de beschouwde jaren ontwikkelde Noorderkikkertgat zich van een kleine, smalle geul naar een geul met vergelijkbare afmetingen als Zuiderkikkertgat-oost (zie A in Figuur 16). Naarmate de lengte van Noorderkikkertgat toenam kreeg het in 1981 ook meanderende patronen. De oorzaak van deze ontwikkeling kan liggen in de noordwaartse verplaatsing van de opsplitslocatie Kikkertgat-Noorderkikkertgat-

Zuiderkikkertgat (zie B in Figuur 16), wat kan leiden tot een groeiend getijdeprisma in het Noorderkikkertgat. Naast het noordwaarts bewegen van het opsplitspunt is de groei in lengte van het Zuiderkikkertgat-west gestagneerd. De geullengte bleef opvallend constant in Zuiderkikkertgat-west, waardoor de absolute lengte van Zuiderkikkertgat-oost met 11% reduceerde sinds 1993 (zie C in Figuur 16). Waar de lengte afneemt, reduceren de hydrodynamische condities met aanzanding aan het einde van de geul als resultaat. De trends in Figuur 15 lijken erop te wijzen dat Noorderkikkertgat langzaam Zuiderkikkertgat-oost vervangt, omdat erosie plaatsvindt in de een en sedimentatie in de ander. Door alleen de lengtes te beschouwen kan deze verwachting niet bewezen worden en daarom moeten ook de andere geuldimensies bestudeerd worden om dit te bewijzen.



Figuur 16 Zoom-in op de geulontwikkeling. A. geeft de ontwikkeling van het Noorderkikkertgat aan, B. duidt op de noordwaartse verplaatsing van het opsplitspunt en C. wijst het reduceren van het Zuiderkikkertgat-west aan.

Als de sinusiteit classificatie voor rivieren (vergelijking 3.3) hier toegepast zouden worden, dan zou geen enkele geul geclassificeerd worden als meanderend. De ratio  $L_{\text{boog}}/L_{\text{abs}}$  is laag, zelfs ondanks dat de gemiddelde sinusiteit gebruikt is. Hoewel het Kikkertgat een grotere toenemende trend dan de andere geulen laat zien, bestaat het uit één golvende geul terwijl de andere geulen meerdere golvende secties bevatten. De geuleinden meanderen minder, waardoor de gemiddelde sinusiteit lager wordt. Zuiderkikkertgat-west en Kikkertgat bevatten geen geuleindes ("doorstroomgeulen" (Zeff, 1988)), waardoor de gemiddelde sinusiteit hoger uitvalt. De kleine, maar opmerkbare toename van de Noorderspruit-sinusiteit wordt toegewezen aan de stabilisering van de eerste twee bochten.

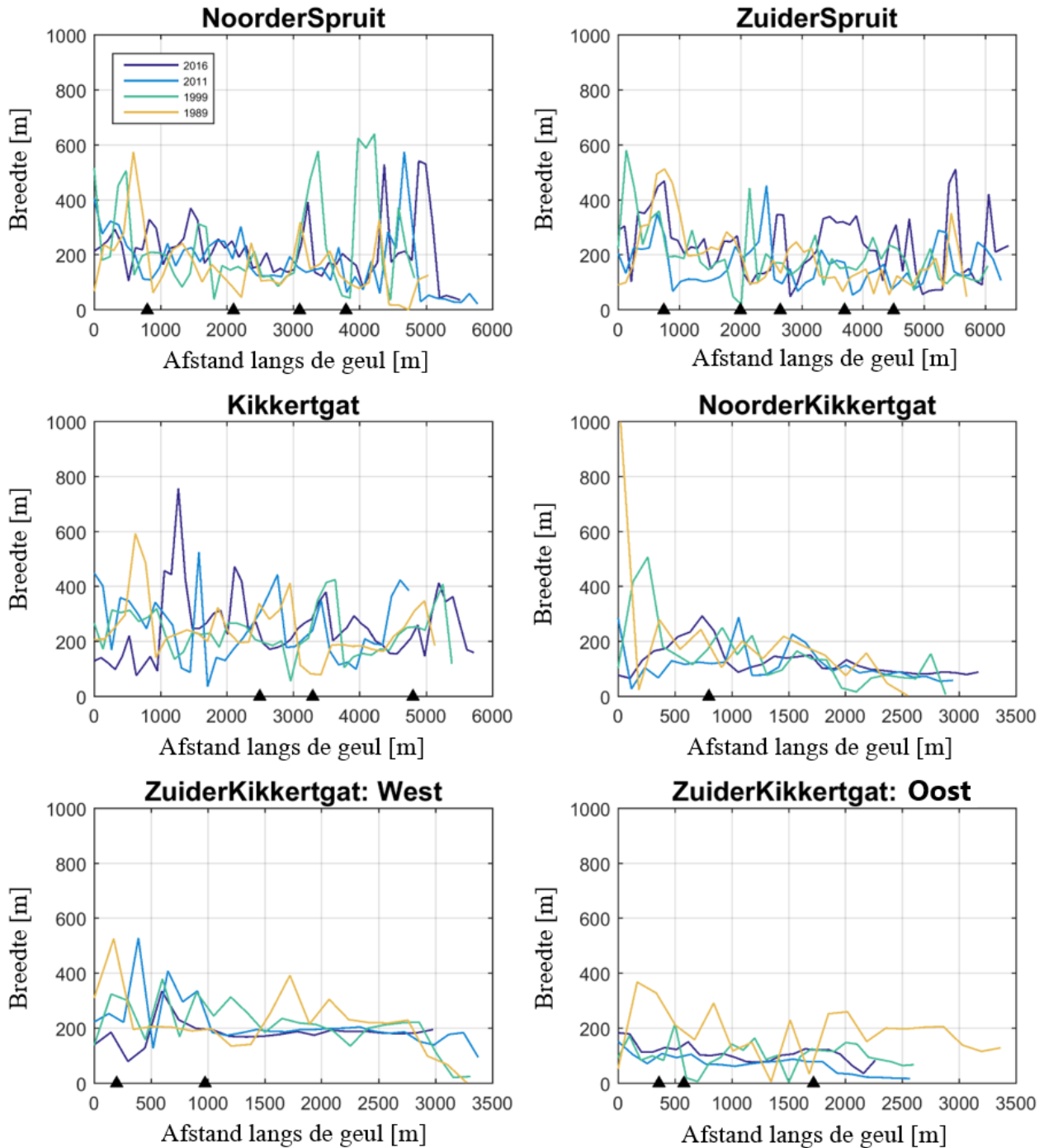
### Geulbreedte

Trends in de breedteontwikkeling langs de geul kunnen een indicatie geven hoe de doorstroomoppervlakte en daarmee ook het getijdeprisma zich ontwikkelen. De aanwezigheid van eb- en vloedcharen resulteren in drempels in de geul, wat het moeilijk maakt om de geulbreedte en het bodemniveau te bepalen. Vanwege de hoge variabiliteit in de dwarsdoorsnede zijn de breedte en het bodemniveau bepaald voor het diepste gedeelte in het doorstroomoppervlak. Aangenomen wordt dat door dit gedeelte van de geul het meeste water stroomt gedurende een getijdencyclus en het wordt daarom gebruikt als maatgevende geulsectie in de analyse van de breedte en bodemniveau.

Figuur 17 presenteert de breedteontwikkeling langs de geulen. Ondanks dat de berekende breedte een onregelmatig patroon toont kunnen verschillende aspecten onderscheiden worden. Om te beginnen fluctueert de breedte rond een constante waarde langs de gehele geul. Voor Noorderspruit, Zuiderspruit, Kikkertgat en Zuiderkikkertgat-west is dit ongeveer 200 m en voor Noorderkikkertgat en Zuiderkikkertgat-oost ongeveer 100-150 m. De breedte langs de geul lijkt voornamelijk beïnvloed te worden door de



meanderende ontwikkeling en de aanwezigheid van opsplitsingen of vloedscharen. De relatie met de ontwikkeling van de uitbochting volgt vanuit de breedteprofielen in Noorderspruit en Kikkertgat. In Noorderspruit laat de breedte relatief weinig variatie zien in de eerste twee bochten en daarna verbreed de geul gelijk. Het Kikkertgat is een sterker meanderende geul en laat een soortgelijke trend zien als in de eerste twee bochten van Noorderspruit. Het Zuiderspruit is minder stabiel en presenteert een inconsistent patroon langs de gehele geul, vergelijkbaar aan de laatste 2000 m van Noorderspruit. De relatie tussen opsplitsingen en de breedte komt naar voren in de plot van Noorderkikkertgat, waar de breedtevariatie bijna nul is rond de niet-meanderende en het niet-opsplitsende geuleinde in 2016.



Figuur 17: In deze figuren is de breedte tegen de locatie in de geul geplot. De nulpunten van de geulen liggen voor elk figuur aan de zeewaartse kant. Door het grote aantal oscillaties in de breedte is hier 1/3 van het totaal aantal datapunten geplot om de zichtbaarheid te verbeteren. De zwarte driehoekige markeringen geven de locaties weer waar een opsplitsing of vloedschaar ongeveer ligt.

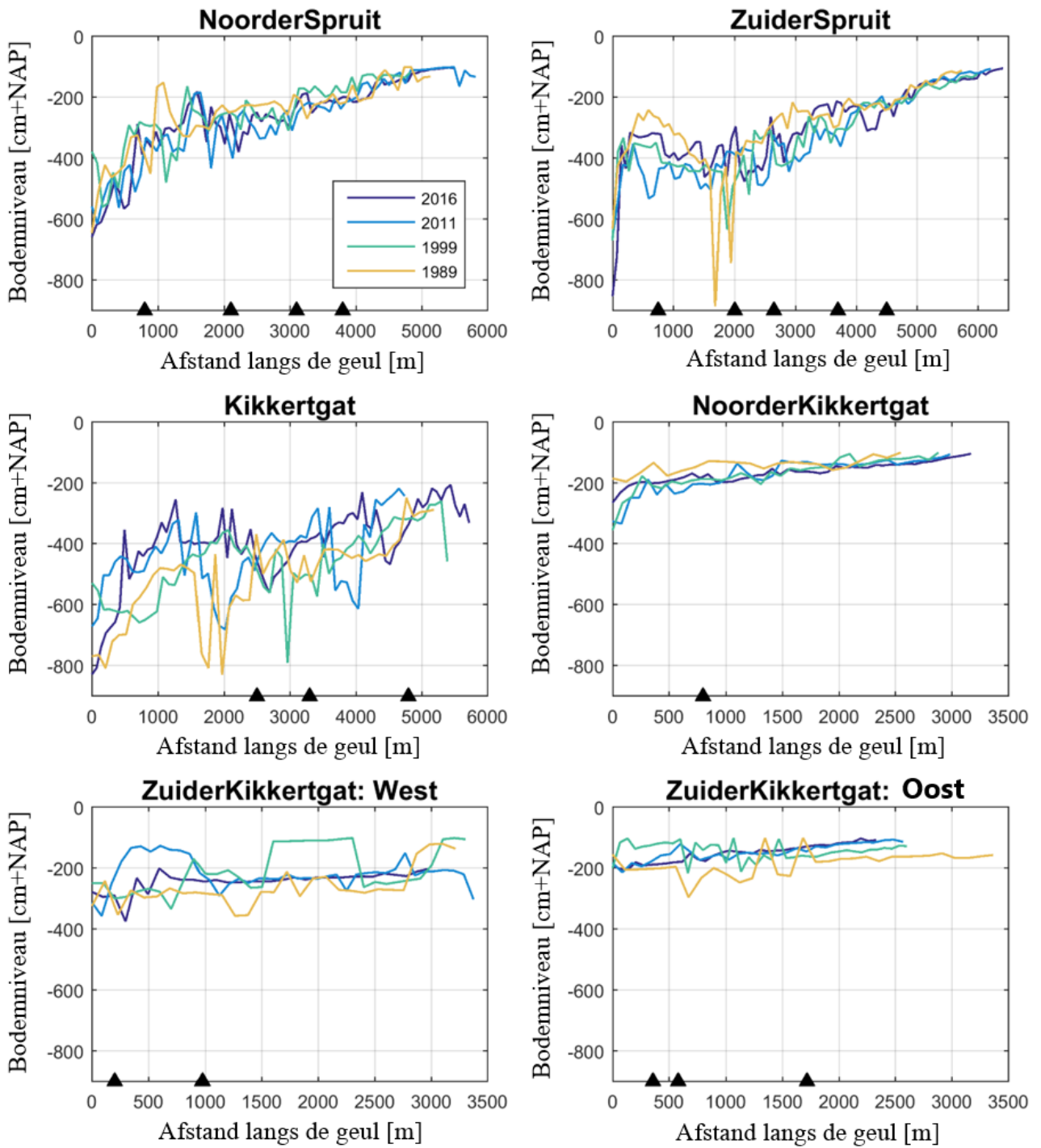
### Geul bodemniveau

Het bodemniveau is bepaald op de locatie in de dwarsdoorsnede waar ook de breedte gedefinieerd is en de resultaten hiervan zijn terug te vinden in Figuur 18. Zoals verwacht neemt het bodemniveau langs de geul toe (het wordt ondieper) totdat de geul-grenswaarde van -1 m+NAP bereikt is. Voor Kikkertgat en Zuiderkikkertgat-west geldt dit niet, omdat dit doorstroomgeulen zijn. Over het algemeen lijken de geulen ondieper te worden en in de recentere jaren heeft zich een beter herkenbaar profiel ontwikkeld. De meest aannemelijke verklaring hiervoor is de stagnerende ontwikkeling van de geullengte, wat resulteert in het aanpassen van andere geuldimensies: het bodemniveau (zie ook vergelijking 2.2). Het bodemniveau voor Zuiderspruit lijkt langs de hele geul lager (dieper) te zijn dan in Noorderspruit en Noorderspruit laat een vrij constante ontwikkeling in bodemniveau zien. Pieken in het Zuiderspruit bodemniveau rond  $x = 2000$  m zijn geen definitiefout. De overzichtskaarten van het bodemprofiel (zie Bijlage A) laten op deze locatie het begin van een vloedschaar zien, welke in verloop van tijd weer verdween.

Vergelijkbaar met Noorderspruit is ook in het bodemprofiel van Kikkertgat een duidelijkere trend te zien naarmate de geul verder uitbocht. De geulsecties ten westen van de eerste opsplitslocatie zijn over het algemeen dieper en worden snel ondieper richting de locatie waar de vloedschaar en ebgeul samenkomen. In Paragraaf 4.6 zijn de kleinere geulontwikkelingen uitgewerkt en hier zal deze ontwikkeling in meer detail beschreven worden. Naast het fluctuerende bodemniveau langs de geul, is er nog steeds een toename in het bodemniveau tussen het begin en einde van de geul.

Het Noorderkikkertgat en Zuiderkikkertgat-west zijn beide opgesplitste geulen van het Kikkertgat, maar laten een verschillende ontwikkeling zien in het bodemprofiel. Voor Noorderkikkertgat neemt het bodemniveau af naarmate de lengte toeneemt. Deze ontwikkeling vindt nog steeds plaats in 2016, dus de geul erodeert nog steeds. Verder nemen de fluctuaties toe naarmate de diepte toeneemt en richting het einde van de geul dempen de fluctuaties uit. De baggerwerkzaamheden in Zuiderkikkertgat-west zijn duidelijk zichtbaar in het verdwijnen van de onregelmatigheden na 1989. De ondiepte in 1999 wordt gevormd door inconsistentie in de data die in de overzichtskaarten te herkennen zijn aan de toename van het bodemniveau. Het bodemniveau in Zuiderkikkertgat-oost is op twee verschillen na opmerkelijk vergelijkbaar met Noorderkikkertgat. Het eerste verschil is dat er meer fluctuaties aanwezig zijn in geulsecties met vergelijkbare bodemniveaus (zie 1999), maar als de geul ondieper wordt (zie Zuiderkikkertgat-oost 2016) dan lijken deze fluctuaties uit te dempen. Daarnaast is de ontwikkeling van de lengte en het bodemniveau in Zuiderkikkertgat-oost tegengesteld aan de ontwikkeling in Noorderkikkertgat. Dus als de lengte en de diepte toenemen ontstaan er meanders en vloedscharen, en ze verdwijnen als de lengte en diepte afnemen.

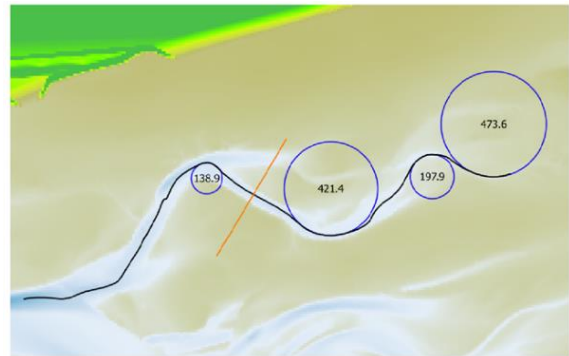
Voor alle geulen is het bodemniveau toegenomen (ondieper) in de richting het wantij en door de tijd. Noorderkikkertgat heeft geen vloedscharen (vergelijk het aantal zwarte driehoeken tussen de grafieken in Figuur 18) en het effect van de opsplitsingen op de geuldimensies is dan ook niet zichtbaar. Uitzonderingen op deze algemene trends zijn Kikkertgat en Zuiderkikkertgat-west. In Kikkertgat is langs de geul een meer golvend bodempatroon zichtbaar, dat overeenkomt met de bochten in de geul. Dit is zichtbaar voor de geultop in 2016 bij  $x = 2600$  m en  $x = 4500$  m. Het Zuiderkikkertgat-west onderscheidt zich voornamelijk door het verdwijnen van de pieken in het bodemprofiel wat verklaard kan worden door het baggeren van de geul.



Figuur 18: De ontwikkeling van het bodemniveau langs de geul. Ten behoeve van de leesbaarheid van de figuren is hier 50% van de datapunten geplott. De zwarte driehoekige markeringen geven de locaties weer waar een opsplitsing of vloodschaar ongeveer ligt.

### Geul golflengte en geulkromming

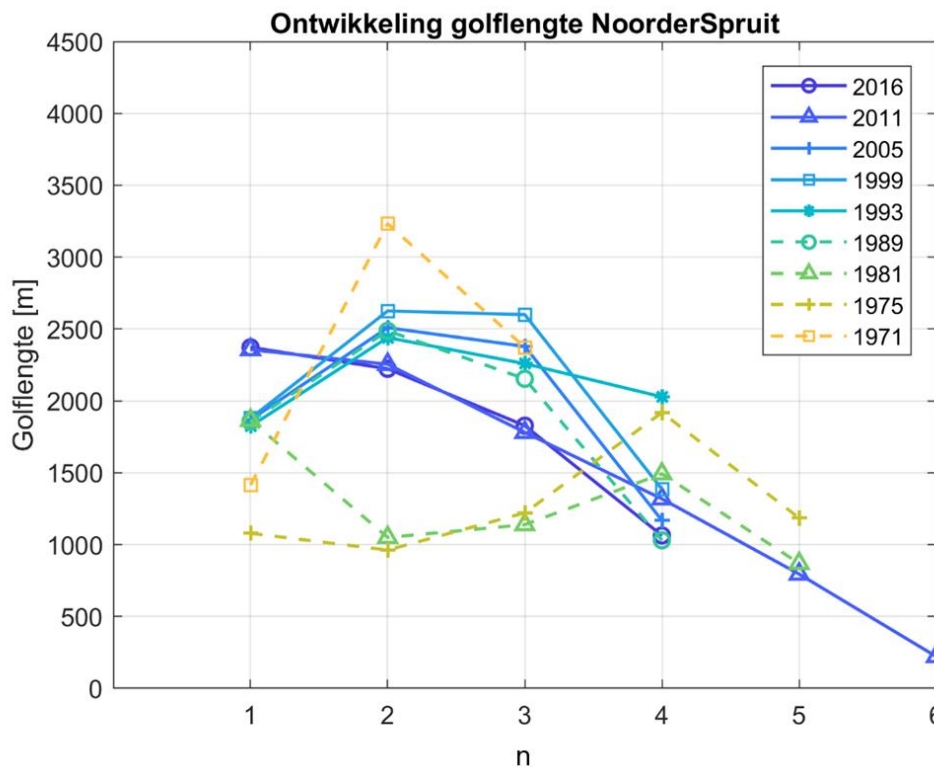
Met de gesmoothte middellijnen kan de geulkromming bepaald worden door vergelijking 4.2 toe te passen. Voor geulen met een duidelijk meanderend patroon kan de bochtstraal geplot worden op de locatie van de geultoppen (het deel in de bocht waar een maximale kromming is). Het figuur met de krommingen langs de geulen is terug te vinden in (Van Til, 2017). De voornaamste conclusies die hieruit kwamen zijn dat de geulkromming varieert tussen  $-0,005 \text{ m}^{-1}$  en  $0,005 \text{ m}^{-1}$ , wat overeenkomt met een bochtstraal van minimaal 200 m. Verder is te zien dat Noorderspruit en Zuiderspruit een gespiegelde oriëntatie hebben en dat daar de fluctuaties veel groter zijn dan in Kikkertgat.



Figuur 19 Voorbeeld van de bochtstraal die geplot is op de locatie van de geultop.

De berekening van de bochtstraal resulteerde in sterk variërende resultaten langs de geulen. Vanwege deze variatie is besloten om de bepaling van de bochtstraal niet verder uit te werken in deze studie. Wel was het mogelijk om automatisch de cross-overs en geultoppen te bepalen volgens de methode die in Paragraaf 4.3 gepresenteerd is. Aan de hand van de cross-overs is de golflengte van de geulbochten bepaald. De afstand tussen drie opeenvolgende cross-overs wordt gebruikt om de golflengte te bepalen (zie Figuur 13). Door dit toe te passen op de geulen binnen het studiegebied is gevonden dat de golflengte in de richting van het wantij afneemt. In Figuur 20 is deze trend weergegeven voor Noorderspruit. De figuren voor de andere geulen met alle jaren aan data zijn gepresenteerd in Bijlage B. De afname van de golflengte betekent dat het golvende patroon minder uitgesproken wordt richting het wantij. De verschillende golflengtes bij  $\lambda_1$  zijn ontstaan door een verschillende vorm van de geul. Voor meerdere punten is dit het geval en daarom kan bij deze analyse alleen geconcludeerd worden dat het meanderende patroon afneemt richting het wantij.

De resultaten van de andere geulen (in Bijlage B) laten eveneens een afnemende golflengte zien richting het wantij. Het is niet mogelijk om een conclusie te trekken omtrent de ontwikkelingen als gevolg van het baggeren, omdat de locatie van het begin- en eindpunt van de gebaggerde geulen varieerde door de tijd (t.g.v. de geuldefinitie). De verschillen in de ligging van de begin- en eindpunten heeft een te groot effect op de resultaten, waardoor de ontwikkeling van de golflengte niet te relateren is aan de baggerwerkzaamheden in de geulen.



Figuur 20: De ontwikkeling van de golflengte in Noorderspruit.

### Jaargemiddelde trends

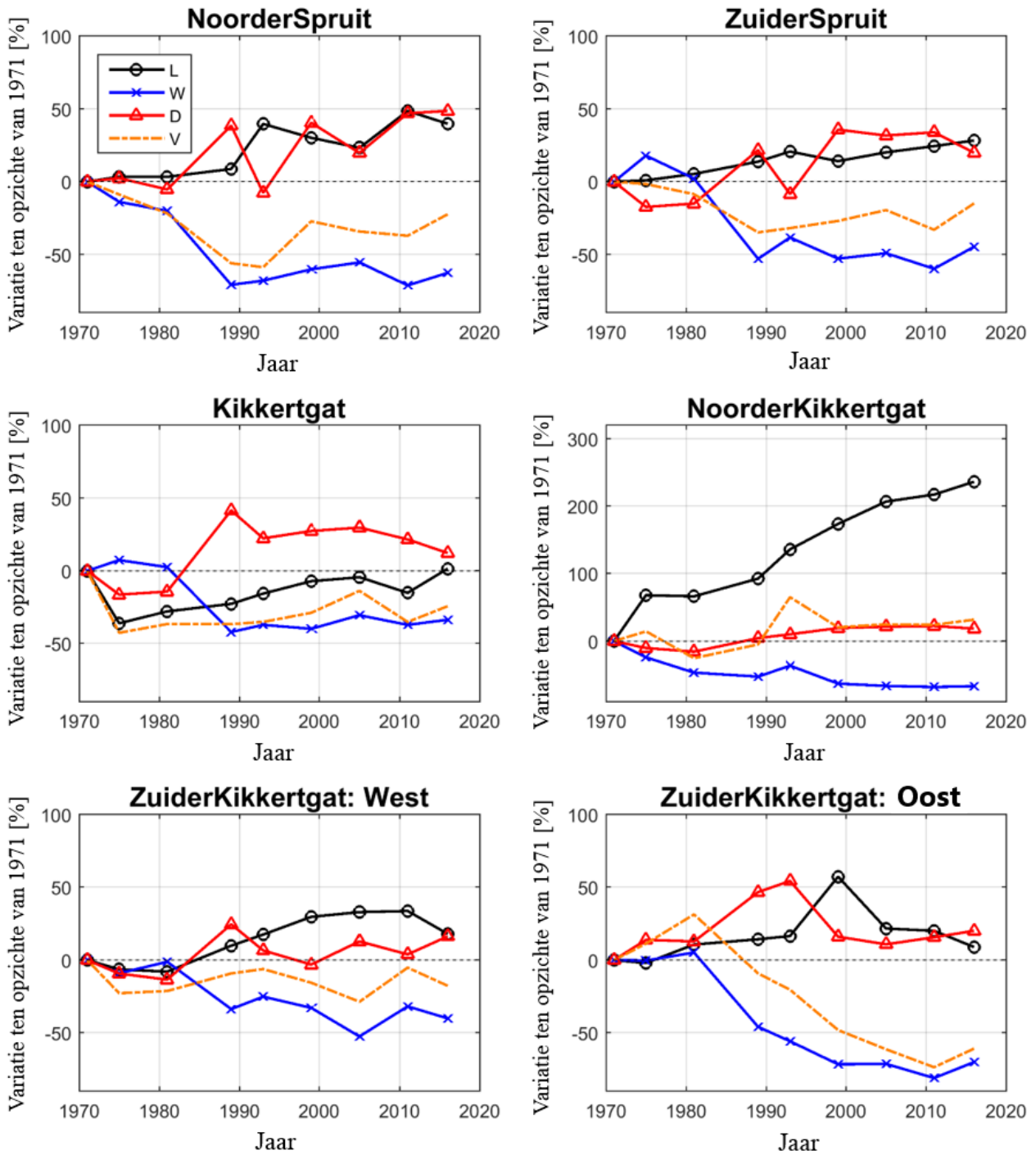
Figuur 21 presenteert de geuldimensies ten opzichte van 1971. Een indicatie van het geulvolume is hierin ook meegenomen door het geulvolume te definiëren als  $V = L \cdot B \cdot D$ . Voor de analyse van Figuur 21 is het belangrijk om op te merken dat ieder datapunt een jaargemiddelde van de gehele geul is. Daarom kunnen steile gradiënten gerelateerd worden aan een opsplitsing, het ontstaan van een vloodschaar, een meefout, of aan hoe de geul gedefinieerd is. Ook zijn Noorderspruit en Zuiderspruit grotere geulen dan bijvoorbeeld Noorderkikkertgat, wat betekent dat over meer punten gemiddeld is. Ondanks deze punten, kan de gemiddelde ontwikkeling van de booglengte ( $L$ ), breedte ( $B$ ), diepte ( $D$ ) en volume ( $V$ ) trends in de gevoeligheid van de parameters naar voren brengen. Het doel van deze deelparagraaf is om te vinden welke geuldimensies het meeste aangepast worden in de ontwikkeling van een meander.

In (Steijn, 2005) is beschreven dat Zuiderkikkertgat-volume afnam na 1998, wat ook naar voren komt in Figuur 21. Terwijl het volume afnam, nam het volume gebaggerd materiaal exponentieel toe (zie Figuur 2). De voornaamste conclusie die hieruit getrokken kan worden is dat de breedteafname vanaf 1993 in Zuiderkikkertgat-west de grootste invloed heeft gehad op de afname van het geulvolume. Voor Zuiderkikkertgat-oost geldt hetzelfde, maar daar nam de breedte al sinds 1981 af. Vanaf 1998 is ook de lengte van Zuiderkikkertgat-oost afgenomen. De enige geulen die een volumetoename hadden sinds 1998 waren Noorderkikkertgat en Zuiderspruit. En ook daar is de afname van de breedte de belangrijkste factor in de veranderingen. In de Alkyon rapporten (Alkyon, 2008; Steijn, 2005) werd beargumenteerd dat het meanderen van Dantziggat voor een herverdeling van het water door de geulen zorgde. Doordat Noorderspruit en Zuiderspruit grotere en meer ontwikkelde geulen zijn dan Noorderkikkertgat is het mogelijk dat deze geulen een deel van het watervolume van de Kikkertgat-geulen overgenomen hebben.

Naast de volumeveranderingen kunnen ook andere trends onderscheiden worden. Om te beginnen namen de geullengtes van de tertiaire geulen toe vanaf 1971. De grote lengtetoename voor Noorderkikkertgat kan verklaard worden met de geullengte in 1971, welke van circa 1000 m naar ca. 3000 m toenam. De andere geulen waren toen al in een meer ontwikkeld stadium, wat resulteert in een meer gelijkmatiger verloop. Ondanks dat de Zuiderspruit-lengte lineair toenam, laat Noorderspruit een grotere netto groei zien. Ook lijken de lengteontwikkelingen ongevoelig voor veranderingen in de geulbreedte en diepte. Over het algemeen laten de geulen een breedteafname en een bodemniveaue toename zien.



In Figuur 21 komt verder naar voren dat het geulvolume van Zuiderkikkertgat-oost afnam sinds 1990. Het afnemende geulvolume is gerelateerd aan sedimentatie en/of de formatie van ondiepe secties aan het einde van de geul, die daardoor niet meer gedetecteerd worden door het model. Het Noorderkikkertgat laat daarentegen een grote toename van de getijdeprisma zien, wat voornamelijk door de lengtetoe name komt. In het oostelijke deel van Zuiderkikkertgat nam de breedte, diepte, lengte en daarmee het volume af sinds 1999.



Figuur 21: Percentuele veranderingen van de booglengte (L), geulbreedte (W), bodemniveau (D) en volume (V). Elk punt in dit figuur representeert een jaargemiddelde waarde van de gehele geul.

**Conclusies geuldimensies Meso-schaal**

Over het algemeen nam de geullengte van alle geulen toe tot aan 1990. Daarna namen de lengtes af, behalve voor in Noorderkikkertgat en Zuiderspruit. Het Noorderkikkertgat groeit, omdat het pas recent ontstaan is en het Zuiderspruit is waarschijnlijk groeiende omdat het beginpunt van de geul naar het westen verschoven is. Verder lieten Noorderspruit en Kikkertgat een toename in de gemiddelde sinuositeit zien, naarmate de meanderende patronen beter te onderscheiden waren. De sinuositeit van Kikkertgat was het grootst ( $S = 1,4$ ), wat de duidelijke uitbochtiging getoond in Figuur 3 bevestigen. Ook lijkt de lengtetoename van Noorderkikkertgat overeen te komen met de afnemende lengte van Zuiderkikkertgat-oost, wat duidt op “landje pik” (Steijn, 2005).

Buiten de lengteontwikkelingen nemen de geulen af in breedte en worden de geulen ondieper in de bestudeerde jaren. De breedte langs de geul fluctueert rond een constante waarde. Voor Noorderkikkertgat en Zuiderkikkertgat-oost, die een gelijke trend maar gespiegelde ontwikkeling laten zien, is die waarde rond 100-150 m en voor de andere geulen circa 200 m. Over het algemeen worden alle geulen ondieper in de bestudeerde jaren. Het baggeren van Zuiderkikkertgat-west was duidelijk zichtbaar in de figuren, omdat in de jaren dat er gebaggerd werd, weinig variatie in het bodemniveau te vinden was.

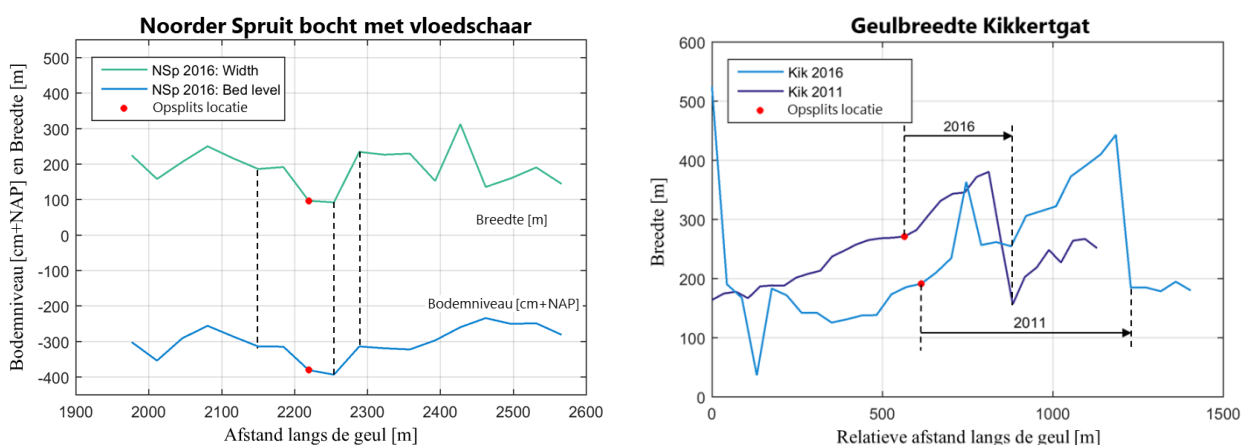
## 4.6 Ontwikkelingen per geul

In de ontwikkelde geulen (Kikkertgat en Noorderspruit), is een trend in geulbreedte en bodemniveau gevonden. Daarom worden deze geulen in deze paragraaf nader beschouwd, om te bepalen hoe het meanderen, de opsplitsingen en de vloedscharen gerelateerd kunnen worden aan de geuldimensies. Als trends gevonden worden in een ontwikkelde geul, dan kan voorspeld worden hoe minder ontwikkelde geulen zich kunnen gaan ontwikkelen. Om een voorspelling te doen zullen de observaties in Kikkertgat en Noorderspruit geprojecteerd worden op minder ontwikkelde geulen die potentieel een ontwikkelde meander kunnen worden (Zuiderspruit). In deze paragraaf worden de bodemkaarten uit 1971 en 1975 buiten beschouwing gelaten, omdat de 100 x 100 m ruimtelijke resolutie niet accuraat genoeg is voor het onderscheiden van de ontwikkelingen op dit geulniveau. Het doel van deze paragraaf is om trends in de geuldimensies te vinden die de geultoppen en de opsplitsingen relateren aan het meanderende gedrag van de geulen.

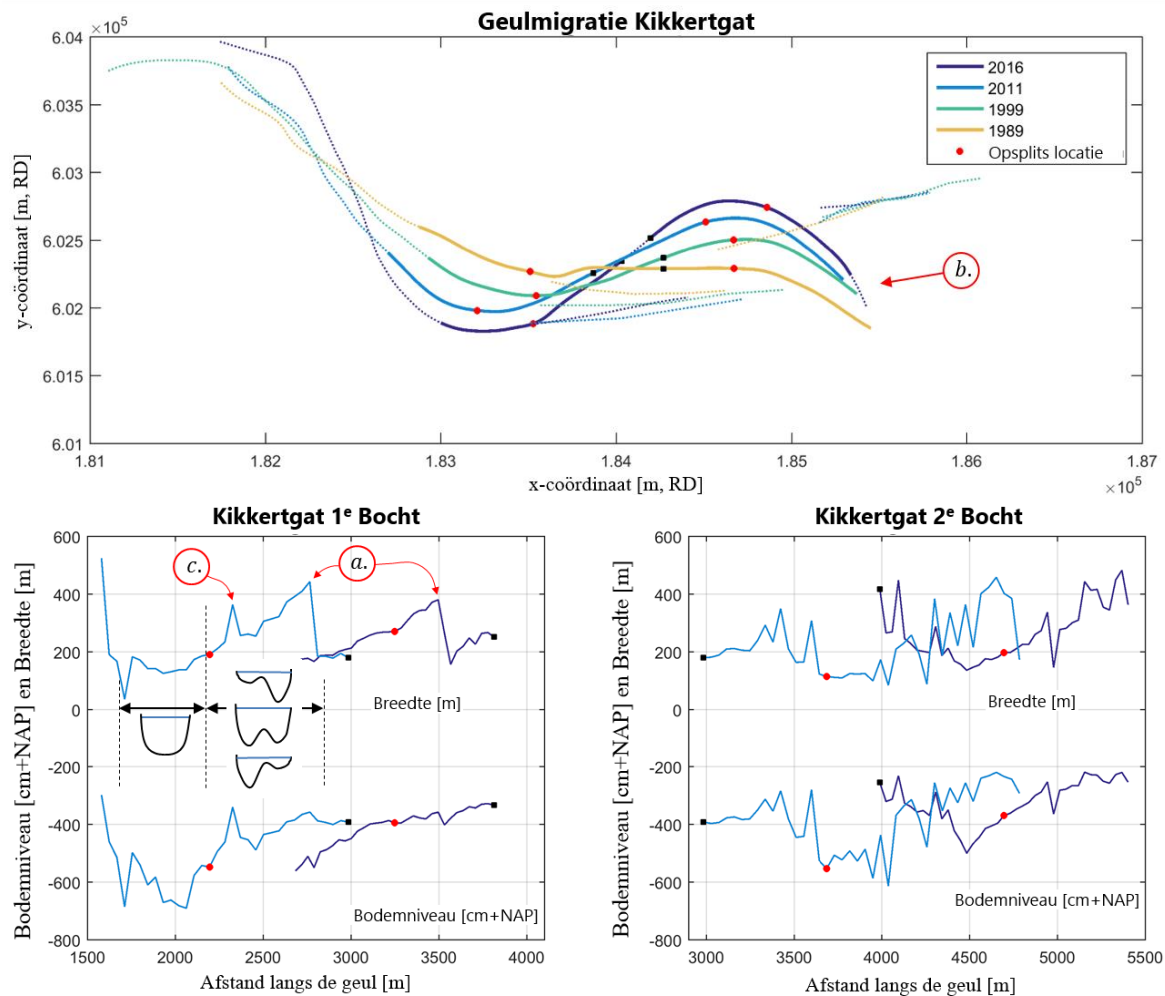
Het Kikkertgat is de eerste meander die bestudeerd zal worden, omdat het de grootste bochten bevat in het studiegebied. Beide geultoppen van het Kikkertgat bevatten vloedscharen en daarom zal de analyse van het Kikkertgat voor elke top apart uitgevoerd worden. Op dezelfde manier worden vervolgens de eerste twee bochten van zowel Noorderspruit als Zuiderspruit geëvalueerd.

De ebageulen en vloedscharen zijn weergegeven in de bovenste plot van Figuur 23 tot en met Figuur 29. De voornaamste trends worden gevonden rond de vloedscharen, die daarom met een ononderbroken lijn gepresenteerd zijn. De analyse is uitgevoerd voor het gedeelte rond de vloedschaar. Voor de duidelijkheid van de figuur is het einde van de eerste bocht en het begin van de tweede bocht met een zwarte markering weergegeven. De ronde punten in de onderste plots geven de geschatte opsplitslocaties weer. Dezelfde jaren als in de vorige Paragrafen worden in deze figuren toegepast (m.u.v. 1971 en 1975). De vloedscharen die zichtbaar zijn, zijn handmatig in QGIS bepaald door een lijn te trekken door het diepste deel van de vloedschaar. Omdat het begin- en eindpunt van de vloedscharen handmatig zijn ingetekend kunnen hier geen conclusies aan verbonden worden. De oriëntatie is daarentegen wel accuraat en zal worden meegenomen in de analyse.

In Figuur 22 worden de meeste relevante aspecten gepresenteerd die in de figuren op de volgende pagina's beschreven worden. Op verschillende locaties laten de geulbreedte en bodemniveau soortgelijke ontwikkelingen zien. Rond een geultop nemen de breedte en het bodemniveau af (verdieping), wat in de linker plot te zien is. De tweede plot laat de eerste bocht van het Kikkertgat zien, welke een ontwikkelde vloedschaar bevat. De hoek tussen de vloedschaar en de ebageul is toegenomen, en de wanden van de ebageul zijn steiler geworden, waardoor de geulsplitsing beter gedetecteerd kon worden. Daardoor wordt de breedtereductie dichterbij de opsplitslocatie gedetecteerd.



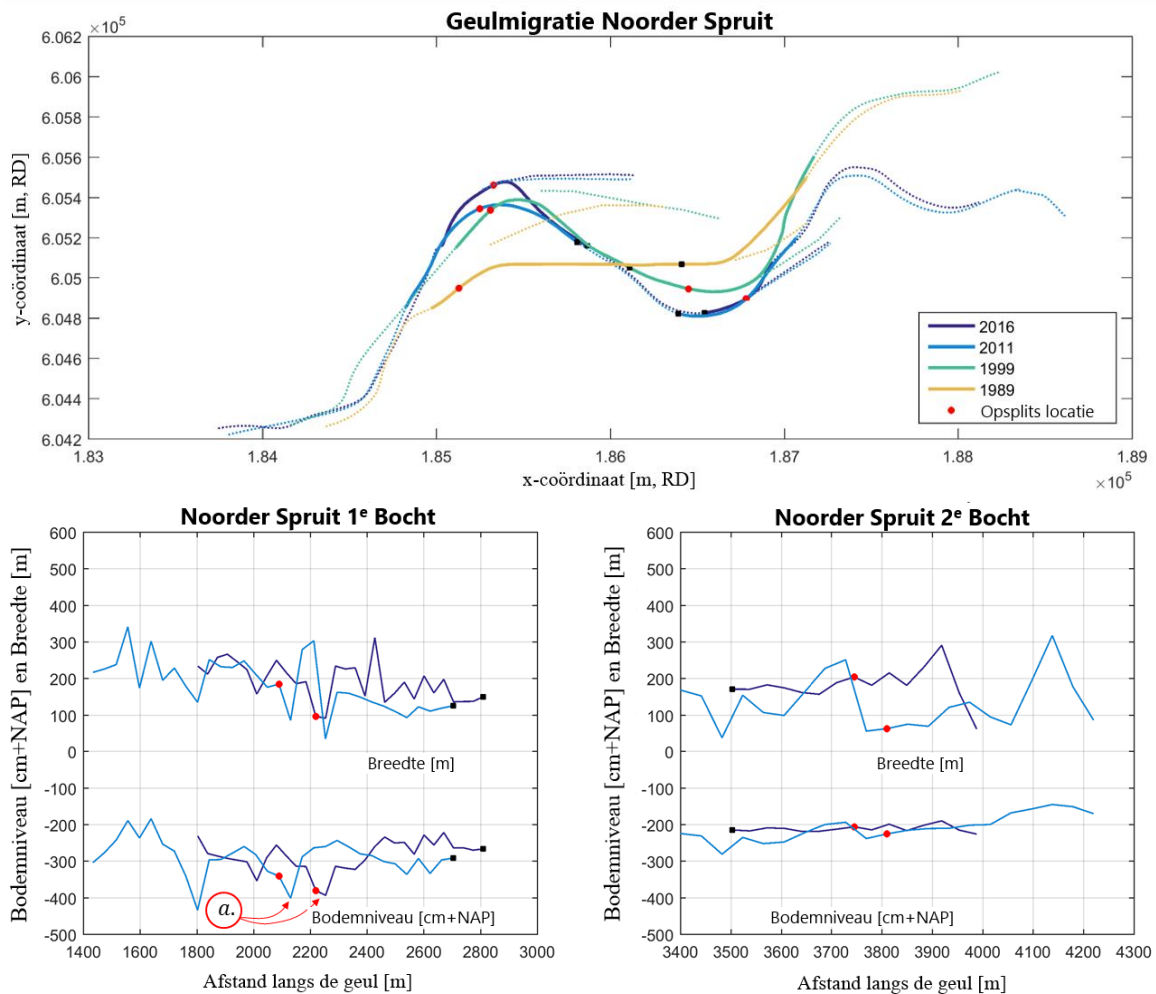
Figuur 22: De linker figuur laat de breedteafname en de afname van het bodemniveau rond een geultop zien. De gestreepte lijnen presenteren de overeenkomst in de ontwikkeling van de breedte en het bodemniveau. De rechter figuur presenteert de afstand tussen de opsplitslocatie en de snelle breedteafname.



Figuur 23: De ontwikkeling van de breedte en het bodemniveau voor de Kikkertgat geultoppen. De eerste bocht is de westelijke geultop en de tweede bocht is de oostelijke geultop. In de onderste twee figuren zijn breedte en bodemniveau van 2011 en 2016 weergegeven. De locatie waar de geul onderverdeeld is in twee bochten is aangegeven met een zwarte vierkante markering en de geschatte locatie van de vloedchaar opsplitsing is met een rode markering weergegeven. In het linker figuur zijn de geulstadia van een karakteristieke dwarsdoorsnede rond een cross-over ingevoegd. Deze laat zien dat het bodemniveau afneemt tussen twee geultoppen en toeneemt bij de geultop.

De geulbreedte in Figuur 23 neemt toe langs de geul en neemt snel af net na de opsplitsing (vlak voor de vierkante markering) van de vloedchaar (zie a. in Figuur 23). De afstand tussen de opsplitsingslocatie en de snelle breedteafname is korter geworden na verloop van tijd. Dus als de hoek tussen de ebgeul en de vloedchaar toeneemt, worden de eb- en vloedgeul meer gescheiden. In de eerste bocht kan de piek bij c. gerelateerd worden aan de overgang tussen ebgeul en vloedchaar. Deze variatie wordt veroorzaakt door de definitie van welke geul bestudeerd wordt, (de ebgeul). De tweede bocht laat ook een breedte toename zien richting de opsplitslocatie bij b. in Figuur 23, maar laat geen sterke breedtereductie zien na het opsplitsen. Dit geulgedrag kan verklaard worden door de afstand tussen de vloedchaar en de opsplitsing aan het einde van het Kikkertgat, wat de lengte reduceert waarover de ebgeul zich kan ontwikkelen (zie b. in Figuur 23).

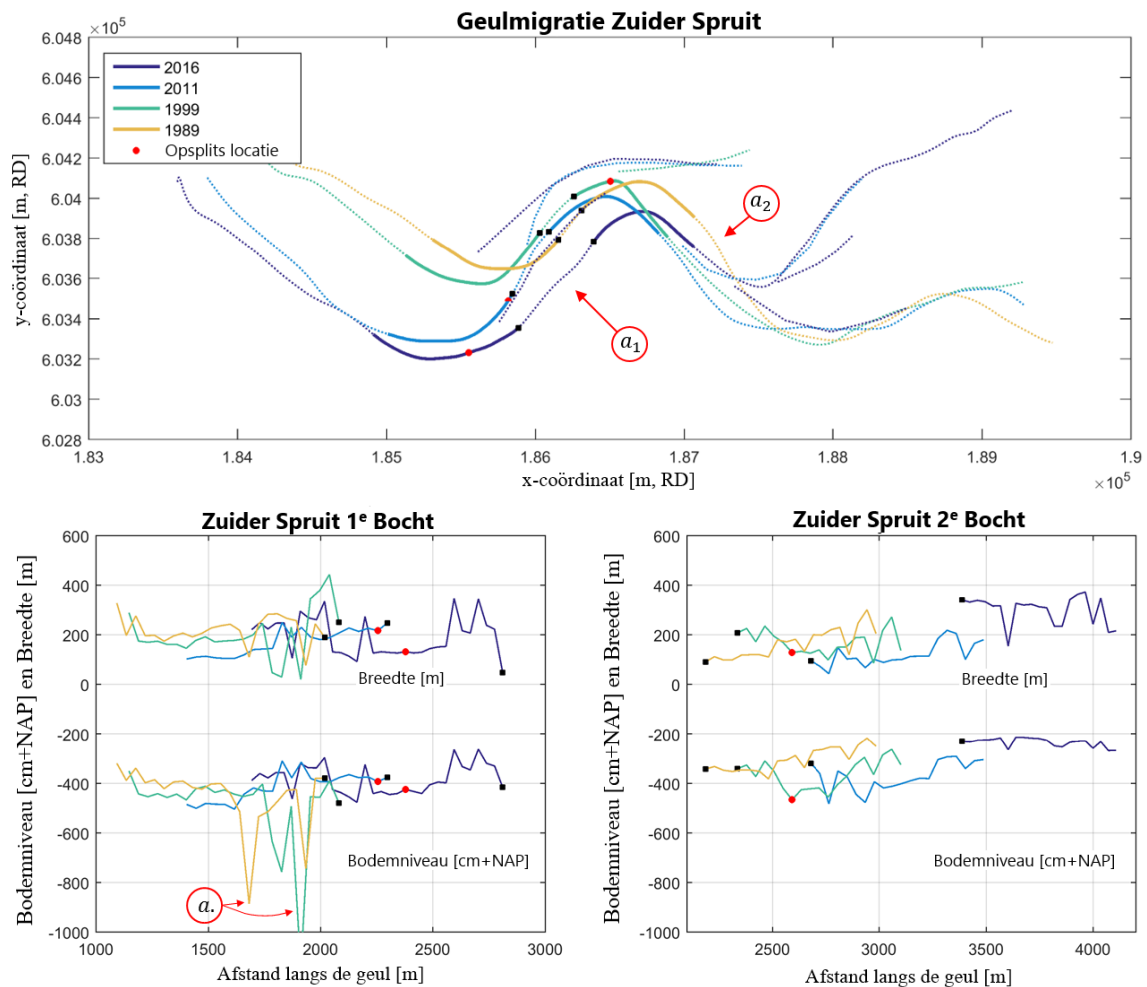
Twee observaties springen eruit met betrekking tot het bodemniveau van de geul: 1) De variaties in het bodemniveau volgen de variaties in de breedte en; 2) De diepte voor het opsplitsen is groter dan na de opsplitsing. De eerste observatie kan verklaard worden met de definitie van de breedte en het bodemniveau die aan elkaar gerelateerd zijn (zie paragraaf 4.3). De tweede observatie kan verklaard worden met het getijprisma (zie vergelijking 2.2). Wanneer een geul opsplijst reduceert de doorstroomoppervlakte wat resulteert in een afname in watervolume wat door de geul heen stroomt. Dit is vervolgens weer gerelateerd aan de afname in stroomsnelheid en daardoor kan aanzanding plaatsvinden.



Figuur 24: De ontwikkeling van de breedte en het bodemniveau voor de Noorderspruit geultoppen. De eerste bocht is de westelijke geultop en de tweede bocht is de oostelijke geultop. In de onderste twee figuren zijn breedte en bodemniveau van 2011 en 2016 weergegeven. De locatie waar de geul onderverdeeld is in twee bochten is aangegeven met een zwarte vierkante markering en de geschatte locatie van de vloedschaar opsplitsing is met een rode markering weergegeven.

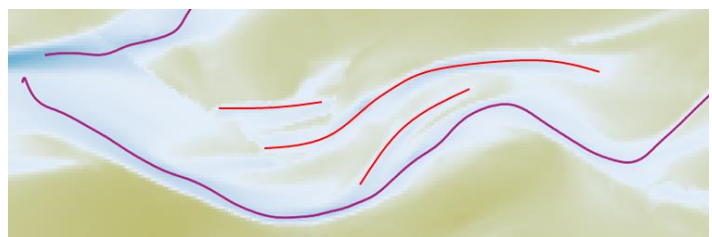
De eerste bocht van het Noorderspruit is meer locatie-vast dan de tweede bocht, waardoor aangenomen wordt dat deze zich in een meer ontwikkeld stadium bevindt. Gelijk aan Kikkertgat bestaat er een duidelijke overeenkomst in de trend van de geulbreedte en het bodemniveau. De 2011- en 2016-plots laten een afname van de breedte en bodemniveau zien rond de geultop. Net voor en net achter de top wordt een tegengestelde trend gevonden (zie a. in Figuur 24). Bij de geultop neemt het bodemniveau af en direct na de opsplitsing neemt het weer toe. De diepte net voor een geultop is ongeveer twee keer zo groot als in de secties daarvoor en daarna. In de tweede bocht zijn de veranderingen in de breedte en het bodemniveau minder gelijkend als in de eerste bocht van het Kikkertgat. Dit zou kunnen betekenen dat er een limiet is voor de geuldimensies waarbij een duidelijke opsplitsing voor kan komen.





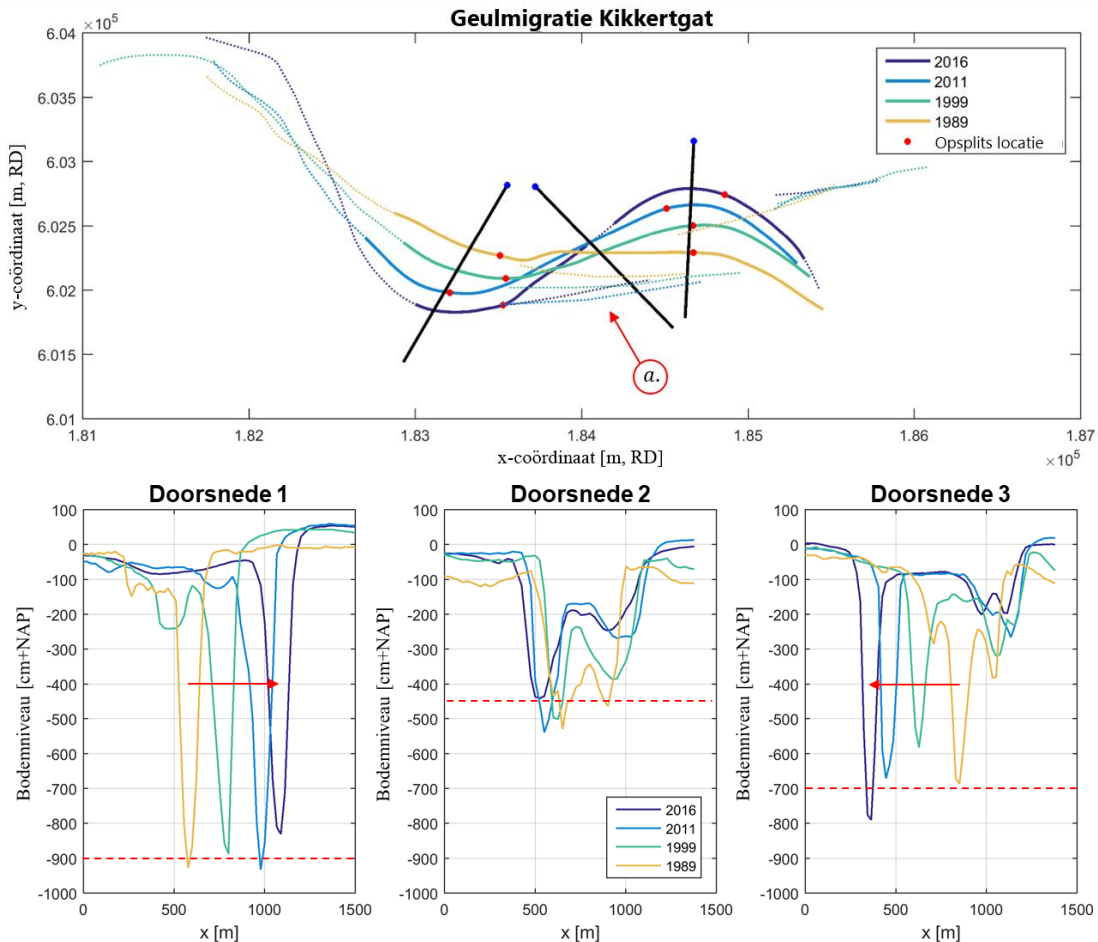
*Figuur 25: De ontwikkeling van de breedte en het bodemniveau voor de Zuiderspruit geultoppen. De eerste bocht is de westelijke geultop en de tweede bocht is de oostelijke geultop. In de onderste twee figuren zijn breedte en bodemniveau van 2011 en 2016 weergegeven. De locatie waar de geul onderverdeeld is in twee bochten is aangegeven met een zwarte vierkante markering en de geschatte locatie van de vloodschaar opsplitsing is met een rode markering weergegeven.*

Het Zuiderspruit is een variabele geul met een instabiele meander, zoals te zien is in het migratiepatroon in de bovenste plot in Figuur 25. In 1989 en 1999 had de geul een minder variabele ligging dan in 2011 en 2016. Hierdoor is het resultaat van de geulbreedte en het bodemniveau met de gebruikte methode betrouwbaarder. De toename in de diepte bij de geultop is daardoor beter te onderscheiden (zie a. in Figuur 25). De instabiele meanders bestaan uit geulen die gescheiden zijn van de ebgeulen (zie Figuur 26), wat resulteert in een groter doorstroomoppervlak. De eerste bocht heeft duidelijkere meanderende patronen in 2011 en 2016, resulterend in een vergelijkbare geulbreedte aan eerdere jaren en een ondiepere geul. De tweede bocht werd meer onregelmatig door de formatie van verschillende geulen, wat resulteerde in een toenemende breedte en een afnemende diepte. De afname van het diepte in de eerste bocht van de jaren 1989 en 1999 is interessant, omdat er toen geen vloodschaar aanwezig was. Het is dus niet noodzakelijkerwijs de vloodschaar die de afname van het bodemniveau veroorzaakt, maar het kan ook de mate van meanderen zijn.



*Figuur 26: De Zuiderspruit in de situatie van 2016, waarbij met rode lijnen de oude ebgeulen schematisch weergegeven zijn.*

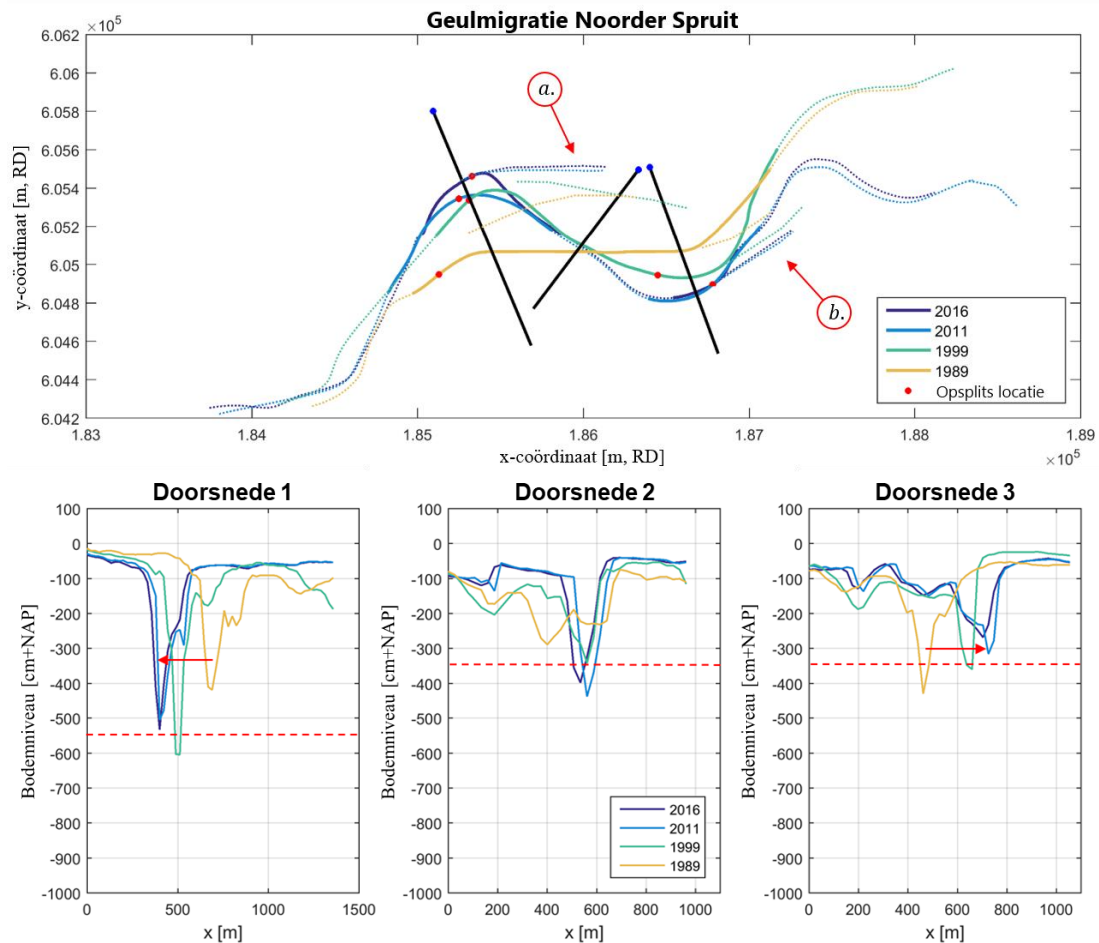
In Figuur 27, Figuur 28 en Figuur 29 is de evolutie van drie dwarsdoorsnedes langs de geulen gepresenteerd. De ontwikkeling van de twee geultoppen en een cross-over is in de drie onderste figuren weergegeven, waarin de blauwe markering in de bovenste plot  $x = 0$  m weergeeft. Met het analyseren van deze figuren is het doel om de uitbochting te bepalen en om trends in de mate van meanderen tussen de drie dwarsdoorsnedes te vinden.



Figuur 27: De ontwikkeling van de dwarsdoorsnedes bij de geultop en de cross-over van het Kikkertgat voor de jaren 1989, 1999, 2011 en 2016. Dwarsdoorsnedes 1 tot en met 3 zijn de bodemprofielen onder de zwarte lijn in het bovenste figuur, gelezen van links naar rechts (west naar oost). De blauwe markering in het bovenste figuur komt overeen met  $x = 0$  m in de onderste figuren.

Om te beginnen laat de bovenste plot in Figuur 27 zien dat de vloedscharen mee migreren met de bocht. Ook behouden ze een west-oost-oriëntatie door de tijd heen (zie a. in Figuur 27). Door een fout in de onttrekking van het geulennetwerk lijkt het of de vloodschaar van 2011 bij a. ten zuiden van de ebgeul is komen te liggen. In de overzichtskaarten is te zien dat de 2011-geultop nabij de geultop van 2016 ligt en dat de ebgeul van 2011 dus noordwaarts verschoven is in deze figuur. Deze afwijking komt niet terug in de tweede bocht en het heeft geen invloed op de resultaten omtrent de breedte, diepte en dwarsdoorsnedes.

In de eerste en derde dwarsdoorsnede is de uitbochting duidelijk zichtbaar. De migratiesnelheid in Doorsnede 1 neemt af van 20 m/j in de periode 1989-1999 naar 17 m/j in de periode 1999-2011. De migratiesnelheid in de derde dwarsdoorsnede is vergelijkbaar met de eerste. In Doorsnede 2 is te zien dat het bodemniveau en de breedte toegenomen zijn door de jaren heen. De uitbochting beïnvloedt verder de profielvorm van Doorsnede 2: in 1989 laat het bodemprofiel van Doorsnede 2 een redelijk uniform profiel zien dat evolueerde in een opsplitsing in een ebgeul en vloodschaar door het ontstaan van een drempel in het midden van de geul.

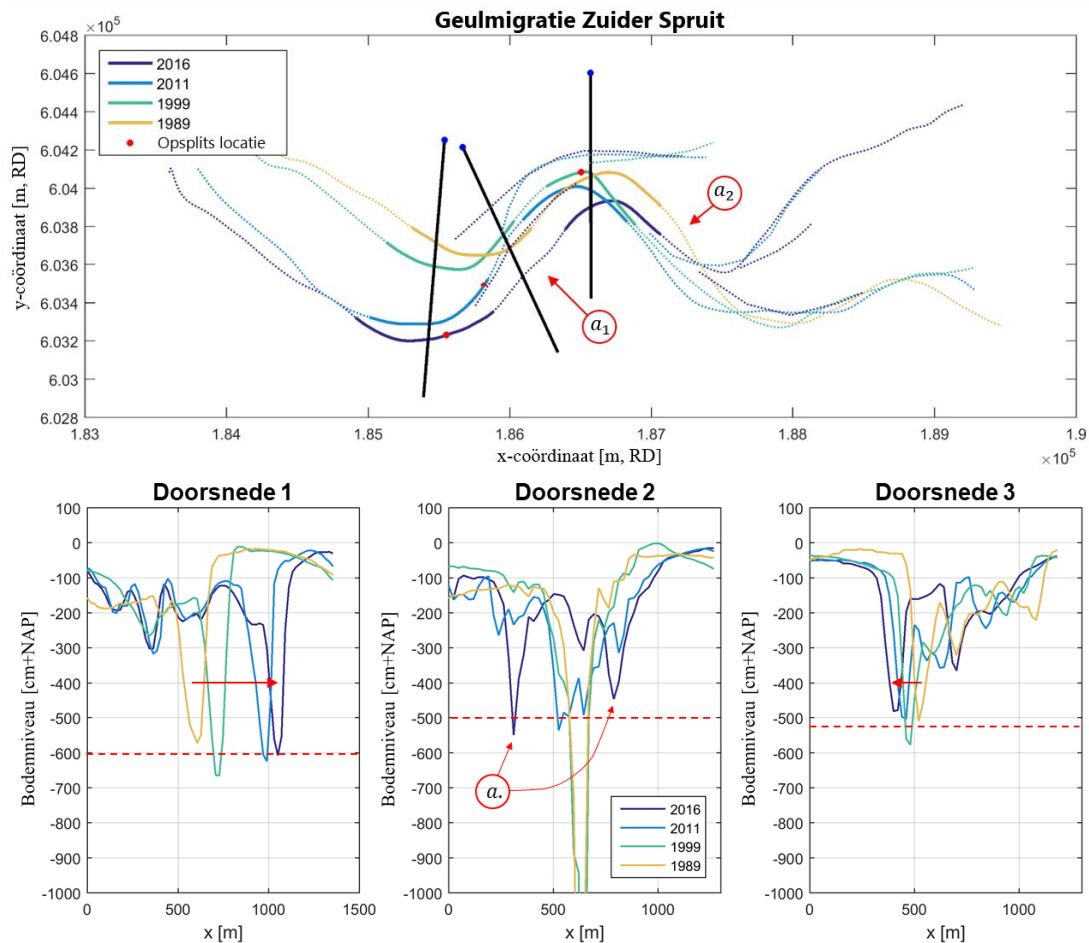


Figuur 28: De ontwikkeling van de dwarsdoorsnedes bij de geultop en de cross-over van het Noorderspruit voor de jaren 1989, 1999, 2011 en 2016. Dwarsdoorsnedes 1 tot en met 3 zijn de bodemprofielen onder de zwarte lijn in het bovenste figuur, gelezen van links naar rechts (west naar oost). De blauwe marking in het bovenste figuur komt overeen met  $x = 0$  m in de onderste figuren.

Net als de vloedscharen in het Kikkertgat migreren de vloedscharen van het Noorderspruit mee met de uitbocht van de ebgeul. Ze krijgen een sterkere west-oost-oriëntatie en in 2011 en 2016 bevindt de vloedschaar zich op ongeveer dezelfde locatie (zie a. in Figuur 28). De vloedscharen in de tweede bocht laten een parallele ontwikkeling zien door de tijd heen. Het migratiepatroon is vergelijkbaar met dat in de eerste bocht (zie b. in Figuur 28).

Vergeleken met het Kikkertgat is de variatie in het bodemniveau tussen de dwarsdoorsnedes veel kleiner in het Noorderspruit (zie de rode gestreepte lijnen in onderste figuren in Figuur 28). Gedurende de geulmigratie in Doorsnede 1 van  $x = 750$  m naar  $x = 400$  m is de maximale diepte toegenomen met circa 1,5 m. Daarnaast is de migratiesnelheid in de recentere jaren veel lager dan in het Kikkertgat. In de periode 1999-2011 was de migratiesnelheid circa 8,5 m/j en in de periode 2011-2016 stagneerde de migratie bijna volledig. De geul middellijn in het bovenste figuur laat dit niet zien, maar dit komt door de fout in de middellijnbepaling. Net als in de eerste bocht van het Kikkertgat is deze fout terug te vinden in de handmatig gedefinieerde locatie van de vloedschaar, welke niet veranderd is in de periode 2011-2016.

Doorsnede 2 toont een duidelijk verschil in de ontwikkeling van de hoofdgeul tussen 1999 en 2011. De twee geulen in 1999 zijn samengevloeid in een enkele, diepere geul in 2011. Dus de meanderende booglengte is toegenomen en het gedeelte tussen Doorsnedes 1 en 3 is verdiept. Echter kan deze verdieping ook beïnvloed zijn door de gekozen locatie van de doorsnede. Doorsnede 3 ligt namelijk dichterbij het opsplitspunt in 2011 en 2016 dan in 1999. Daarom wijkt het ondiepe geulgedeelte, links van het diepste geulgedeelte in Doorsnede 3, af tussen 1999 en 2011. De rechte oriëntatie van de geul in 1989 geeft een symmetrische dwarsdoorsnede, terwijl latere jaren een asymmetrisch profiel tonen als gevolg van de uitbocht.



Figuur 29: De ontwikkeling van de dwarsdoorsnedes bij de geultop en de cross-over van het Zuiderspruit voor de jaren 1989, 1999, 2011 en 2016. Dwarsdoorsnedes 1 tot en met 3 zijn de bodemprofielen onder de zwarte lijn in het bovenste figuur, gelezen van links naar rechts (west naar oost). De blauwe marking in het bovenste figuur komt overeen met  $x = 0$  m in de onderste figuren.

Ook bij het Zuiderspruit is de west-oostelijke floedschaaroriëntatie te vinden. Deze geul verschilt van de voorgaande geulen doordat in 1989 en 1999 geen floedscharen aanwezig waren. De opsplitsingen in 2011 en 2016 zijn geen floedscharen, maar een eb-vloed geulontwikkeling zoals beschreven door Van Veen (1950) in Figuur 9a. De breedte en het bodemniveau in de eerste bocht van 1999 laten vergelijkbare trends zien als bij de andere geulen zijn gevonden. Dit betekent dat de breedtereductie en afname van het bodemniveau ook plaatsvindt zonder de aanwezigheid van de floedscharen. Een ander verschil met het Kikkertgat en Noorderspruit is dat de floedschaar in de tweede bocht ontstaat vanuit de cross-over bij locatie  $a_1$  en niet vanuit de cross-over bij locatie  $a_2$ .

De onregelmatigheid in het bodemprofiel van het Zuiderspruit is duidelijk zichtbaar in de dwarsdoorsnedes in Figuur 29. In Doorsnede 2 is te zien dat de diepte van de opgesplitste geul (in 2016) groter is dan bij de ebgeul (zie  $a.$  in Figuur 29). In eerdere jaren bevond de geul zich op dezelfde locatie, wat resulteerde in een diepere geul in Doorsnede 2. Voor de laatste twee geplote jaren is het cross-over gebied groter en het geulpatroon van Doorsnede 2 onregelmatiger. Over het algemeen neemt de gemiddelde diepte af van Doorsnede 1 naar Doorsnede 3. Het verschil in bodemniveau tussen Doorsnede 2 en Doorsnede 3 is echter minimaal, wat de geul in termen van ontwikkeling plaatst tussen het Kikkertgat en het Noorderspruit. Daarnaast is de migratiesnelheid in Doorsnede 1 veel hoger dan in Doorsnede 3. In de periode 1989 tot 1999 was de migratiesnelheid 10 m/j. en tussen 2011 en 2016 was deze 20 m/j. De geultop bij Doorsnede 3 migreerde met circa 7,5 m/j.

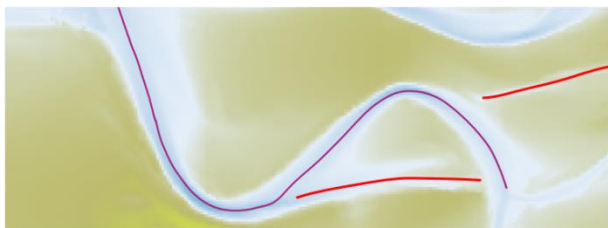
## Concluderend

Door de resultaten en conclusies van deze geulen samen te voegen, kan geconcludeerd worden dat de geografische ontwikkeling van een meander beschreven kan worden door drie meanderende stadia (zie Figuur 30):

- *Ontwikkelde meander (Kikkertgat)*: Dit is een meander met een duidelijke sinusoïde vorm en vloedcharen. In dit stadium is de diepte bij een cross-over circa twee keer kleiner dan bij de geultop. De breedte is kleiner bij de geultoppen dan in de rest van de geul.
- *Ontwikkelde, variabele meander (Noorder- en Zuiderspruit)*: In dit stadium bevat de meander een duidelijke sinusoïde vorm, vloedcharen en een variabele ebgeul locatie richting het einde van de geul. Karakteristiek voor dit stadium is de lagere correlatie tussen de breedte en diepte.
- *Onontwikkelde meander (Noorderkikkertgat)*: Kleine en rechte geulen zoals het Noorderkikkertgat ontwikkelen naar langere geulen met beginnende meanders. In dit stadium zijn beginnende bochten aanwezig en vloedcharen zijn afwezig. Daarnaast worden in dit stadium een vrij constante breedte en diepte gevonden langs de geul, wat betekent dat eb en vloed door dezelfde geul stromen.

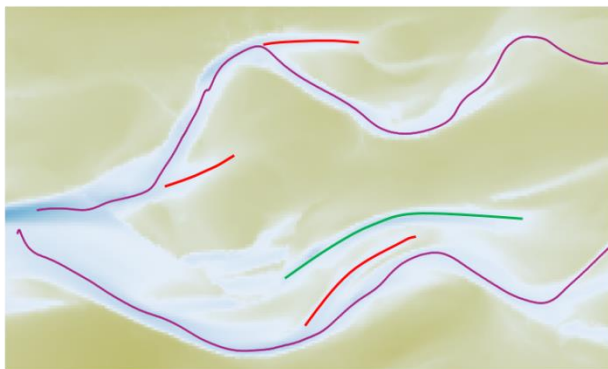
Een versmalling en/of een verdieping in een geul is een indicatie voor de ontwikkeling van een vloedschaar of geulopsplitsing. Op de locatie van deze verandering zal een opsplitsing ontstaan.

## Stadia van een Meanderende Geul



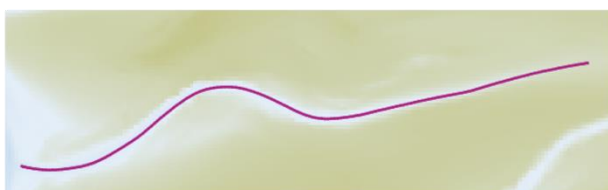
### *Ontwikkelde meander:*

1. Duidelijke sinusoïde vorm
2. Trechtersvormige breedte bij geultop
3. Vloedcharen
4. Diepte bij cross-over  $\pm 2x$  kleiner dan bij geultop
5. Correlatie tussen *B* en *D*



### *Ontwikkelde, variabele meander:*

1. Duidelijke sinusoïde vorm
2. Vloedcharen
3. Variabele ebgeul locatie richting het einde van de geul
4. Mindere correlatie tussen *B* en *D*



### *Onontwikkelde meander:*

1. Kleine, rechte, en ontwikkelende geul
2. Beginnende meanderende patronen
3. Geen vloedcharen
4. *B* en *D* redelijk constant langs de geul

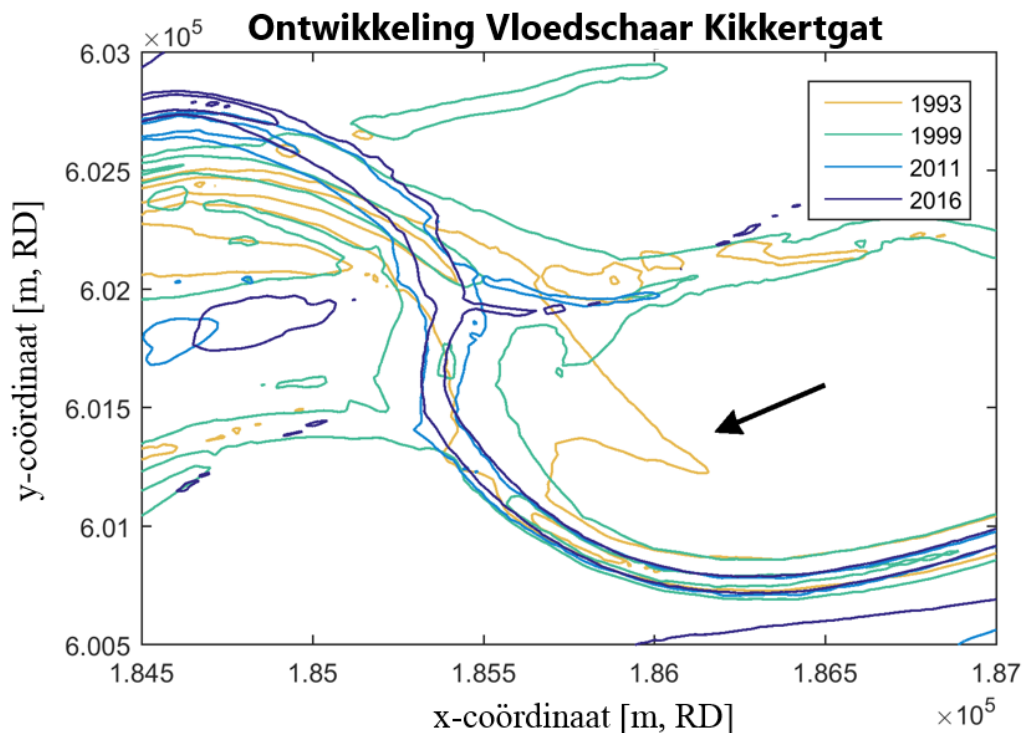
Figuur 30: Overzicht van de stadia van meanderen en waar ze gedefinieerd zijn.

## 4.7 Vloedcharen

In dit Hoofdstuk zijn tot nu toe de vloedgeulontwikkelingen nog niet zo uitgebreid beschreven als de ebgeul ontwikkelingen. De processen gerelateerd aan het ontstaan en het ontwikkelen van de geulopsplitsingen zijn ook nog niet in detail bestudeerd. In deze paragraaf worden daarom de relevante ontwikkelingen in de vloedcharen beschreven. Ook wordt vooruitgekeken naar hoe de processen gerelateerd aan de vloedschaarontwikkelingen bewezen kunnen worden met het modelleren van de waterbeweging.

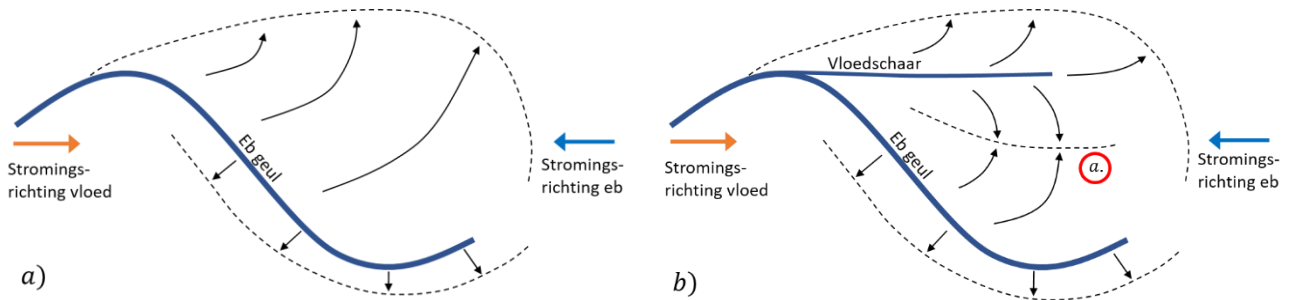


In het geval van het Kikkertgat en de ontwikkeling van Noorderkikkertgat en Zuiderkikkertgat vond een interessante ontwikkeling plaats. In 1989 werd een ontwikkelende vloedschaar aangetroffen in Zuiderkikkertgat-west (zie Figuur 31). Nadat deze was ontstaan migreerde de vloedschaar noordwaarts en kreeg het een meer west-oostelijke oriëntatie, in lijn met de bevindingen in de voorgaande paragraaf. Sinds 1990 is de ebgeul (Zuiderkikkertgat-west) gebaggerd en verdween de ontwikkelende vloedschaar. Het Noorderkikkertgat ontwikkelde zich wel en de bochten in het Kikkertgat werden veel groter dan in de niet-gebaggerde geulen geobserveerd werd. Door de verdwijning van de vloedschaar kan de hypothese gesteld worden dat de stroomsnelheid afnam en/of dat de afstroomrichting van de wadplaten naar de geulen veranderde. In Herman e.a. (2016) is beschreven dat de degeneratie van de vloedschaar indirect gerelateerd is aan de toenemende hoogte van de wadplaat, wat een sleutelrol speelt in de oriëntatie en de locatie van het lokale wantij (zie ook Figuur 32b) en voor de afname van de eb-vloed-circulatie.



Figuur 31: Contourplot van de bathymetrie op de transitielocatie van Kikkertgat naar Zuiderkikkertgat-west. De pijl wijst de locatie van de verdwenen vloedschaar aan.

Door Noorderspruit en Zuiderspruit te bestuderen is gevonden dat als een vloedschaar zich ontwikkelt, deze meer eb- en vloedstromingen gaat afvoeren. Door het opsplitsen van de ebgeul neemt het doorstroomoppervlak toe en met een gelijk watervolume dat door de geulen stroomt, zal dan de stroomsnelheid afnemen. Hierdoor zal het bodemniveau toenemen in de ebgeul en afnemen in de vloedschaar totdat evenwichtsdieptes zijn bereikt in beide geulen. Dit proces kan versterkt worden door het verkleinde lokale kombergingsgebied rond de ebgeul, die deels door de vloedschaar overgenomen is. In Figuur 32 zijn deze processen weergegeven.



Figuur 32: Schematisatie van het gereduceerde afstroomoppervlak als gevolg van de ontwikkeling van een vloedschaar. Het afstroomoppervlak is weergegeven met de stippellijn en de zwarte pijlen geven de afstroomrichting weer gedurende opkomend tij.

De hypothesen gepresenteerd in Figuur 32 omvatten de reductie van het lokale kombergingsgebied, die geschetst is met de stippellijn. De reductie van het lokale kombergingsgebied werkt als volgt: na het ontstaan van de vloedschaar wordt een deel van de vloedstroom opgevangen door de vloedgeul. De locatie waar het water de wadplaten op stroomt verandert (van ebgeul naar vloedschaar) en een lokaal wantij wordt gevormd (zie a. in Figuur 32). In Noorderspruit en Zuiderspruit wordt geobserveerd dat de vloedschaar breder en ondieper wordt, wat door dit proces verklaard kan worden. Het bodemniveau rond het lokale wantij verlaagt waardoor het sneller zal overstromen tijdens vloed. Ook neemt het doorstroomoppervlak door de opsplitsing toe waardoor de gemiddelde stroomsnelheden afnemen. De kalmere stromingscondities versterken daaropvolgend de aanzanding in de ebgeul en uiteindelijk zal een nieuwe geul gevormd worden tussen de eb- en vloedgeul in. Op deze manier ontstaat een nieuwe (rechttere) geul die wederom een meer west-oostelijke oriëntatie heeft en de oude, ondiepe eb- en vloedgeulen worden opgevuld. De nieuwe geul begint te meanderen onder invloed van de getijdestromen en de afstroom van de wadplaten en dan herhaalt het proces zich.

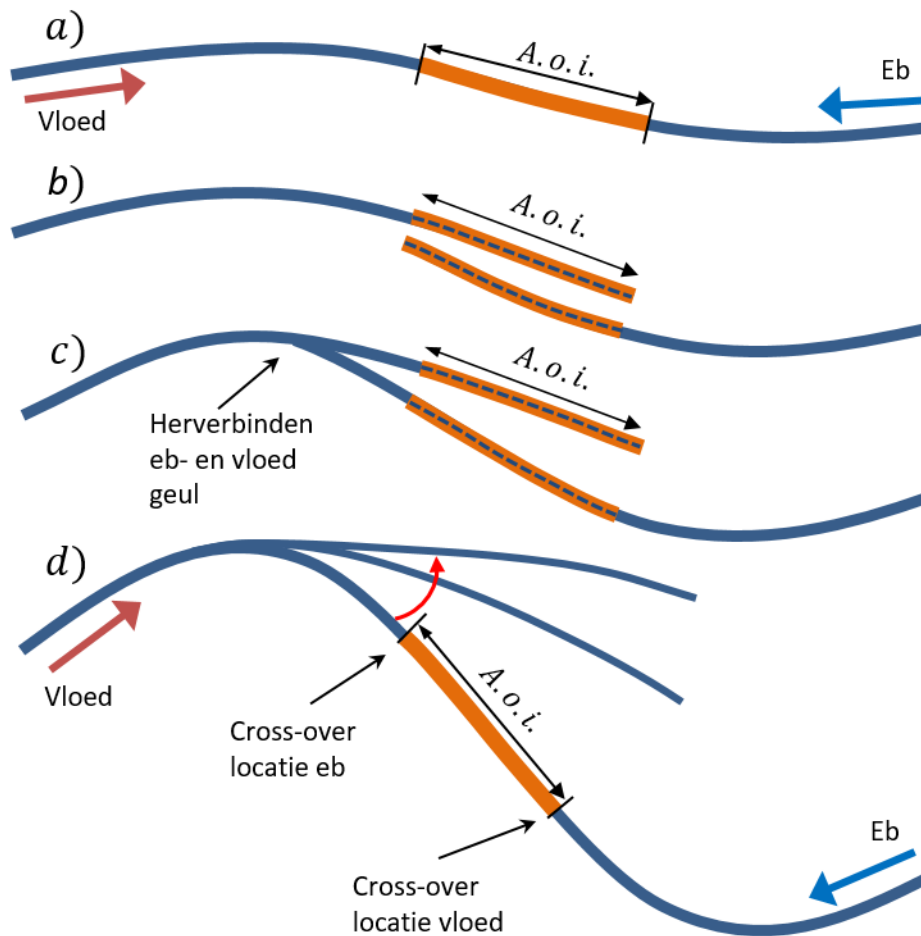
### Cross-overs

Een andere interessante bevinding is de locatie waar de geulsplitsingen plaatsvinden. Vanuit Figuur 11 en Figuur 14 lijkt het alsof de geuloriëntatie voor het opsplitspunt bepaalt hoe de oriëntatie na het opsplitspunt eruit komt te zien. Geulen met een west-oost-oriëntatie (bijv. het Noorderspruit en Zuiderspruit) splitsen op bij een geultop en vormen twee geulen met een gespiegelde oriëntatie. In het geval van een geul met een noord-zuid oriëntatie wordt een parallelle ligging van de geulen gevonden na het opsplitsen bij de cross-over.

De oorsprong van de vloedscharen en geulsplitsingen liggen in twee opsplitsmechanismen. De eerste wordt veroorzaakt door een meanderende geul die “uit de bocht schiet” als de uitbocht toeneemt en de stroomsnelheden toenemen. Het tweede principe is gepresenteerd in Figuur 9a en beschrijft een splitsing tussen een eb- en vloedgeul in de hoofd(eb-)geul. In Figuur 9 is het mechanisme gepresenteerd waarbij een vloedschaar uit een cross-over ontstaat. De cross-overlocatie is de locatie waar de stroming van de ene in de andere bocht overgaat. De secundaire stroming verandert van richting bij de cross-over en daar worden de laagste secundaire stromingsnelheden verwacht. In erodeerbare (fluviale) systemen is een cross-over daarom vaak gerelateerd aan een hoger bodemniveau en een grotere geulbreedte. In het geval van een getijdegeul wordt verwacht dat dit ondiepe gedeelte gevoeliger is voor het ontstaan (opsplitsen) van een nieuwe geul. Tot nu toe worden vloedscharen beschreven volgens het “uitschiet”-principe, terwijl in het kombergingsgebied van het Borndiep het andere principe vaker voorkomt.

Figuur 33 illustreert het proces van geulopsplitsing volgens het tweede principe. Zodra de geul begint te meanderen worden bepaalde geulsecties vloed-dominant en anderen eb-dominant. Vloed-dominant betekent dat de vloedstroming in dat gedeelte van de geul sterker is dan de ebstroming. Als een bocht ontstaan is, ontstaat (bocht-geïnduceerde) secundaire stroming. Boven in de waterkolom is de secundaire stroming gericht naar de buitenbocht en onderin is deze naar de binnenbocht gericht (zie ook Hoofdstuk 5). Bij de overgang tussen bochten klappt de secundaire stroomrichting om. Dit omklappen gebeurt rond de cross-over, wat in Figuur 33a aangeduid wordt als de Aoi (Area of interest, interessegebied). In plot c) wordt de verwachting weergegeven dat de cross-over locatie met vloed meer naar het oosten ligt dan met eb. De verschillende (secundaire) stromingscondities bij de Aoi resulteren in een splitsing van de geul in een eb- en vloedgeul, wat in plot b) gepresenteerd is. Wanneer de geul uitbocht, krijgen de vloedgeulen een meer west-

oost oriëntatie en na verloop van tijd wordt de ebgeul weer opnieuw verbonden aan de eerste bocht, zoals gepresenteerd is in plots c) en d).



*Figuur 33: Een schematisch overzicht van een meanderende getijdegeul met de eb en vloed cross-over op een verschillende locatie. Het interessegebied (Aoi) lijkt het meest instabiele geulonderdeel te zijn die vatbaar is voor variaties in de (secundaire) stroomsnelheden. Plot a) omschrijft een beginnende meander waar door de kleine bochten secundaire stroming gevormd wordt. Als de meander zich ontwikkelt splitst de geul zich op bij de Aoi in een eb- en vloedgeul, zie plot b). Plot c) geeft weer dat de ebgeul zich weer aan de vloedgeul verbonden wordt. De laatste plot, d), presenteert een volledig ontwikkelde meander. De ebgeul is daar weer verbonden aan de vloedgeul, terwijl de vloedgeul een meer west-oostelijke oriëntatie heeft gekregen, wat met een rode pijl is weergegeven.*

De processen die hierboven beschreven worden beschrijven de start en ontwikkeling van een geulopsplitsing. Als de start van opsplitsen bekend is, kunnen conclusies worden getrokken omtrent de maximale uitbocht, waarna de geul zich opnieuw zal opsplitsen. Simulaties van de waterbeweging geven inzicht in het effect dat de uitbocht op de stroming, en dus het sedimenttransport heeft. De ontwikkeling van getijdestromen door de geulen geeft daarnaast ook een indicatie van de cross-over locatie (secundaire stroming) gedurende eb en vloed. De dieptegemiddelde stroomsnelheden laten zien welke geulsecties eb- en/of vloed-gedomineerd zijn en hoe dit zich ontwikkelt in relatie met verschillende bodemprofielen. In het volgende hoofdstuk wordt de waterbeweging gemodelleerd om deze processen te verkennen.

## 4.8 Conclusies

Het doel van dit hoofdstuk is om het verschil in ontwikkeling tussen de getijdemeanders, die wel- en niet beïnvloed zijn door baggeren, in het kombergingsgebied van het Borndiep te verklaren. Om dit doel te bereiken zijn de geulen in het kombergingsgebied geclassificeerd op basis van hun locatie en dimensies. Omdat de ontwikkelingen afhankelijk zijn van de schaal waarnaar gekeken wordt zijn de geulen geclassificeerd op drie verschillende schaalniveaus: Macro, Meso en Micro. Vier deelvragen werden gepresenteerd om de beantwoording van Vraag A te ondersteunen. De conclusies met betrekking tot iedere deelvraag worden hier nu uitgewerkt:

*a.1. Welke geulen kunnen gebruikt worden voor het vergelijken van 'door baggeren beïnvloede' en 'niet-beïnvloede' uitbochtende geulen?*

Door de ontwikkeling van de geul middellijnen in de Macro-schaal te analyseren zijn de uitbochtende geulen onderscheiden van de geografisch meer vastliggende geulen. De kleinere geulen richting het wantij lieten de grootste meanderende ontwikkeling zien. Daarom zijn de geulen Noorderspruit, Zuiderspruit, Kikkertgat, Noorderkikkertgat en het Zuiderkikkertgat gebruikt voor de analyse. Van deze geulen worden Kikkertgat en Zuiderkikkertgat beschouwd als 'door baggeren beïnvloede' geulen.

*a.2. Welke geuldimensie is het meest beïnvloedt door de veranderingen in het systeem?*

Door de verschillende geulen te vergelijken is het meanderende patroon in het kombergingsgebied van het Borndiep beschreven met drie geuldimensies. Ten eerste is een toenemende trend gevonden in de booglengthe van alle geulen tot aan 1990. Na 1990 werden de geulen korter, behalve voor het Noorderkikkertgat, die bleef groeien. Ten tweede is gevonden dat de geulbreedte en het bodemniveau in het algemeen afnemen in de periode 1989 tot 2016. Langs de geulen neemt het bodemniveau toe richting het wantij en deze toename kan het beste beschreven worden met een exponentiele trendlijn. Het bodemniveau nam in mindere mate af dan de breedte en omdat de geulwanden steiler zijn geworden konden de geulen in 2011 en 2016 beter onderscheiden worden in de bodemkaarten. Van de bestudeerde dimensies zijn de geulbreedtes het meeste veranderd in de bestudeerde periode.

*a.3. Hoe veranderen de geuldimensies in een bocht en worden deze dimensies beïnvloed door de aanwezigheid van een geulsplitsing of een vloodschaar?*

Voor en achter een geultop neemt de breedte van de geul en het bodemniveau toe. De geultop zelf is gedefinieerd door lokale verdieping en een gereduceerde breedte. Dit resulteert in een trechtvormige geometrie die beter te onderscheiden is als de meanders ontwikkelen. Deze eigenschappen worden gevonden ongeacht of er een vloodschaar aanwezig is in de geul. De vloodscharen migreren mee met de geultop en ze streven naar een west-oost oriëntatie.

*a.4. Hoe is de gebaggerde geul en het naastliggende Kikkertgat anders dan de niet-gebaggerde geulen?*

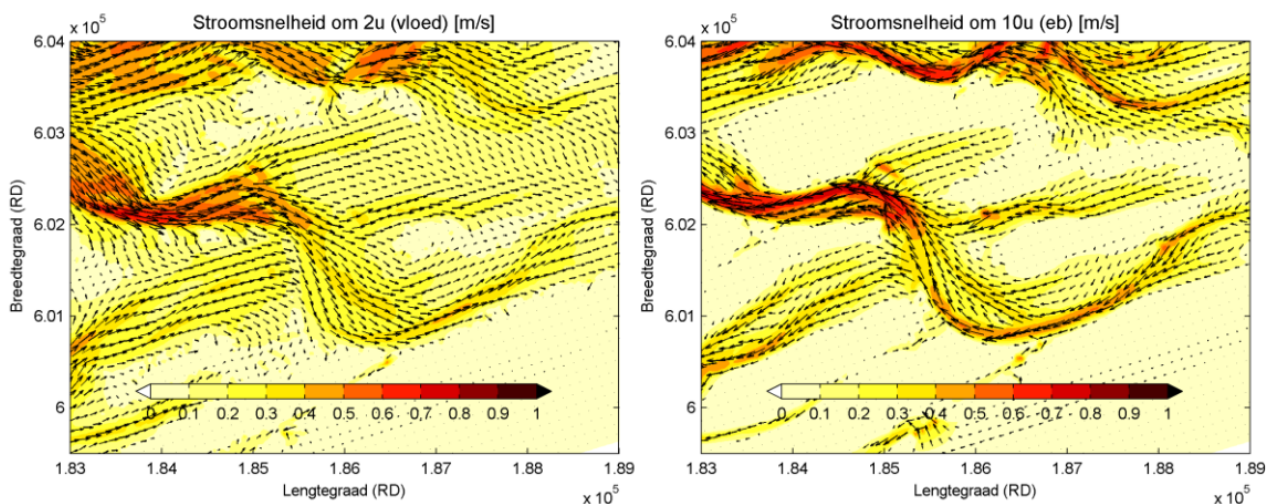
Het Kikkertgat en Zuiderkikkertgat-west worden beschouwd als de 'door baggeren beïnvloede' meanders. Niet-beïnvloede meanders bevatten vloodscharen die gedetecteerd kunnen worden aan de hand van een onregelmatigheid in de breedte en het bodemprofiel. Het Kikkertgat bevat deze karakteristieken ook, maar het gebaggerde Zuiderkikkertgat-west niet. Deze geul bevat ook geen vloodscharen of eb-vloedgeul ontwikkelingen.

## 5 WATERBEWEGING

### 5.1 Inleiding

Nu de geuldimensies op verschillende ruimteschalen bestudeerd zijn, worden in dit hoofdstuk de ontwikkelingen op het niveau van de individuele geulen onderbouwd met modelsimulaties van de waterbeweging. Het doel hiervan is om de rol van de hydrodynamica in het ontstaan en de ontwikkeling van de meanderende geulen te bepalen. Zoals in Paragraaf 4.7 beschreven is, wordt verwacht dat inzicht in de locaties en het moment van geulsplitsing van groot belang is op de maximale uitbocht. Om deze hypothese te onderbouwen zijn dieptegemiddelde en secundaire stromingen in 2DH en 3D gesimuleerd.

De hydrodynamica in het kombergingsgebied van het Borndiep is al eerder gemodelleerd, onder andere in (Herman e.a., 2016a). Hiervoor is een 2DH model opgezet en zijn onder andere de dieptegemiddelde stromingen en bodemschuifspanningen in de vaargeul bestudeerd. De meeste aanzanding vond plaats in het Zuiderkikkertgat-west en omdat het Kikkertgat niet-natuurlijk uit lijkt te bochten, werd de focus voornamelijk op deze twee geulen gelegd. De hoofdconclusie van de modelleerstudie was dat in het Zuiderkikkertgat-west het getijdevolume reduceert en dat de vloeddominantie lokaal toeneemt (Herman e.a., 2016a). In het Kikkertgat namen de getijdevolumes en stroomsnelheden toe in 2011 ten opzichte van 1999 en 1993. In de meeste andere geulen reduceerde de stroomsnelheden, waardoor sedimentafzetting in de vaargeulen mogelijk werd. De ebstroomsnelheden namen meer af dan de vloedstroomsnelheden en dat betekent dat het transport in de richting van het kombergingsgebied werd bevorderd. Om tot deze conclusies te komen zijn de dieptegemiddelde stromingen langs de geul bepaald en zijn overzichtsfiguren zoals Figuur 34 gegenereerd. In deze figuren is de getijstrooming in de vloodschaar (zie ook Figuur 31) duidelijk zichtbaar. Resultaten van latere jaren lieten zien dat de strooming door deze schaar uiteindelijk verdween.



Figuur 34: Overzichtsfiguren van de dieptegemiddelde stromingen gedurende vloed (links) en eb (rechts) in 1993. Figuur uit (Herman e.a., 2016a).

De hypothese dat vloodscharen en geulopsplitsingen gevormd worden bij een cross-over wordt ondersteund door de dieptegemiddelde stromingen in Figuur 34. Als gekeken wordt naar Figuur 34 vindt de geulopsplitsing plaats rond de cross-over, waar het ondieper is dan in de rest van de geul. Het verdwijnen van de vloedgeul is mogelijk gerelateerd aan het baggeren, wat de grote uitbocht van het Kikkertgat als gevolg heeft veroorzaakt. Als de geul niet gebaggerd wordt, dan wordt verwacht dat de uitbocht van een getijdegeul afhankelijk is van de opsplitsingen.



Met het bestuderen van de eb- en vloedstromingen in de geulen kan de relatie tussen stroomsnelheden en de geuldimensies beoordeeld worden. De vraag die in dit onderdeel beantwoord wordt is:

*Welke trends in dieptegemiddelde- en secundaire stroomsnelheden kunnen onderscheiden worden die van invloed kunnen zijn op de uitbocht van getijdegeulen?*

Hoewel secundaire stroming relatief zwak is, kan deze stroming het momentum herverdelen over de dwarsdoorsnede (de Vriend e.a., 2011). Als de locatie waar de secundaire stroming van richting verandert (bij de cross-over) verschilt tussen eb en vloed, dan ontstaat een onstabiele geulsectie. De verwachting is dat de sterkte van de (secundaire) stroming (eb of vloed) rond de cross-over vervolgens maatgevend is voor het aanpassen van de geuldimensies in deze geulsectie. Dit principe kan beschreven worden met de volgende deelvragen die gebruikt worden om de bovenstaande vraag te beantwoorden:

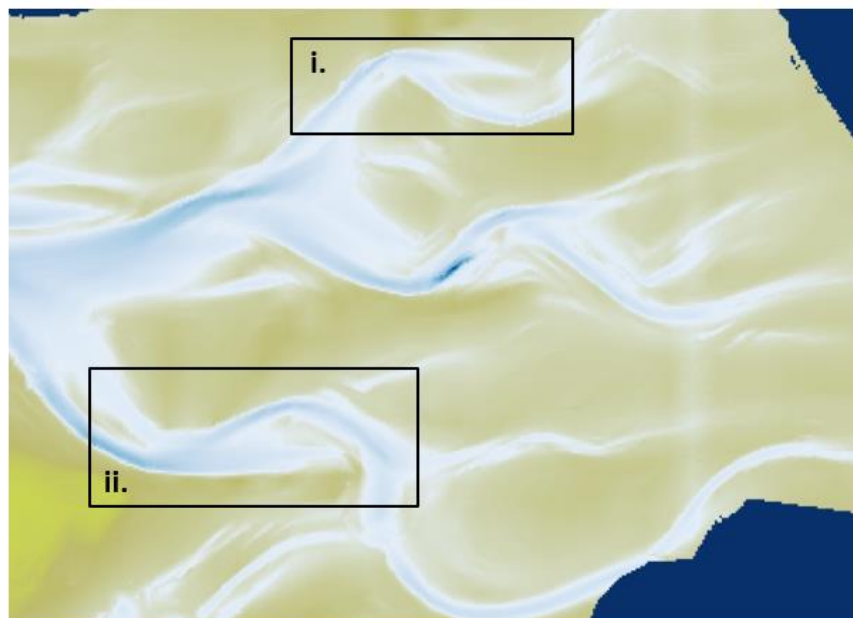
b.1. *Hoe is de dieptegemiddelde stroming gerelateerd aan de veranderende geuldimensies?*

b.2. *Hoe is de secundaire stroming gerelateerd aan de veranderende geuldimensies?*

b.3. *Hoe zijn de getijdestromingen gerelateerd aan de geulopsplitsingen?*

Met deze vragen worden verschillende hypothesen getest. In Paragraaf 3.2 werd beschreven dat meer energie verloren gaat langs een meanderende geul dan in rechte geulen. De toename in geullengte kan daarom gerelateerd worden aan het energieverlies per eenheid lengte, wat afneemt met een lengtetoe name (Leopold et al., 1960). Er wordt verwacht dat dit ook naar voren zal komen in de stromingsverdelingen langs de geul. Daarbij ontstaat de verwachting dat er ook een relatie is tussen de booglengte van de geul en de (secundaire) stroomsnelheden waarbij een geulopsplitsing plaatsvindt.

De ontwikkelingen omtrent de geuldimensies zijn bestudeerd voor Kikkertgat, Noorderspruit en Zuiderspruit in Hoofdstuk 4. Deze geulen laten een verschillend meanderend patroon zien met vloedscharen en opsplitsingen op verschillende locaties. Het Noorderspruit en Zuiderspruit bevinden zich in hetzelfde stadium en daarom wordt alleen het Noorderspruit bestudeerd samen met Kikkertgat. De focus van dit hoofdstuk zal liggen op de ontwikkelingen per geul. De bestudeerde locaties zijn gepresenteerd in Figuur 35 en deze lieten de meest consistente en vergelijkbare ontwikkeling zien. De analyses zijn uitgevoerd voor alle geulen die in de Meso-schaal uitgewerkt zijn, maar deze zijn hier niet allemaal gepresenteerd. Voor de uitwerkingen van alle geulen wordt verwezen naar (Van Til, 2017).



*Figuur 35: De twee locaties die met het hydrodynamische model bestudeerd zijn. Gebied i. bevat de eerste bocht van het Noorderspruit en gebied ii. de Kikkertgat-bochten. De bodemkaart die als achtergrond dient is de 1999 bathymetrie.*

## 5.2 Methode waterstromingen

De waterstromingen die gemodelleerd zijn omvatten alleen de getijdestromen, invloeden van wind en golven zijn niet meegenomen. De modelsimulaties geven inzicht in de stromingsontwikkeling door de geulen met verschillende geuldimensies. De modelresultaten zijn geanalyseerd voor een gemiddelde getijamplitude, wat in dit geval uit een getijverschil van 1 m+NAP tot -1,2 m+NAP bestond. Voor de beschrijving van de modelopzet wordt verwezen naar (Van Til, 2017).

Van de berekende dieptegemiddelde en secundaire stroming worden verschillende figuren gepresenteerd. Voor het presenteren van de 2DH-resultaten zijn overzichtsfiguren gemaakt voor de dieptegemiddelde en secundaire stroming. Hierbij zijn de piekstromsnelheden gepresenteerd voor het moment dat deze plaatsvinden in het meest westelijke observatiepunt in het Kikkertgat. De observatiepunten zijn gedefinieerd langs de geulmiddellijn en de piekstromsnelheden bij eb en vloed in de observatiepunten zijn in een apart figuur gepresenteerd. Op deze manier geeft iedere figuur de maximale (secundaire) stroomsnelheid gedurende een getijdencyclus. De secundaire stroming is berekend voor ieder apart punt op hetzelfde tijdstip als waarvoor de dieptegemiddelde piekstroming gevonden was. Voor de 3D-resultaten is de dieptegemiddelde piekstromsnelheid gepresenteerd in overzichtsfiguren en verder zijn de (secundaire) stromingen uitgewerkt langs de observatiepunten.

## 5.3 Dieptegemiddelde stroomsnelheid

De dieptegemiddelde stroomsnelheid is gesimuleerd om te bepalen welke gebieden in de geul eb- of vloedgedomineerd zijn. Hoe dit anders is voor de verschillende bodemkaarten (i.e. jaren) geeft inzicht in de relatie tussen de geomorfologische ontwikkelingen en stroomsnelheden. Figuur 36 *a)* en *b)* tonen relatieve dieptegemiddelde stroomsnelheden voor een eb- en een vloedsituatie. De figuur laat zien dat de ebstromingen voornamelijk door de ebgeulen stromen en dat de afstroom van de wadplaten voornamelijk richting het westen plaatsvindt. Vloedstroming propageert zowel door de ebgeulen als over de wadplaten, maar de snelheden in de ebgeulen blijven groter dan over de wadplaten. Gedurende vloed is te zien dat het water over de platen stroomt in een voornamelijk oostelijke richting. De trechtersvormige geultop zorgt voor een stroomversnelling ten oosten van de geultop gedurende vloed. Waar gedurende eb deze acceleratie geobserveerd kan worden aan beide zijden van de oostelijke geultop, laat de westelijke geultop een verschuiving in piekstromsnelheid zien. Ten noorden van de westelijke geultop bevindt zich een gebied met een lager bodemniveau dan de andere wadplaten. Dit kan komen door de afstroom van de wadplaat gedurende eb een meer westelijke stromingsrichting heeft, in plaats van dat het de kortste weg naar de ebgeul zoekt. Dit komt overeen met het stromingspatroon in Figuur 34.

Omdat de wadplaten overstromen bij opkomend tij, wordt een verschil verwacht in de stroomsnelheden in de geulen bij eb en vloed. Door het verschil tussen de vloed- en eb-stroomsnelheden te berekenen wordt de dominante stromingsrichting bepaald. Dit geeft een indicatie voor de verplaatsingsrichting van het sediment en daarom worden de stroomsnelheden in de ebgeulen bestudeerd in plots *a)* en *b)*. De eb en vloedstromingen in plot *c)* laten een gelijke trend langs de geul zien. Zoals verwacht zijn de ebstroomsnelheden groter dan bij vloed. Met de groene en oranje markeringen wordt in plot *c)* het verschil tussen vloed en eb weergegeven. In plot *d)* is dit verschil voor vier verschillende jaren in één figuur geplot en daarin wordt gevonden dat de vloed-dominantie bij  $x = 700$  m toeneemt tussen 1993 en 2011, maar dat het meer eb-dominant is geworden tussen 2011 en 2016. De vloed-dominantie verplaatst zich langs de geul als gevolg van een verschil in startlocatie van de geul (zie Paragraaf 4.5) en als gevolg van de uitbocht van de geul. Uiteindelijk wordt de geul bijna volledig eb-dominant in 2016, wat betekent dat het sediment hoogstwaarschijnlijk uit de geul getransporteerd zal worden.

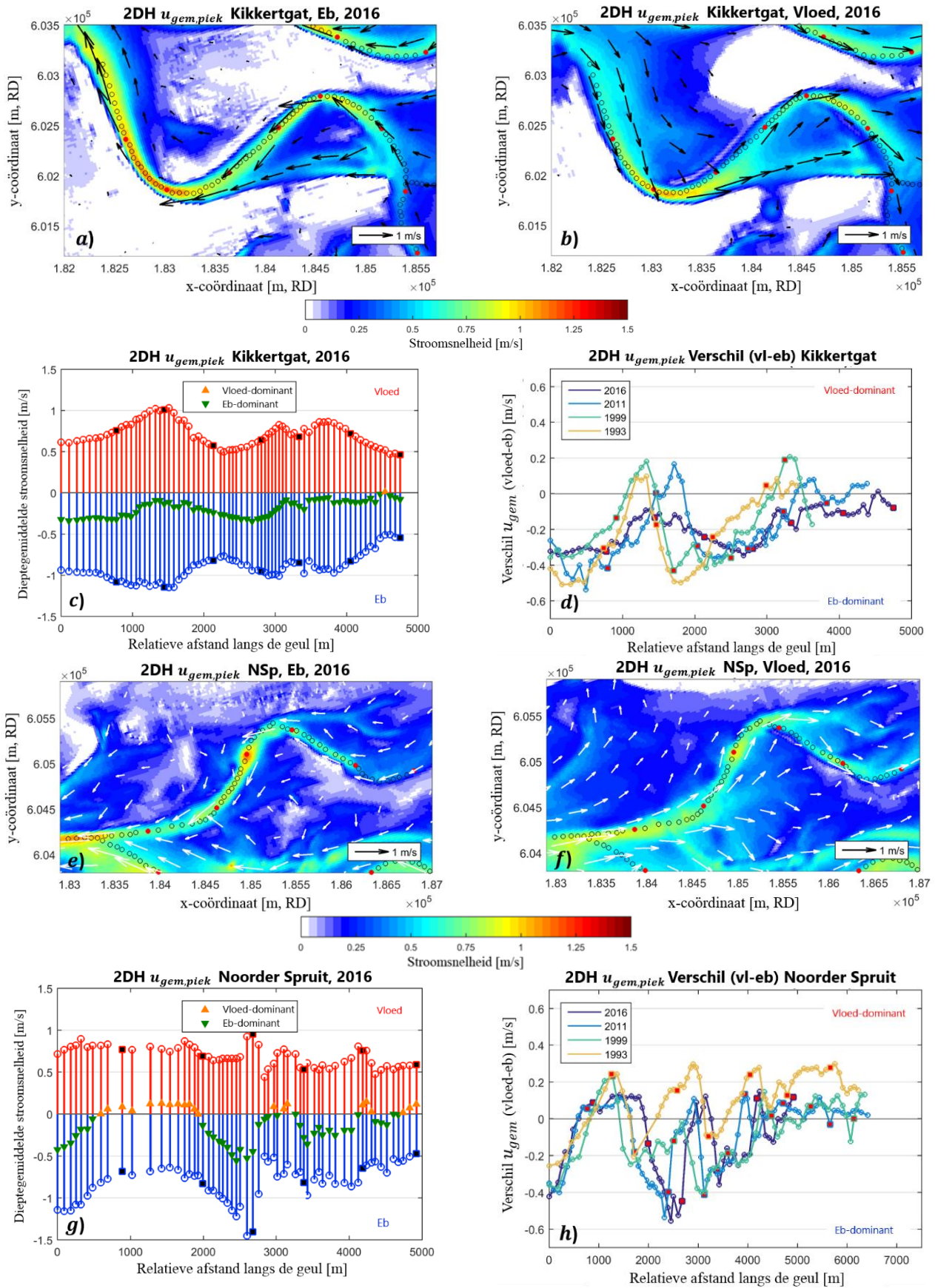
De vier onderste plots laten dezelfde informatie zien, maar dan voor Noorderspruit. Plots *e)* en *f)* zijn gecreëerd op hetzelfde moment als plots *a)* en *b)*. De wadplaten zijn daar nog niet drooggevallen, waardoor het vergelijk tussen Kikkertgat en Noorderspruit gecompliceerder wordt. Op de locatie van de 3<sup>e</sup> rode markering wordt een hoge lokale snelheid gevonden. Deze piek stroomsnelheid is het resultaat van een grote gradiënt in het bodemniveau op deze locatie, die terug te vinden is in de overzichtskaarten. Gedurende vloed is deze pieksnelheid minder uitgesproken vanwege de hogere waterstand; de toename van het doorstroomoppervlak verlaagd de stroomsnelheid (zie vergelijking 2.2). Buiten deze lokale afwijking laten de snelheidsvectoren zien dat bij de geultop de snelheden over het algemeen hoger zijn dan in de ebgeulen. Ook in de vloedperiode zijn de stroomsnelheden het hoogste bij de geultop en propageert het water door de

vloedschaar. Plots *g*) en *h*) laten een mix zien van eb- en vloed-dominantie. Door de tijd heen (plot *h*) wordt de kracht van de ebstroming sterker, terwijl dit ongeveer gelijk blijft gedurende vloed. De geultop (links van de 4<sup>e</sup> rode markering) is vloed-dominant en de cross-over voor en achter de geultop zijn eb-dominant. Dit ondersteunt de redenering van Van Veen (1950) dat de vloedscharen gevormd worden door de vloedstromingen. Waarom er geen ebscharen gevormd wordt is beschreven in Paragraaf 5.5.3.

### **Concluderend**

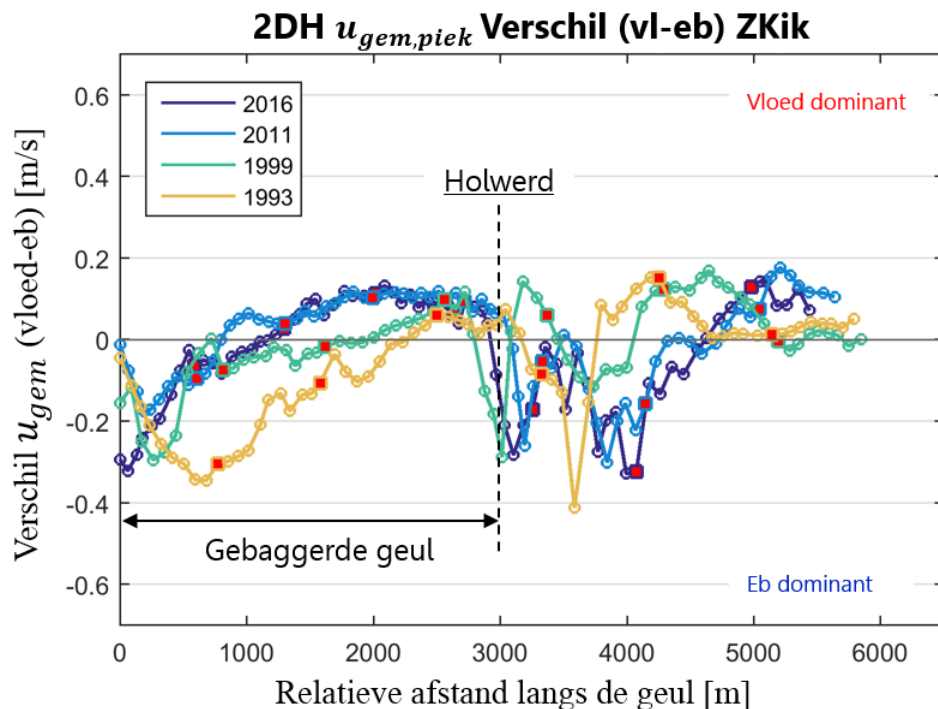
Bij zowel Kikkertgat als Noorderspruit worden de grootste stroomsnelheden gevonden bij de geultop. Daar is het eb-vloedverschil het kleinst en heerst er vloed-dominantie. De stroomversnelling op deze locatie stuwt het water naar de vloedschaar gedurende vloed en richting de cross-over gedurende eb. Dit resulteert in een lokale geulverbreding voor en na de geultop. Terwijl de uitbocht plaatsvindt worden de ebstromen sterker en wordt de vloed-dominantie gereduceerd. In het Kikkertgat verdween de vloed-dominantie bijna in zijn geheel.

Wanneer de andere geulen geëvalueerd worden (zie hiervoor Van Til, 2017) wordt gevonden dat Zuiderspruit en het Noorderspruit gelijke trends laten zien op het gebied van eb- en vloed-dominantie bij de cross-overs en de geultoppen. Ook kan gezien worden dat als de ligging van de geul meer variabel wordt (zie Paragraaf 4.8), de eb- en vloed-dominantie ook meer variabel wordt. Het Zuiderkikkertgat laat een compleet tegengesteld resultaat zien (zie Figuur 37). Het Zuiderkikkertgat-west ging over van eb-dominantie in 1993 naar voornamelijk vloed-dominantie in 2011 en 2016. Rond Holwerd wordt de geul weer eb-dominant, waarna (naar het oosten toe) gelijke trends gevonden werden in Noorderspruit en Zuiderspruit. In de ontwikkelende Noorderkikkertgat-geul zijn de ondiepere gedeeltes vloed-dominant en het diepere begin van de geul wordt voornamelijk gedefinieerd door eb-dominantie.



Figuur 36: Verschillende figuren die de dieptegemiddelde stroomsnelheid presenteren in het Kikkertgat en Noorderspruit. Plots a), b), e) en f) zijn overzichtplots waarin de vectoren en de kleuren de stroomsnelheid weergeven. Plots c) en g) presenteren de dieptegemiddelde stroming langs de geul voor één jaar en plots d) en h) laten de verschillen zien tussen vloed en ebstromen voor de vier jaar die gesimuleerd zijn.





Figuur 37: Het verschil tussen vloed en eb voor het Zuiderkikkertgat. Het geuldeel dat gebaggerd wordt bevindt zich tussen  $x = 0$  m tot  $x = 3000$  m.

## 5.4 Ontwikkeling meanders

De hypothese die in Figuur 32 gepresenteerd is, stelde dat de ontwikkeling van een vloed-schaar het lokale kombergingsgebied van de ebgeul zou reduceren. Daarnaast wordt verwacht dat als de ebgeul gebaggerd wordt, het lokale wantij (tussen de eb- en vloedgeul in) noordwaarts migreert en de ontwikkeling van de vloed-schaar limiteert. Door de dieptegemiddelde piekstromsnelheden en de vloed-schaarontwikkeling van Noorderspruit en Kikkertgat/Zuiderkikkertgat-west te bestuderen, wordt deze hypothesen getest.

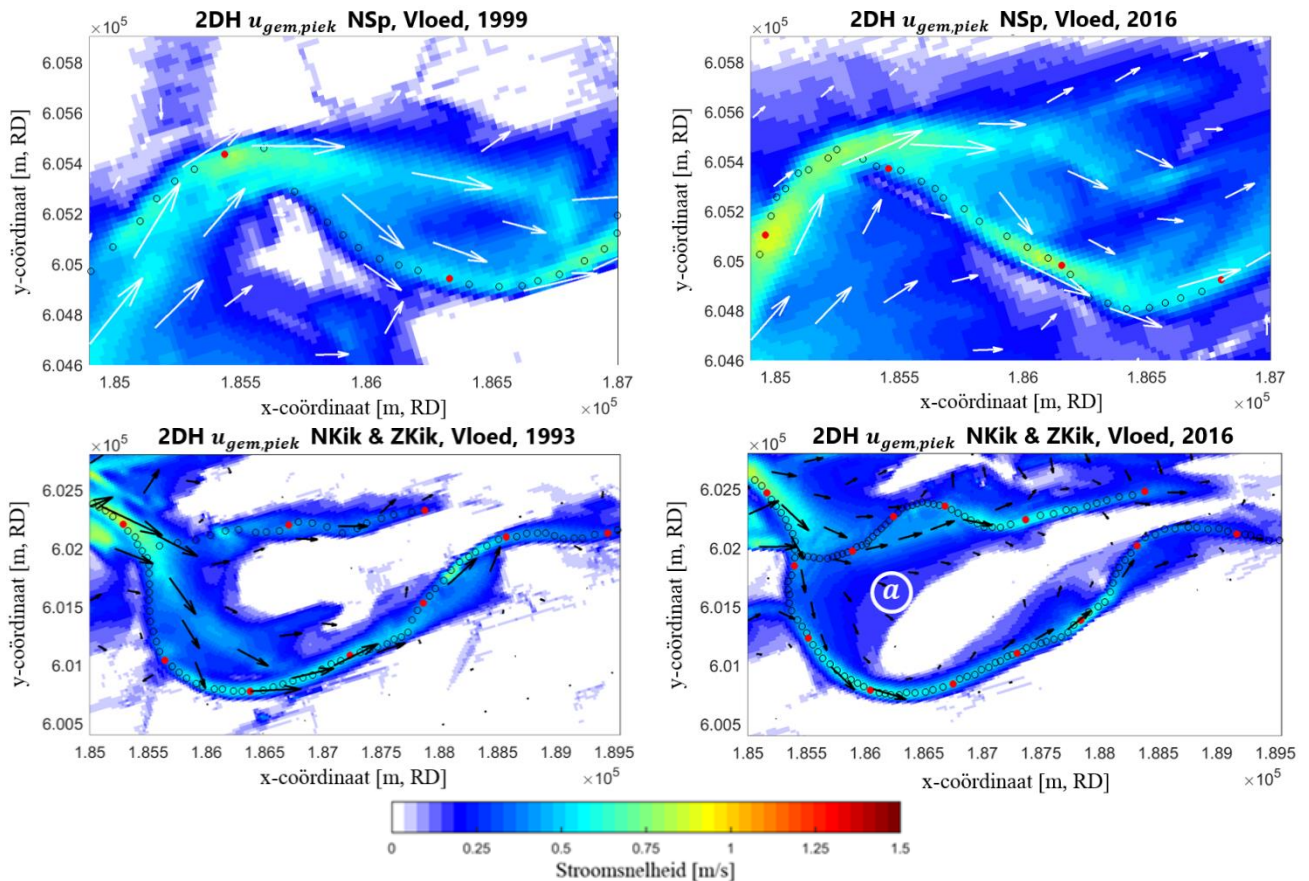
In Figuur 38 is een overzicht gepresenteerd van de vloedstromingen in het gebied nabij Holwerd. In de bovenste plots is de vloedstroming en de ontwikkeling van de vloed-schaar in de eerste bocht van het Noorderspruit weergegeven. De vloed-schaarontwikkeling van Noorderspruit wordt gekarakteriseerd door een noordwaartse migratie, waardoor de vloed-schaar een meer west-oostelijke oriëntatie krijgt. Als de plot van 1999 en 2016 vergeleken worden, wordt duidelijk dat in 2016 de ebgeul weer is verbonden met de vloedgeul. Kalmere stromingscondities worden in het gebied tussen de geulen gevonden, wat overeenkomt met de locatie van de geulsplitsing. Een interessante derde observatie is de ontwikkeling van de stroomsnelheden in dit tussengebied. De vloed-schaarontwikkeling lijkt te stagneren en de stroming wordt nu meer afgebogen naar de ebgeul, die verdiept. In de plots van 1999 en 2016 is een toename in de stroomsnelheden bij de voormalige cross-over te zien. Ten oosten van deze locatie is de start van een splitsing, te zien zoals gepresenteerd door Van Veen (1950) (zie ook Figuur 9a).

Tegengesteld aan de ontwikkelingen van de vloed-schaar in Noorderspruit migreert het lokale wantij tussen Noorderkikkertgat en Zuiderkikkertgat-west zuidwaarts. Op hetzelfde moment evolueert de Noorderkikkertgat-geul en nemen de stroomsnelheden bij a. in Figuur 38 en in de ebgeul (Zuiderkikkertgat-west) af. Deze observatie ondersteunt de hypothese dat de locatie en de lokale wantijmigratie informatie biedt over de ontwikkeling van de stroming in de geulen. Wanneer de geulmiddellijn ontwikkeling in Figuur 14 opnieuw bestudeerd wordt, wordt gevonden dat het Kikkertgat een rechtere oriëntatie had vóór 1993. Terwijl deze meander zich ontwikkelde, werd een soortgelijk gedrag gevonden in het Noorderspruit (2016). De ontwikkeling van een nieuwe geul (Noorderkikkertgat) of een vloed-schaar reduceert het getijdeprisma van de ebgeul (Zuiderkikkertgat-west), wat resulteert in lagere stroomsnelheden en daarmee wordt sedimentatie bevorderd. Of het Noorderkikkertgat zich ontwikkelt door de migratie van het wantij of door de ontwikkelingen in het Kikkertgat is in deze studie niet in detail bestudeerd.

Naast deze observaties worden gelijke ontwikkelingen gevonden ten noordwesten van het Noorderkikkertgat (zie ook Figuur 41). Ook in de westelijke bocht van het Zuiderspruit migreerde de geul naar het westen nadat dit fenomeen plaatsvond. In het geval van het Noorderspruit kunnen gelijke mechanismes als in het



Zuiderkikkertgat-west voor gaan komen als de ebgeul naar het westen migreert. Maar als de geulopsplitsing in het oosten van de Noorderspruit plot (2016) zich gaat ontwikkelen en het begint noordwaarts te migreren, wordt de hypothese voor het ontwikkelen van een nieuwe geul uit een splitsing ondersteund. Het monitoren van deze gebieden zou meer inzichten kunnen geven in hoe belangrijk dit principe is in het ontwikkelen van getijdemeanders. Daarnaast zal het inzicht kunnen bieden in hoe het Zuiderkikkertgat-west zich ontwikkeld zou hebben als de geul niet gebaggerd zou zijn.



Figuur 38: De bovenste twee plots geven de vloodschaar bij de westelijke bocht van het Noorderspruit gedurende vloedcondities weer. In deze plots is de scheiding van de eb- en vloedgeul en het herverbinden van de ebgeul aan de vloedgeul gepresenteerd. De onderste twee plots representeren de dieptegemiddelde vloedstroming in het gebied voor Holwerd. Met deze plots is de migratie van het lokale wantij geëvalueerd.

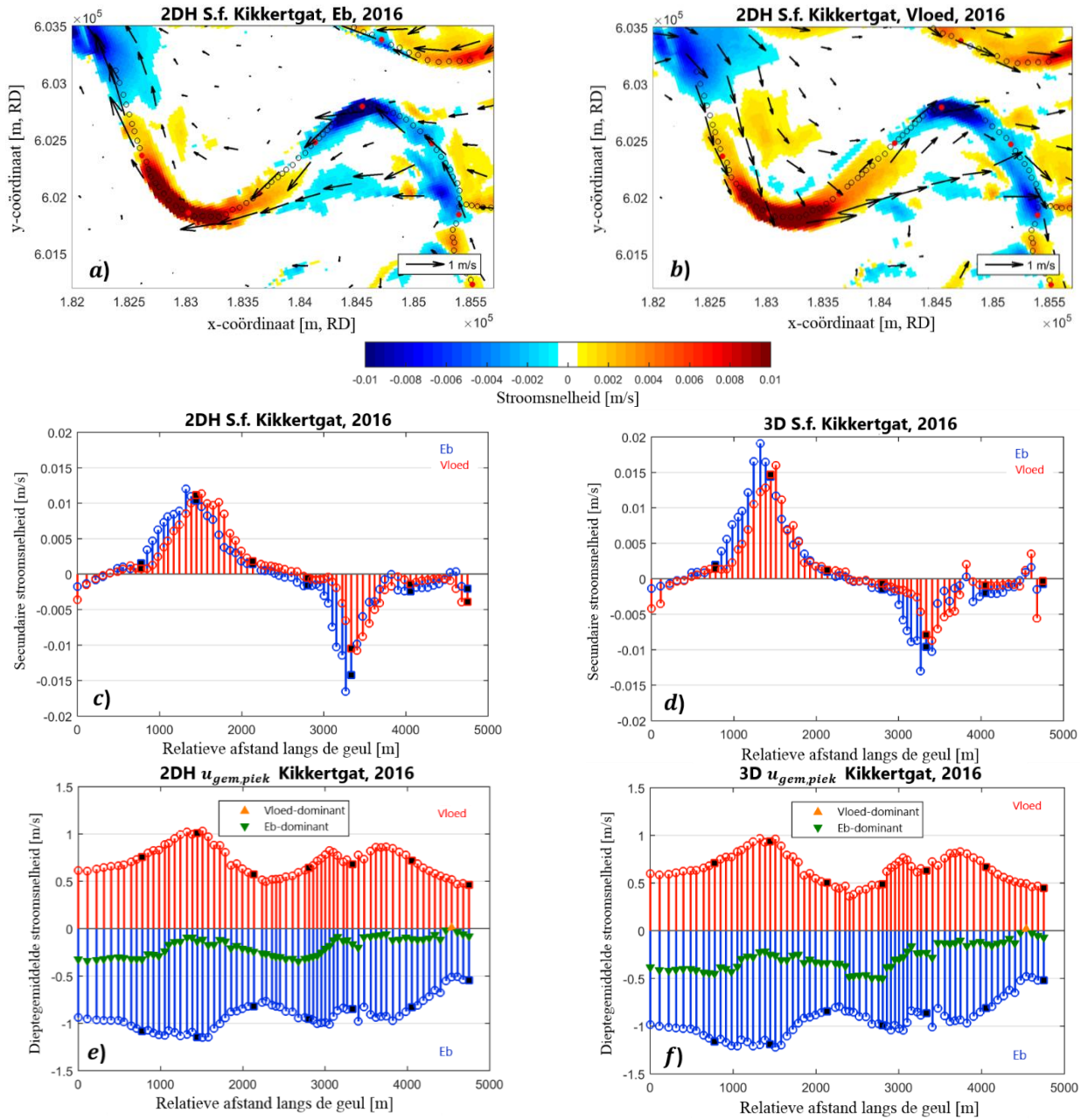
## 5.5 Secundaire stroming

Secundaire stroming kan een netto effect hebben op het sedimenttransport in de richting dwars op de geul. Om de invloed van deze stroming op de geulontwikkeling in te schatten wordt in deze paragraaf de secundaire stroming geëvalueerd. Evenredig aan de dieptegemiddelde stromingen in paragraaf 5.3 worden de stromingen in het Kikkertgat en Noorderspruit eerst gepresenteerd en vervolgens worden in paragraaf 5.5.3 de resultaten van de andere geulen uitgewerkt.

### 5.5.1 Kikkertgat

Plots *a)* en *b)* in Figuur 39 geven dezelfde tijdstippen weer als in Figuur 36*a)* en *b)* en de vectoren representeren wederom dieptegemiddelde stroomsnelheid. Drie cross-over locaties worden onderscheiden, waarvan de eerste en de derde op dezelfde locatie blijven gedurende eb en vloed. De tweede cross-over locatie ligt tijdens vloed meer naar het oosten dan tijdens eb. De ruimtelijke variatie (d.i. de  $Aoi$ ) tussen de twee is ongeveer 400 m. De oostwaartse verplaatsing kan op twee manieren verklaard worden. De eerste is dat de bathymetrie het verloop van de stromingen in de geulen beïnvloedt. De tweede is dat de afstroom van de wadplaten naar de geul de stromingen in de geul afbuigen, waarmee het de secundaire stroming beïnvloedt. In Paragraaf 5.5.3 wordt deze tweede mogelijkheid ook voor alle geulen in meer detail besproken.

De invloed van de geuldimensies op de stromingen wordt ondersteund met de bevindingen in plot *c)*. Dit is een 2DH-plot die duidelijk laat zien dat de secundaire stroming toeneemt in de bochten en dat de richting omklapt bij een cross-over. Een verschuiving is te zien tussen eb en vloed, die overeenkomt met de observaties in plots *a)* en *b)*. De 3D-plot laat gelijke trends zien als bij de 2DH-resultaten voor de maximale stroomsnelheid rond de geultoppen en de minima rond de cross-overs. Maar de verschuiving bij de  $Aoi$  is in de 3D-situatie niet terug te vinden. De secundaire stroomsnelheden in de 3D resultaten zijn hoger in de eerste bocht en lager in de tweede bocht. Er zijn drie mogelijke verklaringen voor de verschillende resultaten. Ten eerste is de getijdeslag iets groter in 3D dan in 2DH (ordegrootte 10 cm). Dit resulteert in een hogere dieptegemiddelde stroomsnelheid gedurende eb, wat ook in Figuur 39 *e)* en *f)* gezien kan worden. Op eenzelfde manier zijn de vloedstromen kleiner in 3D, wat de reductie van de secundaire stroming in de oostelijke bocht verklaart. Een tweede verklaring kan gevonden worden in de bodemruwheid in het model, welke in de 3D-simulatie gebaseerd is op een vaste aanname. De derde mogelijke verklaring is dat de vloodschaar op een of andere manier een toename kan veroorzaken in de stroomsnelheden in het bovenste gedeelte van de waterkolom. Dit kan echter niet bewezen worden in de dieptegemiddelde situatie, waarin de verticale variatie niet meegenomen wordt.



Figuur 39: Resultaten van de secundaire stroming in het Kikkertgat. De twee bovenste plots laten een bovenaanzicht van de secundaire stroming in de geulen zien en de dieptegemiddelde stroomsnelheden zijn met vectoren aangegeven. De secundaire stroomsnelheden zijn gepresenteerd met de kleuren die in de kleurschaal onder de plot staan. De middelste twee plots presenteren de secundaire stroming langs de geul voor de 2DH- en 3D-simulaties. In de onderste twee plots is de dieptegemiddelde stroming langs de geul geplot om de verschillen tussen de 2DH- en 3D-resultaten te verklaren. De rode markeringen in de bovenste plots komen overeen met de zwarte markeringen in de onderste plots.

### 5.5.2 Noorderspruit

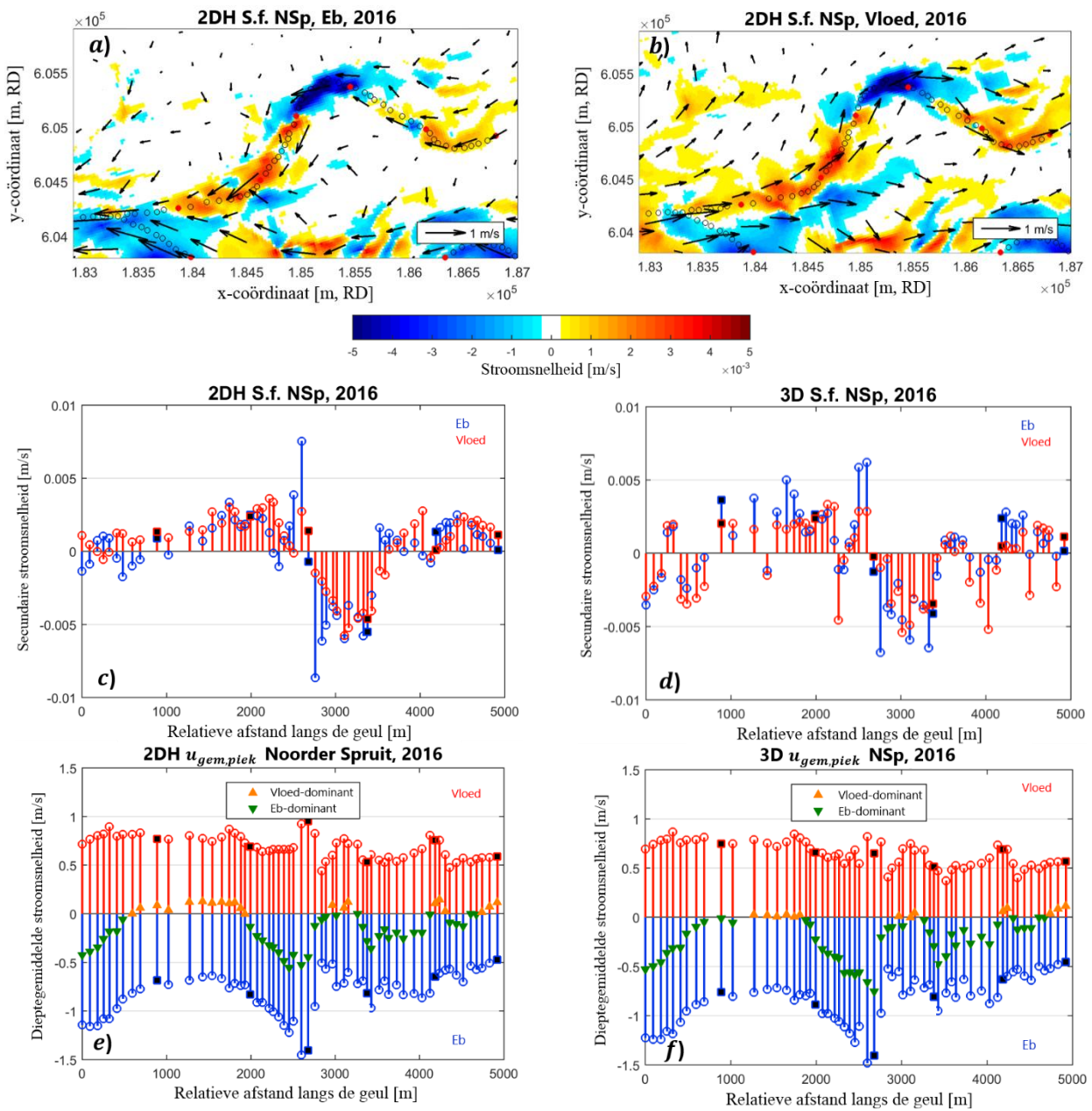
Het Noorderspruit is geclassificeerd als een 'niet door baggeren beïnvloede' geul met een ontwikkelde geulbocht (zie paragraaf 4.6) en daarom is het meegenomen in de analyse voor de vergelijking met geulen die door baggeren beïnvloed zijn. De secundaire stroming in de bovenste plots van Figuur 40 geven weer dat de beginlocatie van de geul voornamelijk beïnvloed wordt door Zuiderspruit. In plots *c*) en *d*) is een meer onregelmatigere secundaire stroming te zien, wat consistent is met plots *a*) en *b*). De piek in het midden is het resultaat van een gradiënt in het bodemniveau, die ook voor Figuur 36*e*) en *f*) beschreven was. Op de locatie van deze pieksnelheid is de secundaire stroming tijdens eb significant groter dan tijdens vloed. Daarnaast kan gezien worden dat de secundaire stroming ten oosten van de geul top (3<sup>e</sup> rode marker) lager is tijdens vloed, wat de invloed van de vloed-schaar naar voren brengt. Ook in 3D wordt een onregelmatig resultaat gevonden op deze locatie. Ook op  $x = 4000$  m wijzen de pieken met vloed en net daarna de pieken met eb op een geulopsplitsing, wat ook geobserveerd werd in Paragraaf 5.4. Verder laten plots *e*) en *f*) zien dat de vloodsnelheden vergelijkbaar zijn met die in de 2DH situatie. Anderzijds zijn de stroomsnelheden met eb hoger in 3D. Dit resulteert in een grotere secundaire stroming met eb en het verschil is hoogstwaarschijnlijk te verklaren met de verschillen in de getijdeslag die iets groter is in 3D dan in 2DH. Ondanks dat zijn de stroomsnelheden en trends voor de 2DH- en 3D-situaties vergelijkbaar.

In tegenstelling tot de resultaten in het Kikkertgat zijn de cross-over locaties in het Noorderspruit minder duidelijk gedefinieerd. Desondanks is een gelijkende oostwaartse verplaatsing te zien in plots *a*) en *b*). De linker (westelijke) *Aoi* is circa 50 m verschoven en de rechter (oostelijke) circa 250 m. Hoewel de eerste geulbocht als "ontwikkeld" wordt beschouwd, net als in het Kikkertgat (zie Hoofdstuk 4), is de *Aoi* een stuk kleiner. Door de dieptegemiddelde stromingsvectoren te bestuderen wordt gevonden dat de afstroomrichting van de wadplaten naar de geul parallel is aan de geul. Bij het Kikkertgat was de afstroomrichting meer haaks georiënteerd op de geul en daarom wordt verwacht dat er een relatie bestaat tussen de *Aoi* en de wadplaat-afstroomrichting ten opzichte van de geul.

#### Concluderend (Kikkertgat en Noorderspruit)

Gelijkenissen in de secundaire stroming in het Noorderspruit en Kikkertgat zijn te vinden in de oostwaartse verschuiving van de cross-over. Deze verschuiving is echter veel kleiner bij de *Aoi* van het Noorderspruit dan van het Kikkertgat. In de 3D figuren is de verschuiving nauwelijks waarneembaar, maar rond de geul toppen is het wel aanwezig. Dat het in 3D nauwelijks waarneembaar is, kan komen door de verwaarloosbare kleine secundaire stroomsnelheden op die locatie. Verder kunnen kleine afwijkingen in de secundaire stroming tussen 2DH en 3D verklaard worden met de kleine afwijking in opgelegde waterstand, een aanname voor de bodemruwheid in 3D of de daadwerkelijke 3D-effecten.





Figuur 40: Resultaten van de secundaire stroming in het Noorderspruit. De twee bovenste plots laten een bovenaanzicht van de secundaire stroming in de geulen zien en de dieptegemiddelde stroomsnelheden zijn met vectoren aangegeven. De secundaire stroomsnelheden zijn gepresenteerd met de kleuren die in de kleurschaal onder de plot staan. De middelste twee plots presenteren de secundaire stroming langs de geul voor de 2DH- en 3D-simulaties. In de onderste twee plots is de dieptegemiddelde stroming langs de geul geplot om de verschillen tussen de 2DH- en 3D-resultaten te verklaren. De rode markeringen in de bovenste plots komen overeen met de zwarte markeringen in de onderste plots.



### 5.5.3 Andere geulen

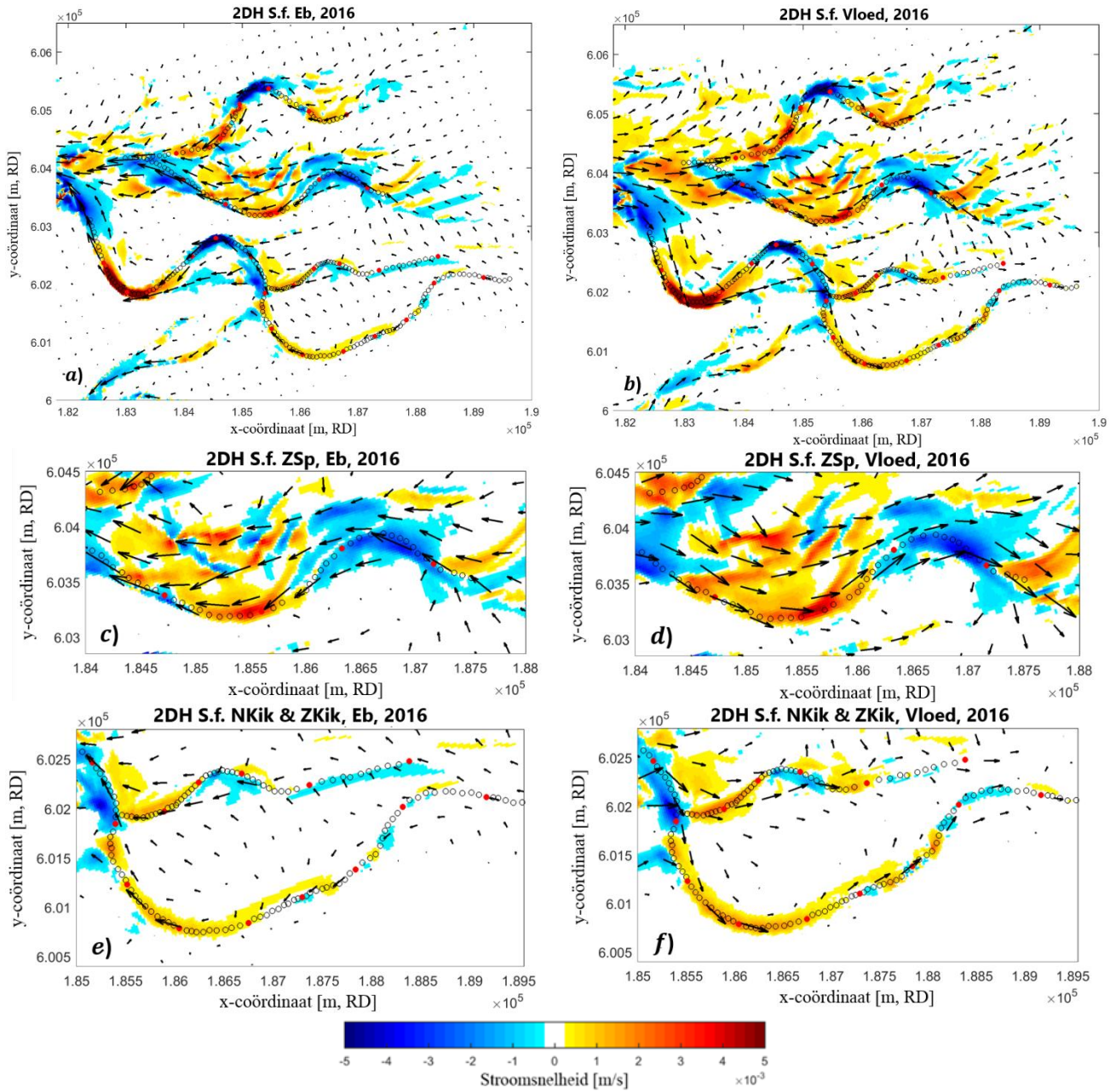
Bij de Kikkertgat cross-over werd de hypothese opgesteld dat de afstroom van de wadplaten de secundaire stroming bovenin de waterkolom lokaal kan versterken of afzwakken. Daarnaast was vanuit de Noorderspruit cross-over een hypothese opgesteld over de relatie tussen de *Aoi* en de oriëntatie van de wadplaat afstroomrichting. De overzichtsplots van de andere geulen suggereren dat deze processen plaatsvinden op meerdere locaties. Figuur 41a en b tonen een overzicht van de secundaire stromingsintensiteit voor het gehele studiegebied. Net als in eerdere figuren laten de vectoren de dieptegemiddelde stroomsnelheid en richting zien. Verschillende locaties worden nu uitgelicht die deze hypothesen onderbouwen, maar een diepgaander onderzoek zal verricht moeten worden om de hypothesen te verifiëren.

De eerste geul die uitgelicht wordt is het Zuiderspruit in plots c) en d). De Zuiderspruit ebstromingen ten zuiden van de tweede bocht stromen westwaarts wanneer ze de geulen instromen. De locatie van de cross-over met eb ligt meer naar het westen, terwijl met vloed het tegenovergestelde plaatsvindt en de cross-over naar het oosten verschuift. Dezelfde observatie kan gedaan worden bij het Zuiderkikkertgat-oost en het Noorderkikkertgat in plots e) en f). Bij het Noorderkikkertgat is het afstroomoppervlak waarover het water af kan stromen naar de geul klein en daarom is de verschuiving minder duidelijk zichtbaar dan in het Kikkertgat. De grote bochten in het Kikkertgat hebben een grotere *Aoi* en daar vindt een grotere verschuiving plaats. Ten oosten van de oostelijke Kikkertgat-bocht (zie plots e) en f)) wordt dit fenomeen niet gevonden, maar bij deze *Aoi* lijkt de secundaire stromingsintensiteit af te nemen. Dit is terug te vinden in het kleurverschil (kleurschaal) tussen de eb en vloodsituatie.

Als de theorie klopt dat de afstroom vanaf de wadplaten naar de geul de secundaire stroming beïnvloedt, dan is dat voornamelijk relevant voor de grotere meanders. In kleine meanders is de secundaire stroming namelijk erg zwak en is een hogere dataresolutie nodig om in die geulen hier iets over te kunnen zeggen. Vanuit observaties in het Noorderspruit kan beargumenteerd worden dat de hoek waaronder het water van de platen de geul instroomt belangrijk is voor de mate van invloed op de secundaire stroming. Deze invloed is beschreven voor het Noorderspruit in Paragraaf 5.5.2 en lijkt ook gerelateerd te zijn aan de *Aoi*. Met kleinere bochten – en daardoor een kleinere *Aoi* – blijft de cross-over bij ieder getij op dezelfde locatie. Dus als de bochten groter worden zal de afstand tussen de geultoppen toenemen en zal de *Aoi* groter worden. De stromingen in de geul kunnen dan meer beïnvloed worden door de afstroom van de wadplaat. De invloed is dan wel afhankelijk van de oriëntatie van de stromingen ten opzichte van de geul en deze resultaten zijn alleen gebaseerd op de 2DH-resultaten. In de 3D-figuren van de secundaire stroming is deze invloed niet terug te vinden, of alleen in klein detail. Verder is de periode waarin de secundaire stroming beïnvloed kan worden relatief kort, dus wordt er getwijfeld aan deze relatie. De invloed van de wadplaat afstroom op de secundaire stroming behoeft daarom verder onderzoek.

#### Concluderend

De resultaten van de 2DH secundaire stroming-simulaties duiden op een relatie tussen de *Aoi*, de afstroomrichting van de wadplaten ten opzichte van de geuloriëntatie, en de invloed hiervan op de secundaire stroming in de geul. De overzichtsfiguren laten consistent zien dat de op- en afstroom van wadplaten (dieptegemiddelde stromingen) een respectievelijk oostelijke en westelijke richting hebben bij de grotere meanders. Dit kan het sedimenttransport lokaal beïnvloeden en daarmee de uitbocht versterken. Omdat in 3D de verschuiving van de *Aoi* moeilijk te onderscheiden is, zal een vervolgstudie uitgevoerd moeten worden om deze bevindingen te valideren.



Figuur 41: Overzichtsplots met de secundaire stroming worden hier gepresenteerd voor verschillende relaties. In plots a) en b) staat het hele studiegebied, de middelste twee plots omvatten het Zuiderspruit en de onderste twee het Noorderkikkertgat en Zuiderkikkertgat. De vectoren in de plots representeren de dieptegemiddelde stroomsnelheden, net als in de eerdere figuren, komen de cirkelvormige markeringen overeen met de observatiepunten langs de geul. De kleurschaal geeft de stroomsnelheid van de secundaire stroming aan.

## 5.6 Conclusies

Door het modelleren van de stromingen is de relatie tussen de stromingen en de uitbochting getest. In paragraaf 4.7, *Vloedscharen*, zijn hypothesen opgesteld over meanderen en het ontstaan van vloedscharen. Door de volgende vragen te beantwoorden is de invloed van de dieptegemiddelde en secundaire stroomsnelheden op de ontwikkelingen van een getijdemeander bepaald.

### b.1. Hoe is de dieptegemiddelde stroming gerelateerd aan de veranderende geuldimensies?

De stroming accelereert rond de trechtersvormige geultoppen. Rond een geultop is de vloedstroming dominant en de ebstromen zijn dominant bij de cross-overs. Dit is gevonden in zowel de gebaggerde als de niet-gebaggerde geulen. De stroomversnelling rond een geultop resulteert in stroming richting de vloedschaar gedurende vloed en in stroming richting de cross-over gedurende eb. Hierdoor vindt er een lokale geulverbreding plaats voor en achter de geultop. Eb-dominantie wordt sterker naarmate de geulen meer uitbochten en in geval van het Kikkertgat verdween de vloed-dominantie bijna volledig. Daarentegen ontwikkelt het Zuiderkikkertgat-west zich richting een voornamelijk vloed-gedomineerde geul. Richting het wantij hebben de eb- en vloedstromen dezelfde orde-grootte en fluctuaties worden gevonden in de eb- en vloed-dominantie langs de geul. Op deze locaties wordt de geulgeometrie meer variabel en stabiele opsplitsingen worden daar niet meer gevonden.

### b.2. Hoe is de secundaire stroming gerelateerd aan de veranderende geuldimensies?

De secundaire stroming is afgeleid van de dieptegemiddelde stroming en daarom komen de gradiënten in de stroming overeen voor beide gevallen. Zoals verwacht hebben kleinere meanders (bochten) een lagere secundaire stroomsnelheid. De secundaire stroming in het Kikkertgat en Noorderspruit laat in beide geulen een verplaatsing rond de cross-over zien. De cross-over-locatie ligt met eb meer naar het westen en meer naar het oosten gedurende vloed. De verplaatsing bij de *Aoi* is echter veel kleiner in het Noorderspruit dan in het Kikkertgat. In de 3D-resultaten is de verplaatsing bij de cross-over veel kleiner dan in de 2DH-berekeningen, maar bij de geultoppen is de verplaatsing in beide situaties wel aanwezig. Verschillen tussen 2DH en 3D worden toegekend aan de kleine afwijkingen in opgelegde waterniveau. Ten slotte is een hypothese opgesteld dat er een correlatie is tussen de afstand tussen geultoppen, de secundaire stroming en de oriëntatie van hoe het water van de wadplaten afstroomt. In een vervolgstudie zou deze hypothese in meer detail onderzocht kunnen worden.

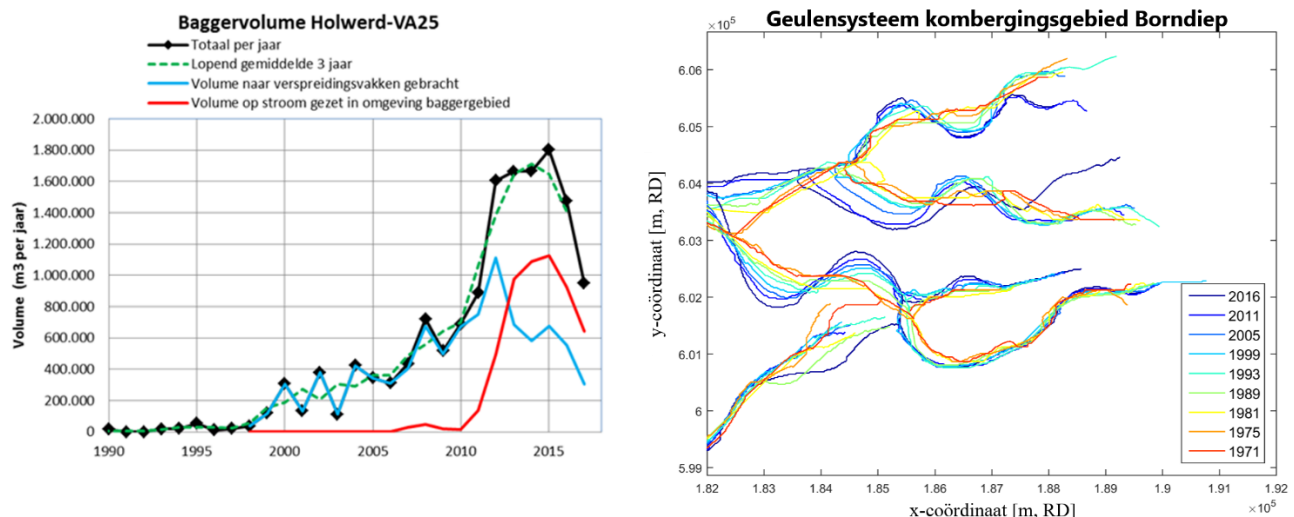
### b.3. Hoe zijn de getijdestromen gerelateerd aan de geulopsplitsingen?

Geulopsplitsingen vinden plaats bij de cross-overs en bij de geultoppen. De stroming rond de geultoppen is vloed-dominant en logischerwijs kunnen daar vloedscharen ontstaan. De ontwikkeling van een vloedschaar reduceert de landwaartse stroming in de naastliggende ebgeul, waardoor daar makkelijker sedimentatie plaats kan vinden. Als de vloedscharen zich ontwikkelen krijgen ze steeds meer een west-oostelijke oriëntatie. Terwijl de vloedschaar een andere oriëntatie krijgt, ontwikkelt de wadplaat tussen de geulen zich en zal deze de vloedstroming weer naar de ebgeul afbuigen. Hierdoor verdiept de ebgeul zich weer en zal het ook meer potentie hebben om water af te voeren gedurende eb, wat resulteert in een westwaartse migratie van de ebgeul. Observaties in de ontwikkeling van de stromingen en bodemniveau in het Noorderspruit, Zuiderspruit, Kikkertgat, Noorderkikkertgat en Zuiderkikkertgat-west ondersteunen dit principe.

## 6 CONCLUSIES

### 6.1 Inleiding

De exponentiele groei in volume gebaggerd materiaal en de uitbochting in de vaargeul voor Holwerd vormde de aanleiding voor dit rapport (zie Figuur 42). De meanders in de vaargeul hebben zich verder ontwikkeld dan de andere meanders in het kombergingsgebied van het Borndiep. Om inzicht te krijgen in de ontwikkeling van meanders in dit gebied is als doel gesteld om de verschillen in ontwikkeling tussen 'door baggeren beïnvloede' en 'niet-beïnvloede' meanders te verklaren. Om dit doel te bereiken zijn de geulen geïdentificeerd naar hun locatie en afmetingen. Omdat de ontwikkelingen afhankelijk zijn van de beschouwde schaal, zijn de geulen geïdentificeerd op drie verschillende schalen: Macro-schaal, Meso-schaal en op het geulniveau. Om de ontwikkeling van de geuldimensies aan de fysische processen te koppelen, is de hydrodynamica gemodelleerd. De focus van de modelstudie ligt op de processen gerelateerd aan het ontstaan en ontwikkelen van getijdemeanders, met de nadruk op secundaire stroming (bochtwerking) als een mogelijk verklarend mechanisme. Hoewel de kracht van de secundaire stroming klein is, werd verwacht dat het een netto effect heeft op het sedimenttransport. De dieptegemiddelde stroming heeft een grotere invloed op de bochtontwikkeling en daarom zijn beide typen stromingen geanalyseerd.



Figuur 42: Twee figuren die de probleembeschrijving illustreren. Het linker figuur beschrijft de exponentiële groei van het baggerbezwaar en het rechter figuur presenteert de uitbochting van de geulen waardoor de lengte van de vaargeul toegenomen is.

### 6.2 Algemene ontwikkeling geuldimensies

In de analyse van de geuldimensies zijn de geulbreedte, bodemniveau en geullengte bestudeerd om de volgende vraag te beantwoorden:

*Wat zijn de trends in de ontwikkeling van de getijdegeulen die een natuurlijke uitbochting karakteriseren in het kombergingsgebied van het Borndiep?*

De 'niet door baggeren beïnvloede' meanders bevatten vloedscharen, die waargenomen kunnen worden aan de hand van onregelmatigheden in het breedte- en bodemniveau profiel langs de geul. Door de geul middellijn ontwikkeling in de Macro-schaal te analyseren, zijn de ontwikkelende meanderende geulen onderscheiden van de meer locatie-vaste geulen. De kleinere geulen nabij het wantij lieten de grootste meanderende ontwikkelingen zien. Tot aan 1990 is voor alle geulen een toename gevonden in de booglengte. Na 1990 is bij alle geulen een afnemende trend waargenomen, behalve voor het Noorderkikkertgat, die bleef toenemen (voor geulnamen zie Figuur 11). Op de Meso-schaal is tussen 1989 en 2016 een afname van geulbreedte en neemt de geuldiepte af naar het wantij toe. De afname van de geulbreedte domineert over de diepteafname en daardoor kan geconcludeerd worden dat de overgang van geul naar wadplaten scherper werd.



Door de geuldimensies op een kleinere schaal te bestuderen werd gevonden dat rond een cross-over de geul breder en ondieper is dan bij de geultop. De geultop wordt beschreven door een verdieping met factor 2 en een afnemende breedte met een trechtersvorm als resultaat. Naarmate de bochten zich meer ontwikkelen is deze trechtersvorm beter te onderscheiden. De aanwezigheid van vloedscharen is niet van invloed op de geuldimensies bij de geultop. De vloedscharen migreren wel mee met de geultop en streven naar een west-oostelijke ligging. Als al deze observaties samengevoegd worden, kan de geografische ontwikkeling van een getijdemeander in dit gebied beschreven worden aan de hand van drie meanderende stadia:

- *Ontwikkelde meander (Kikkertgat)*: Dit is een meander met een duidelijke sinusoïde vorm en vloedscharen. In dit stadium is de diepte bij een cross-over circa twee keer kleiner dan bij de geultop. De breedte is kleiner bij de geultoppen dan in de rest van de geul.
- *Ontwikkelde, variabele meander (Noorder- en Zuiderspruit)*: In dit stadium bevat de meander een duidelijke sinusoïde vorm, vloedscharen en een variabele ebgeul locatie richting het einde van de geul. Karakteristiek voor dit stadium is de lagere correlatie tussen de breedte en diepte.
- *Onontwikkelde meander (Noorderkikkertgat)*: Kleine en rechte geulen zoals het Noorderkikkertgat ontwikkelen naar langere geulen met beginnende meanders. In dit stadium zijn beginnende bochten aanwezig en vloedscharen zijn afwezig. Daarnaast worden in dit stadium een vrij constante breedte en diepte gevonden langs de geul.

De dynamische aspecten die de veranderingen in het kombergingsgebied aandrijven kunnen inzicht geven in waarom de 'door baggeren beïnvloede' en 'niet-beïnvloede' geulen zich op deze manier ontwikkelen. Daarom werd de volgende vraag gesteld:

*Welke trends in dieptegemiddelde- en secundaire stroomsnelheden kunnen onderscheiden worden die van invloed kunnen zijn op de uitbochting van getijdegeulen?*

Er is gevonden dat de stroomsnelheid toeneemt rond de (trechtersvormige) geultoppen, waar vloed dominant is en vloedscharen zich kunnen ontwikkelen. Bij eb vindt er een gelijke stroomversnelling plaats richting de cross-over, waar eb-dominantie gevonden is. Het uitbochten van geulen correspondeert met de verschuiving naar eb-dominantie in zowel de 'door baggeren beïnvloede' als de 'niet beïnvloede' geulen. Echter werd het gebaggerde Zuiderkikkertgat-west juist meer vloed-dominant.

### 6.3 Het ontstaan en het effect van vloedscharen

Naast het "uit de bocht schieten" van de geul (Van Veen, 1950), lijken verschillende vloedscharen juist te ontstaan vanuit een geulsplitsing bij de cross-over. Het gedeelte in de geul waar de richting van de secundaire stroming omklapt (bij de cross-over) bevindt zich op verschillende locaties tijdens eb en vloed. In zowel het Kikkertgat en het Noorderspruit is een oostwaartse verplaatsing van de cross-over-locatie geobserveerd. Of deze verplaatsing samenhangt met de uitbochting, of dat het de geulsplitsing versterkt is niet bewezen. Er is echter wel een indicatie gevonden dat er een relatie bestaat tussen de afstand tussen de geultoppen en de verplaatsing bij de cross-over. De afstand tussen de geultoppen neemt toe met de uitbochting, waardoor een groter gebied ontstaat waarover de secundaire stromingsrichting kan veranderen. Daarnaast lijkt de richting van de stromingen over de wadplaten gecorreleerd te zijn aan de hoek waaronder het water de geul instroomt.

Een serie van processen beschrijft de meanderende geulontwikkeling rond een vloedschaar. De relatie tussen deze processen wordt gevormd door de verhouding tussen het getijdeprisma, de doorstroomoppervlakte en de stroomsnelheden. De toename in het doorstroomoppervlak bij de locatie waar de vloedschaar zich ontwikkelt zorgt voor een verlaging in de stroomsnelheden en versterkt de sedimentatie in de geulen. Door de vloed-dominantie rond de geultop stroomt meer (vloed-)water richting de schaar en vindt sedimentatie voornamelijk plaats in de ebgeul. Hierdoor ontwikkelt de vloedschaar zich en krijgt het een meer west-oostelijke oriëntatie. Wanneer dit bereikt is, gaat de ebgeul zich meer ontwikkelen. Dit komt doordat de afstroom van de platen meer richting de ebgeul plaatsvindt, waardoor deze meer water voert, ook tijdens vloed. De daarmee toegenomen stroomsnelheden in de ebgeul resulteren in geul uitbochting en een westwaartse migratie van de ebgeul. Deze afbuiging van de vloedstromen naar de ebgeul is op verschillende locaties teruggevonden. Tenslotte vindt aanzanding plaats in de vloedgeul, wordt de ebgeul "te lang" en ontwikkelt zich een vloedschaar tussen de ebgeul en de vloedschaar. Door een vloedschaar te vormen streeft de geul dus naar een geullengte reductie en om een nieuw morfologisch evenwicht te vinden.



## 6.4 Consequenties voor het beheer

Het kwalitatieve model dat beschreven is in Paragraaf 6.3 is een aanvulling op de bestaande kennis over het ontstaan en werking van vloedscharen. Hiermee kan de impact van baggeren op de geul- en vloedschaarontwikkeling beter begrepen worden. Voor de beheerder is het belangrijk dat het ontstaan van nieuwe kortsluitingen (vloedscharen) in de kiem gesmoord wordt door baggeren. De consequentie hiervan is dat de geul steeds langer wordt en dat de beperkingen voor het uitbochten niet meer aanwezig zijn. In deze zin is het doorgaand baggeren van geulen, waardoor deze steeds verder uitbochten niet het volgen van de natuurlijke morfologische ontwikkelingen is, zoals geformuleerd in de Structuurvisie Waddenzee. Op de vorming van een nieuwe kortsluiting, die in potentie een kortere route kan gaan vormen voor de vaarweg, kan niet worden gerekend. Pas wanneer gestopt wordt met baggeren zal de geul de kans krijgen om een kortsluitgeul te vormen, maar dit is natuurlijk onwenselijk als de bevaarbaarheid van de geul gegarandeerd moet worden. Een alternatief voor de beheerder is het forceren van een kortsluitgeul, door deze te baggeren.

Redenerend vanuit deze inzichten had 10 jaar geleden met terugwerkende bij de vaarweg Ameland bij Holwerd een kortsluiting kunnen worden geforceerd, om zo een meer natuurlijke ontwikkeling te stimuleren. Echter, als 10 jaar lang niet gebaggerd en gestort was, dan was de uitbochting minder ver doorgegaan en was het gedrag van de geul minder goed herkend. Het aantal geulen waar doorgaande uitbochting van directe invloed is op het gebruik en het beheer is in de Waddenzee (en de andere Nederlandse getijdewateren) beperkt, zodat vergelijkbare situaties zich niet of beperkt voordoen. Deze kennis had dan ook niet elders verkregen kunnen worden.

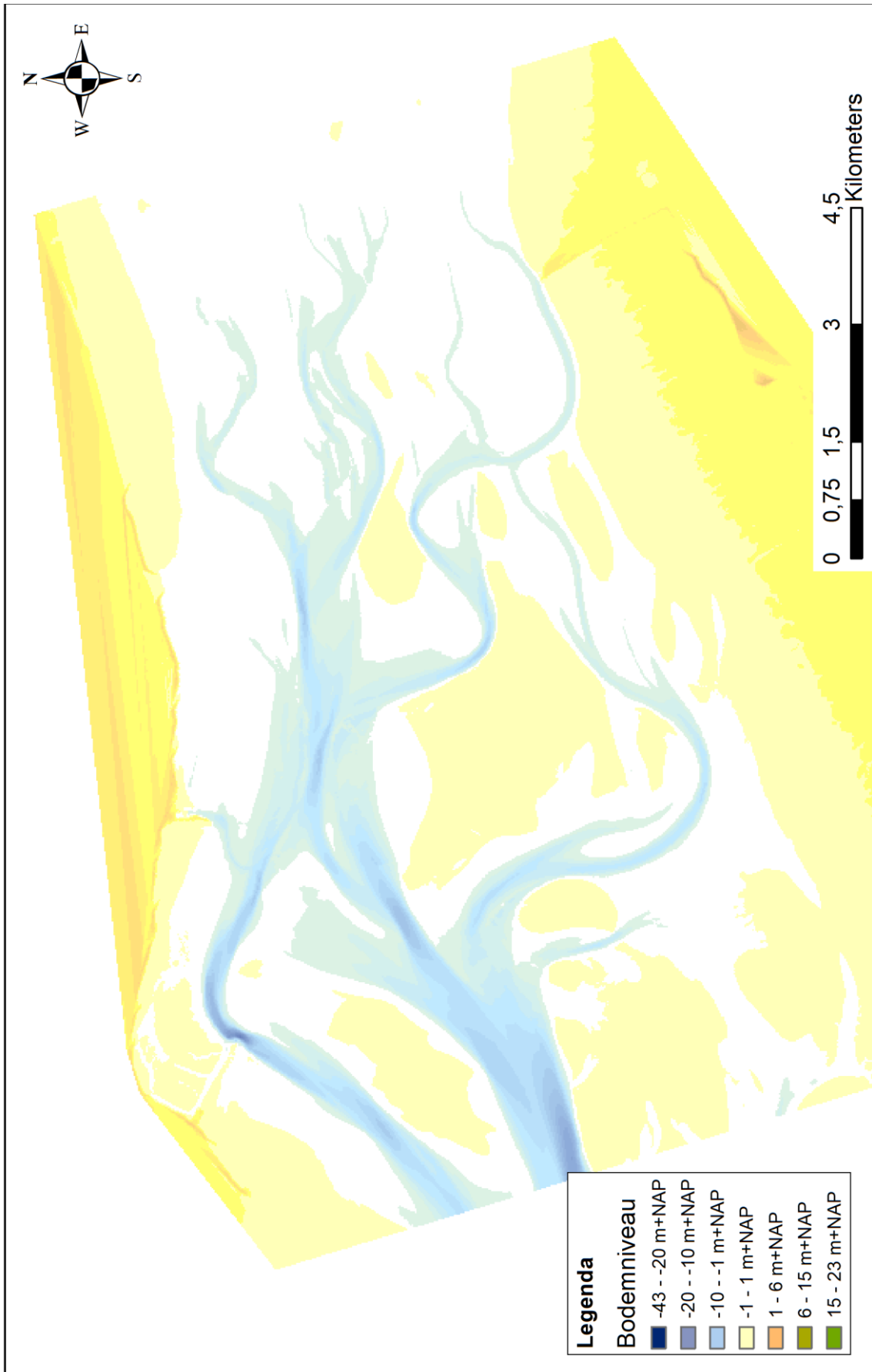
## 7 REFERENTIES

- Alkyon. (2008). Haalbaarheidsstudie vaarweg Ameland; Fase 1: selectie van Kansrijke alternatieven (Report).
- ArcGIS. (2017). Smooth Line (Cartography) [ArcGIS Documentation]. Geraadpleegd 16 oktober 2017, van <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//007000000012000000>
- Bosboom, J., & Stive, M. J. F. (2015). *Costal Dynamics 1* (Vol. Version 0.5). Delft: Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Section of Hydraulic Engineering.
- Cleveringa, J. (2012). Quick Scan Baggervolumes Vaarweg Ameland. (Report).
- Cleveringa, J., & Oost, A. P. (1999). The fractal geometry of tidal-channel systems in the Dutch Wadden Sea. *Geologie en Mijnbouw*, 78, 21–30.
- de Vriend, H. J., Havinga, H., Van Prooijen, B. C., Visser, P. J., & Wang, Z. B. (2011). CT4345 River Engineering. Delft: Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Department of Hydraulic Engineering.
- De Vriend, H. J., & Struiksmā, N. (1983). Flow and bed deformation in river bends : presented at Rivers '83, New Orleans, October 24-26, 1983. Delft : Waterloopkundig Laboratorium.
- Dey, S. (2014). Fluvial Processes: Meandering and Braiding. In *Fluvial Hydrodynamics* (pp. 529–562). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-19062-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-19062-9_9)
- Elias, E. P. L., & Wang, Z. B. (2013). Abiotische gegevens voor monitoring effect bodemdaling (Report).
- Eysink, W. D. (1979). Morfologie van de Waddenzee; gevolgen van zand- en schelpenwinning (No. R1336). WL|Delft Hydraulics.
- Fagherazzi, S., Bortoluzzi, A., Dietrich, W. E., Adami, A., Lanzoni, S., Marani, M., & Rinaldo, A. (1999). Tidal networks 1. Automatic network extraction and preliminary scaling features from digital terrain maps. *Water Resources Research*, 35(No. 12), 3891–3904.
- Friedkin, J. F. (1945). A Laboratory Study of the Meandering of Alluvial Rivers. *Waterways Exp. Sta., U.S. Army Corps Eng., Vicksburg, Mississippi*.
- Herman, P. M. J., Villars, N., Winterwerp, J. C., Van Kessel, T., Wang, Z. B., Brière, C., ... Cleveringa, J. (2016a). Analyse Vaargeul Holwerd-Ameland (Report).
- Herman, P. M. J., Villars, N., Winterwerp, J. C., Van Kessel, T., Wang, Z. B., Brière, C., ... Cleveringa, J. (2016b). Analyse Vaargeul Holwerd-Ameland (Report).
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America*, 56, 275–370. <https://doi.org/10.1130/0016-7606>
- Hughes, Z. J. (2012). Tidal Channels on Tidal Flats and Marshes. In R. A. D. Dalrymple & R.W. (Red.), *Principles of Tidal Sedimentology*. New York: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-0123-6\\_11](https://doi.org/10.1007/978-94-007-0123-6_11)
- Inglis, C. C. (1947). *Meanders and their bearing on river training*. London: Institution of Civil Engineers.
- Jeuken, M. C. J. L. (2000). On the morphologic behaviour of tidal channels in the Westerschelde estuary. Utrecht: Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht.
- Kreyszig, E. (1991). *Differential Geometry* (Vol. 1st edition (June 1, 1991)). New York: Dover Publications.
- Lanzoni, S., & D'Alpaos, A. (2015). On funneling of tidal channels. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120(3), 433–452.
- Leopold, L. B., & Wolman, M. G. (1960). River Meanders. *Bulletin of the Geological Society of America*, 71(No. 6), 769–793. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1960\)71\[769:RM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1960)71[769:RM]2.0.CO;2)
- Leuven, J. R. F. W., Kleinhans, M. G., Weisscher, S. A. H., & van der Vegt, M. (2016). Tidal sand bar dimensions and shapes in estuaries. *Earth-Science Reviews*, 161(06), 204–223.
- Leuven, J.R.F.W., B. van Maanen, B.R. Lexmond, B.V. van der Hoek, M.J. Spruijt & M. G. Kleinhans. (2018) Dimensions of fluvial-tidal meanders: Are they disproportionately large? *Geology*

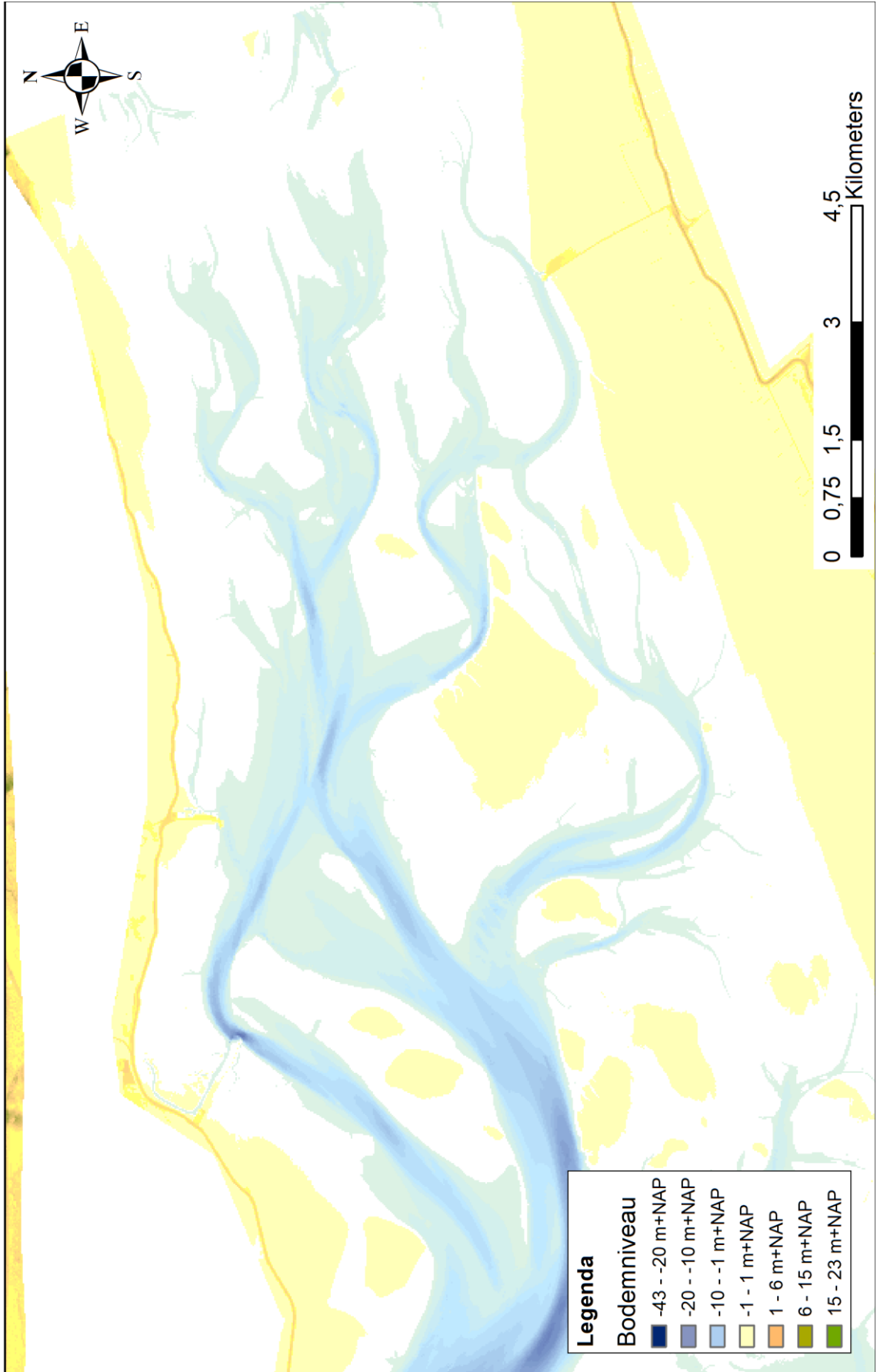
- Marani, M., Lanzoni, S., Zandolin, D., Seminara, G., & Rinaldo, A. (2002). Tidal meanders. *Water Resources Research*, 38(11), 14. <https://doi.org/10.1029/2001WR000404>
- Marciano, R., Wang, Z. B., Hibma, A., De Vriend, H. J., & Defina, A. (2005). Modeling of channel patterns in short tidal basins. *Journal of Geophysical Research*, 110(F01001), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2003JF000092>
- Oost, A. P. (1995). Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian Inlet; A study of the barrier islands, ebb-tidal deltas, inlets and drainage basins (Thesis).
- Rust, B. R. (1978). A classification of alluvial channel systems. *Fluvial Sedimentology*, *Can. Soc. Petr. Geol.*, (Memoir No. 5), 187–198.
- RWS. (2016). Dataset documentation Vaklodgingen (Vol. 2016). Rijkswaterstaat.
- Steijn, R. (2005). Huidige en toekomstige sedimentatie in de vaargeul (Report).
- Thorne, C. R. (1978). Processes of Bank Erosion in River Channels (Thesis).
- Van Til, S.W. (2017). Tidal Meanders in the Ameland Basin (Msc Thesis). Delft University of Technology, Delft. Geraadpleegd van <https://doi.org/10.5737486e-562d-4a2b-92fd-59224ba5ac1c>
- Van Veen, J. (1950). Ebb and Flood Channel Systems in the Netherlands Tidal Waters. *Tijdschrift Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap*, 67(6), 303–325. <https://doi.org/10.2112/04-0394.1>
- Villars, N., Van Kessel, T., Winterwerp, J. C., Wang, Z. B., Brière, C., De Lucas Pardo, M., ... Herman, P. M. J. (2016). Analyse vaargeul Holwerd-Ameland: Verkennende studie naar maatregelen om vertragingen en baggerbezwaar op te lossen. (p. 69). Deltares rapport.
- Waddenzee, H. B. (2008). Waddenzee, Hollum tot Ternaard. Chef der Hydrografie.
- Wagenborg. (2014). Vervoerkundig jaaroverzicht 2014 Wagenborg Passagiersdiensten B.V. (Report).
- Wagenborg. (2015). Vervoerkundig Jaaroverzicht 2015 Wagenborg Passagiersdiensten B.V. (Report).
- Werner, P. W. (1951). On the origin of river meanders. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 32(6), 898–902. <https://doi.org/10.1029/TR032i006p00898>
- Winterwerp, J. C., Wang, Z. B., Stive, M. J. F., Arends, A., Jeuken, C., Kuijper, C., & Thoolen, P. M. C. (2001). A new morphological schematization of the Western Scheldt estuary, The Netherlands. IAHR.
- Zeff, M. L. (1988). Sedimentation in a salt marsh-tidal channel system, southern New Jersey. *Marine Geology*, 82(1–2), 33–48. [http://dx.doi.org/10.1016/0025-3227\(88\)90005-9](http://dx.doi.org/10.1016/0025-3227(88)90005-9)

# BIJLAGE A VAKLODINGEN KAARTEN

Vaklodingen kaart 2016

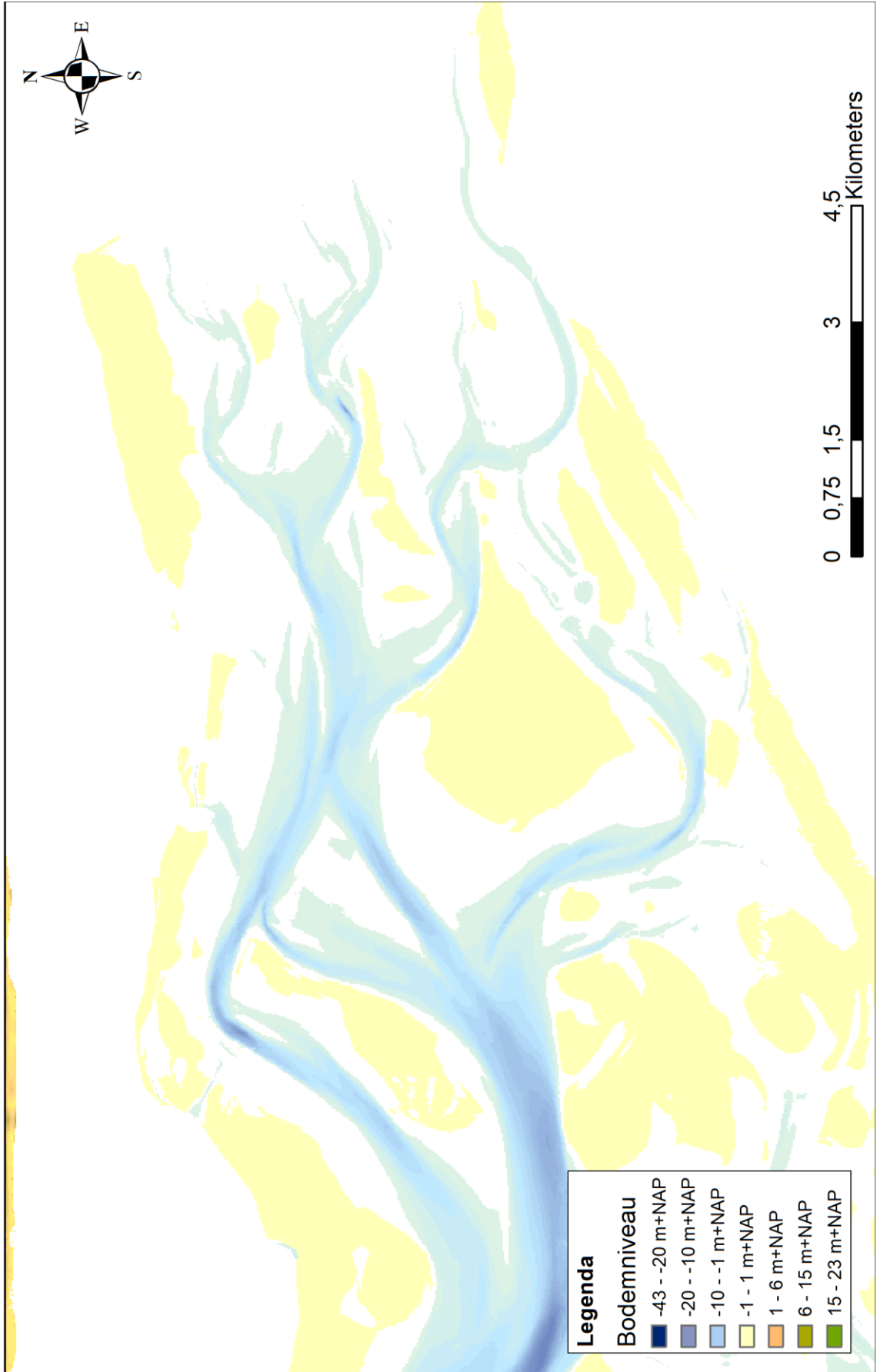


Vaklodingen kaart 2011

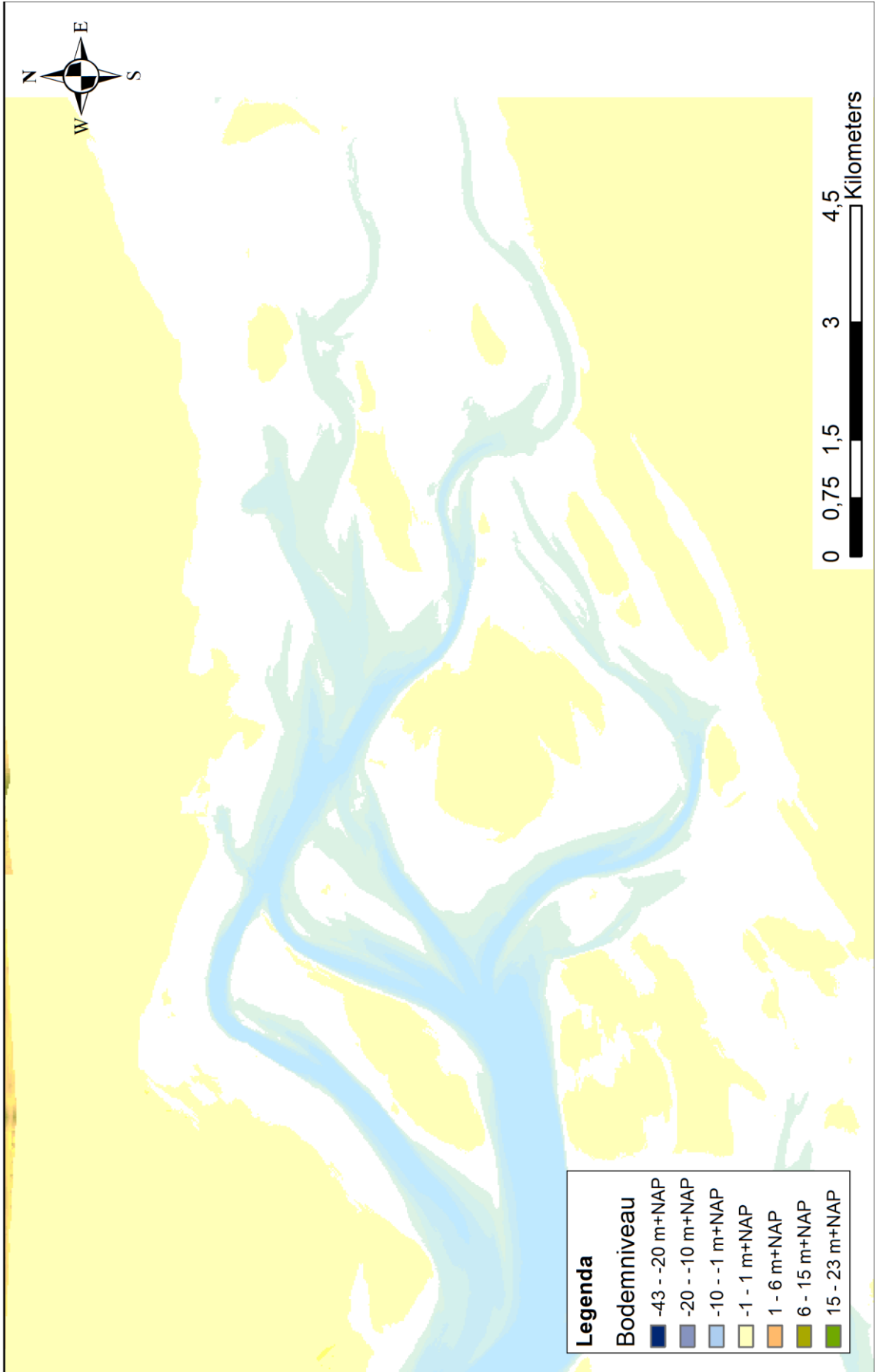




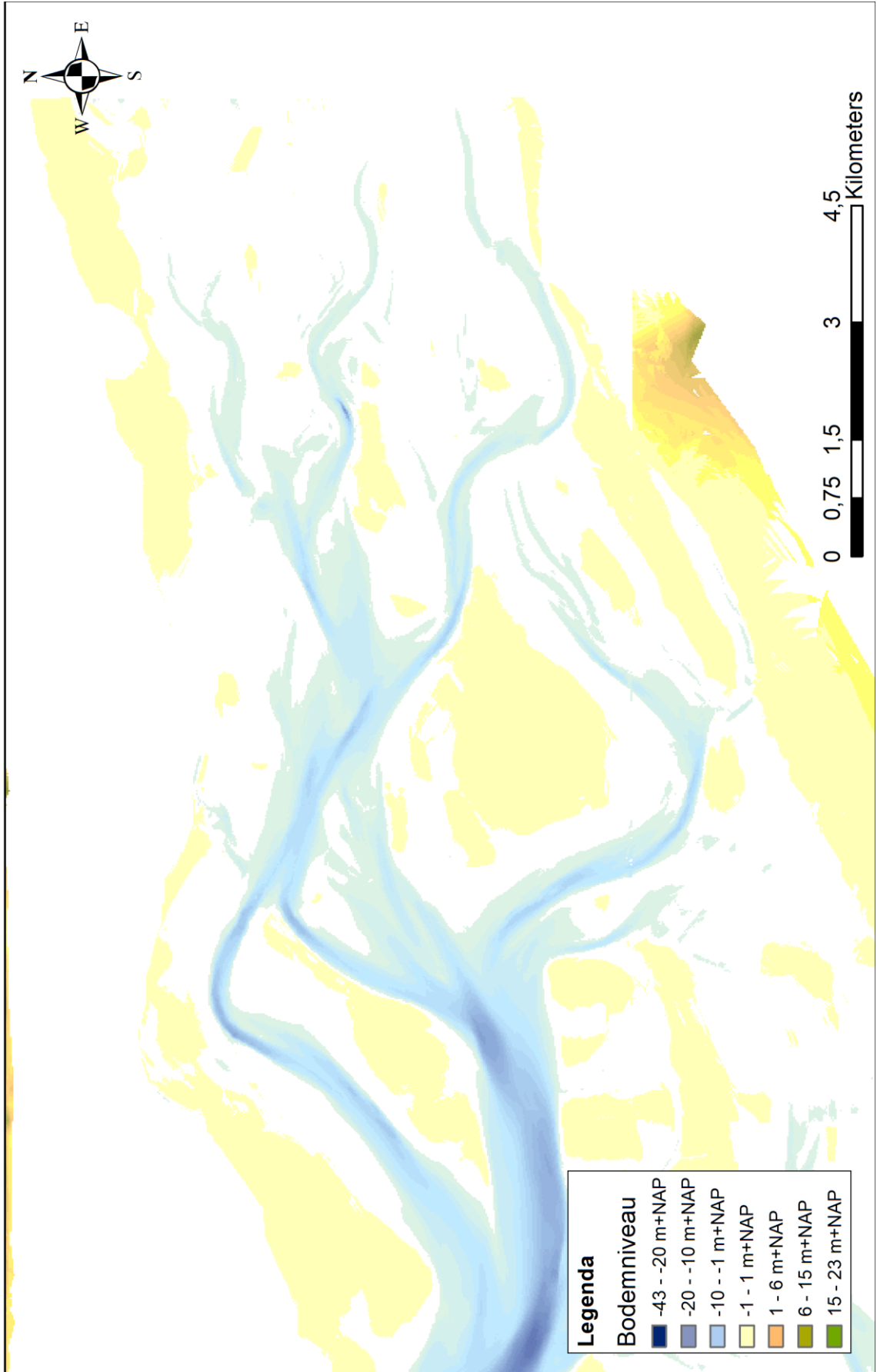
Vaklodingen kaart 1999



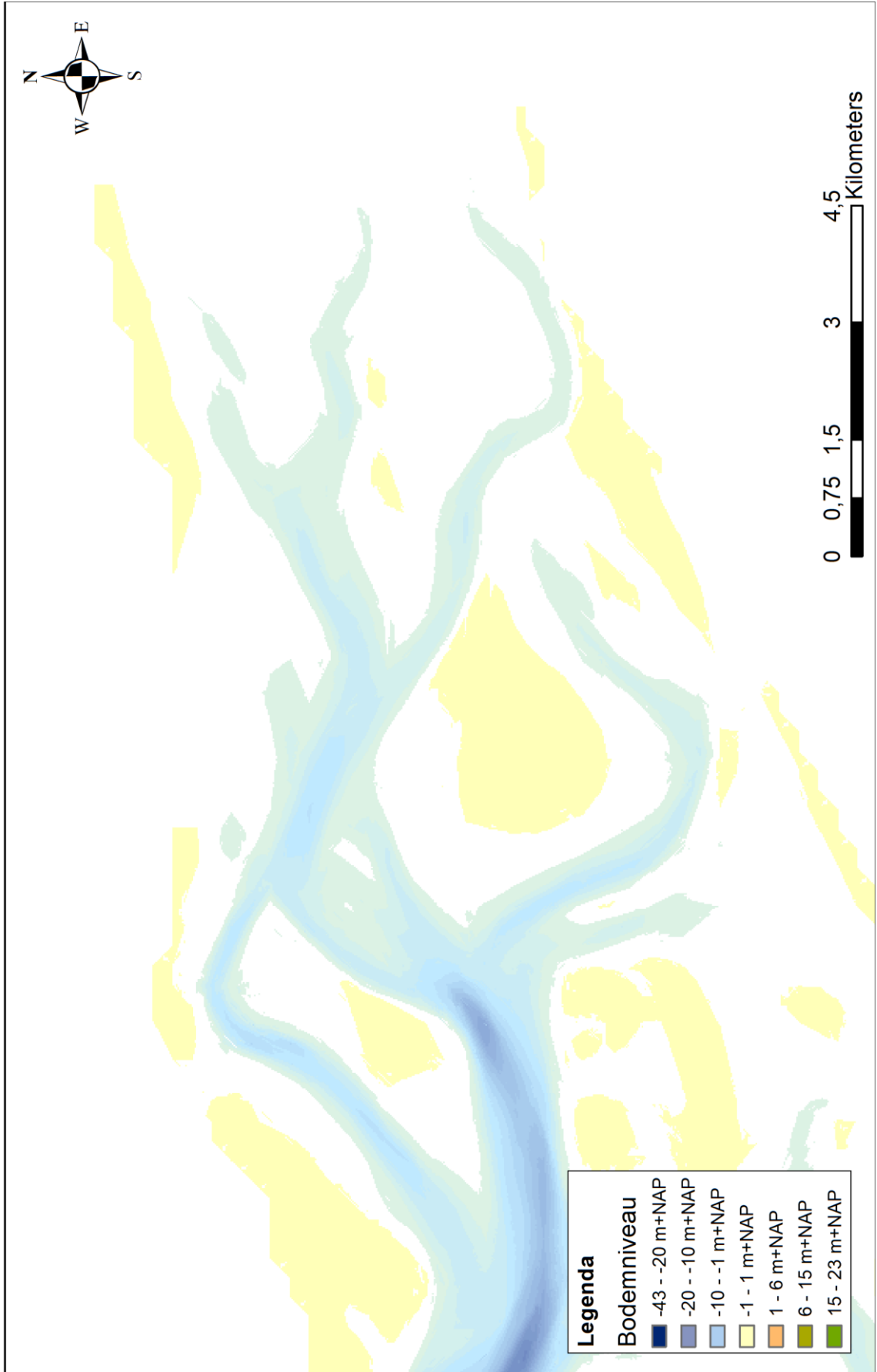
Vaklodingen kaart 1993



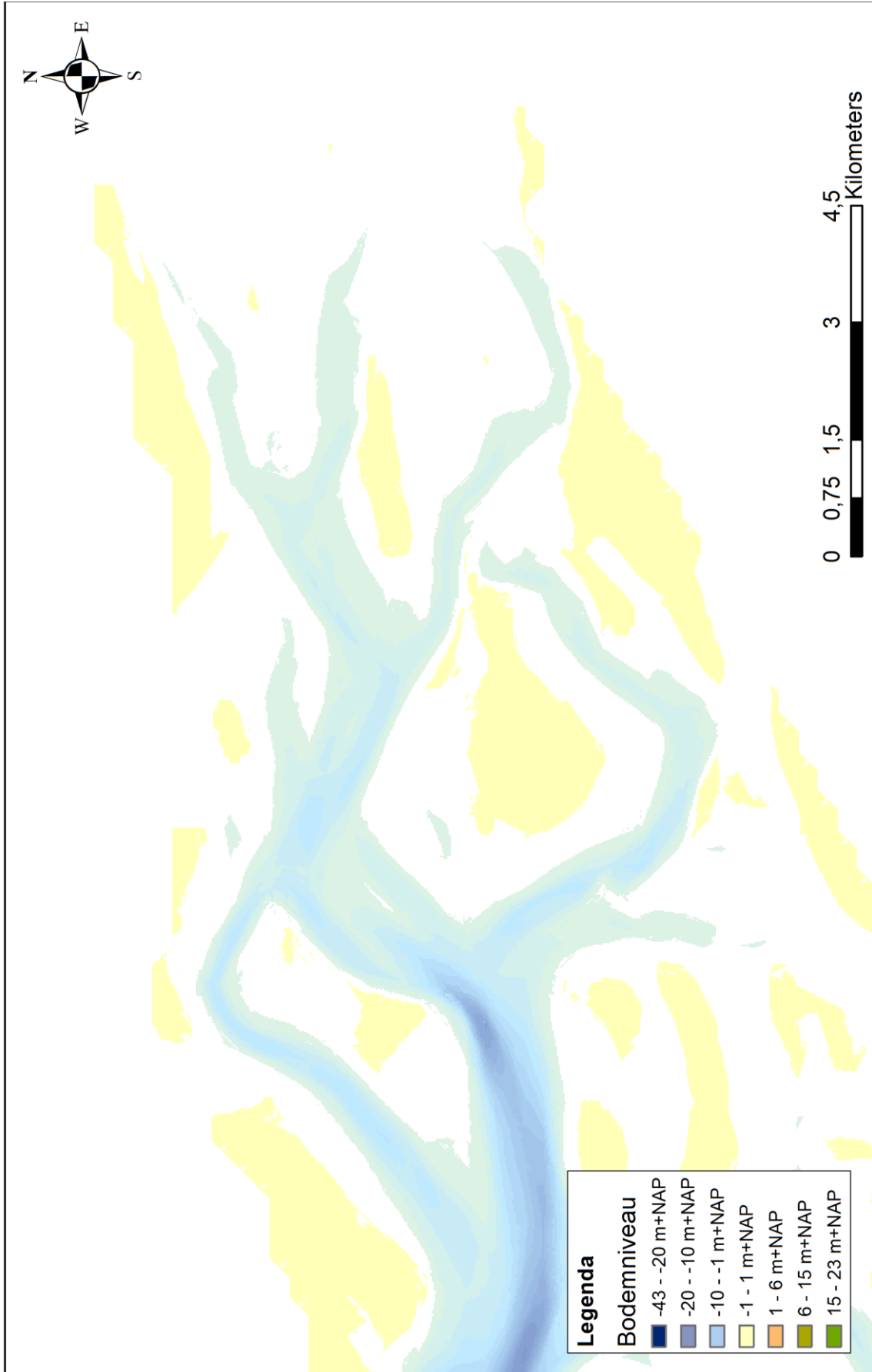
Vaklodingen kaart 1989



Vaklodingen kaart 1981

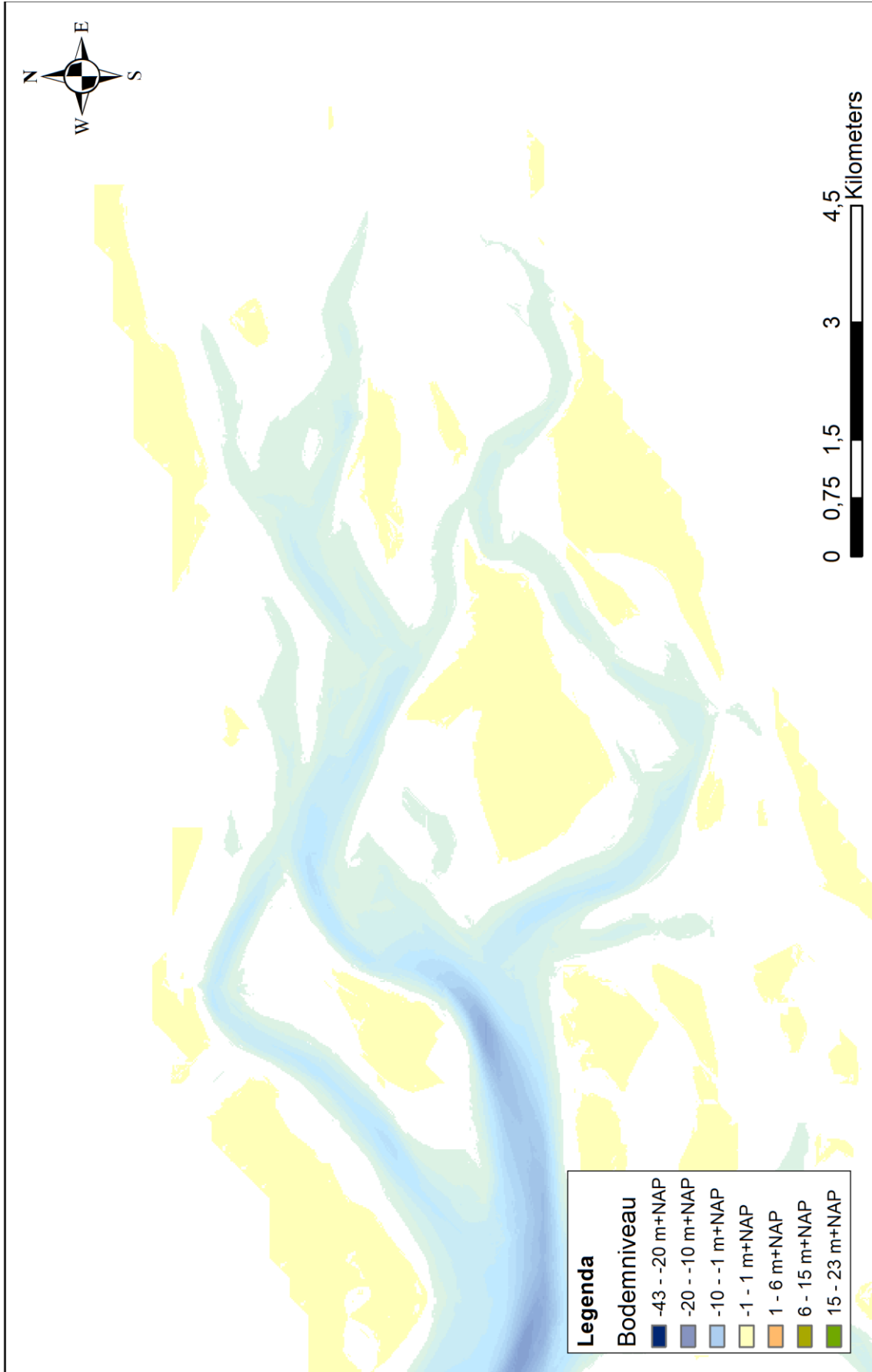


Vaklodingen kaart 1975

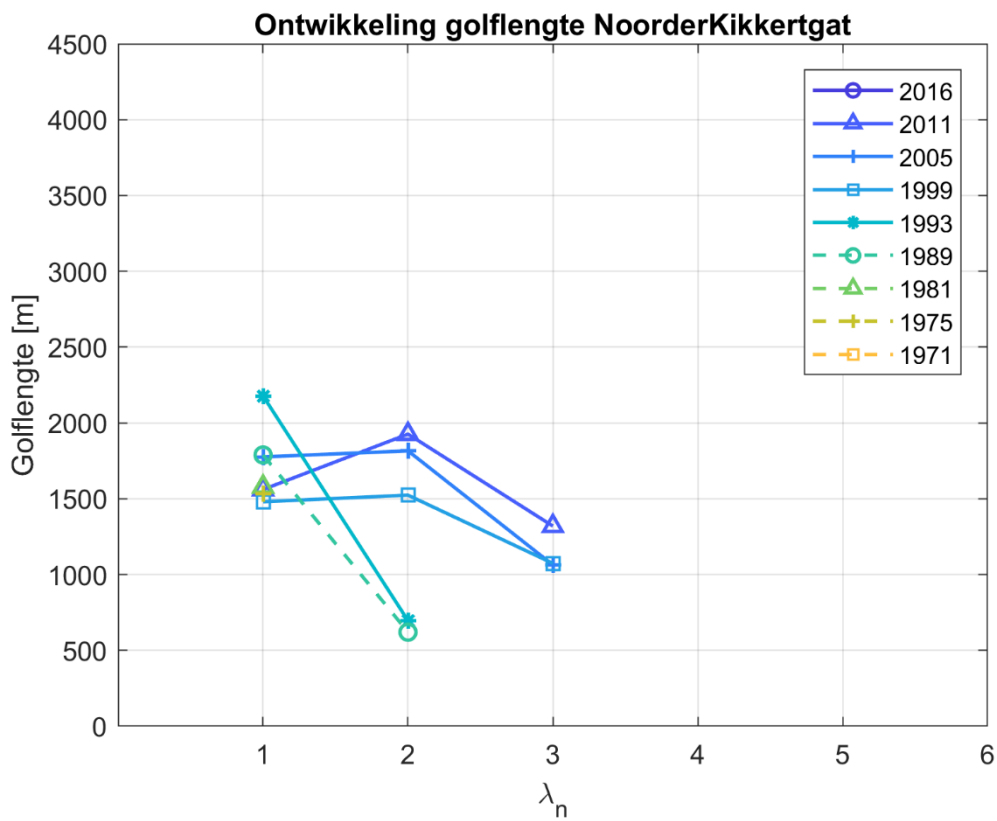
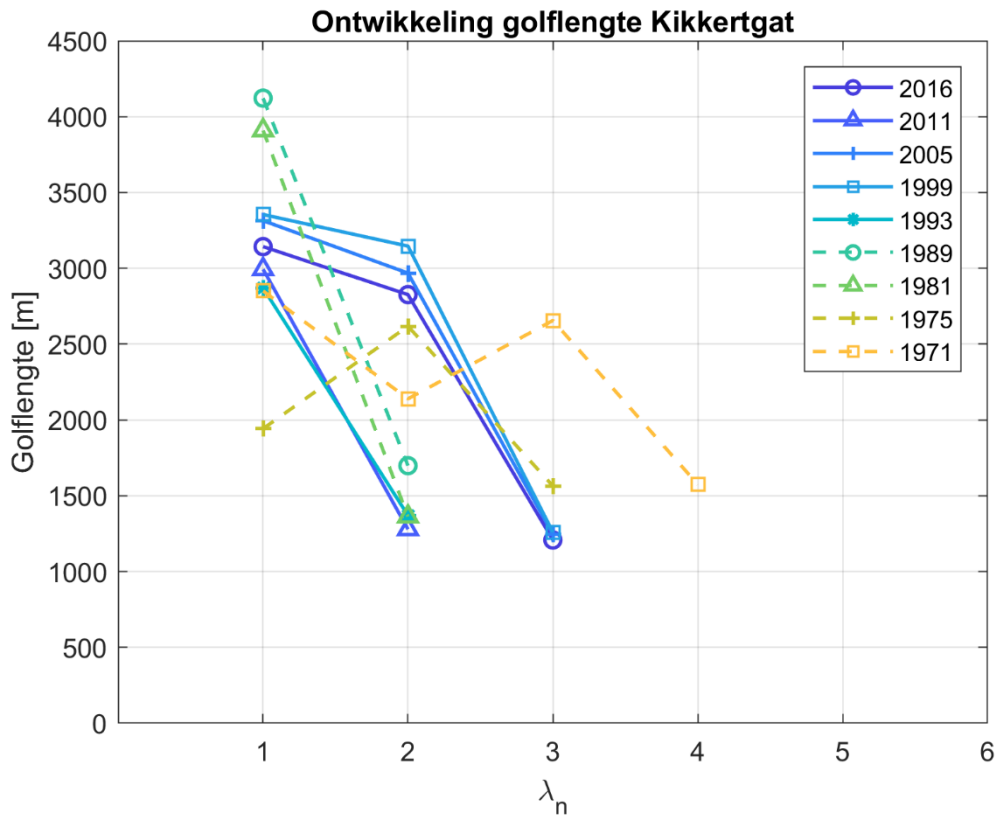


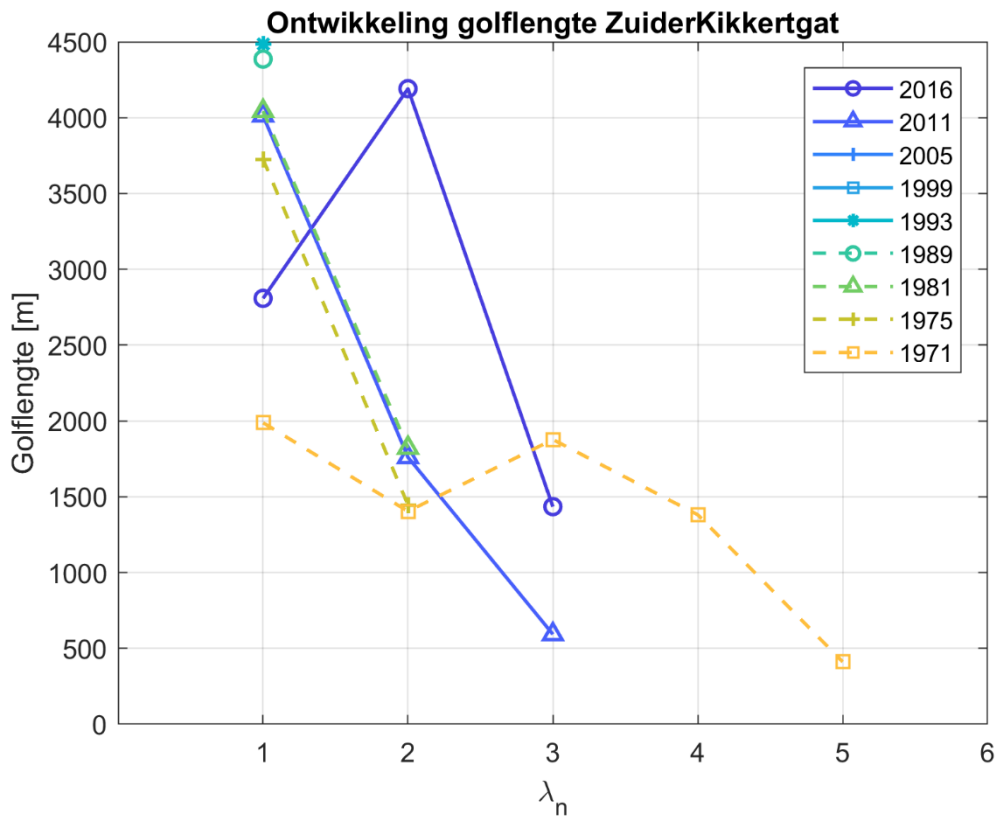
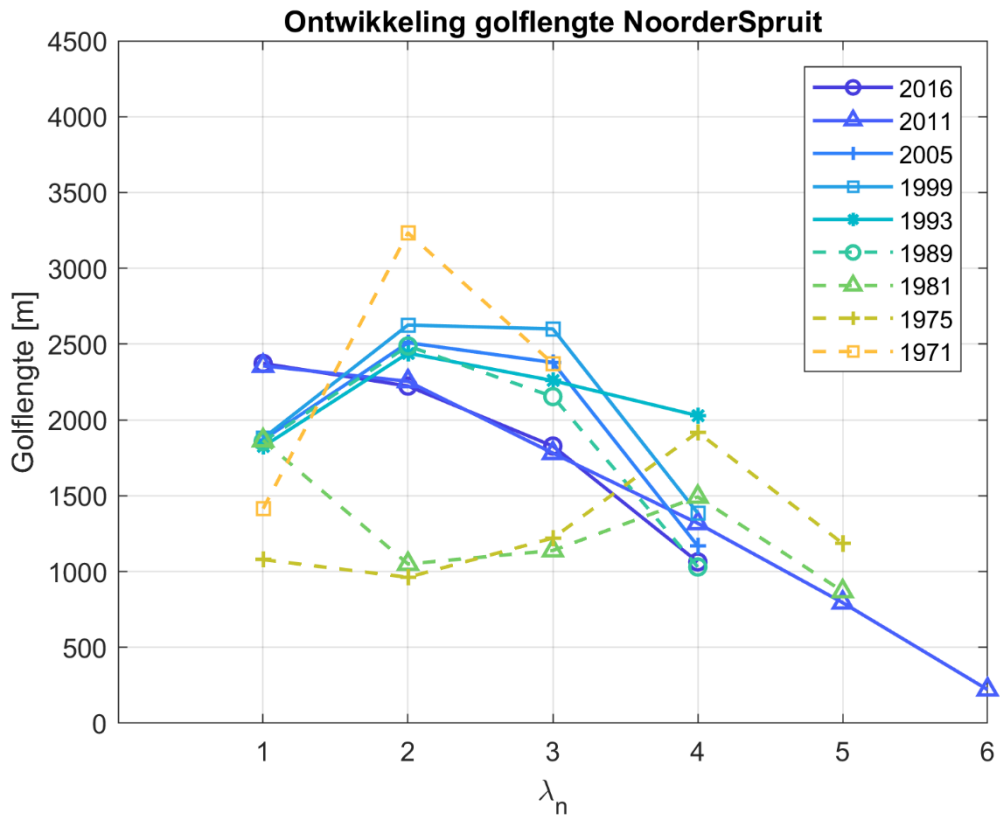


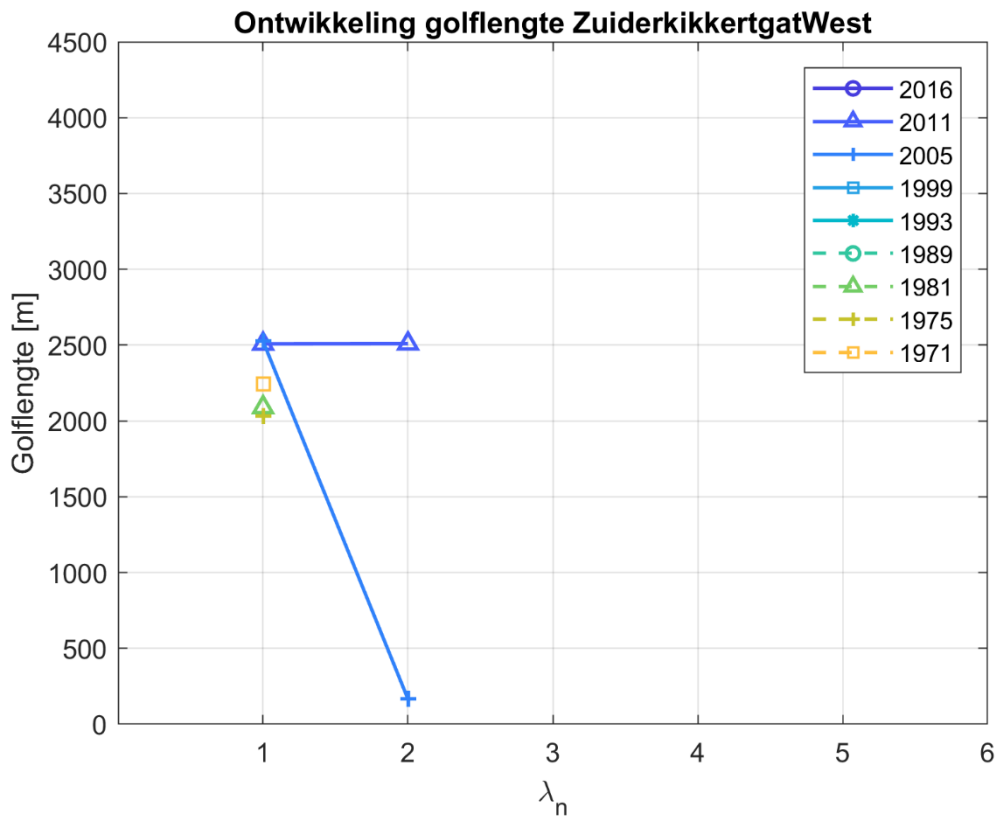
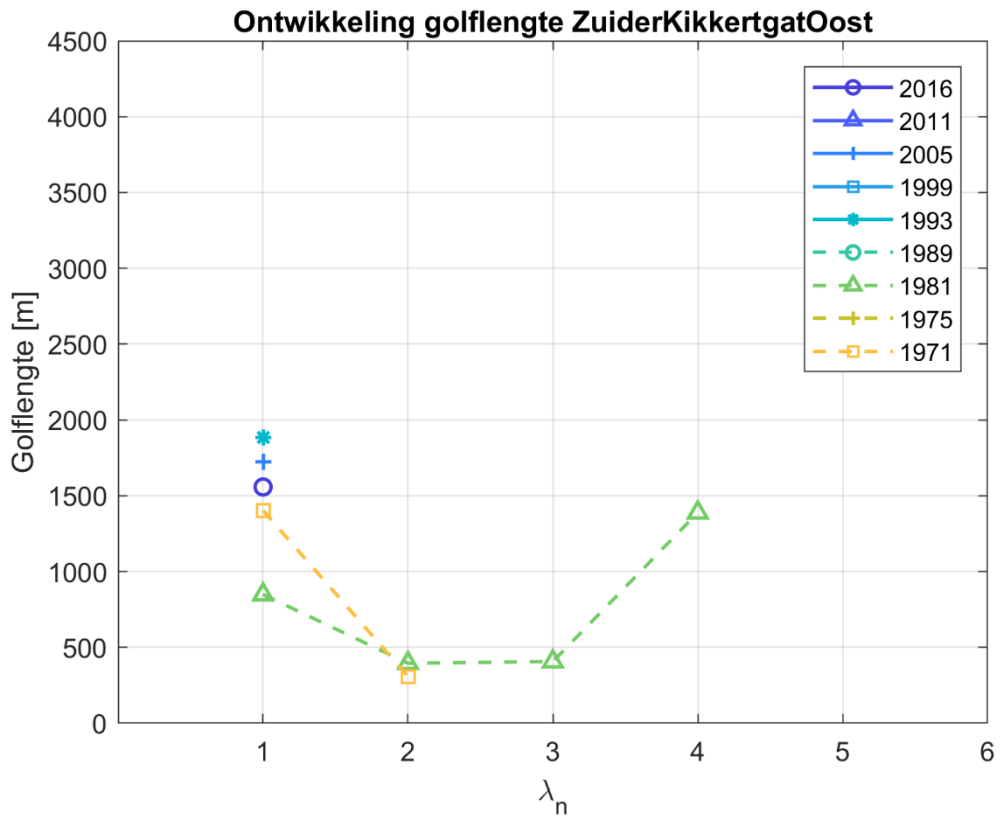
Vaklodingen kaart 1971

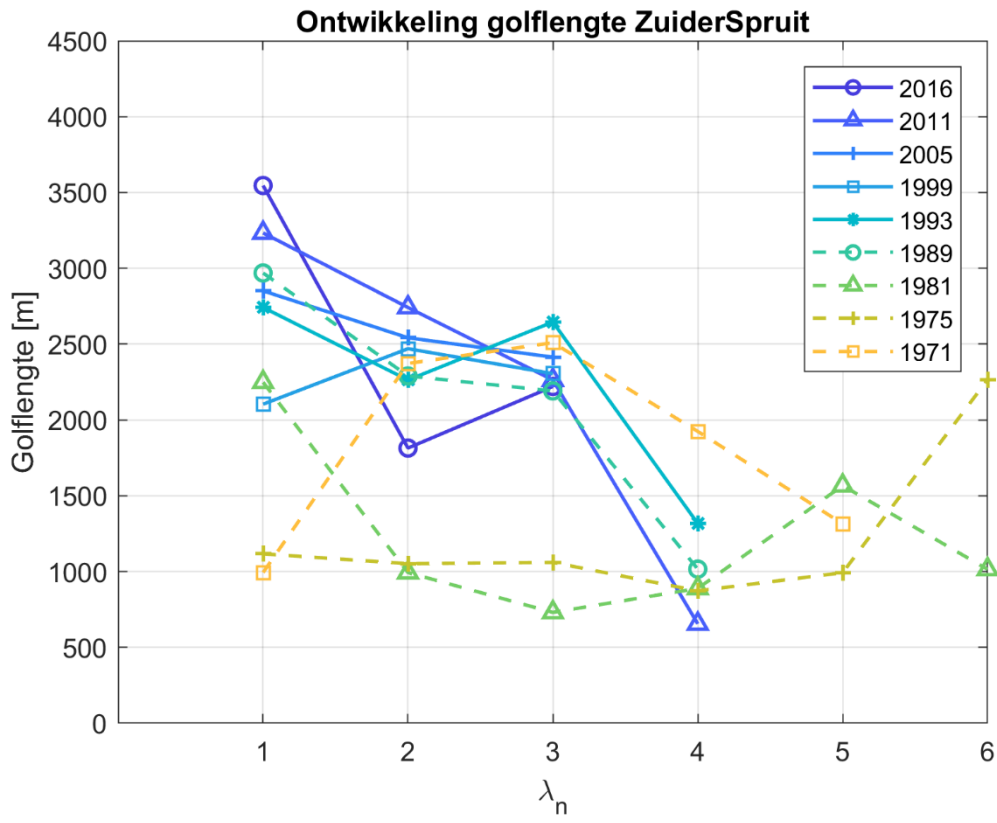


## BIJLAGE B GOLFLENGTE ONTWIKKELING











**Arcadis Nederland B.V.**

Postbus 137

8000 AC Zwolle

Nederland

+31 (0)88 4261 261

[www.arcadis.com](http://www.arcadis.com)

Onze referentie: