Deltares

Enabling Delta Life

Geologie en morfodynamiek getijdengeulen

Casus Borndiep, Zuidwest Ameland



Deltares

Geologie en morfodynamiek getijdengeulen

Casus Borndiep, Zuidwest Ameland

Andrea Forzoni
Marc Hijma
Tommer Vermaas

11202190-001

© Deltares, 2018, B

Deltares

Titel
Geologie en morfodynamiek getijdengeulen

Project	Kenmerk	Pagina's
11202190-001	11202190-001-ZKS-0002	26

Trefwoorden
Differentiële erosie, migratiesnelheid, erosiebestendig, getijdengeulen, kustbeheer

Samenvatting
Dit rapport beschrijft de invloed van erosiebestendige afzettingen in de ondergrond op de migratiesnelheid en vorm van het Borndiep, de getijdengeul ten westen van Ameland. Voor de analyse zijn ondergrondgegevens gebruikt (boringen en seismische data) en bathymetrische opnames over de periode 1989-2018. De analyse laat zien dat de vorm van de getijdengeul in de onderzochte periode sterk veranderd is en dat de aanwezigheid van erosiebestendige lagen grote invloed heeft gehad op de morfologische veranderingen. De aanwezigheid van een Holocene kleilaag (Formatie van Naaldwijk) aan de noordoostzijde van de geul heeft de migratie van de geul vertraagd en de vorming van steilranden en plateaus veroorzaakt. Op het moment dat rond 2013 de geulbodem harde potklei (Formatie van Peelo) raakte stopte verdere verdieping van de geul en vormde zich een vlakke geulbodem. Na het in contact komen met erosiebestendige lagen nemen de migratie- en verdiepingssnelheden af tot 25-30% van de snelheden daarvoor.

De analyse bevestigt de hypothese dat migratiesnelheden en morfologische veranderingen sterk beïnvloed worden door de geologische opbouw rondom een getijdengeul. Daarnaast toont het onderzoek de meerwaarde aan van het combineren van boorgegevens, seismische data en bathymetrische data en laat het zien dat het hiermee mogelijk is om te begrijpen waarom bepaalde fluctuaties in migratiesnelheid en/of morfologische veranderingen optreden. Een opvallende waarneming is dat bij de aanwezigheid van een relatief dunne erosiebestendige laag (~ 1 m) er niet alleen ter hoogte van deze laag een steile geulwand kan ontstaan, maar dat het steile stuk zich tot meerdere meters daaronder kan voortzetten. Het voorkomen van dergelijke hoge steile wanden vergroot waarschijnlijk de kans op relatief grote afschuivingen.

Dit rapport valt binnen een opgezette onderzoekslijn naar de invloed van de geologische opbouw van de ondergrond op lange-termijn kust- en getijdenbekkenontwikkeling (Onderdeel van KPP programma B&O kust). Met de resultaten zet dit rapport een flinke stap voorwaarts in de ontwikkeling van een werkwijze om te komen tot een kwantificering van de erosiebestendigheid. Deze laatste zou verder gekwantificeerd moeten worden door vergelijkbare studies op te zetten in andere gebieden van de Waddenzee, literatuuronderzoek en (kleinschalige) labproeven. Daarnaast zou gestart moeten worden met de inbedding van geologie in morfodynamische modellen.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	Oct. 2018	Andrea Forzoni		Ad van der Spek		Frank Hoozemans	
		Marc Hijma					
		Tommer Vermaas					

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding en achtergrond **3**
1.1 Inleiding 3
1.2 De invloed van erosiebestendige afzettingen: een conceptueel model 3
1.3 Beschrijving onderzoeksgebied en gebruikte data 5

2 Analyse geulwanden profielen **11**
2.1 Bovenaanzicht analyse 11
2.2 Morfologische veranderingen van de geulwand 11
2.3 Migratiesnelheid 14

3 Relatie geulwandprofiel en geologie **17**
3.1 Geologische data: seismiek en boringen 17
3.2 “Geologische” doorsneden 19
3.3 Interpretatie 19

4 Discussie **23**

5 Potentiele studiegebieden in de Waddenzee **25**

6 Conclusies **29**

7 Aanbevelingen **31**

8 Referenties **33**

1 Inleiding en achtergrond

1.1 Inleiding

In Nederland bestaat een grote behoefte om de kustontwikkeling in de komende jaren en decades redelijk betrouwbaar te kunnen voorspellen. Migrerende getijdengeulen zijn hierbij een belangrijk aspect, omdat ze relatief zeer dynamisch zijn en de stabiliteit van de kust en eventuele verdedigingswerken in gevaar kunnen brengen. Om op dergelijke tijdschalen realistische voorspellingen te kunnen doen, is het onder andere nodig om de invloed van de geologische opbouw van de ondergrond op langetermijnkustontwikkeling te begrijpen, te kwantificeren en uiteindelijk in te bedden in morfodynamische modellen. Hiertoe is binnen het KPP programma Beheer en Onderhoud Kust, dat Deltares uitvoert in opdracht van Rijkswaterstaat-WVL, een onderzoekslijn opgezet. De onderzoekslijn draait rondom de hypothese dat de aanwezigheid van erosiebestendige afzettingen leidt tot lagere migratiesnelheden van getijdengeulen en/of tot het verhinderen van het dieper worden van een getijdengeul. Om deze hypothese te toetsen kunnen locaties gebruikt worden waarvan bekend is dat getijdengeulen (deels) ingebed liggen in erosiebestendige afzettingen. Een serie van bathymetrische opnames, verspreid over meerdere jaren, liefst decades, kan dan gebruikt worden om de morfologische veranderingen door de tijd te analyseren en een link te leggen naar voorkomen en verbreiding van erosiebestendige afzettingen. Dergelijke studies kunnen ook gebruikt worden om een eerste stap te zetten in het opvullen van een belangrijk kennishiaat, namelijk het gebrek aan kwantitatieve kennis over de differentiële erosiegevoeligheid van de verschillende afzettingen. Deze kennis is nodig om in een volgende stap modellen geschikt te maken voor het maken van verwachtingen over toekomstige geulverplaatsingen.

Eerste stappen in het toetsen van de hypothese zijn genomen in Van der Spek (1997), Van der Spek and Van Heteren (2004), en (Hijma, 2017a; 2017b). De rapporten van Hijma boden een overzicht van de verbreiding, dikte en diepte van erosiebestendige lagen langs de Nederlandse kust, samen met een overzicht van de migratiesnelheden van getijdengeulen berekent op basis van verplaatsende contourlijnen. In dit rapport zoomen we in op het Borndiep, een getijdengeul bij de westkust van Ameland waar in de ondergrond zowel erosiebestendige als zandige lagen voorkomen en beschrijven we de verandering van meerdere morfologische parameters van een getijdengeul.

Dit rapport beschrijft de resultaten van een analyse van (a) de migratiesnelheden van het Borndiep over de periode 1989-2018 en (b) de opbouw van de ondergrond van het gebied op basis van nieuwe boringen en seismiek, specifiek op de locatie van erosiebestendige afzettingen. De invloed van de ondergrond op de migratiesnelheden wordt vervolgens beschreven en bediscussieerd. Hieronder wordt het gehanteerde conceptuele model gegeven (geïntroduceerd in Hijma, 2017b), waarna het onderzoeksgebied en de gebruikte data beschreven worden

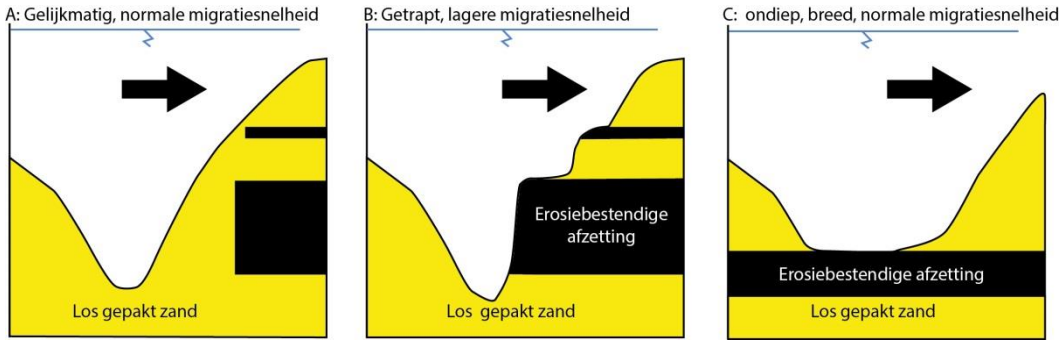
1.2 De invloed van erosiebestendige afzettingen: een conceptueel model

In Nederland liggen de meeste getijdengeulen ingebed in een zandpakket met daarin afwisselingen in de hoeveelheden zand, silt en lutum, maar ook in schelpenconcentraties. Omdat getijdengeulen vaak heen en weer migreren in een bepaald gebied, zal een groot deel van het zandpakket bestaan uit omgewerkt materiaal dat afgezet is op de binnenbochten van migrerende getijdegeulen. De verschillen in zandsamenstelling kunnen differentiële erosiegevoeligheid veroorzaken, maar dit leidt zover bekend niet tot geobserveerde verschillen in migratiesnelheid. Er zijn echter ook gebieden in Nederland waar duidelijk meer erosiebestendige afzettingen voorkomen (bijvoorbeeld klei- en veenlagen, keileem) en

verwacht kan worden dat de aanwezigheid van dergelijke afzettingen er voor zorgt dat de gemiddelde migratiesnelheid van geulen lager is dan in gebieden met alleen zandige afzettingen. Afgezien van lagere migratiesnelheden kan de aanwezigheid van erosiebestendige afzettingen ook weerspiegeld worden in afwijkende geulwandprofielen, zoals geconceptualiseerd in Figuur 1.1.

Paneel A laat een typisch geulprofiel zien van een getijdengeul die vrijelijk kan bewegen door een zandpakket. De vorm is afgeleid uit bathymetrische data van verschillende getijdengeulen uit de Waddenzee. De mate van geulsymmetrie varieert tussen geulen en secties van geulen, maar de geulen delen het gelijkmatige profiel. Dit profiel verandert wanneer erosiebestendige afzettingen aanwezig zijn in de geulwand (Paneel B): er ontstaan steilere delen ter hoogte van dergelijke afzettingen en aan de top van deze afzettingen ontstaat vaak een plateau. De steilere delen lijken niet alleen te kunnen ontstaan in de erosiebestendige afzettingen, maar ook in het zand direct onder erosiebestendige afzettingen waardoor relatief hoge steile wanden kunnen ontstaan. Verwacht kan worden dat steile delen die deels uit zand bestaan anders zullen eroderen dan steile delen die geheel uit erosiebestendige afzettingen bestaan. In het eerste geval is de kans groter dat de erosie uit afschuivingen bestaat, terwijl in het tweede geval de erosie wat geleidelijker zal verlopen, waarbij het niet uitgesloten is dat nu en dan grote(re) stukken erosiebestendige afzettingen afbreken.

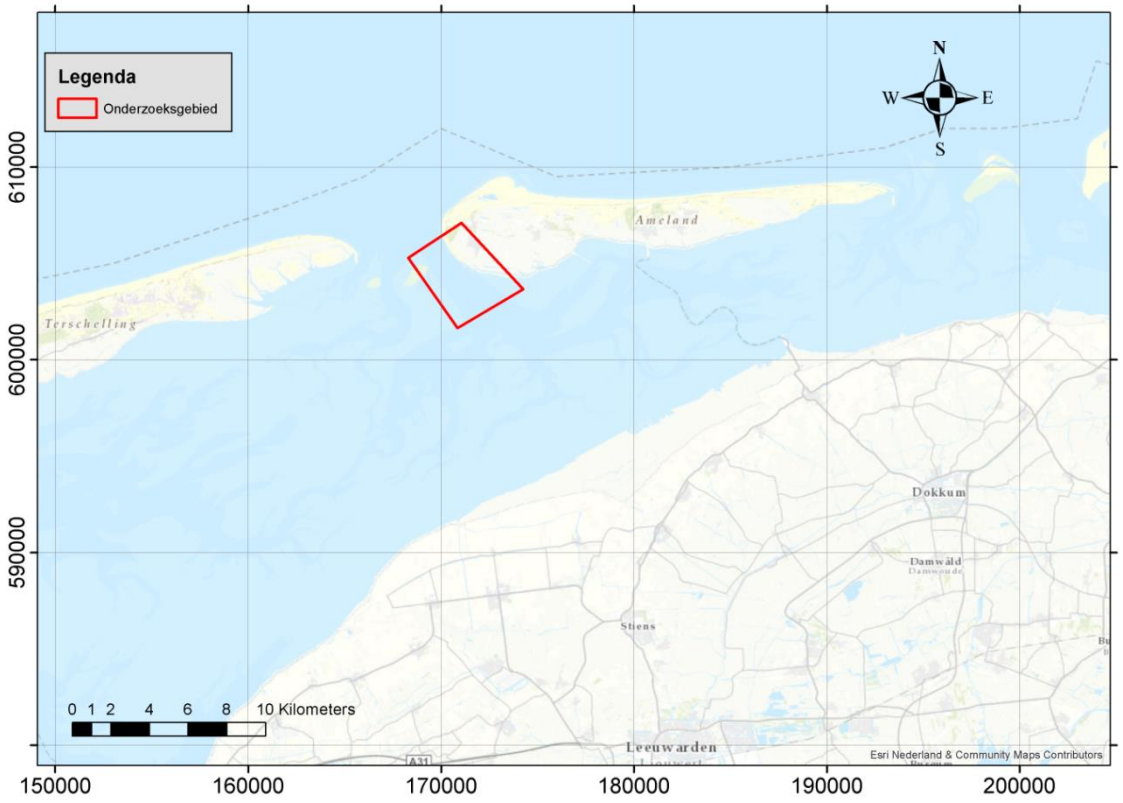
Als de erosiebestendige afzetting aan de basis van de geul voorkomt, en dus dieper worden van de geul bemoeilijkt, dan ontstaat veelal een relatief ondiepe, maar brede geul met een sterk afwijkende diepte-breedte verhouding (Paneel C). Initieel zal de geul zich mogelijk relatief snel verbreden, maar over meerdere jaren is de migratiesnelheid niet opvallend hoog.



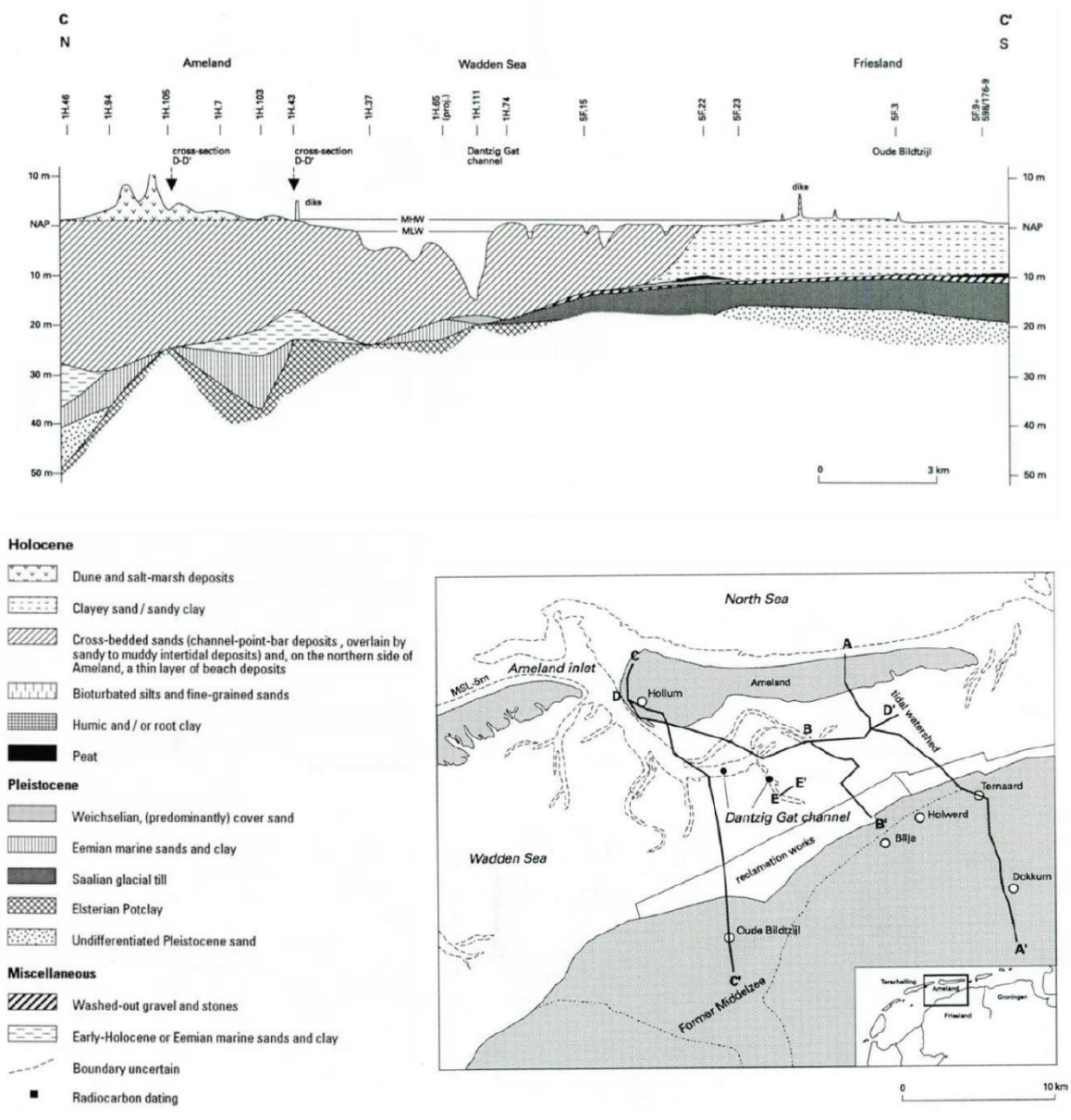
Figuur 1.1 Conceptueel model van de invloed van erosiebestendige lagen op de vorm van geul. Paneel A laat een situatie zien waarin de geul vrijelijk kan bewegen, leidend tot een gelijkmatig profiel waarvan de vorm vooral gedicteerd wordt door morfodynamische processen in de geul. In Paneel B dagzomen erosiebestendige lagen in de staat een geulwand, resulterend in een getrapt profiel met steile hellingen en plateaus. In Paneel C bevindt de erosiebestendige afzetting zich aan de basis van geul waardoor de geul niet dieper en alleen breder kan worden.

1.3 Beschrijving onderzoeksgebied en gebruikte data

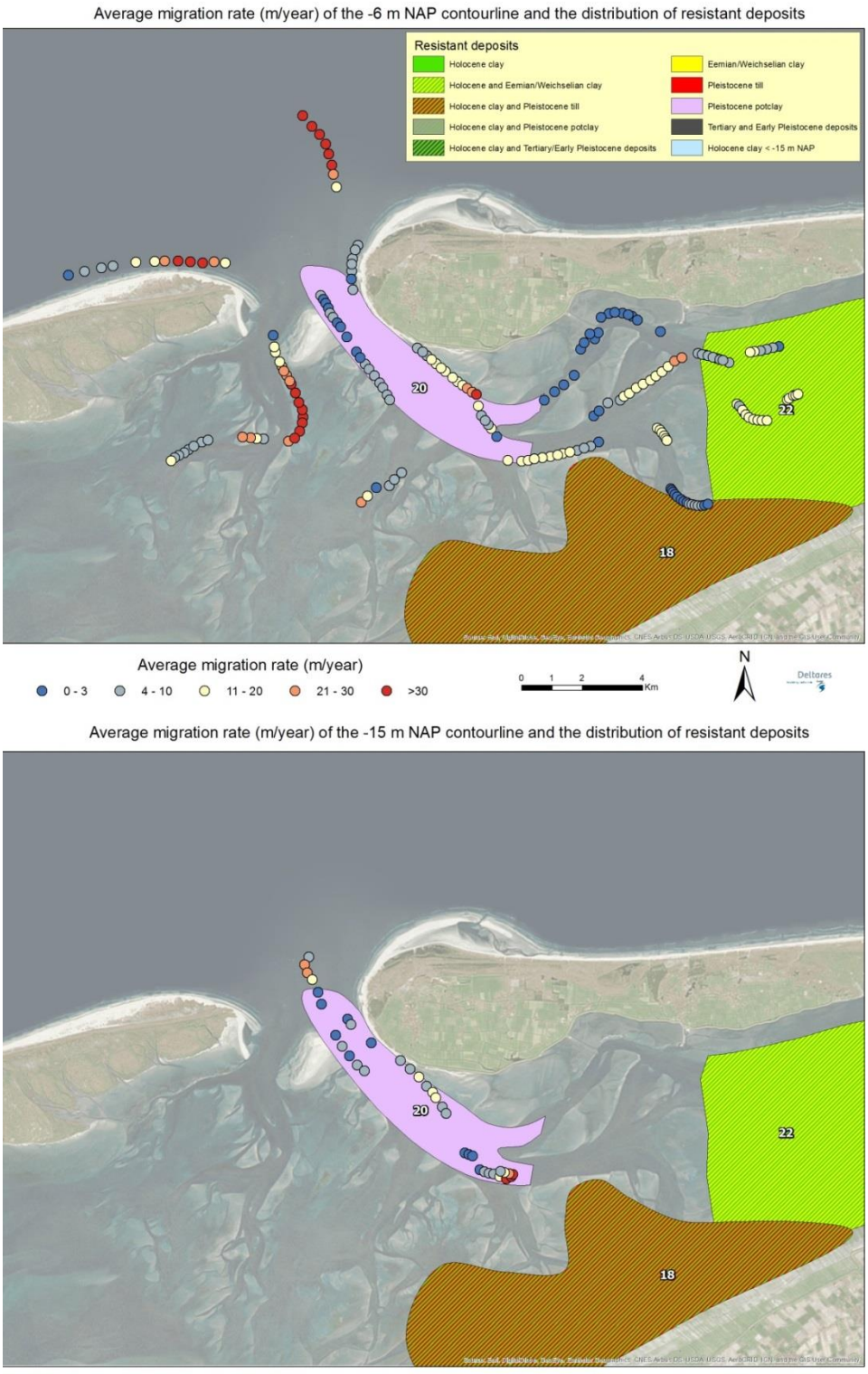
In het onderzoeksgebied bij West-Ameland (Figuur 1.2) komt potklei in de ondergrond voor, maar in de nabijheid (Figuren 1.3 en 1.4) ook basisveen en keileem (Van der Spek, 1994; Hijma, 2017a). Boringen laten zien dat de potklei voorkomt tussen -23 en -25 m NAP, net onder de basis van de getijdengeulen. Hijma (2017a) beschrijft dat deze erosiebestendige klei bij Ameland verdieping van de getijdengeulen kan voorkomen, maar geen directe invloed heeft op de snelheid van laterale migratie van de geul. Sommige boringen bij West-Ameland laten daarnaast zand- en kleilagen van de Eem Formatie zien. Deze afzettingen zijn oud, rond de 120.000 jaar, en de klei kan behoorlijk hard zijn, vooral als gevolg van bodemvorming en vorstwerking. Aan weerszijden van het Borndiep lijken alleen homogene pakketten Holoceen zand aanwezig te zijn (Figuren 1.3-1.4).



Figuur 1.2 Ligging van het onderzoeksgebied bij West-Ameland.



Figuur 1.3 Geologische doorsnede C-C' door de Holocene en Pleistocene afzettingen van het westelijke deel van Ameland richting Friesland (Van der Spek, 1994).



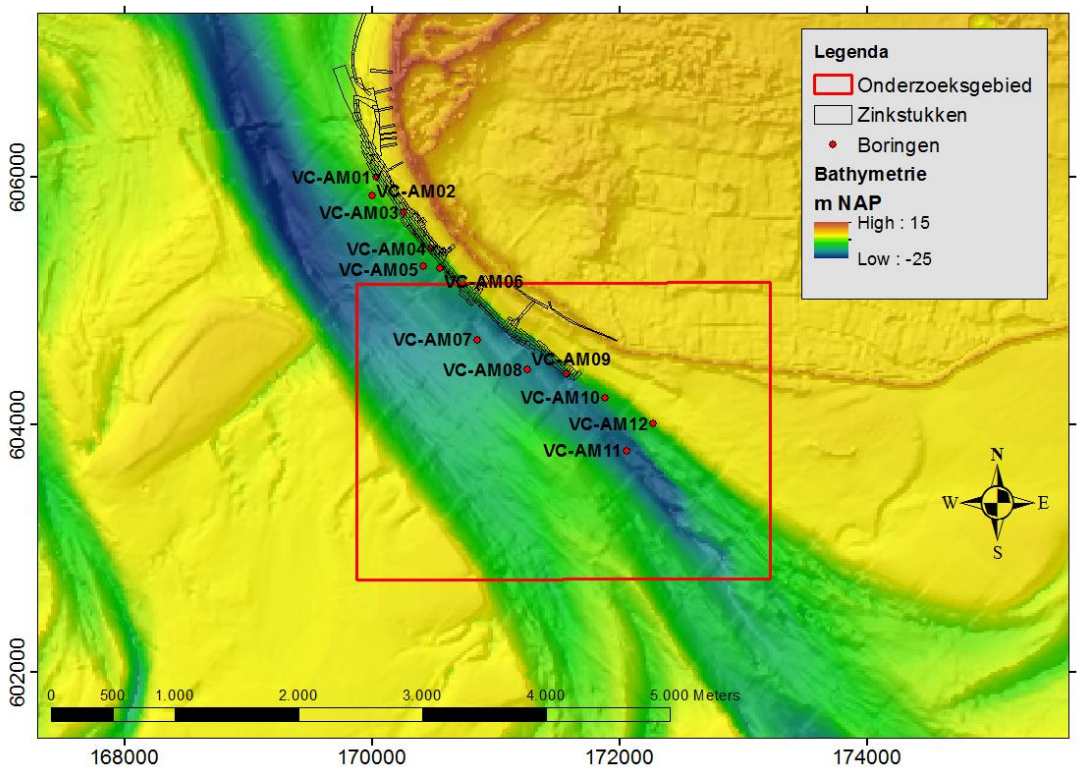
Figuur 1.4 Gemiddelde migratiesnelheid van het Borndiep en de aanwezigheid van erosiebestendige afzettingen (uit Hijma, 2017b). Gebied 20: potklei; gebied 18: Holocene klei en veen op keileem; gebied 22: Holocene en oudere kleien.

De morfologische veranderingen zijn geanalyseerd aan de hand van bathymetrische profielen die afgeleid zijn van vaklodingen en multibeam surveys in het gebied (Tabel 1.1). Vaklodingen in een bepaalde regio worden verspreid over een langere periode uitgevoerd. Vervolgens worden de vaklodingen gecombineerd tot bathymetrische kaarten, die dus geen exacte datum van opname hebben. Voor de huidige studie wordt een datum van 1 maart aangehouden als opnamedatum voor de vaklodingskaarten. De opbouw van de ondergrond is deels afgeleid uit ondergronddata zoals beschikbaar op DINOloket, maar ook uit 12 nieuwe vibrocores en 100 km seismische data. De boringen en de seismiek worden beschreven in een andere studie (Vermaas, 2018; Vermaas et al., 2018). De Figuren 1.4 en 1.5 geven een overzicht van de locatie van de vibrocores en van de geanalyseerde bathymetrische profielen die verderop in het rapport beschreven worden.

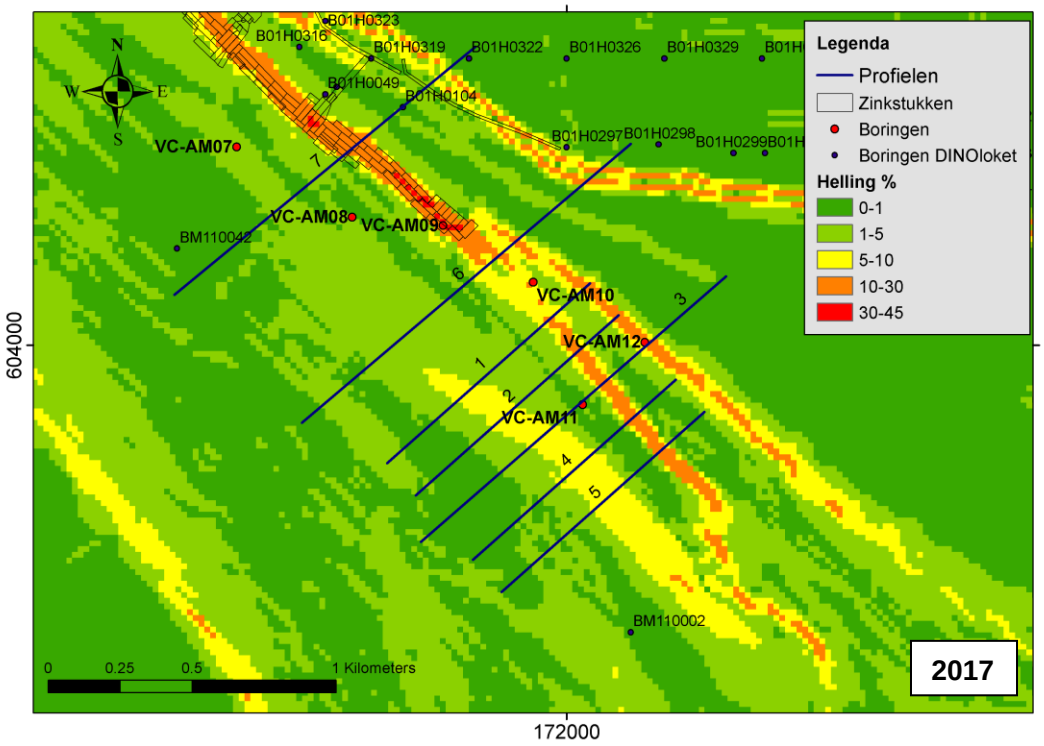
De gemaakte hellingenkaart (Figuur 1.6) toont drie gebieden met steile hellingen (>30 %). Het meest noordelijke gebied is de dijk bij de kust van Ameland. De tweede steile helling is de rand van de getijdengeul in het noorden (bij profiel 7). De derde en het meest cruciale voor deze studie is een steile helling aan de oostelijke zijde van de getijdengeul. Deze helling scheidt een smal plateau op ongeveer -12 m NAP (niet zichtbaar in Figuur 1.3) van het diepste deel van de geul. Het smalle plateau is afwezig in het noorden. Hier is de hele noordoostzijde van de geul bestort.

Tabel 1.1 Overzicht van de gebruikte bathymetrische data. (Bron data: Rijkswaterstaat)

Datum	Soort meting
1989	Vakloding
1993	Vakloding
1999	Vakloding
2005	Vakloding
2009, mei, 25	Multibeam
2011, april, 18	Multibeam
2011, november, 29	Multibeam
2012, april, 17	Multibeam
2013, mei, 2	Multibeam
2014, april, 3	Multibeam
2015, februari, 11	Multibeam
2016, maart, 3	Multibeam
2017, april, 25	Multibeam
2018, mei, 23	Multibeam



Figuur 1.5 Bathymetrie uit 2018 en locatie van de vibrocores. De rode rechthoek toont het onderzoeksgebied.



Figuur 1.6 Hellingkaart en locatie van de zeven bathymetrische profielen. De rode rechthoek in Figuur 1.5 correspondeert met deze figuur.

2 Analyse geulwanden profielen

Op basis van de bathymetrische data hebben we drie analyses uitgevoerd:

1) Morfologische veranderingen (bovenaanzicht) op basis van contourlijnen,
2) Morfologische veranderingen van de geulwand, en
3) Migratiesnelheden.

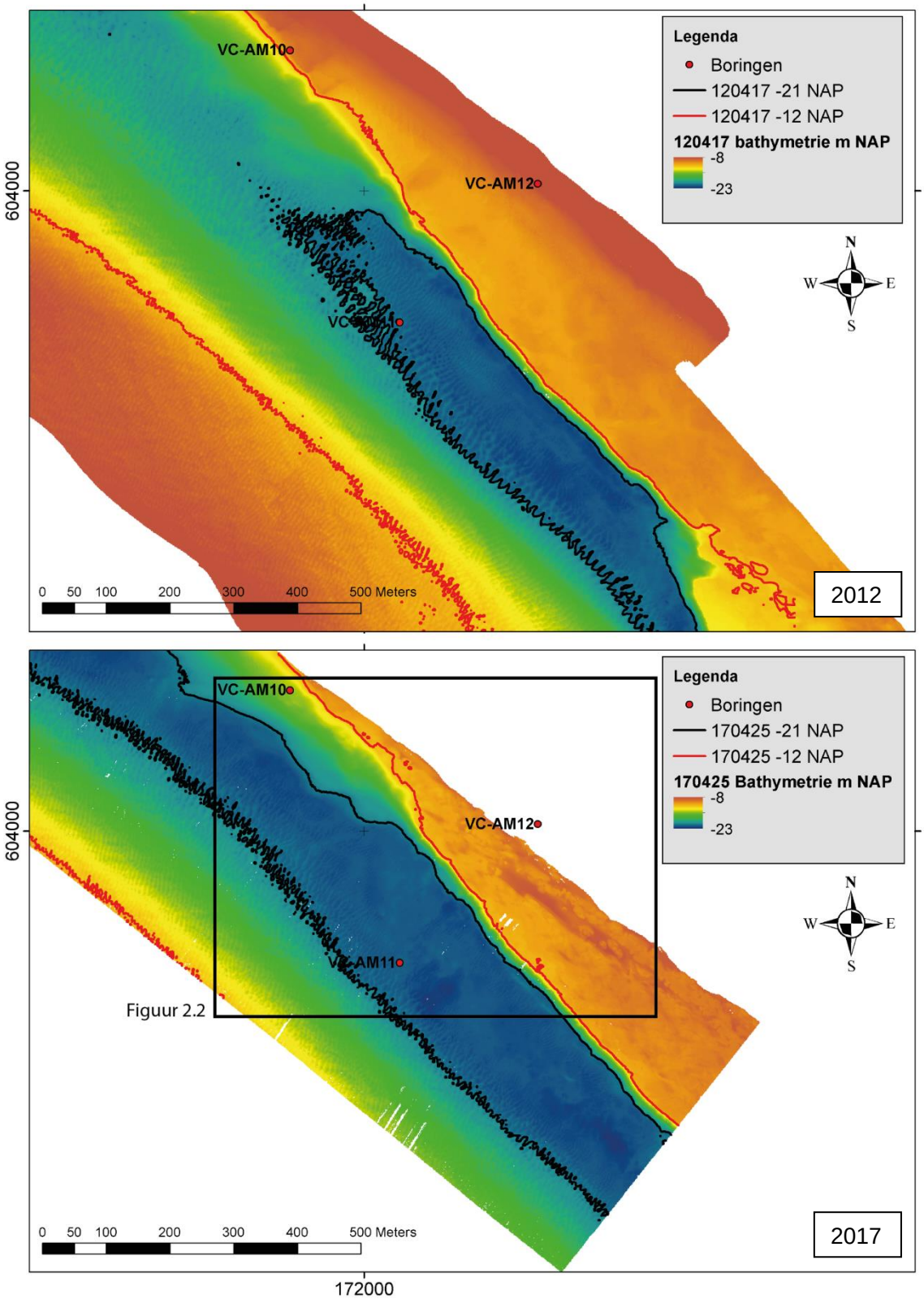
2.1 Bovenaanzicht analyse

Figuur 2.1 toont de bathymetrie en de ligging van de -12 m en -21 m contourlijnen in 2012 en 2017. De oostelijke -12 m contourlijn ligt aan de rand van het plateau aan de noordoostzijde van de getijdengeul. De -21 m contourlijn is de op een na diepste contourlijn in het studiegebied. Tussen 2012 en 2017 heeft het gebied onder de -21 NAP zich voornamelijk richting het noordwesten uitgebreid. De -12 m contourlijn migreerde, met name in de noordelijke helft, juist naar het noordoosten. Deze contourlijn migreerde tussen 2011-2013 relatief snel in het gebied rondom boorlocaties VC-AM10, zeker in vergelijking met het gebied ten zuiden ervan (Figuur 2.2). Daarna zijn de migratiesnelheden weer uniform over het gehele gebied.

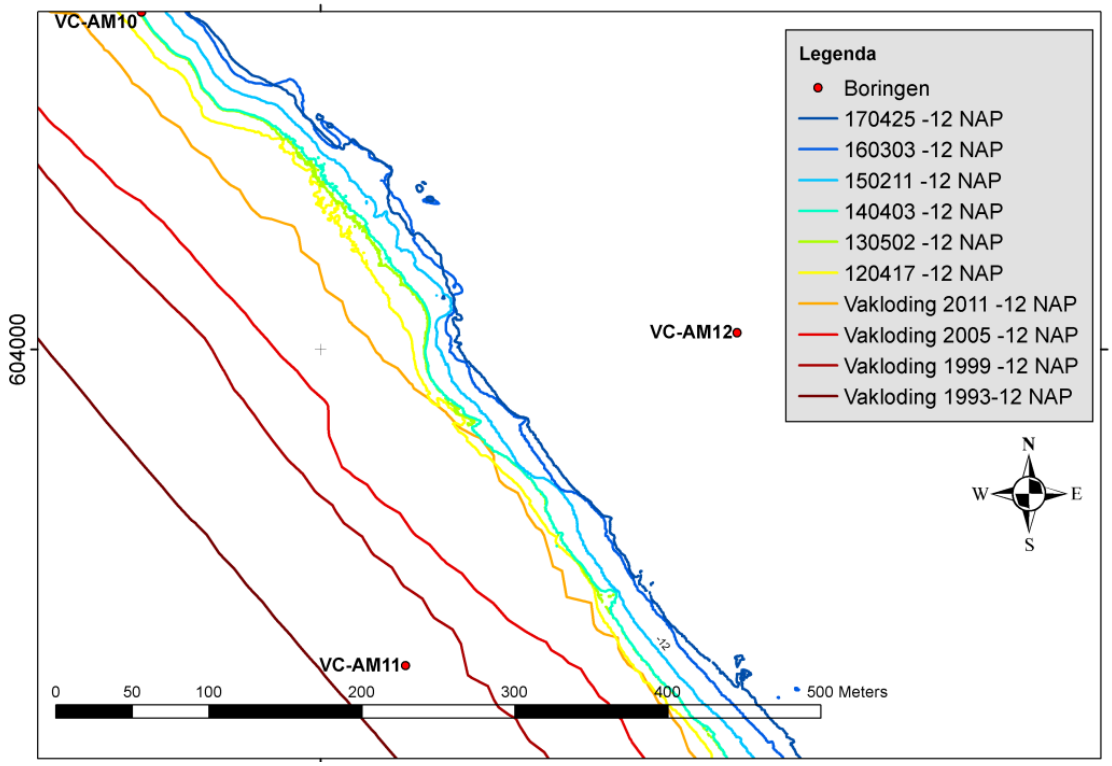
2.2 Morfologische veranderingen van de geulwand

We hebben vijf bathymetrische profielen geanalyseerd op zoek naar patronen in laterale ontwikkeling en verdieping van de getijdengeul. Drie profielen worden getoond in Figuren 2.3-2.5. Uit de profielen kunnen de volgende patronen afgeleid worden:

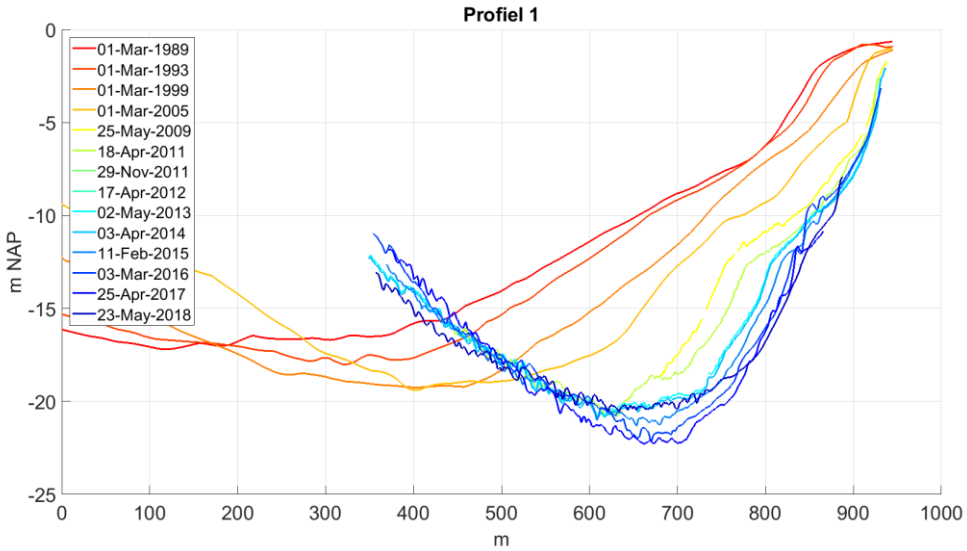
- De geul migreert naar het noordoosten, richting het eiland.
- Er ontstaat een steile helling en een vlak plateau aan de noordoostzijde van de geul tussen 1999 en 2005 in profielen 3 en 5. Vervolgens migreert deze steilrand ook richting het noordoosten. De bovenrand van de steilrand ligt op -12 m NAP. In profiel 1 is rond -12 m NAP ook wel een klein plateau zichtbaar, maar minder prominent dan in profielen 3 en 5.
- Vanaf 2009 wordt de verdieping van de geul in profiel 3 en 5 veel langzamer ten opzichte van de vorige periode. Hier vormt zich een vlakke bodem op ongeveer -22 m NAP diepte. In profiel 1 vormt zich geen vlakke bodem en gaat de verdieping door tot het moment van de suppletie midden 2017. Het bereiken van de harde laag lijkt niet te leiden tot bovengemiddeld hoge migratiesnelheden of opvallende verbreding van het Borndiep. Wel neemt het oppervlak waar de geul in contact staat met de potklei toe: de geul wordt dus gemiddeld nog wel dieper.



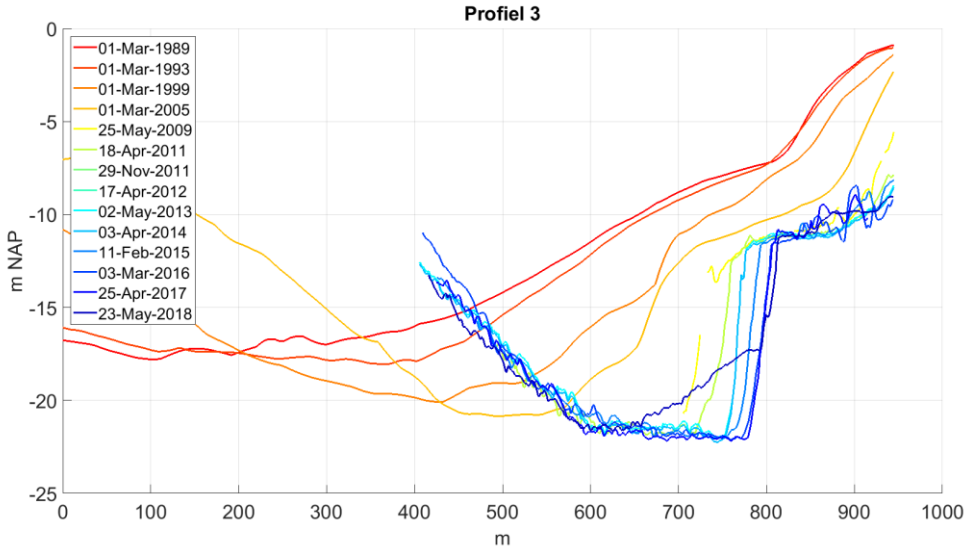
Figuur 2.1 Bathymetrie en contourlijnen -21 m en -12 m onder NAP in 2012 (boven) en in 2017 (onder). Deze figuur toont dat het gebied onder de -21 m NAP zich heeft uitgebreid in 2017 ten opzichte van 2012, vooral richting het noorden en deels richting het zuidoosten. Het zwarte vierkant geeft de ligging van Figuur 2.2 weer.



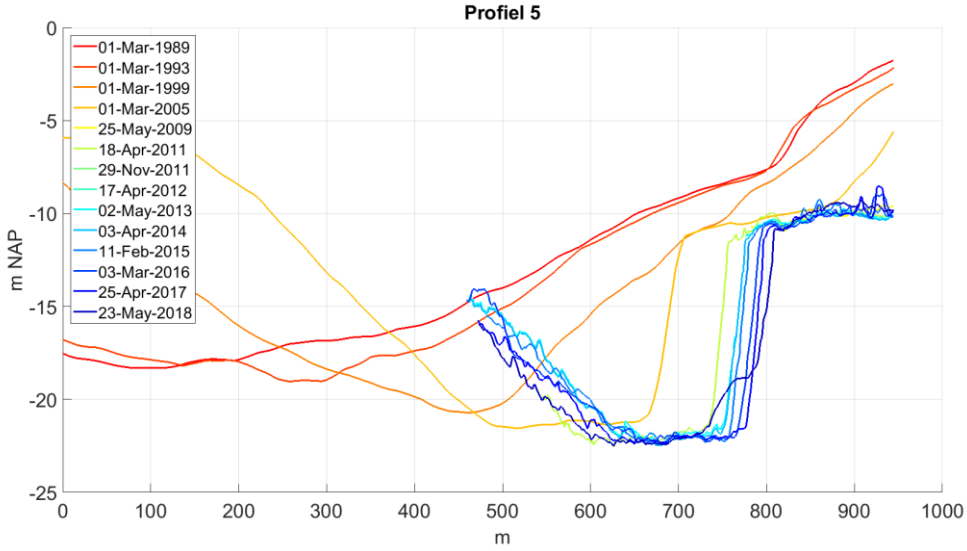
Figuur 2.2 Laterale migratie van de -12 m NAP contourlijn (rand van plateau) tussen 1993 en 2017. Voor locatie zie Figuur 2.1.



Figuur 2.3 Bathymetrie van de getijgeul tussen 1989 en 2018 in profiel 1 (zie Figuur 1.6 voor locatie).



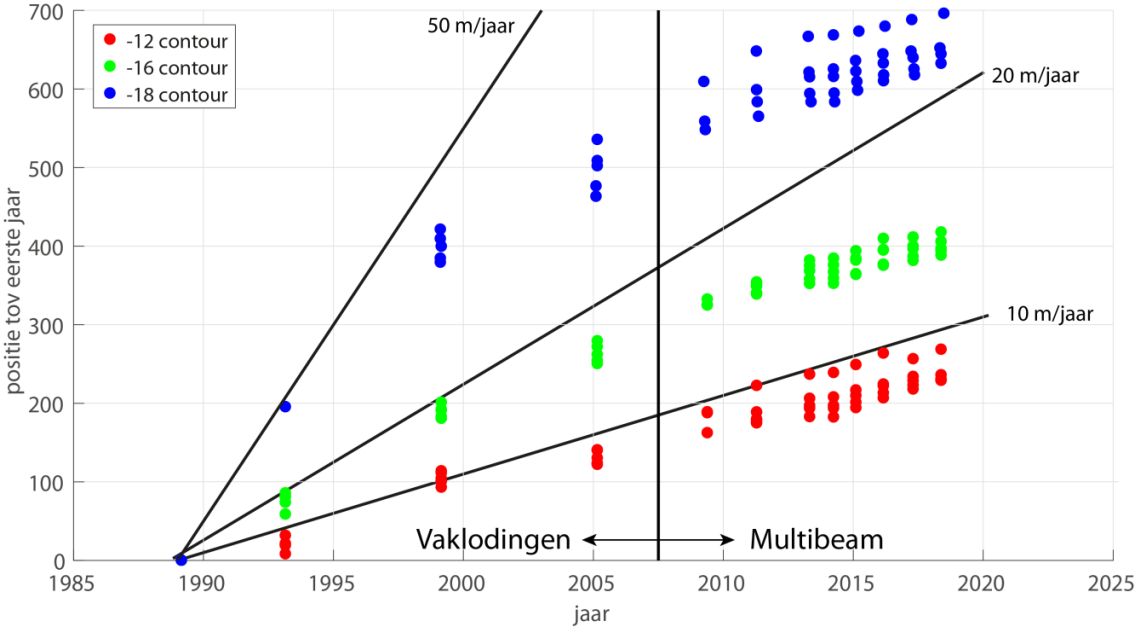
Figuur 2.4 Bathymetrie van de getijgeul tussen 1989 en 2018 in profiel 3 (zie Figuur 1.5 voor locatie).



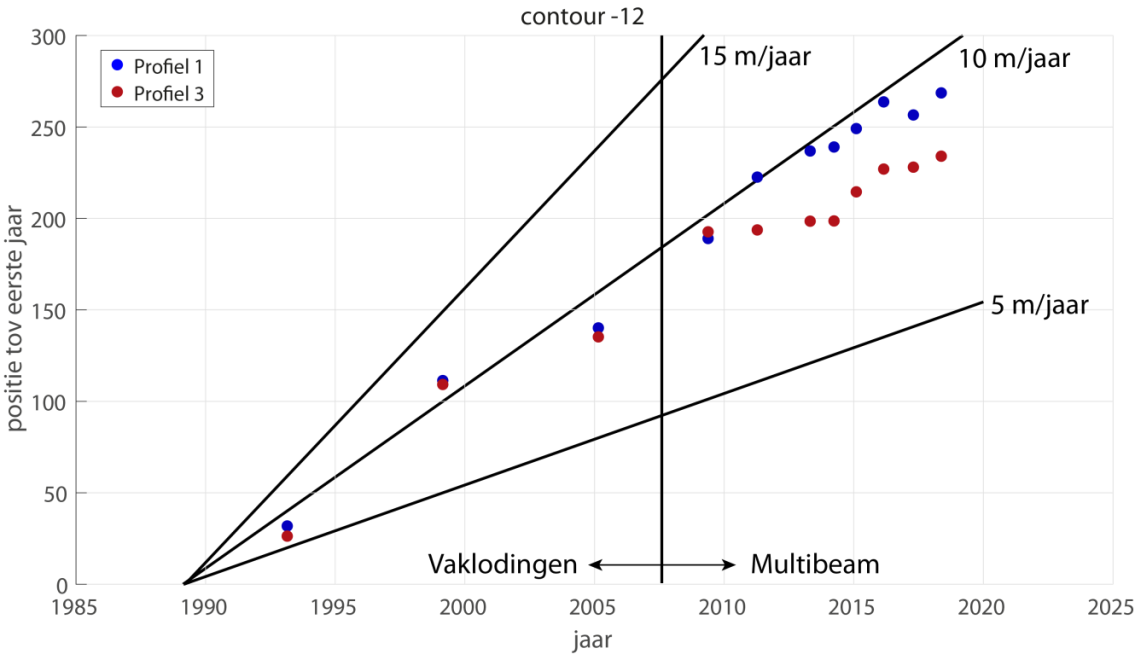
Figuur 2.5 Bathymetrie van de getijgeul tussen 1989 en 2018 in profiel 5 (zie Figuur 1.6 voor locatie.)

2.3 Migratiesnelheid

De gemiddelde migratiesnelheid is berekend op basis van de migratieafstand van de contourlijnen -12 m, -16 m en -18 m NAP aan de oostzijde van alle vijf de geanalyseerde profielen (Figuur 2.6). Tussen 1989 en 1999 neemt de migratiesnelheid toe met de diepte, dit impliceert dat de geulwand steiler wordt. Na 1999 vlakt de migratiesnelheid voor de diepere contourlijnen af en na 2005 bewegen alle contourlijnen ongeveer even snel (5-15 m/jaar). Deze trend is in alle profielen zichtbaar, maar er zijn wel kleine verschillen tussen de profielen. Figuur 2.7 toont bijvoorbeeld het verschil in migratieafstand en -snelheid voor de -12 m NAP contourlijn in profielen 1 en 3. In profiel 1 (géén ontwikkeling plateau in geulwand) is de migratie sneller dan in profiel 3 (wel ontwikkeling plateau in geulwand) in de periode 2009-2017, waarbij het grootste verschil in afstand ontstaat tussen 2011 en 2013. Daarna blijft het verschil constant.



Figuur 2.6 Migratieafstand en -snelheid van de -12, -16 en -18 m NAP contourlijnen voor alle de vijf profielen. De zwarte lijnen laten zien welke snelheid bij welke helling hoort.

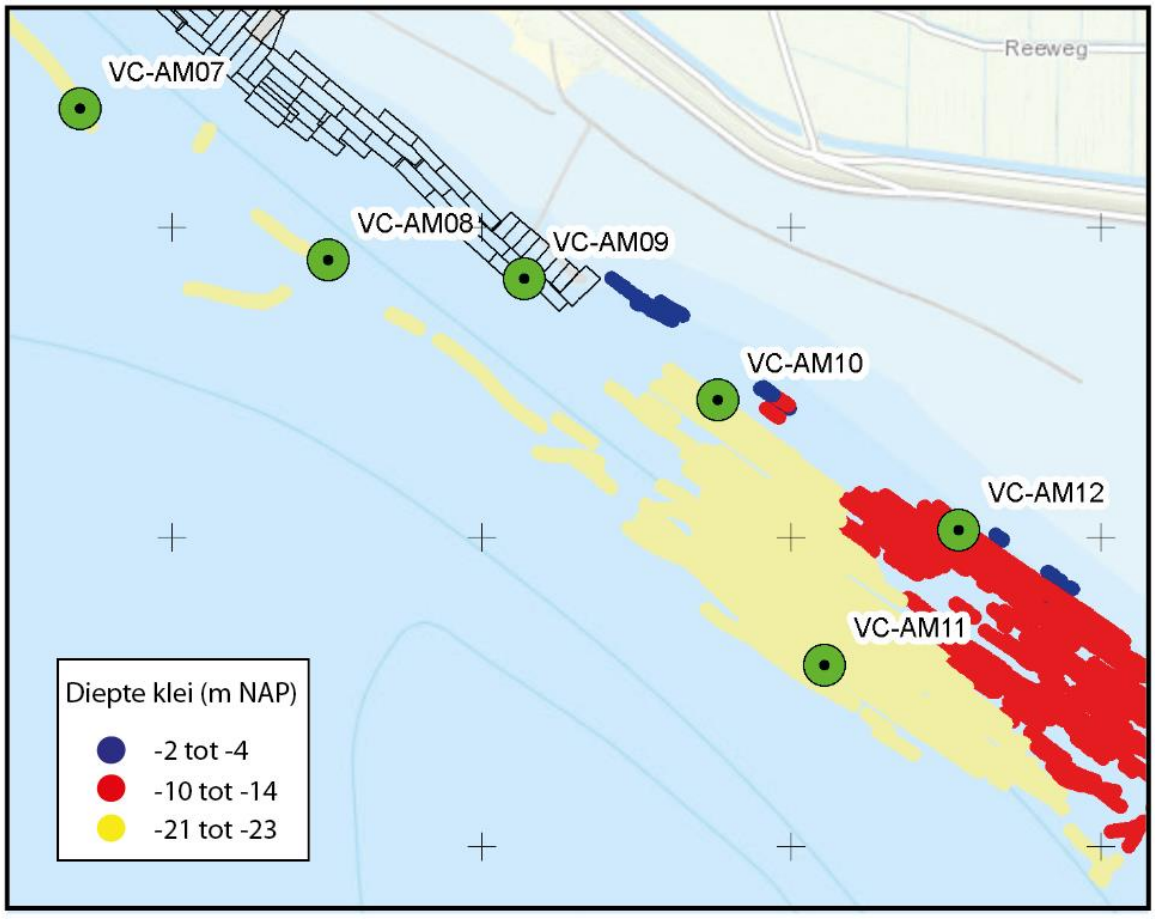


Figuur 2.7 Migratieafstand en -snelheid van de -12 m NAP contourlijnen in de tijd voor profiel 1 en profiel 3.

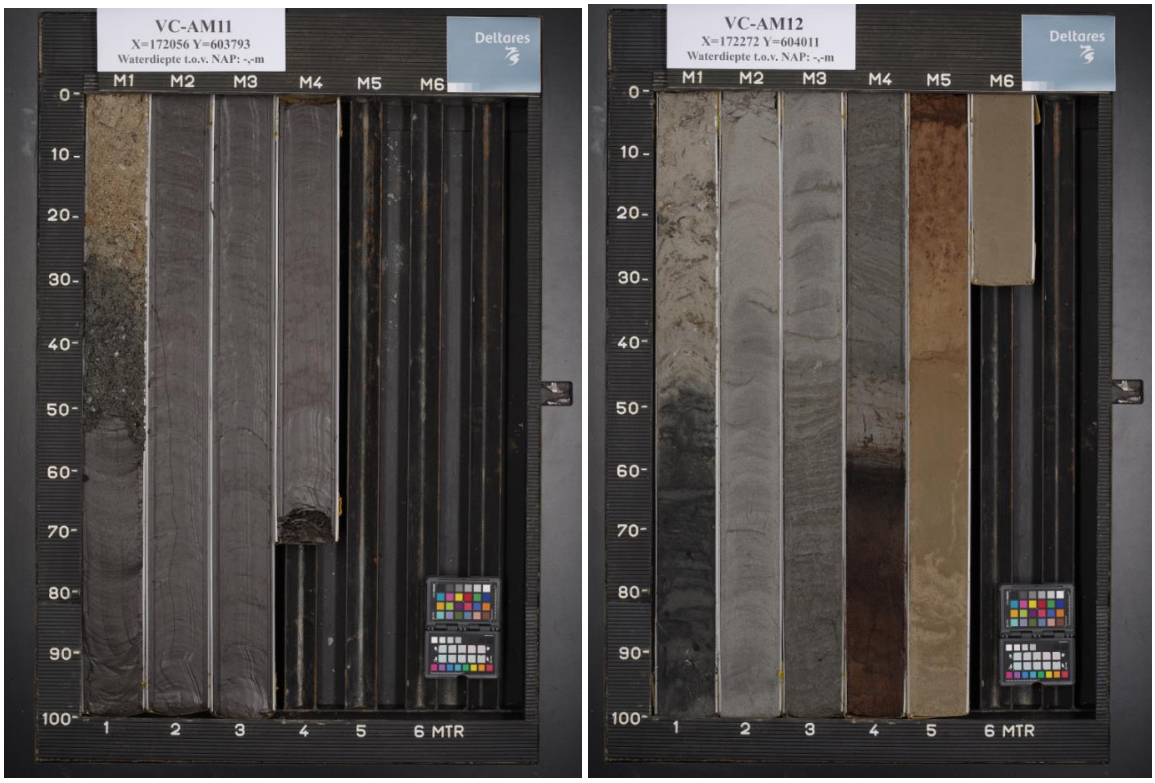
3 Relatie geulwandprofiel en geologie

3.1 Geologische data: seismiek en boringen

De geïnterpreteerde seismische data (Figuur 3.1) en nieuwe boringen in het gebied laten twee relevante eenheden met kleiige afzettingen zien (Figuur 3.2): (1) potklei, een relatief harde klei van Pleistocene ouderdom tussen -22 en -24 m (Formatie van Peelo, laagpakket van Nieuwolda) en (b) een Holocene humeuze klei op (basis)veen in het zuidoosten van het gebied. De aanwezigheid van de Holocene klei- en veenlagen op deze locatie op deze diepte was nog niet bekend en toont het belang aan van het constant updaten van de landsdekkende kaart van erosiebestendige afzettingen in het kustgebied (Hijma, 2017a). De ondiep voorkomende kleilaag is niet in boringen aangetroffen, wel in seismiek (Vermaas, 2018), komt in relatief kleine gebieden voor en lijkt niet veel invloed te hebben op de morfologie van de geul. Mogelijk dat versteiling van de ondiepe geulwand in profiel 3 na 2011 wel in verband staat met de aanwezigheid van deze kleilaag.



Figuur 3.1 Geïnterpreteerde aanwezigheid en diepte intervallen van kleilagen op basis van seismische data



Figuur 3.2 Boorfoto's van boringen VC-AM11 en VC-AM12 (zie Figuur 1.5, 2.1 of 3.1 voor locatie). De bovenste 0.30 m van boring VC-AM11 bestaat uit zandige afzettingen van de actieve laag met daaronder nog 0.2 m zand en schelpen. Het meer dan 3 m dikke pakket daaronder bestaat uit donkerbruine, harde potklei. Boring VC-AM12 is verdeeld in vijf eenheden: de bovenste 0.65 m bestaan uit zand, met daaronder siltig zand (0.65-2.4 m) en humeuze klei (2.40-3.60 m). Een dunne veenlaag van 0.02 m scheidt de Holocene afzettingen van de Pleistocene afzettingen.

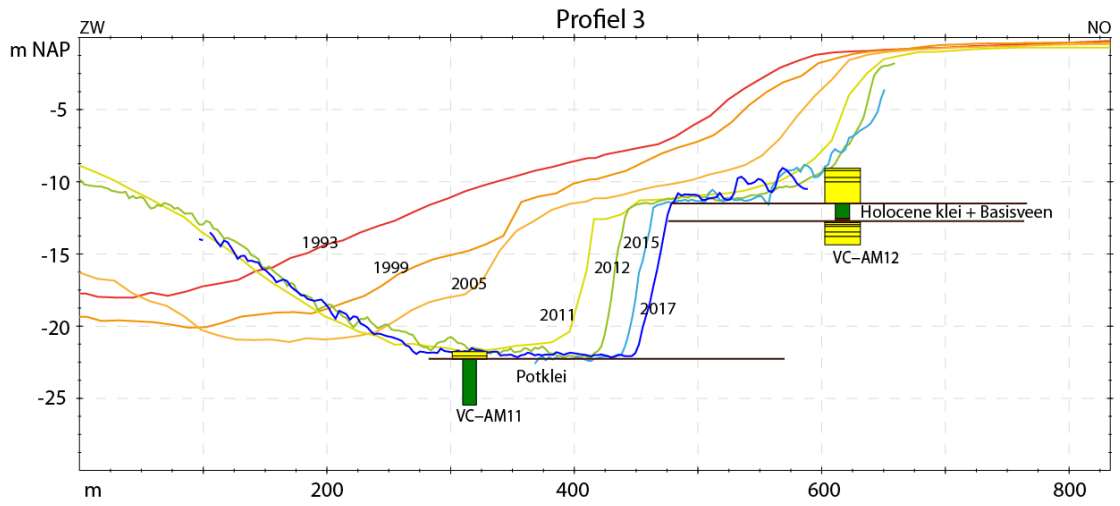
3.2 “Geologische” doorsneden

Drie “geologische” doorsneden (Figuren 3.3-3.5) zijn geconstrueerd ter hoogte van de profielen 3, 6 en 7 (Figuur 1.6 voor ligging). Deze figuren tonen de verandering in de dwarsdoorsnede van de geulvorm en de boorstaat van de nieuwe boringen en van twee boringen uit DINOloket. In profiel 3 (Fig. 3.3) komt het plateau aan de noordoostzijde van de geul overeen met de klei- en veenlaag in boring VC-AM12. De vlakke bodem op -22 m NAP komt overeen met de potklei in boring VC-AM11. In profiel 6 (Fig. 3.4) zijn de steile rand en het plateau minder zichtbaar dan in profiel 3. De steile rand en plateau beginnen zich te vormen na 2005. Er is hier geen vlakke bodem op -22 m. Profiel 7 (Fig. 3.5) toont een sterk asymmetrisch geulprofiel met een hele steile noordoostrand als gevolg van bestorting. Er is hier geen plateau op -12 m NAP. Boringen laten zien dat de geul migreert in zandige afzettingen. De potklei begint op een diepte van -23 tot -24 m NAP. Wellicht dat het diepste deel van de geul in de profielen uit 2015 en 2017 tot op de potklei reikt.

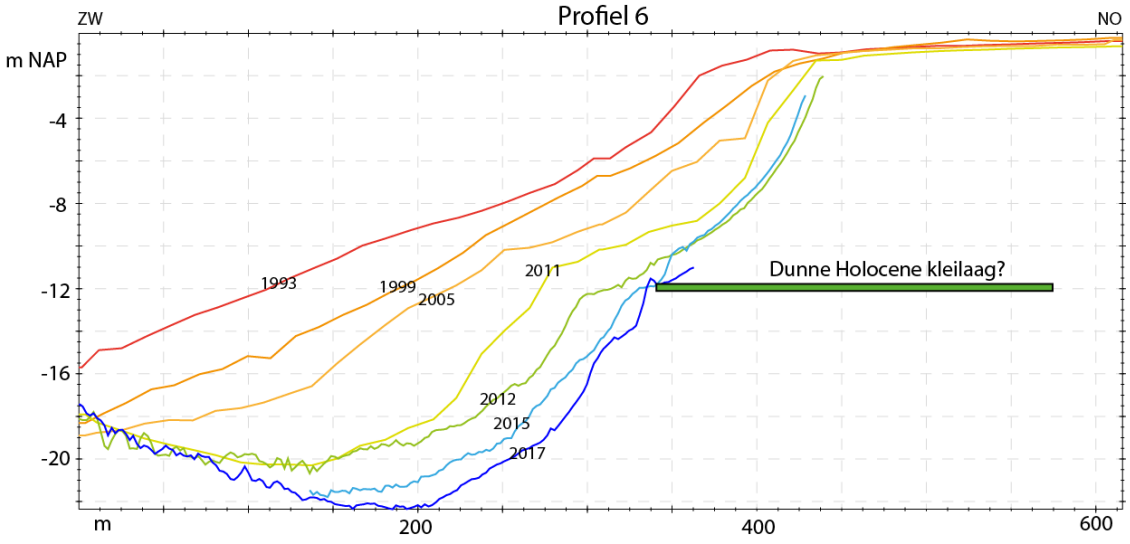
3.3 Interpretatie

De Holocene klei- en veenlaag vormt de basis van het plateau op -12 m NAP. Deze laag is aanwezig in het zuiden (Profielen 3 & 5) en afwezig in het noorden (Profiel 7). De steile wand in Profiel 7 wordt vooral veroorzaakt door de aanwezigheid van bestorting. De steilrand in Profiel 3 is ontstaan rond 2010. Voor die tijd was de verplaatsingssnelheid van het diepste deel van de geul gemiddeld 25 m/jaar, daarna circa 6 m/jaar. Profiel 6 toont een hoek in de geulwand profiel die we interpreteren als het gevolg van de dagzoom van een kleilaag (Figuur 3.4). Aangezien zich hier geen plateau vormt nemen we aan dat de kleilaag hier dunner of minder hard is dan in Profielen 3 en 5. Onder de klei- en veenlaag is minimaal 1.5 m dekzand aanwezig. Welke afzettingen aanwezig zijn tussen het dekzand en de potklei is vooralsnog onbekend. Wel duidelijk is dat de steile wand onder de klei- en veenlaag zich uitstrekt tot de diepte waarop de potklei voorkomt. Dit zou kunnen duiden op de aanwezigheid van aanvullende erosiebestendige lagen tussen -12 en -22 m NAP (bijvoorbeeld keileem of kleilagen binnen de Formatie van Boxtel), maar mogelijk kunnen dergelijke steilwanden zich ook in zand vormen als ze aan de bovenkant afgedekt worden door een hardere laag die afschuiving voorkomt.

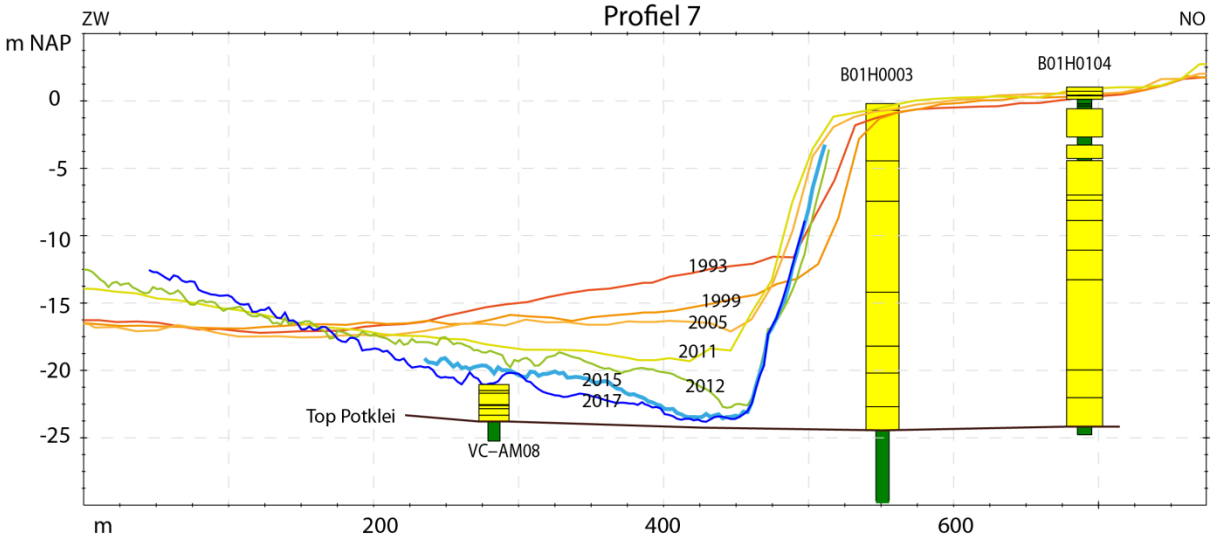
De aanwezigheid van potklei is de oorzaak van de vlakke bodem op -22 m in Profiel 3 (en ook in Profiel 5; Fig. 2.5). De snelheid van bodemverlaging in profiel 3 was voor het bereiken van de potklei laag ongeveer 0.2 m/jaar, sinds het bereiken van de potklei ligt deze snelheid dicht bij 0 m/jaar. Een vlakke bodem ontstaat niet in het noorden (Profiel 1 en 6) omdat de top van de potklei hier nog dieper ligt dan de diepste punten van de geul. Het bereiken van de potklei leidt niet tot snellere migratiesnelheden of verbreding. De geul vergroot zichzelf vooralsnog door te verdiepen in delen waar de potklei nog niet bereikt is. Wellicht treedt de verbreding pas op nadat de gehele geulbodem in contact staat met de potklei.



Figuur 3.3 Geologische doorsnede langs profiel 3: ontwikkeling geuldoorsnede tussen 1993 en 2017 en de aanwezigheid van kleilagen.



Figuur 3.4 Geologische doorsnede 6: ontwikkeling geuldoorsnede tussen 1993 en 2017 en de mogelijke aanwezigheid van een dunne Holocene kleilaag, gebaseerd op de hoek in de geulwand profiel tussen 2011 en 2017.



Figuur 3.5 Geologische doorsnede 7: ontwikkeling geuldoorsnede tussen 1993 en 2017 en de aanwezigheid van kleilagen. De kleilaag die onder -24 m NAP voorkomt bestaat uit potklei.

4 Discussie

Op basis van bathymetrische en geologische data lijkt de geologische opbouw in het studiegebied een belangrijke invloed te hebben op de migratiesnelheid en op de morfologie van de getijdengeul. We kunnen verschillende stappen onderscheiden in de evolutie van de geul. Deze evolutie wordt samengevat in Tabel 4.1.

1) 1989-1999: de geul migreert snel naar het noordoosten (10 - 25 m/jaar) en snijdt zich in (de geul wordt dieper en smaller). Het is aannemelijk dat de geul zandige afzettingen erodeert. Er komen geen opvallend steile hellingen voor.
2) 1999-2009: de Holocene kleilaag op een diepte van ca. NAP -12 m komt voor het eerst in de zijkant van de geul voor. Een steile wand en een plateau beginnen zich daardoor te vormen in de zuidelijke profielen (3-4-5). De maximale diepte van de geul neemt toe, terwijl de migratiesnelheid tussen 10-20 m/jaar ligt.
3) 2009-2013: de migratiesnelheid van de geulranden neemt sterk af (tot minder dan 10 m/jaar: afname tot 0.25-0.33%) ten opzichte van voor het ontstaan van de steilrand). Deze afname toont aan de langzamer eroderende kleilaag een obstakel vormt voor geulmigratie. Dit gebeurt vooral in het zuiden, waar de kleilaag vermoedelijk dikker is. De zuidwestzijde van de geul blijft vanaf nu stabiel.
4) 2013-2018: in het zuiden wordt de potklei bereikt in de diepte. Als gevolg vormt zich een vlakke geulbodem die zich uitbreidt, vooral richting het noorden. Het bereiken van de potklei leidt tot een sterke afname in de verdiepingssnelheid (afname 25% of meer), maar vooralsnog niet tot een toename in laterale migratiesnelheid. Wel wordt de geul nog dieper in delen waar de potklei nog niet bereikt is.

Tabel 4.1 Overzicht van de morfologische veranderingen in de verschillende profiel en van het voorkomen van erosie-bestendige lagen aan de rand of onderkant van de geul.

Fase	Geul morfologie	Holocene Kleilaag	Potklei
1989-1999	Smaller & dieper alle profielen		
1999-2009	Smaller & dieper alle profielen Profiel 1 t/m 3: vorming steile rand Profiel 4 t/m 7: meer gelijkmatige rand	Profiel 1 t/m 3	
2009-2013	Smaller & dieper alle profielen Profiel 1 t/m 3: steile rand & plateau Profiel 4 t/m 6: steile rand zonder plateau Profiel 7: meer gelijkmatige rand	Profiel 1 t/m 6	
2013-2018	Profiel 1 t/m 3: breder, steile rand & plateau Profiel 4 t/m 6: dieper, steile rand Profiel 7: meer gelijkmatige rand	Profiel 1 t/m 6	Profiel 1 t/m 3

Samengevat lijkt de aanwezigheid van een Holocene kleilaag aan de noordoostzijde van de geul de migratiesnelheid te vertragen. Dit gebeurt vooral in het zuiden, waar deze laag vermoedelijk dikker is. Hierbij vormen zich een duidelijk steile geulwand en een plateau. Door de insnijding van de geul wordt de potkleilaag op ca. NAP -22 m bereikt, waardoor de verdieping stopt en een vlakke geulbodem ontstaat. Door voortgaande erosie dagzoomt een steeds groter deel van de potklei in de geulbodem.

De geobserveerde morfologische veranderingen bevestigen daarmee de hypothese dat de aanwezigheid van erosiebestendige afzettingen leidt tot aantoonbaar lagere migratiesnelheden van getijdengeulen en/of tot het verhinderen van het dieper worden van een getijdengeul. Daarnaast sluiten de morfologische veranderen goed aan bij het conceptuele model uit Figuur 1.1. Het toont verder aan dat zich in het Borndiep een situatie voordoet, aantoonbare invloed van geologie op morfologisch gedrag, die ook in andere getijdengeulen te vinden is (b.v. Nieuwe Schulpengat). Bij morfologische analyses van getijdengeulen moet dus serieus rekening gehouden worden met de invloed van geologie. Een opvallende waarneming is wel dat de steilwand ter hoogte van de kleilaag rond -12 m NAP zich uitstrekt tot in de potklei en dus circa 10 m hoog is. Het is niet uitgesloten dat zich tussen -12 en -22 m NAP nog meer erosiebestendige lagen bevinden (keileem, kleilagen), maar vooralsnog zijn hier geen concrete aanwijzingen voor.

Uiteraard spelen verschillen in hydrodynamica, bijvoorbeeld landwaarts afnemende hydrodynamische energie en de aanwezigheid van harde keringen, ook een rol in migratiesnelheden. Toch komt het uit de data duidelijk naar voren dat relatieve verschillen in migratiesnelheid tussen verschillende locaties beïnvloed worden door de geologische opbouw.

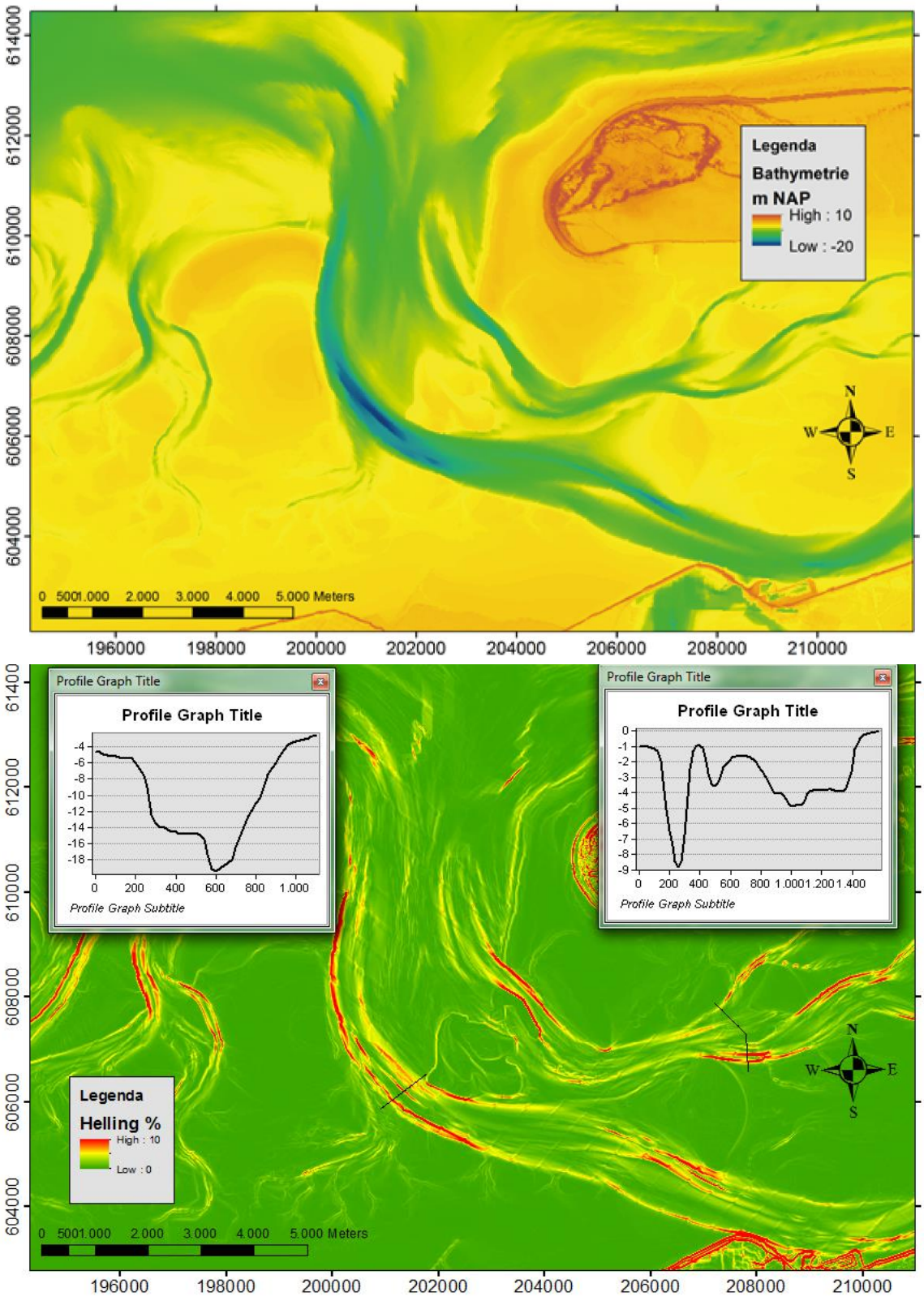
Ten slotte, de temporele fluctuaties in migratiesnelheid tussen 2009-2017, een periode met aanzienlijke hogere meetfrequentie dan in de periode daarvoor, zouden het resultaat kunnen zijn van de aanwezigheid van erosiebestendige afzettingen die niet geleidelijk eroderen. Dit zou kunnen resulteren in stapsgewijze migratie door bijvoorbeeld afbrokkeling en/of falen van het steile talud. Omdat dergelijke afbrokkeling lokaal optreedt, kan dit er toe leiden dat er grote verschillen in migratiesnelheden ontstaan over relatief korte afstanden.

5 Potentiele studiegebieden in de Waddenzee

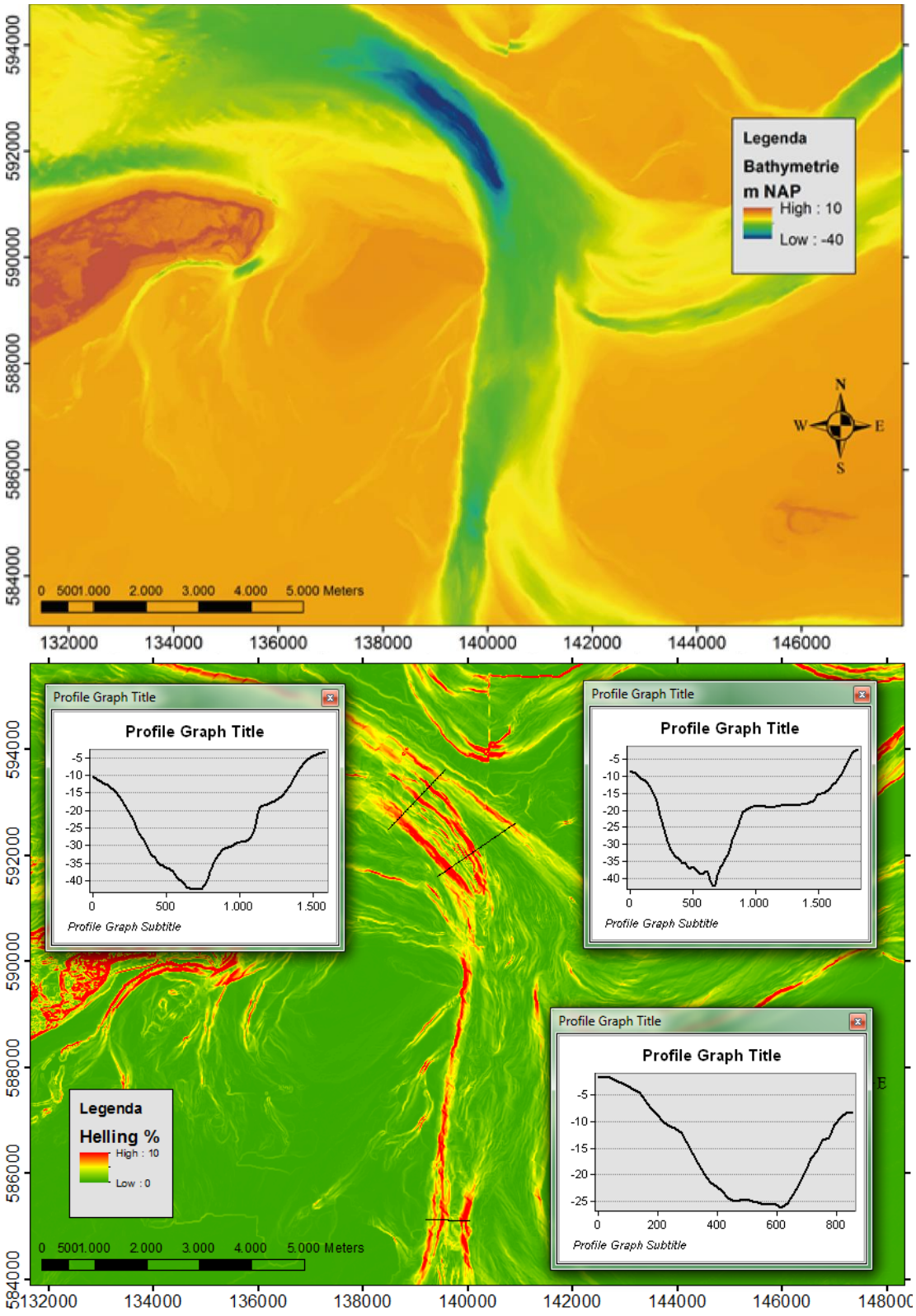
De huidige studie, in aansluiting op eerder werk (Van der Spek and Van Heteren, 2004; Hijma, 2017b), toont aan dat erosiebestendige lagen invloed hebben op de morfodynamiek van getijdengeulen. De huidige studie bevestigt daarnaast dat de geulwandmorfologie sterk beïnvloed wordt door de aanwezigheid van erosiebestendige lagen: er komen steilranden en plateaus voor die niet aanwezig zijn in getijdengeulen die zandige afzettingen eroderen. Dit maakt het mogelijk om op basis van bathymetrische kaarten, en vooral hieruit afgeleide hellingkaarten, locaties te identificeren waar erosiebestendige lagen de morfologie zeer waarschijnlijk beïnvloeden (Hijma, 2017b). Hierbij moet niet simpelweg gekeken worden naar waar geulwanden steil zijn, buitenbochtwanden zijn bijvoorbeeld vaak ‘van nature’ steil, maar naar afwijkende patronen en correlaties met bekende voorkomens van erosiebestendige lagen.

Ter illustratie is voor de huidige studie is een snelle blik geworpen op twee gebieden waar volgens Hijma (2017a) erosiebestendige lagen aanwezig zijn en de relatie tussen geologie en migratiesnelheid verder bestudeerd zou kunnen worden: het Friesche Zeegat en de Vliestroom.

Bathymetrische data van het Friesche Zeegat laten steile hellingen en relatief vlakke gebieden (plateaus) zien langs de grootste getijgeul Zoutkamperlaag (Figuur 5.1). Deze zouden veroorzaakt kunnen zijn door de aanwezigheid van Holocene kleilagen en kleihoudende zandlagen of andere erosiebestendige lagen. Vergelijkbare morfologische patronen zien we ook bij de Vliestroom. Hier zijn steile hellingen en plateaus vooral aanwezig in de diepste delen van de getijgeul, mogelijk overeenkomend met diepte waarop potklei begint (Figuur 5.2). De invloed van ondiepere erosiebestendige lagen op de morfologische veranderingen van de Vliestroom, keileem komt bijvoorbeeld lokaal relatief ondiep voor (-15 tot -20 m NAP), is eerder onderzocht en lijkt beperkt (De Leeuw, 2007).



Figuur 5.1 Waterdiepte (boven) en hellingkaart (onder) van het Friesche Zeegat. De profielen laten verschillende plateaus en steilranden zien.



Figuur 5.2 *W*aterdiepte (boven) en hellingskaart (onder) van de Vliestroom. Met name de twee noordelijke profielen laten verschillende steilranden en plateaus zien.

6 Conclusies

Dit rapport beschrijft de invloed van erosiebestendige afzettingen in de ondergrond op de migratiesnelheid en vorm van het Borndiep, de getijdengeul ten westen van Ameland. Voor de analyse zijn ondergrondgegevens gebruikt (boringen en seismische data) en bathymetrische opnames over de periode 1989-2018. De analyse laat zien dat de vorm van de getijdengeul in de onderzochte periode sterk veranderd is en dat de aanwezigheid van erosiebestendige lagen grote invloed heeft gehad op de morfologische veranderingen. De aanwezigheid van een Holocene kleilaag (Formatie van Naaldwijk) aan de noordoostzijde van de geul heeft de migratie van de geul vertraagd en de vorming van steilranden en plateaus veroorzaakt. Op het moment dat rond 2013 de geulbodem harde potklei (Formatie van Peelo) raakte stopte verdere verdieping van de geul en vormde zich een vlakke geulbodem. Na het in contact komen met erosiebestendige lagen nemen de migratie- en verdiepingssnelheden af tot 25-30% van de snelheden daarvoor.

De analyse bevestigt de hypothese dat migratiesnelheden en morfologische veranderingen sterk beïnvloed worden door de geologische opbouw rondom een getijdengeul. Daarnaast toont het onderzoek de meerwaarde aan van het combineren van boorgegevens, seismische data en bathymetrische data en laat het zien dat het hiermee mogelijk is om te begrijpen waarom bepaalde fluctuaties in migratiesnelheid en/of morfologische veranderingen optreden. Een opvallende waarneming is dat bij de aanwezigheid van een relatief dunne erosiebestendige laag (~ 1 m) er niet alleen ter hoogte van deze laag een steile geulwand kan ontstaan, maar dat het steile stuk zich tot meerdere meters daaronder kan voortzetten. Het voorkomen van dergelijke hoge steile wanden vergroot waarschijnlijk de kans op relatief grote afschuivingen.

7 Aanbevelingen

Binnen de genoemde onderzoekslijn (‘Invloed geologie op kustontwikkeling’) zijn kwantificering van de (relatieve) erosiebestendigheid van de verschillende typen afzettingen en inbedding in morfologische modellen belangrijke onderdelen. Dit rapport laat zien dat snelheden van verbreding en verdieping na het bereiken van erosiebestendige lagen kunnen afnemen tot 25-30% van de eerdere snelheden.

Verdere kwantificering zou kunnen komen uit:

- Update literatuuronderzoek uit Van der Spek (1997). Verwachting is dat er relatief weinig onderzoek naar dit onderwerp gedaan wordt en een update dus een beperkte inspanning zal zijn. Dit literatuuronderzoek omvat uiteraard ook de resultaten van het onderzoek bij het Nieuwe Schulpengat, maar zal ook bestaan uit een schouw van gedane geotechnische proeven.
- Het zou daarnaast nuttig zijn om (kleinschalige) labproeven uit te voeren op opgeboorde erosiebestendige afzettingen (potklei, keileem, andere kleirijke afzettingen), waarbij bijvoorbeeld gekeken wordt hoe snel dergelijke afzettingen eroderen onder invloed van stromend water met zand.

De inbedding in morfologische modellen zou gestart kunnen worden:

- Met behulp van het bestaande modelinstrumentarium zeer eenvoudige modelopzetten maken met enkele Waddenachtige eilanden en het voorkomen van erosiebestendige lagen. In deze opzet kunnen verschillende hypotheses getest worden om het effect van differentiële erosiegevoeligheid beter te begrijpen en kan vast een aanzet gegeven worden voor verdere implementatie in de modellen met een meer complexe opzet. Dit werk zou prima gedaan kunnen worden door een stagiair of afstudeerder.

Het rapport laat verder zien dat steile geulwanden zich kunnen uitstrekken over hoogtes van zeker 10 m. Op zeker moment zullen de geulwanden zich weer aanpassen en een flauwer profiel krijgen, waarbij deze aanpassing geleidelijk kan gaan, maar in potentie ook vrij plotseling (afschuiving, afbrokkeling). Aanbevolen wordt om voor het Nederlandse kustgebied op basis van bestaande bathymetrische data een overzichtskaart te maken van geulen met hoge steile wanden.

8 Referenties

De Leeuw, V.P.M., 2007. De rol van Pleistocene afzettingen op het verloop van geulen in de Nederlandse Waddenzee. Utrecht University, Utrecht, 23 pp.

Hijma, M.P., 2017a. Geology of the Dutch Coast. Deltares report 1220040-007-ZKS-0003, Utrecht, The Netherlands, 43 pp.

Hijma, M.P., 2017b. Tidal-channel migration between 1997-2014 in relation to the local build-up of the subsurface, The Netherlands. Deltares report 11200538-004-ZKS-0003, Utrecht, The Netherlands, 40 pp.

Van der Spek, A.J.F., 1994. Large-scale evolution of Holocene tidal basins in the Netherlands. Ph.D.-thesis, Utrecht University, Utrecht.

Van der Spek, A.J.F., 1997. De geologische opbouw van de ondergrond van het mondingsgebied van de Westerschelde en de rol hiervan in de morfologische ontwikkeling. TNO-NITG report 97-284-B, Utrecht, The Netherlands, 65 pp.

Van der Spek, A.J.F., Van Heteren, S., 2004. Analyse van steekboringen verzameld in het Molengat en het Nieuwe Schulpengat. TNO-NITG report 04-095-C, Utrecht, The Netherlands, 45 pp.

Vermaas, T., 2018. Aanvullende analyses metingen Ameland ZW. Deltares memo 11202190-001-ZKS-0011, Utrecht, The Netherlands, 27 pp.

Vermaas, T., Mastbergen, D., Schrijvershof, R., Mesdag, C., Gaida, T., 2018. Geologie, bestorting en strandvallen bij Ameland zuidwest - Analyses en metingen. Deltares report 11200538-004-ZKS-0010, Utrecht, The Netherlands, 45 pp.