



Memo

Datum	Ons kenmerk	Aantal pagina's
26 september 2019	11203683-002-ZKS-0001	45
Contactpersoon	Doorkiesnummer	E-mail
Marc Hijma	+31(0)88 335 7869	Marc.Hijma@deltares.nl

Onderwerp

Hellingkaart: tool voor identificatie geologische invloed getijdengeulen / Update kaart erosie-resistente lagen

Binnen het deelproject "Invloed geologische opbouw ondergrond op lange termijn kust- en getijdenbekken ontwikkeling" van het KPP-Programma Beheer en Onderhoud Kust (onderdeel 4C1) wordt gewerkt met een lange-termijn plan. Binnen dit plan zijn verschillende onderzoekslijnen opgezet:

1. Inzichtelijk maken waar langs de Nederlandse kust de morfologische ontwikkeling gestuurd wordt door geologische lagen in de ondergrond.
2. Kwantificering van de erosiegevoeligheid van de verschillende erosie-resistente afzettingen, zoals keileem, potklei en basisveen. Dit is noodzakelijke voeding voor modellen.
3. Implementeren geologie/ondergrond in hydro/morfodynamische modellen.
4. Overzicht van steile oevers en plateaus in geulwanden langs de gehele Nederlandse kust en inzichtelijk maken van potentiële risico's op infrastructuur en beheer en onderhoud van de kust.
5. Prioritering van gebieden waar aanvullende data nodig zijn.

Dit memo beschrijft werkzaamheden aan onderzoekslijnen 1 en 4. Omdat deze lijnen sterk aan elkaar gerelateerd zijn worden ze in één memo gerapporteerd. De werkzaamheden voor hoofdstuk 1 zijn met name uitgevoerd door Marc Hijma, voor hoofdstuk 2 met name door Erik van Onselen.

1 Update kaart erosie-resistente lagen

De eerste onderzoekslijn betreft het 'Inzichtelijk maken waar langs de Nederlandse kust de morfologische ontwikkeling gestuurd wordt door geologische lagen in de ondergrond'. De laatste paar jaar zijn belangrijke stappen gezet binnen deze onderzoekslijn, met name door het geven van een regionaal overzicht van de aanwezigheid van erosie-resistente lagen. De hiervoor gemaakte kaart wordt inmiddels regelmatig gebruikt. Het eerste deel van dit memo beschrijft de huidige versie van de kaart (Figuur 1.1) met de verbreiding van erosie-resistente lagen binnen het kustfundament en de getijdenbekkens. Deze kaart is bij deze memo meegeleverd. De eerste versie is beschreven in Hijma (2017b). Dat rapport beschrijft ook de algemene werkwijze om de kaart te maken, deze is niet gewijzigd, en waarom welke lagen zijn opgenomen. In grote lijnen zijn buiten de getijdengeulen de verbreidingsgebieden van alle relevante erosie-resistente lagen boven de -15 m NAP opgenomen; binnen en nabij getijdengeulen zijn erosie-resistente lagen opgenomen over het gehele dieptebereik van de geul.

Gebruikte databronnen zijn boringen en sonderingen uit Dinoloket, geologische modellen (met name GeoTOP), geologische kaarten en andere geologische literatuur.

Ten opzichte van de versie uit 2017 zijn enkele wijzigingen aangebracht. De belangrijkste zijn nabij Katwijk en voor de kust van Terschelling (Kustgenese 2-project, pers. comm. Ad van der Spek; het Borddiep bij Ameland (op basis van Vermaas, 2018; Vermaas et al., 2018), in het gebied van de Eems-Dollard (Pierik et al., 2019; Pierik et al., 2019 (verwacht)). Daarnaast is de naamgeving van de gebieden gewijzigd. Het kustgebied is nu opgedeeld in 5 hoofdgebieden en de verbreidingen van de lagen hebben codes gekregen die te herleiden zijn naar het hoofdgebied. In Hijma (2017b) worden de kenmerken van de gebieden met erosie-resistente lagen in het Engels beschreven, hieronder worden per hoofdgebied de kenmerken in het Nederlands beschreven.

1.1 Zuidwestelijk kustgebied

Gebied	Omschrijving
ZW1 - Westerschelde - Wielingen - Westgat	<p>Hoewel er lokaal zeker Holocene klei- en veenlagen voorkomen in de nabijheid van de getijdengeulen in dit gebied, lijken vooral Tertiaire en Vroeg-Pleistocene afzettingen van invloed op hun morfologische ontwikkeling. De erosie-resistente lagen liggen met name aan de basis van de geulen en beïnvloeden daarmee vooral de diepteontwikkeling en minder de snelheid van laterale migratie van de geulen. Het is goed mogelijk dat de geulen relatief breed zijn, omdat verdieping bemoeilijkt wordt (Van der Spek, 1997; Hijma, 2017a; Forzoni et al., 2018).</p> <p>In de westelijke helft van de Westerschelde gaat het vooral om de top van de Boomklei van de Formatie van Rupel (rond -20 m NAP). In de meer oostelijke delen van de Westerschelde, eveneens beginnend rond -20 m NAP, zijn het vooral kleilagen van de Formaties van Waalre en Oosterhout die relatief erosie-resistent zijn.</p>
ZW2 - Put van Hansweert	Recent onderzoek laat zien dat aan de westzijde van de geul (Overloop van Hansweert) waarschijnlijk klei van de Formatie van Waalre rond -24 m NAP in de wand zit. De bodem van de put (rond -36 m NAP) staat in contact met klei van de Formatie van Oosterhout.
ZW3 - Vlakte v/d Raan	De Vlakte van de Raan is een breed plateau bij de monding van de Westerschelde met een gemiddelde diepteligging van -7 m NAP. De beschikbare boringen liggen vrijwel allemaal bij de oostelijke grens van het plateau. Verschillende boringen laten metersdikke kleipakketten zien die dicht onder de bodem beginnen. Tertiaire afzettingen, die vaak relatief resistent zijn, zijn vanaf -20 m NAP aanwezig.
ZW4 - Randen Oosterschelde	Langs de noordwestelijke oever van Walcheren komen tussen 0 en -7 m NAP dikke Holocene kleipakketten voor, met daarbinnen ook veenlagen. De zeewaartse verbreidingen van deze pakketten is onduidelijk, maar zeer waarschijnlijk beïnvloeden ze in enige mate de kustnabije morfodynamiek. In het verleden dagzoomden er



Datum
26 september 2019

Ons kenmerk
11203683-002-ZKS-0001

Pagina
3 van 45

ZW5
- Geulen
Oosterschelde

regelmatig kleilagen op het strand (Van Alphen & Damoiseaux, 1987), maar sinds de start van het suppletieprogramma gebeurt dit niet meer. De twee grootste plateaus in het gebied worden door Van Alphen en Damoiseaux (1987) gekoppeld aan het ondiep voorkomen van erosie-resistente lagen, maar het er is feitelijk geen data beschikbaar om dit te bevestigen of te ontcrachten.

De basis van deze geulen reikt soms dieper dan -30 m NAP en daarmee tot in de Vroeg-Pleistocene afzettingen van de Formaties van Waalre en Maassluis. Hoewel deze afzettingen oud zijn, en daardoor relatief meer erosie-resistent dan Holocene afzettingen, is de exacte aard van de afzettingen niet bekend. De weinige boringen die beschikbaar zijn laten vooral zandige afzettingen zien en de invloed van deze afzettingen op de morfodynamiek is daardoor mogelijk beperkt.

Op de voormalige eilanden Noord-Beveland en Schouwen komen op regionale schaal dikke pakketten Holocene klei- en veenlagen voor. Ongetwijfeld hebben deze invloed gehad, of wellicht nog steeds, op de laterale migratiesnelheden van getijdengeulen in de Oosterschelde. In dit gebied wordt de morfodynamiek overigens ook juist bepaald door de aanwezigheid van zeer losgepakte zanden: waar deze zanden dagzomen is de kans op zettingsvloeiingen relatief groot.

ZW6
- Grevelingen en
Haringvliet

De basis van deze geulen reikt soms dieper dan -30 m NAP en daarmee tot in de Vroeg-Pleistocene afzettingen van de Formatie van Waalre. Boringen laten een dikke kleilaag zien aan de top van deze Formatie. Rond de -20/-25 m NAP komen verder nog kleilagen voor van de Eem Formatie (Grevelingen) en de Formatie van Kreftenheye (Haringvliet) die het geulgedrag beïnvloeden.

ZW7
- RijnMaasmond

De verbreiding van de Laat-Glaciële/Vroeg-Holocene klei- en veenlagen in dit gebied is relatief goed bekend door de beschikbaarheid van geïnterpreteerde seismiek en boringen. Vrijwel altijd komen deze beneden de -15 m NAP voor en hun invloed op de huidige kustontwikkeling is daardoor naar verwachting beperkt. In het verleden zijn ze zeker van invloed geweest op de kustontwikkeling en deze invloed wordt mogelijk nog gereflecteerd door een relatief flauwe helling van de vooroever (0.2-0.25%, ten noorden van dit deelgebied oplopend naar 0.3-0.4%) en een relatief lage gemiddelde korrelgrootte.

1.2 Centraal kustgebied: Hollandse kust



Gebied	Omschrijving
CE1 - Oude Rijn Delta	Dit deelgebied ligt ter plekke van de delta van de Oude Rijn die in de omgeving van Katwijk zijn monding had tussen 5700-828 jaar geleden (Cohen et al., 2012). In riviermondingsgebieden kunnen organische kleilagen verwacht worden, kleiig opgevulde geulen en ook veenlagen. Rondom Rotterdam, waar de Rijn voor en na de Oude Rijn-periode zijn hoofdmonding had (Hijma et al., 2009), worden deze afzettingen veelvuldig aangetroffen en zijn goed gekarteerd. Voor de Oude Rijn-monding is de verbreiding van dergelijke afzettingen veel minder bekend. Seismisch onderzoek heeft laten zien dat, deels kleiige, (pro)delta tot ver de Noordzee op nog aanwezig zijn rond dieptes van -19 m NAP (Van Heteren & Van der Spek, 2008). Recent onderzoek in het kader van Kustgenese 2 laat, dicht bij de kust en rond -11 m NAP, ook de aanwezigheid van organische klei zien (Van der Spek, pers. comm.). Het is goed mogelijk dat de kustontwikkeling door de aanwezigheid van deze delta-afzettingen beïnvloed wordt.
CE2 - IJmuiden	Dit deelgebied wordt gekarakteriseerd door het regionale voorkomen van klei- en veenlagen tussen -16 en -20 m NAP. Ook hier geldt dat hun invloed op de huidige kustontwikkeling waarschijnlijk beperkt is, maar gezien de grote verbreiding en het feit dat de vaargeul naar IJmuiden, erosiekuil en enkele erosiekuilen bij de pieren tot deze diepte reiken zijn ze toch opgenomen in de kaart. De vooroever in dit deelgebied ligt relatief vlak ten opzichte van de vooroever direct ten noorden en ten zuiden, mogelijk gelinkt aan de aanwezigheid van de <i>shoreface-connected ridges</i> .
CE3 - Bergen	Dit deelgebied wordt gedomineerd door de aanwezigheid van de Laag van Bergen van de Formatie van Naaldwijk. Deze dikke kleilaag, soms meer dan 10 m dik, heeft zijn top net beneden de -15 m NAP liggen.
CE4 - Petten-Den Helder	In dit deelgebied liggen Pleistocene afzettingen relatief hoog, soms boven de -10 m NAP. De afzettingen zijn sterk heterogeen en bevatten klei- en veenlagen uit het Weichselien (laatste ijstijd). Lokaal komen ook kleilagen van de Eem Formatie voor. Daarnaast komen eveneens in de Holocene afzettingen veel kleilagen voor.
CE5 - Nieuw Schulpengat tot Marsdiep	Dezelfde afzettingen als in CE3 kunnen verwacht worden. De geulen van het Nieuwe Schulpengat-Marsdiepsysteem reiken dieper dan -25 m NAP en raken daarbij afzettingen van de Eem Formatie die uit 5 m dikke kleilagen kunnen bestaan (Van der Spek & Van Heteren, 2004).

1.3 Westelijke wadden: Texel-Vlieland-Terschelling

Gebied	Omschrijving
--------	--------------



Datum
26 september 2019

Ons kenmerk
11203683-002-ZKS-0001

Pagina
5 van 45

WW1 - Vooroevers Texel en Vlieland	Keileem is aanwezig boven de -15 m NAP aan zowel de Noordzee- als de Waddenzeekant van Texel en Vlieland.
WW2 - Getijdengaten Texel en Vlieland	De top van de keileem ligt hier naar verwachting rond de -10 m NAP, een diepte waar beneden de geulbodems regelmatig reiken.
WW3 - Balgzand en Lutjeswaard	Dit deelgebied omvat uitgestrekte intergetijdengebieden met veel keileem in de ondergrond. Met name beneden de Lutjeswaard komt ondiep keileem voor, lokaal al rond -5 m NAP. Beneden het Balgzand is de keileem soms afwezig. Op veel plaatsen, vooral beneden het Balgzand, komen ook Holocene basisveen- en kleilagen voor.
WW4 - Texelstroom, Malzwin	Deze geulen reiken op veel plaatsen ver beneden de -15 m NAP, waarbij ze in contact staan met de keileem. De diepste delen reiken tot de Formatie van Urk die dikke kleilagen kan bevatten.
WW5 - Vlakte van de Kerken, De Hengst en Waardgronden	Op veel plaatsen start de keileem rond -10 m NAP, maar soms al rond -7 m NAP. Daarnaast komen Holocene basisveen- en kleilagen voor, met name tussen -1 en -7 m NAP.
WW6 - Zuideinde Vliestroom	Dit deel van de Vliestroom is ongeveer 15 m diep, met keileem in de flanken. De diepste delen reiken beneden de -20 m NAP, waarbij lokaal kleilagen van de Eem Formatie en Formatie van Urk bereikt zullen worden. De bovenste 5 m van de ondergrond bestaat uit Holocene afzettingen die soms dikke veenlagen omvatten.
WW7 -Westmeep	Het profiel van de Westmeep laat een aantal plateaus zien die vermoedelijk gekoppeld kunnen worden aan erosie-resistente lagen. Boringen laten rond -7 m NAP klei-op-basisveen zien en rond -8 m NAP grindig leem. Hoewel deze beschrijving overeenkomt met keileem, wordt keileem bij de Westmeep eigenlijk pas rond -20 m NAP verwacht. Wellicht dat de diepste delen van de Westmeep in contact staan met het keileem.
WW8 - Grienderwaard	De Grienderwaard ligt rond gemiddeld zeeniveau. De Holocene afzettingen zijn ongeveer 6-7 m dik en de onderste helft daarvan bestaat uit klei- en veenlagen. De Pleistocene afzettingen daaronder lijken tot minstens -18/-20 m NAP hoofdzakelijk te bestaan uit zand.
WW9 - Vlieree	Dit deel van het zeegat wordt gekenmerkt door twee plateaus. De meest ondiepe ligt rond -7 m NAP, de diepte waarop klei-op-basisveen wordt verwacht. Het diepere plateau ligt rond -19 m NAP, de diepte waarop keileem wordt verwacht. Er zijn geen boringen in de buurt.

Datum
26 september 2019

Ons kenmerk
11203683-002-ZKS-0001

Pagina
6 van 45

WW10 - Noordmeep	Dit deel van de Noordmeep heeft over een afstand 300 m een erg vlakke bodem rond -19 m NAP. Dit komt overeen met de diepte waarop keileem voorkomt in de omgeving.
WW11 - Borndiepdal	Het beekdal van de Borne kan de Noordzee op vervolgd worden. Tijdens de transgressie waren hier getijdengeulen actief die deels kleilig opgevuld zijn. Dit volgt uit seismische profielen (Ad van der Spek, pers. comm.).

1.4 Oostelijke wadden: Ameland-Schiermonnikoog-Rottumeroog

Gebied	Omschrijving
OW1 - West-Friesche Wad	In dit gebied komt keileem voor beneden -10 m NAP. Waar geen keileem aanwezig is bestaan de bovenste Pleistocene afzettingen voornamelijk uit zand. De Holocene afzettingen zijn tot 10 m dik en lijken uit onregelmatige voorkomens van klei en zand te bestaan. In het oostelijke deel komt onder de keileem potklei voor.
OW2 - Piet Scheveplaat en Kikkertplaat	In dit deelgebied bestaat de top van het Pleistoceen (tussen -12 en -16 m NAP) regelmatig uit potklei, maar soms ook uit keileem of zand. Aan de basis van de Holocene afzettingen komen klei- en veenlagen voor.
OW3 - Borndiep	De diepste delen van deze geul reiken tussen -15 en -30 m NAP, waardoor regelmatig contact is met de potklei die tussen -19 en -25 m NAP begint (Van der Spek, 1994; Vermaas, 2018; Vermaas et al., 2018). Soms is de potklei bedekt door zandige en kleiige afzettingen van de Eem Formatie.
OW4 - Molengat en Dantzigat	Deze geulsystemen zijn kleiner en ondieper dan het Borndiep: de diepste delen reiken maar net beneden de -15 m NAP. Verwacht wordt dat potklei regelmatig aan de geulbodembodem ligt. De oostelijke delen van deze geulen liggen in een gebied waar het Pleistoceen rond -10/-15 m NAP begint en bestaat uit een complexe mix van de Formatie van Peelo (potklei), Boxtel (voornamelijk zand), Drente (zand, keileem) en Eem (zand, klei). De basis van het Holoceen bestaat regelmatig uit klei-op-basisveen.
OW5 - Borndiep oostrand	Aan de oostrand van het Borndiep ligt rond -13 m NAP een gebied waar aan de basis van het Holoceen basisveen en klei voorkomt. Dichter bij Ameland komen ook ondieper nog kleilagen voor.
OW6 - Amelander Wad	De geologie onder het Amelander Wad is complex met een grote verscheidenheid aan Pleistocene afzettingen. De bovenste afzettingen hiervan bestaan meestal uit zandige afzettingen van de Formatie van Boxtel, die lokaal ook kleilagen omvat. Deze formatie begint meestal tussen -6 en -12 m NAP. De onderliggende Eem Formatie bestaat aan de top, rond -14/-16 m NAP, regelmatig uit



Datum
26 september 2019

Ons kenmerk
11203683-002-ZKS-0001

Pagina
7 van 45

	<p>metersdikke kleilagen. Ook in het Holocene pakket komen kleilagen voor, soms is ook het basisveen aanwezig.</p>
<p>OW7 - Wierumerwad</p>	<p>Onder het Wierumerwad stijgt de top van de potklei van west naar oost van -20 m naar -12 m NAP. Lokaal is de potklei bedekt door keileem of meer zandige afzettingen uit de laatste ijstijd. In het Holocene pakket komen uitgestrekte kleilagen voor.</p>
<p>OW8 - Zoutkamperlaag</p>	<p>De aanwezigheid van erosie-resistente lagen wordt vermoed door de aanwezigheid van een breed plateau op -15 m NAP. Er zijn geen boringen beschikbaar om dit te staven. Indien ze inderdaad aanwezig zijn gaat het waarschijnlijk om keileem. Er is een kleinere kans dat het om potklei gaat.</p>
<p>OW9 - Brakzand</p>	<p>De opbouw van de ondergrond is vergelijkbaar met OW7, al zijn de Holocene afzettingen minder kleiig. Lokaal zal de potklei bedekt zijn door zandige afzettingen van de Formatie van Urk.</p>
<p>OW10 - Groningerwad</p>	<p>Er is zeer weinig informatie beschikbaar voor dit gebied. Boringen direct op het land laten keileem en potklei zien boven -15 m NAP. Ook de opbouw van de Holocene afzettingen is feitelijk onbekend, maar de aanwezigheid van dikke kleilagen is niet uit te sluiten.</p>
<p>OW11 - Rottumerplaat</p>	<p>Er is weinig informatie bekend over de diepere ondergrond van dit eiland. In 2016 is bij een handboring op 11 m diepte keileem aangetroffen.</p>
<p>OW12 - Uithuizerwad</p>	<p>Tussen -12/-13 m en -15/-20 m NAP komen dikke Holocene klei- en veenlagen voor.</p>

1.5 Eems-Dollard

Gebied	Omschrijving
<p>ED1 - Oude Westereems</p>	<p>Er is niet veel informatie over dit gebied, maar verwacht wordt dat potklei soms aan de bodem van de geul voorkomt, zeker in de diepste delen.</p>
<p>ED2 - Westereems</p>	<p>Er zijn weinig boringen beschikbaar, maar wel seismische lijnen (Medusa, 2010). In deze delen van de Westereems ligt regelmatig potklei aan de basis.</p>
<p>ED3 - Westereems</p>	<p>Er zijn weinig boringen beschikbaar, maar wel seismische lijnen (Medusa, 2010). In deze delen van de Westereems ligt regelmatig keileem op potklei aan de basis.</p>

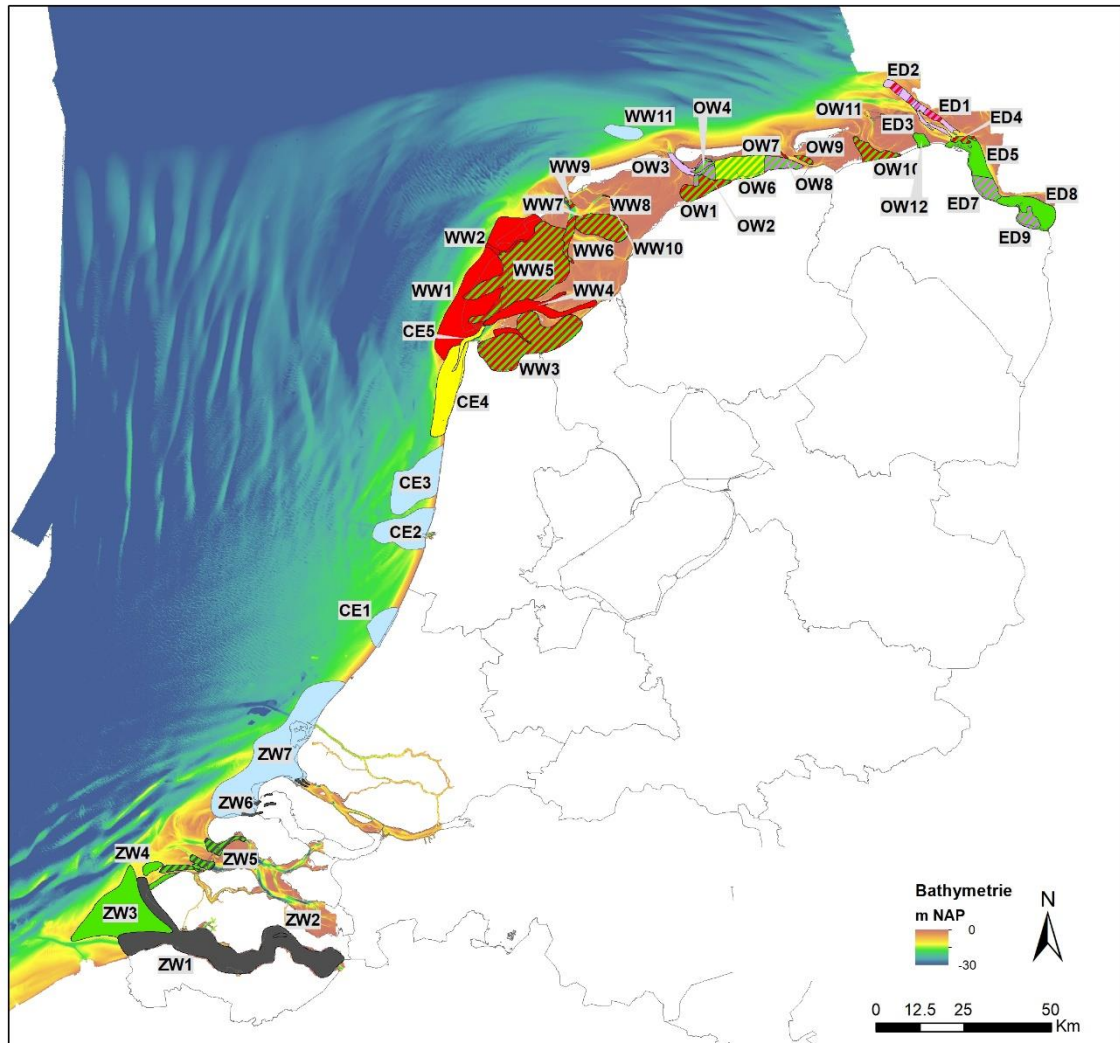


Datum
26 september 2019

Ons kenmerk
11203683-002-ZKS-0001

Pagina
8 van 45

ED4 - Eemshaven	Tussen -1 en -15 m NAP kunnen dikke Holocene klei- en veenlagen voorkomen. Waarschijnlijk is er ook keileem aanwezig (Pierik et al., 2019).
ED5 - Eemshaven, Hond- en Paapzand	Tussen -1 en -15 m NAP kunnen dikke Holocene klei- en veenlagen voorkomen, met name ten zuiden van de Eemshaven.
ED6 - Doekegat	Aan de basis van dit deel van het Doekegat lijkt potklei voor te komen.
ED7 - Delfzijl	In dit deelgebied komt zeer ondiep potklei voor, lokaal boven de -10 m NAP. Regelmatig wordt de potklei bedekt door dekzand. De Holocene afzettingen omvatten dikke veen- en kleilagen.
ED8 - Termunten	De potklei in dit gebied ligt weer wat dieper, meestal beneden de -15 m NAP en is bedekt door zand uit de laatste ijstijd. Dit zand begint tussen -7 en -11 m NAP. De Holocene afzettingen bestaat vrijwel volledig uit klei met meerdere veenlagen.
ED9 - Dollard	In het Dollardgebied ligt de potklei weer hoger, meestal beginnend tussen -9/-12 m NAP. Ook hier wordt de potklei naar verwachting bedekt door Pleistoceen zand. Net als in grote delen van het Eems-Dollard gebied komen er veel en dikke klei- en veenlagen voor binnen de Holocene afzettingen.



Type erosie-resistente lagen

	Holocene klei/veen		Pleistocene keileem
	Holocene en Eemien/Weichselien klei		Pleistocene potklei
	Holocene klei/veen en Pleistocene keileem		Pleistocene keileem en potklei
	Holocene klei/veen en Pleistocene potklei		Tertiaire en Vroeg-Pleistocene afzettingen
	Holocene klei en Tertiaire/Vroeg-Pleistocene afzettingen		Holocene klei/veen veelal <-15 m NAP
	Eemien/Weichselien klei		

Figuur 1.1 Kaart met de verbreiding van erosie-resistente lagen langs de Nederlandse Kust

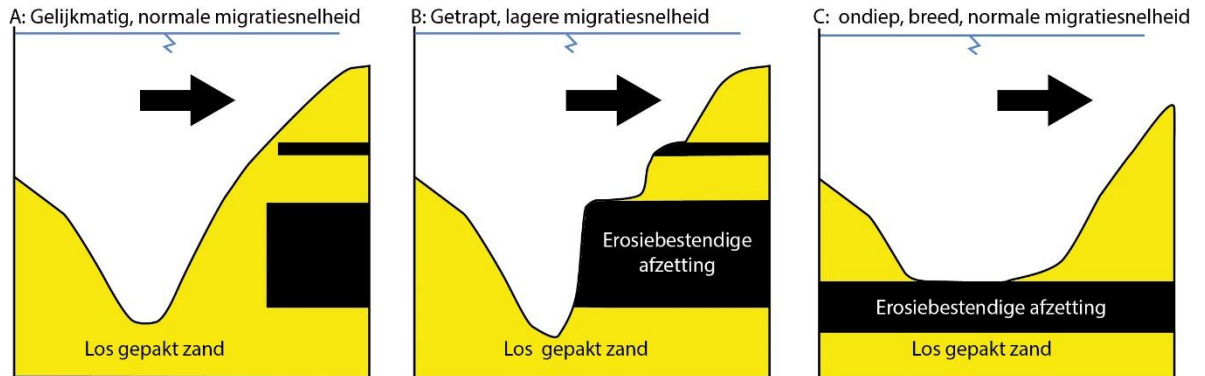
2 Hellingkaart: tool voor identificatie geologische invloed getijdengeulen

2.1 Achtergrond

De tweede onderzoekslijn betreft een 'Overzicht van steile oevers en plateaus in geulwanden langs de gehele Nederlandse kust en inzichtelijk maken potentiële risico's op infrastructuur en beheer en onderhoud van de kust.' De aanwezigheid van erosie-resistente lagen aan de basis of in de wand van getijdengeulen beïnvloedt de morfologie van deze geulen. In het conceptuele model beschreven in Hijma (2017a) leiden erosie-resistente lagen aan de basis van de geul tot relatief vlakke, maar brede geulbodems, terwijl deze lagen in de geulwand leiden tot een afwisseling van steile en vlakke delen. Dit model is bevestigd door een recente analyse van seismische data en boringen bij het Borndiep (Forzoni et al., 2018) en een eerste analyse binnen Delft3D (Xu, 2019). Bij het Borndiep worden de geulwand en de geulbodem sterk beïnvloed door de aanwezigheid van respectievelijk een Holocene kleilaag en potklei. Na het in contact komen met deze erosie-resistente lagen is de migratie- en verdiepingssnelheid tot 25-30% van de oorspronkelijke snelheden gedaald (Forzoni et al., 2018).

Hoofdstuk 1 van dit memo laat zien dat op veel plaatsen langs de Nederlandse kusten erosie-resistente lagen aanwezig zijn die naar alle waarschijnlijkheid de morfologische ontwikkeling beïnvloeden. Er is echter slechts weinig informatie over de opbouw van de ondergrond aanwezig om dit te onderbouwen. Dit hoofdstuk borduurt verder op de aanpak beschreven in Forzoni et al. (2018), waarbij voor het gehele Waddengebied en de Westerschelde met behulp van hellingkaarten geulwanden en/of geulbodems worden geïdentificeerd die eigenschappen vertonen van het conceptuele model. Het hoofdstuk laat zien dat op relatief veel plekken geologie waarschijnlijk een belangrijke rol speelt in de morfologische ontwikkeling van geulen.

Niet alle vlakke subgetijdegebieden in het bijzijn van geulen zijn overigens per definitie onder invloed van erosie-resistente lagen ontstaan. Bijvoorbeeld in de Vliestroom (gebied B, locatie 5) en in het Boschgat (gebied C, locatie 6), waar geen aanwijzingen in nabijgelegen boringen voor de aanwezigheid van erosie-resistente lagen gevonden zijn, zou het plateau enkel een gevolg van de hydrodynamische condities kunnen zijn. Welke condities dit zijn is niet verder onderzocht. Verder zijn op veel locaties, waarvan sterk vermoed wordt dat geologie een rol speelt in de morfologische ontwikkeling, onvoldoende ondergrondgegevens aanwezig om met zekerheid vast te stellen wat de lithologie en herkomst van de erosie-resistente lagen is. Extra boringen op deze locaties kunnen meer en beter inzicht verschaffen op de verbreiding en eigenschappen van deze lagen.



Figuur 2.1. Invloed van erosie-resistente afzettingen op de morfologie en migratiesnelheid van een geul (Hijma, 2017a).

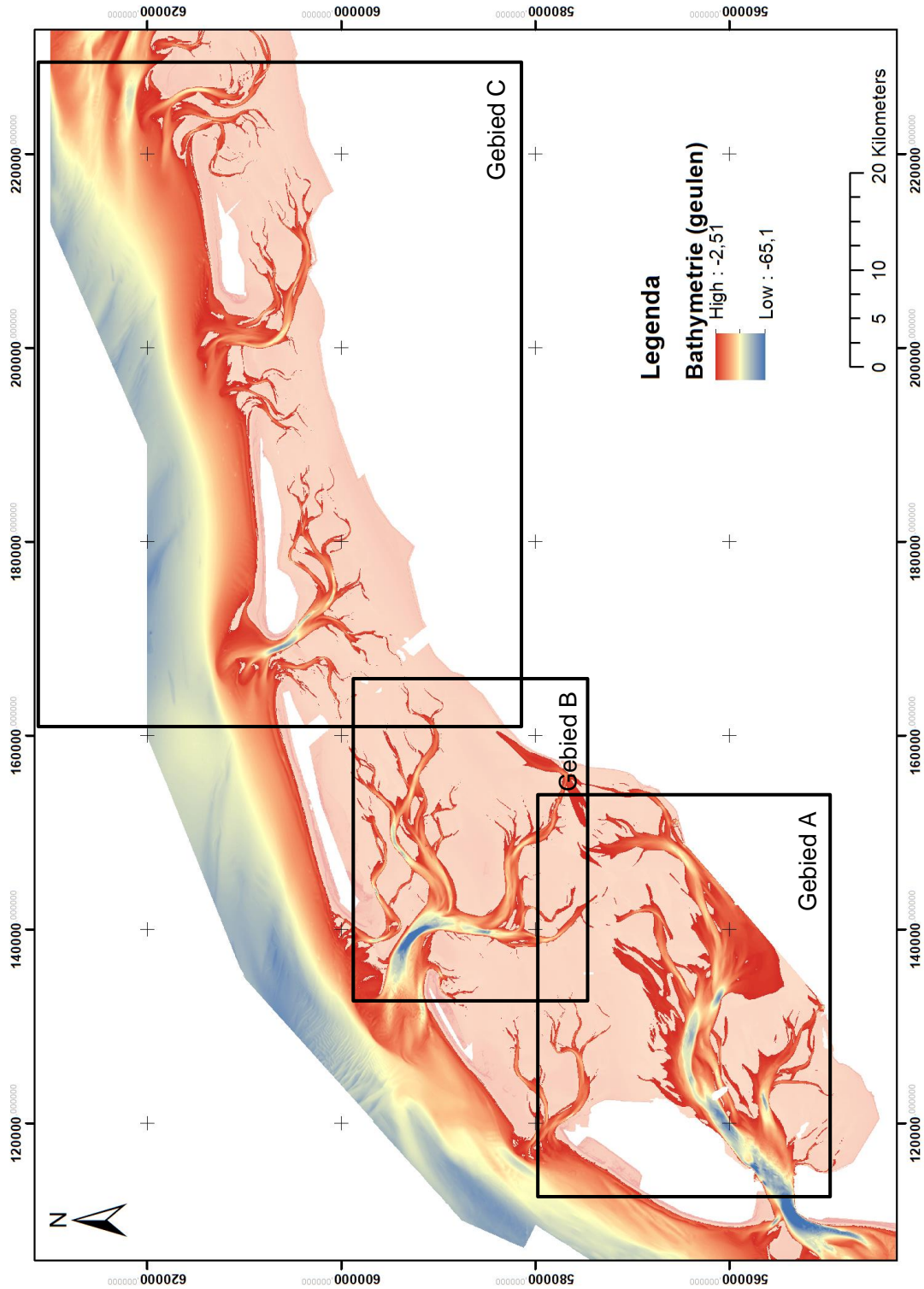
2.2 Onderzoeksgebied en methoden

Het onderzoeksgebied omvat de Waddenzee (§2.3) en de Westerschelde (§2.4). De Eems-Dollard en het buitengaats gebied zijn voorsnog niet meegenomen. Voor de analyse is de Waddenzee onderverdeeld in drie gebieden, namelijk: (A) rond Texel met o.a. Texelstroom, Malzwin en Vogelzwin; (B) rond Vlieland en Terschelling met o.a. Vliestroom, West Meep en Noord Meep; en (C) van Ameland tot de Rottumerplaat met o.a. Borddiep, Zoutkamperlaag en Boschgat.

De gebruikte bathymetrische data is een samenvoeging van vaklodingen die tussen 2009 en 2014 ingemeten zijn. De raster dataset heeft een resolutie van 20x20 meter. Alle gebieden die onder 2.5 m -NAP liggen zijn eruit gefilterd om hoofdzakelijk geulsystemen over te houden voor verdere analyses (Figuur 2.2). Van het bathymetrisch grid is een hellingkaart gemaakt waarop vervolgens twee filters zijn toegepast: een filter voor hellingen kleiner dan 0.5° om plateaus en vlakke geulbodems makkelijker te kunnen identificeren en een filter voor hellingen groter dan 8° om steilranden te vinden.

Op basis van de hellingkaart en de twee gefilterde subsets is visueel beoordeeld of een geul mogelijk onder invloed staat van erosie-resistente lagen. Enkel locaties waar de vorm van de geul overduidelijk afwijkt van de 'normale' vorm (paneel A van Figuur 2.1) zijn in dit memo meegenomen. De selectie is puur op basis van geulvorm en dus zonder voorafgaande geologische kennis bepaald. Van deze locaties is een representatief profiel gemaakt om het effect van de erosie-resistente laag of lagen te verduidelijken. De locaties zijn ook vergeleken met de kaart van erosie-resistente afzettingen (Hijma, 2017a) en waar mogelijk met nabijgelegen boringen die via www.dinoloket.nl verkregen zijn.

2.3 Resultaten Waddenzee



Figuur 2.2. Overzicht van het onderzoeksgebied en onderverdeling daarvan. De gebieden die onder 2.5 m -NAP liggen zijn voornamelijk onderdeel van getijdengeulen.

2.3.1 Gebied A

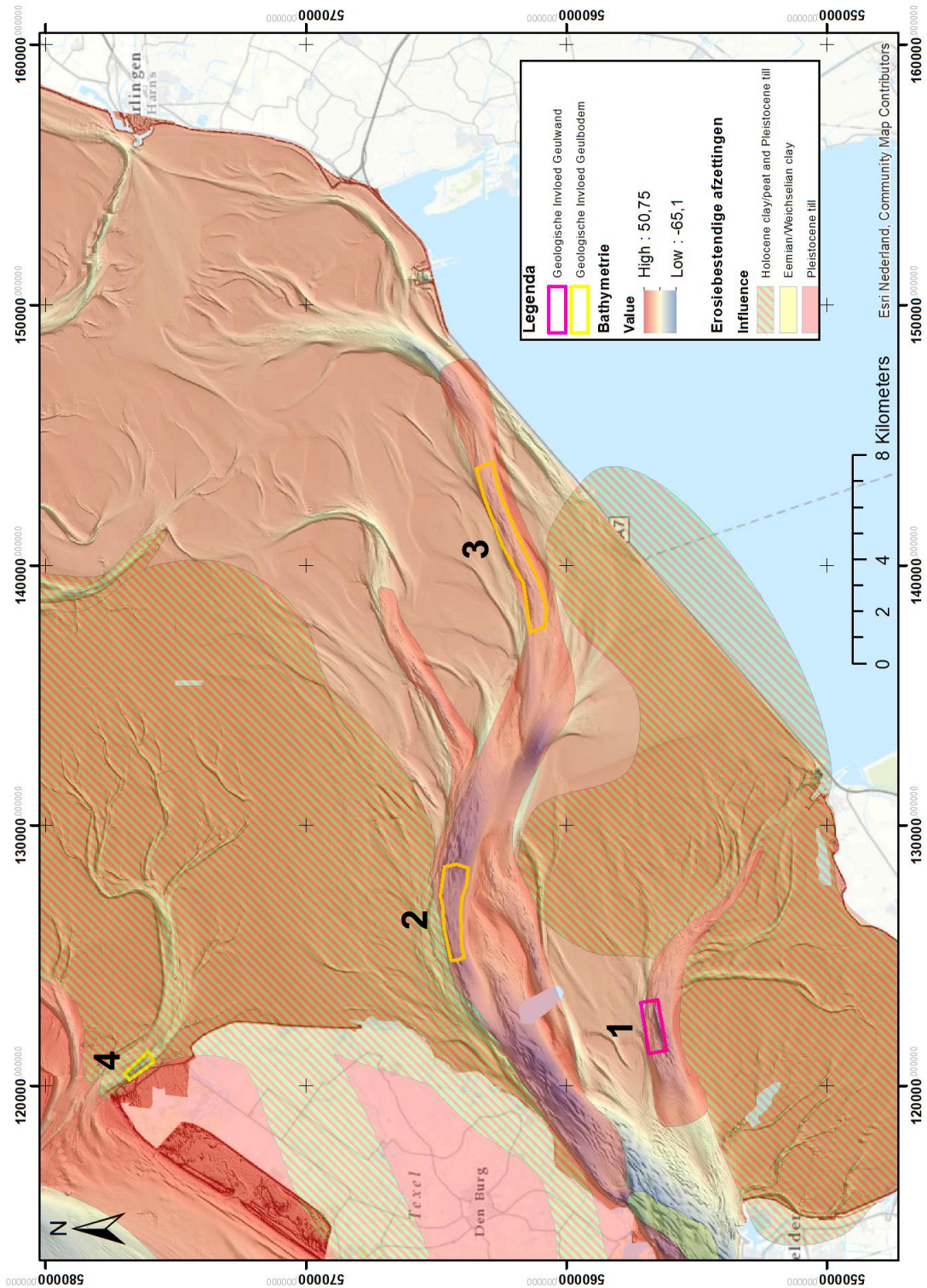
Voor het gebied rond Texel zijn in totaal vier locaties aangewezen waar geologie mogelijk een rol speelt, namelijk: (1) ten oosten van het zeegat tussen Texel en Den Helder in de Malzwin, (2) net ten oosten van Texel in de Texelstroom, (3) nabij de afsluitdijk in de Doove Balg en (4) in het Robbengat net ten noorden van De Cocksdorp. Een overzicht van deze locaties is gegeven in (Figuur 2.3).

Op locatie 1 (Figuur 2.4) is er mogelijk een erosie-resistente laag op 13 m -NAP die ervoor heeft gezorgd dat de verdieping van de oorspronkelijke geul (400-1800 m) is gestopt en een plateau zich heeft gevormd. De vervolgens ingesneden geul tussen 800 en 1200 m heeft geen afwijkende vorm. De dichtstbijgelegen boring ligt echter 6 kilometer ten westen van het profiel. Op 22 m -NAP is hier een kleilaag aangetroffen. Er zijn geen aanwijzingen dat deze laag enige invloed heeft op de geul die in het profiel getoond is. Mogelijk gaat het hier om een andere erosie-resistente laag, zoals bijvoorbeeld keileem van de Drente formatie die in dit gebied gekarteerd is door Hijma (2017a).

Locatie 2 (Figuur 2.5) is een goed voorbeeld van een geul die zich heeft verbreed omdat verdere verdieping onmogelijk was (paneel C in Figuur 2.1). Tussen 400 en 1100 m is de bodem zo goed als vlak op een diepte van 18-19 m -NAP. De vorm van de geul kan niet direct gelinkt worden aan een erosie-resistente laag die in de nabijgelegen boringen is gevonden. In de getoonde boring is tussen 15 en 17 m -NAP matig grof en grindig zand aangetroffen behorend tot de Drente formatie (keileem volgens GeoTOP). Mogelijk ligt dezelfde (soort) afzetting op deze locatie aan de basis van de geul. In meerdere verder weg gelegen boringen wordt keileem rond de diepte van de geulbodem aangetroffen. De aanwezigheid van keileem in het gebied is ook door Hijma (2017a) gekarteerd.

Op locatie 3 (Figuur 2.6) dient een soortgelijke situatie als op locatie 2 zich aan. In vergelijking met locatie 2 is de verbreding van de geulbodem als gevolg van gelimiteerde verdieping minder sterk. Waarschijnlijk is net zoals op locatie 2 keileem aanwezig in de bodem. 3 kilometer ten oosten van de profiellocatie is op ongeveer 12 m -NAP leem aangetroffen behorend tot het Gieten laagpakket van de Drente formatie. De meest waarschijnlijke erosie-resistente laag die de vorm van de geulbodem beïnvloedt is keileem, maar er zijn weinig dichterbij gelegen boringen die dit beeld kunnen bevestigen.

Op locatie 4 (Figuur 2.7) is de invloed van geologie kleinschaliger. De bodem van de geul is op 17 m -NAP mogelijk net op een erosie-resistente laag gestuit, waardoor deze over een breedte van 80 meter geheel vlak is. Enkele nabijgelegen boringen laten rond de 16/17 m -NAP erosie-resistente lagen zien die soms uit keileem bestaan, maar soms ook uit metersdikke kleilagen van de Formatie van Urk.



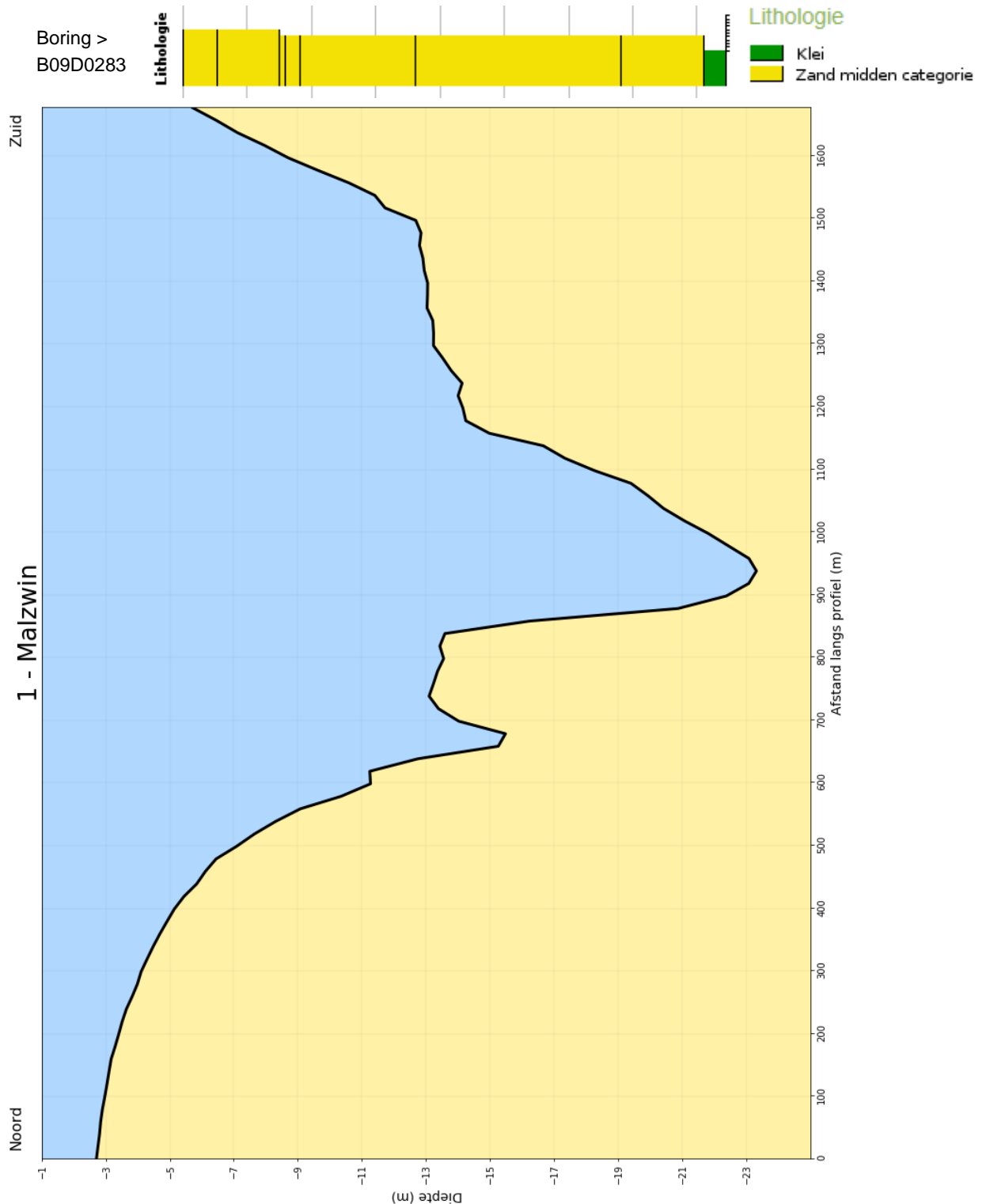
Figuur 2.3. Overzicht van locaties in gebied A. Geulwanden en -bodern waarvan vermoed wordt dat hun vorm door erosie-resistente lagen wordt bepaald zijn omkaderd. De verbreiding van erosie-resistente lagen volgens Hijma (2017a) is ook ingetekend.



Datum
26 september 2019

Ons kenmerk
11203683-002-ZKS-0001

Pagina
15 van 45



Figuur 2.4. Op locatie 1 (Malzwin) is mogelijk op 13 m -NAP een erosie-resistente laag. Boring ligt 6 km ten westen van profiel en suggereert niet de aanwezigheid van een erosie-resistente laag. Mogelijk ligt er een andere afzetting die verantwoordelijk is voor de plateau's in deze geul.

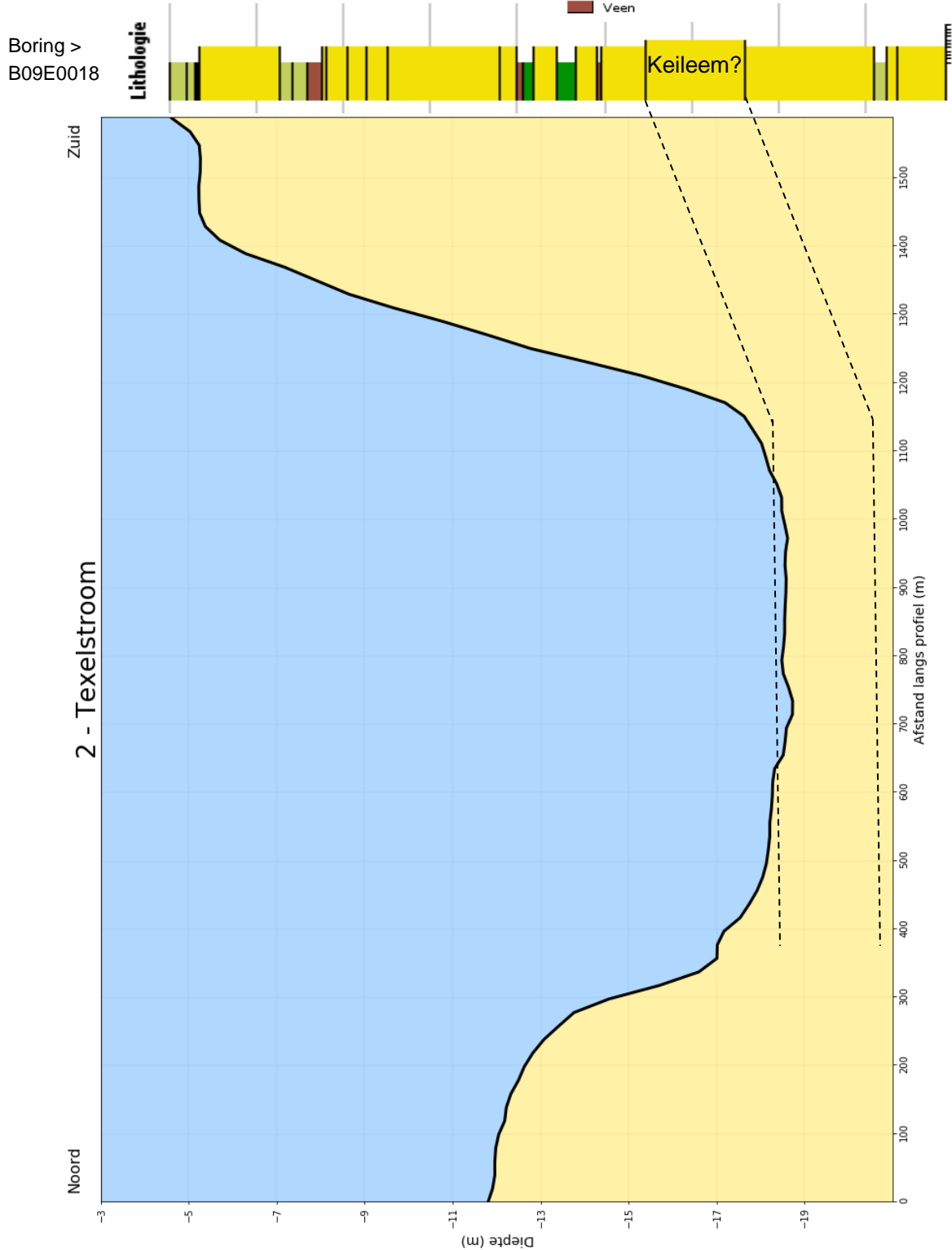


Datum
26 september 2019

Ons kenmerk
11203683-002-ZKS

Lithologie
 Leem
 Klei
 Zand midden categorie
 Veen

Parina
45



Figuur 2.5. Op locatie 2 (Texelstroom) wordt de verdieping van de geul mogelijk verhinderd door een erosie-resistente laag waarvan de top op ongeveer 18-19 m -NAP ligt. B09E0018 ligt anderhalve kilometer ten oosten van het profiel.



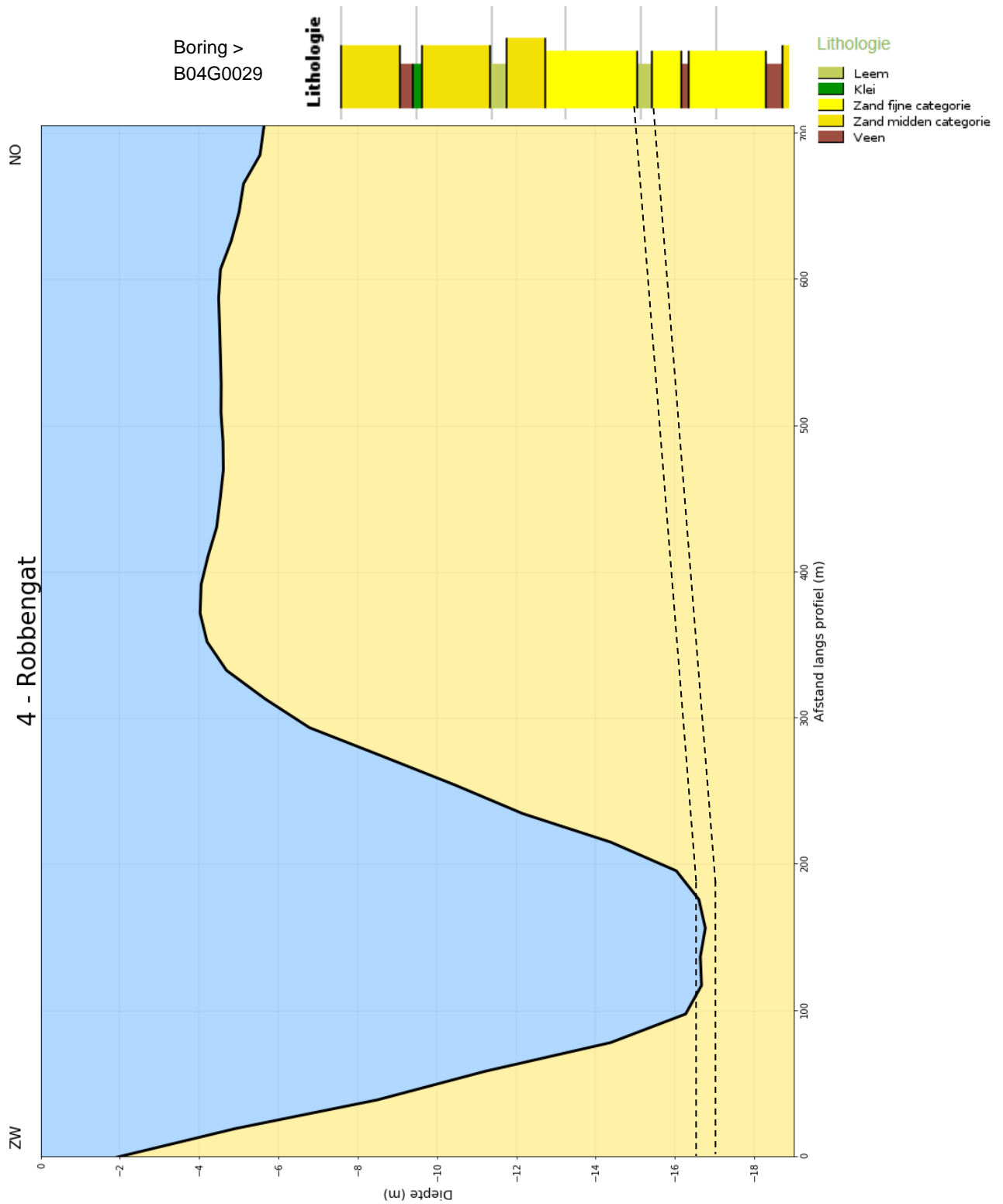
Figuur 2.6. Op locatie 3 (Doove Balg) wordt de verdieping van de geul mogelijk verhinderd door een erosie-resistente laag (keileem) op een diepte van ongeveer 14 m -NAP



Datum
26 september 2019

Ons kenmerk
11203683-002-ZKS-0001

Pagina
18 van 45



Figuur 2.7. Op locatie 4 (Robbengat) is de geulbodem is erg vlak op 17 m -NAP.

2.3.2 Gebied B

Voor het gebied rond Vlieland en Terschelling zijn in totaal vijf locaties aangewezen waar mogelijk geologie een rol speelt, namelijk: (1) De Vlieree, het zeegat tussen Vlieland en Terschelling, (2) De Noord Meep, ten zuiden van Terschelling, (3) De Oost Meep, ten zuiden van Terschelling, (4) De West Meep ter hoogte en ten westen van de Richel en (5) in De Vliestroom tussen De Richel en Griend. Een overzicht van deze locaties is gegeven in Figuur 2.8.

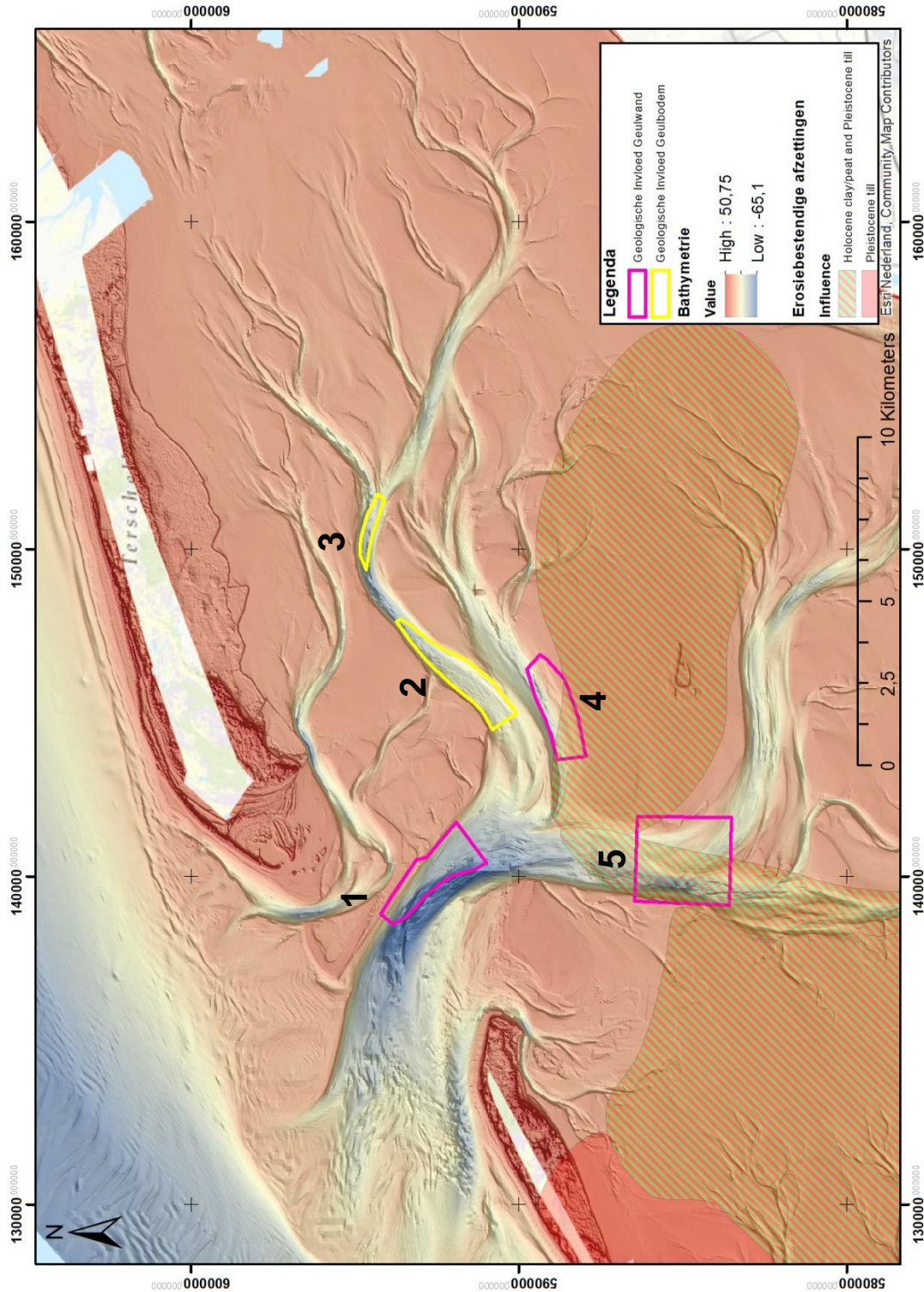
Op locatie 1 (Figuur 2.9) zijn er twee grote plateau's aan weerszijden van het zeegat. In het noordoosten op 19 m -NAP tussen 600 en 1000 m in het profiel en in het zuidwesten op 7 m -NAP tussen 2000 en 2400 m. Er zijn in het gebied geen boringen die inzicht kunnen geven in de herkomst van eventuele erosie-resistente lagen die de vorm van deze geul beïnvloeden. Wel is binnen een straal van 5 km (jachthaven van Vlieland) keileem aangetroffen op dezelfde diepte als het plateau op 19 m -NAP

In de Noord Meep (locatie 2, Figuur 2.10) is de bodem van de geul vrijwel vlak over een breedte van 600 meter op een diepte van 12 m -NAP. Keileem zit net ten oosten van deze locatie op dieptes onder 21 m -NAP, wat het onwaarschijnlijk maakt dat keileem de oorzaak is van de vlakke geulbodem. Uit enkele ondiepe boringen blijkt echter wel dat de eerste twee meter van de geulbodem bestaat uit matig tot uiterst grof zand, af en toe afgewisseld door een dun kleilaagje.

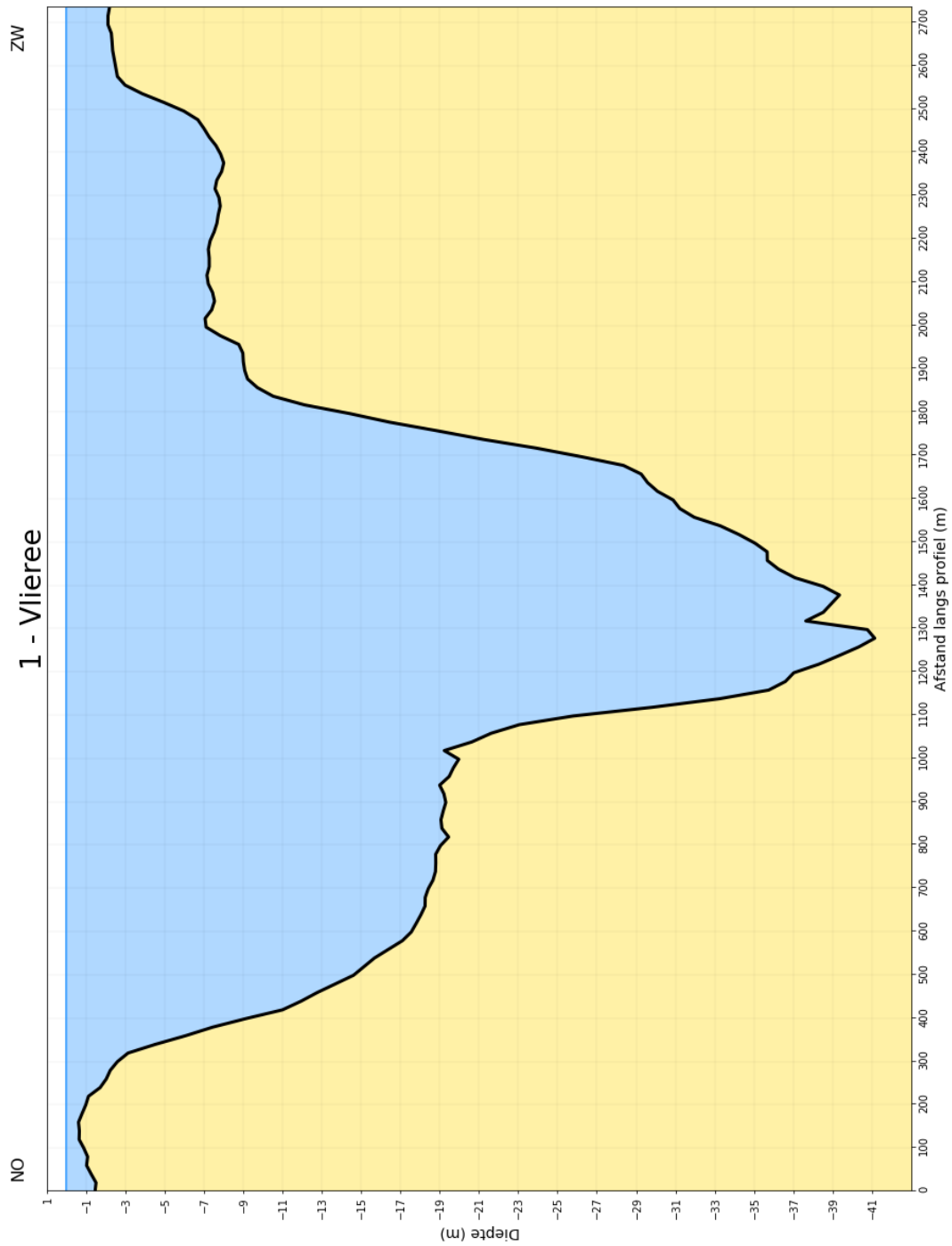
Locatie 3 (Figuur 2.11) ligt in het verlengde van locatie 2 maar lijkt door een andere erosie-resistente laag gestuurd te zijn. De bodem van de geul is hier over een breedte van 300 meter vlak, maar op een diepte van 19 m -NAP. Met keileem op een diepte van 20-21 m -NAP in omliggende boringen is dit de meest waarschijnlijke erosie-resistente laag die de vlakke geulbodem heeft veroorzaakt.

Op locatie 4 (Figuur 2.12) is de invloed van geologie zichtbaar in de geulwanden. Op 5 en rond 13 m -NAP zijn er kleine plateaus ontstaan die mogelijk gevormd zijn door erosie-resistente lagen zoals geïllustreerd in paneel B van Figuur 2.1. Aanwijzingen voor geologische sturing op deze locatie zijn in vrijwel alle nabijgelegen boringen te vinden. Op 5 m -NAP is een dunne schelpenlaag aangetroffen met daaronder een 1.5 meter dik kleipakket, gevolgd door een dunne laag basisveen. De dieper gelegen erosie-resistente laag bestaat waarschijnlijk uit een meter dikke laag grind.

Locatie 5 (Figuur 2.13) is waar de Vliestroom opsplijt in de Blauwe Slenk en de Straat van Schieringhals. Het profiel op deze locatie laat een vlakke laag zien op ongeveer 7 m -NAP. In een nabijgelegen boring is keileem op een diepte van 19 m -NAP aangetroffen. De diepe geul aan de westkant van het profiel lijkt zich daar echter niks van aangetrokken te hebben. Ter hoogte van het plateau op 7 m -NAP zijn er geen lagen aangetroffen die mogelijk erosie-resistent zijn. De mogelijkheid dat hydrodynamische condities bij de splitsing van de Vliestroom de grootste rol hebben gespeeld in de vorming van het plateau lijkt aannemelijker.



Figuur 2.8. Overzicht van locaties in gebied B. Geulwanden en -bodems waarvan vermoed wordt dat hun vorm door erosie-resistente lagen wordt bepaald zijn omkaderd. De verbreiding van erosie-resistente lagen volgens Hijma (2017a) is ook ingetekend.



Figuur 2.9. Locatie 1, Vlieree, het zeegat tussen Vlieland en Terschelling. Twee duidelijk herkenbare plateaus die mogelijk ontstaan zijn door een erosie-resistente laag. Er zijn geen nabijgelegen boringen die dat kunnen bevestigen of ontkrachten.



Datum
26 september 2019

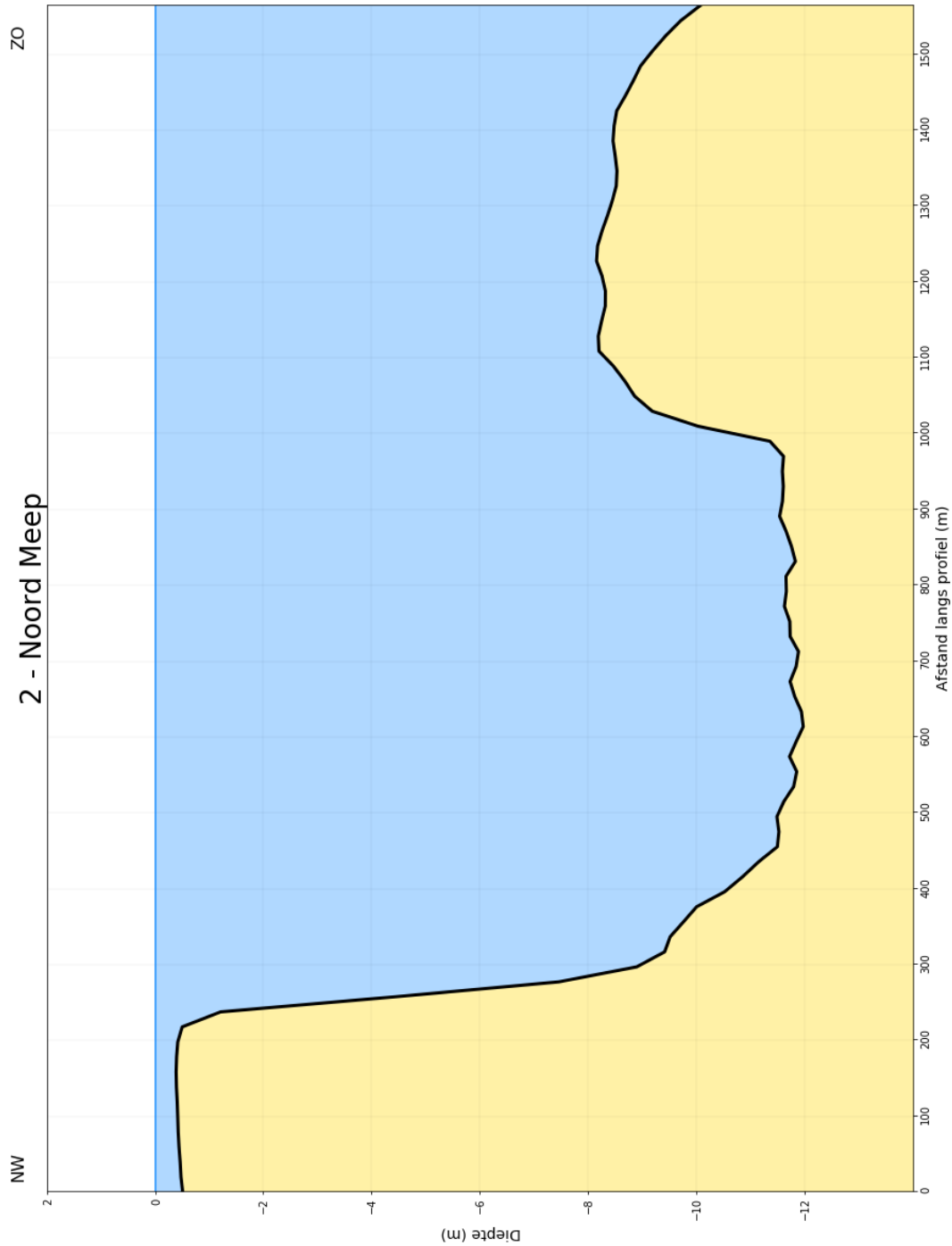
Ons kenmerk
11203683-002-ZKS-0001

Pagina
22 van 45

Lithologie

- Klei
- Zand fijne categorie
- Zand midden categorie

Boring >
B05A0269



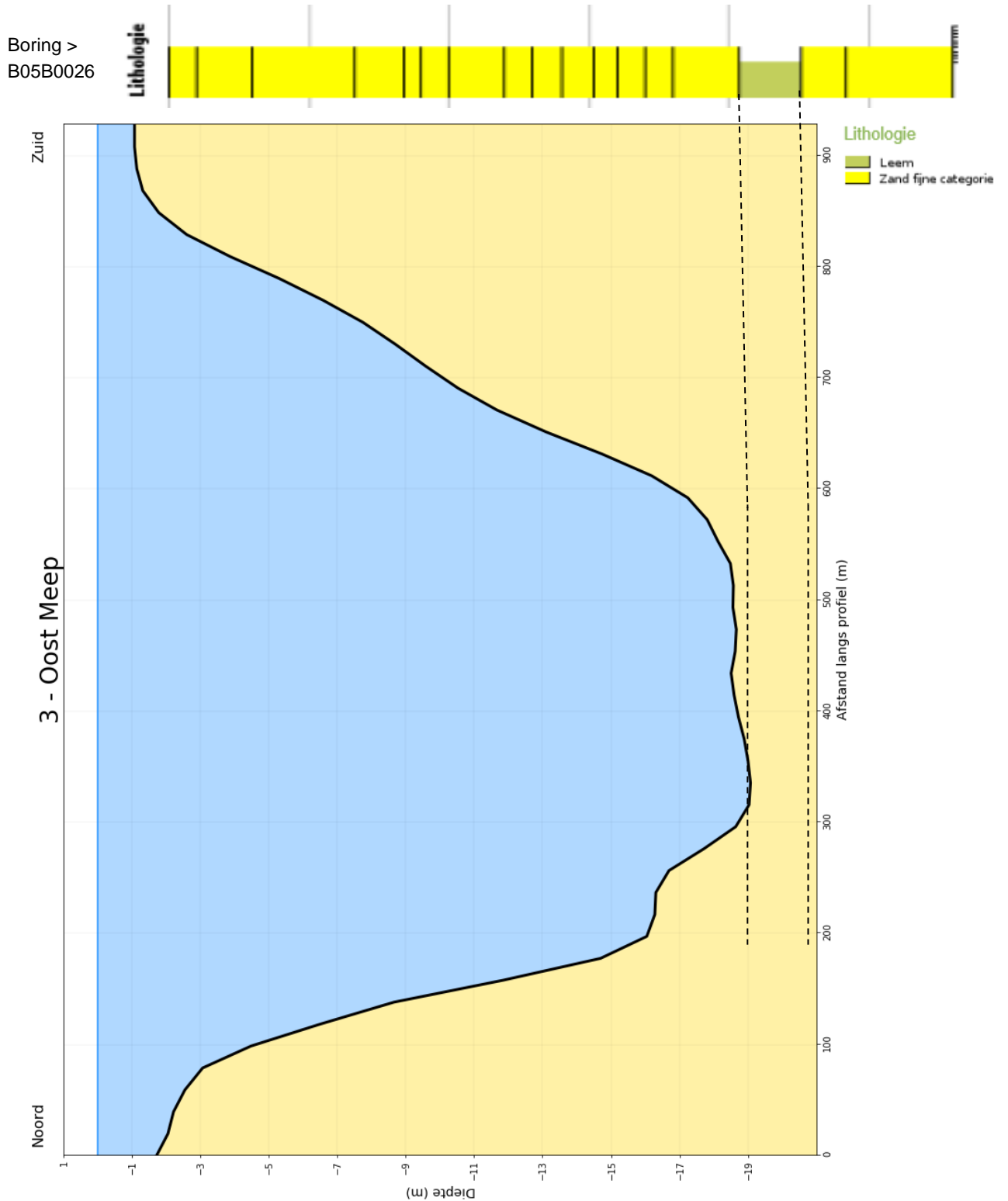
Figuur 2.10. In de Noord Meep is de geulbodembodem vlak over een breedte van 600 meter. Nabijgelegen boringen vinden op deze diepte matig tot uiterst grof zand.



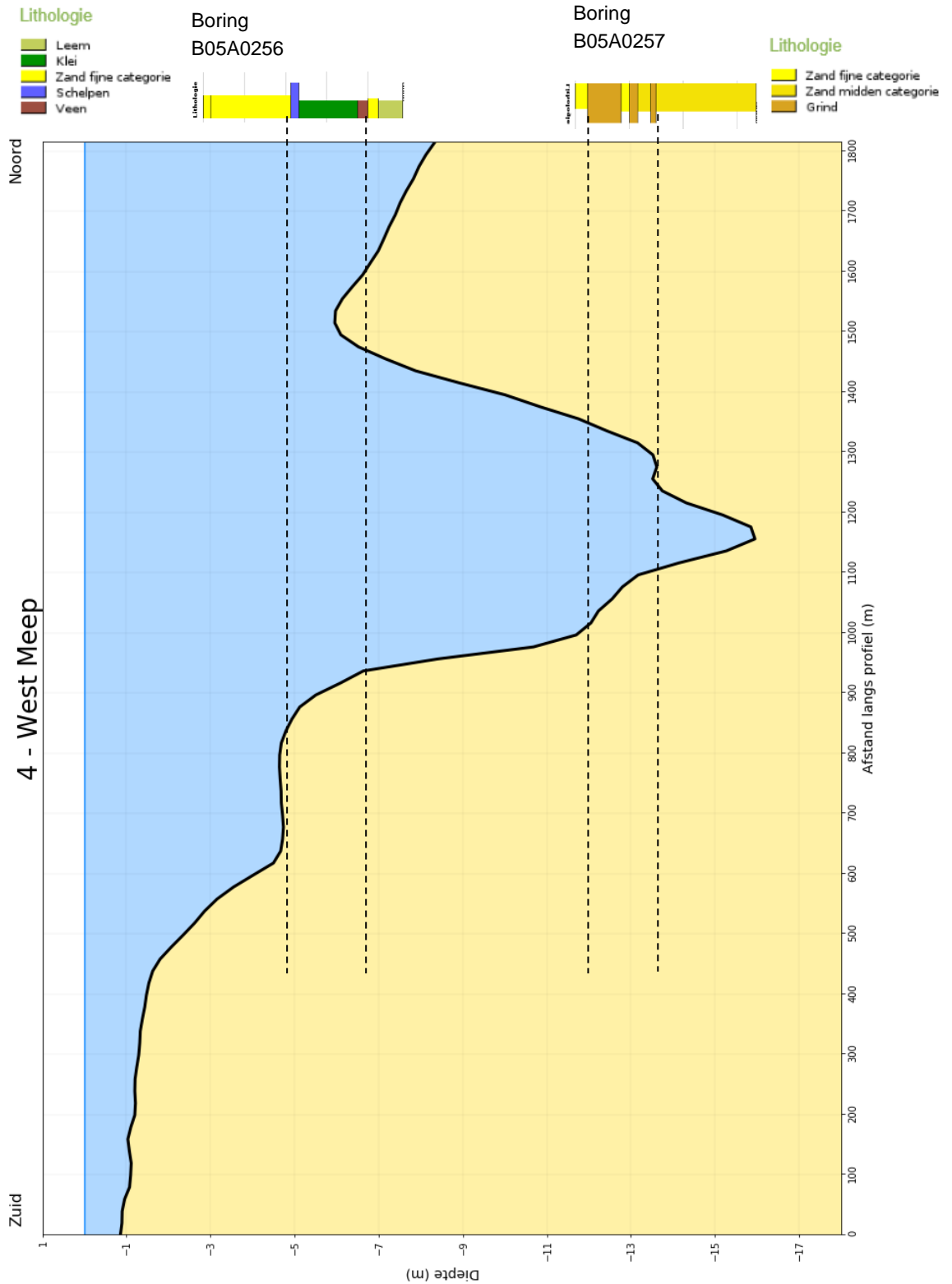
Datum
26 september 2019

Ons kenmerk
11203683-002-ZKS-0001

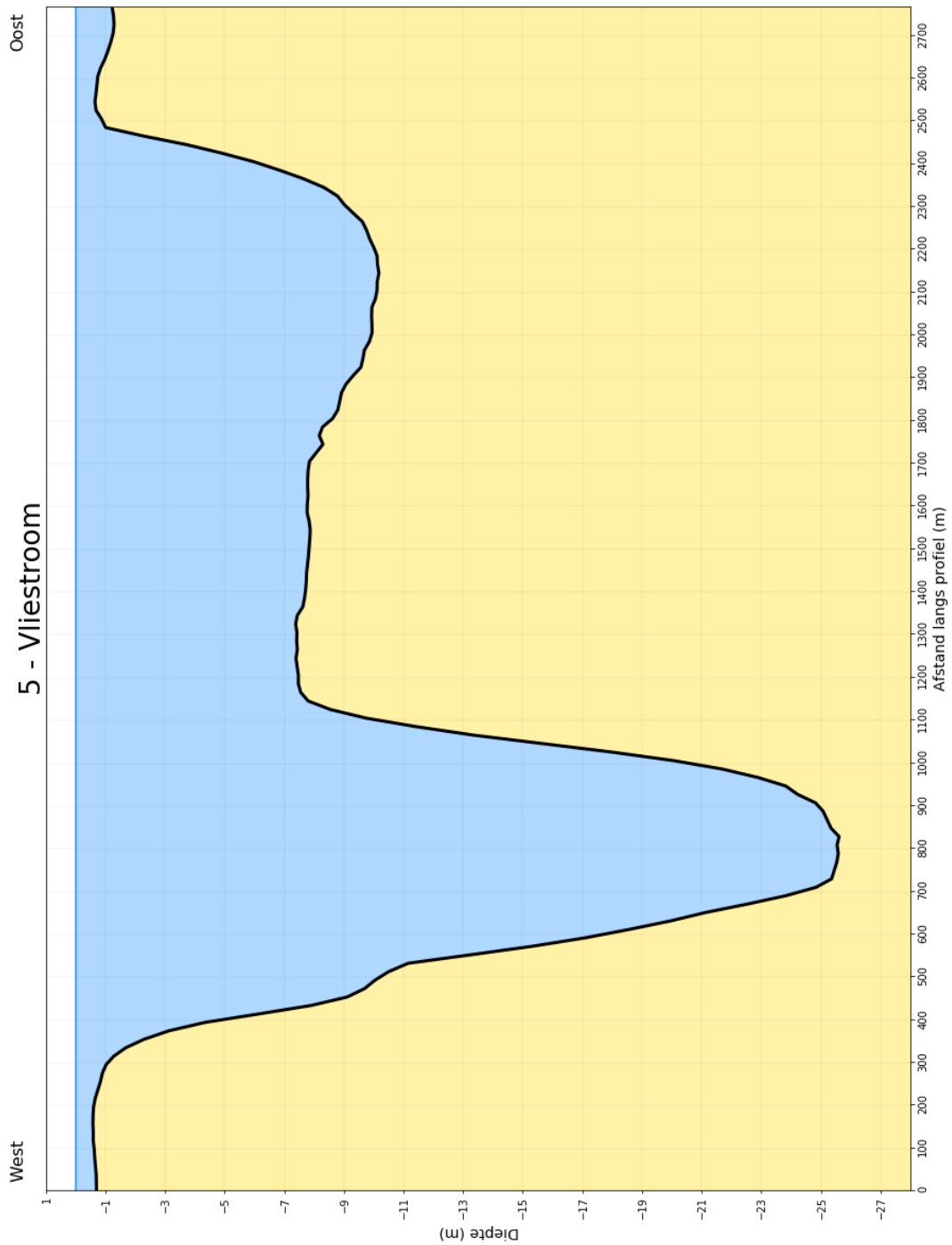
Pagina
23 van 45



Figuur 2.11. Deze locatie ligt in het verlengde van locatie 2. De geulbodem is wederom vlak, maar op een grotere diepte van 19 m -NAP, waardoor keileem de meest waarschijnlijke geologische factor is.



Figuur 2.12. Op deze locatie spelen twee verschillende erosie-resistente lagen een rol. Rond 5 en 13 m -NAP. Nabijgelegen boringen bevestigen de aanwezigheid hiervan.



Figuur 2.13. Op deze locatie springt het plateau op 7 m -NAP in het oog. Er zijn echter geen boringen in de buurt die aanwijzingen geven voor een erosiebestendige laag op deze diepte.

2.3.3 Gebied C

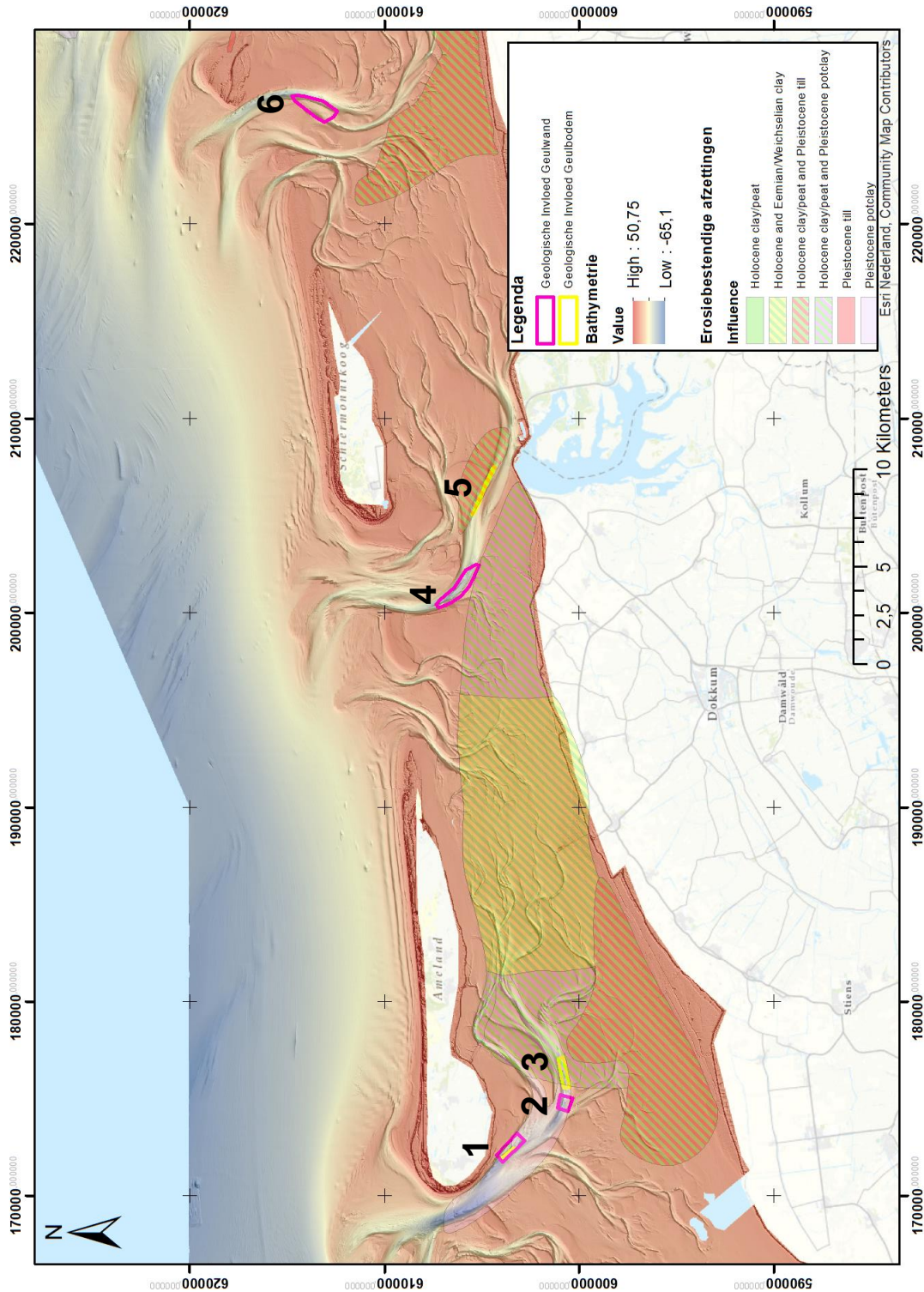
Gebied C omvat het waddengebied rond Ameland in het westen tot de Rottumerplaat in het oosten. De locaties in dit gebied zijn: (1) Het Borndiep, ten westen van Ameland (2) Het Dantziggat (geulwand) ten zuiden van Ameland, (3) Het Dantziggat (geulbodem) ten zuiden van Ameland en net ten oosten van locatie 2, (4) De Zoutkamperlaag (geulwand) ten zuidwesten van Schiermonnikoog, (5) De Zoutkamperlaag (geulbodem) ten zuiden van Schiermonnikoog en net ten oosten van locatie 4, en (6) Het Boschgat ten oosten van Schiermonnikoog. Een overzicht van deze locaties is gegeven in Figuur 2.14.

Locatie 1 (Figuur 2.15) in het Borndiep is een schoolvoorbeeld van zowel een door geologie beïnvloede geulwand (11 m -NAP) als geulbodem (22 m -NAP). De morfologische ontwikkeling en verband houdende erosie-resistente lagen worden uitgebreid beschreven in Forzoni et al. (2018).

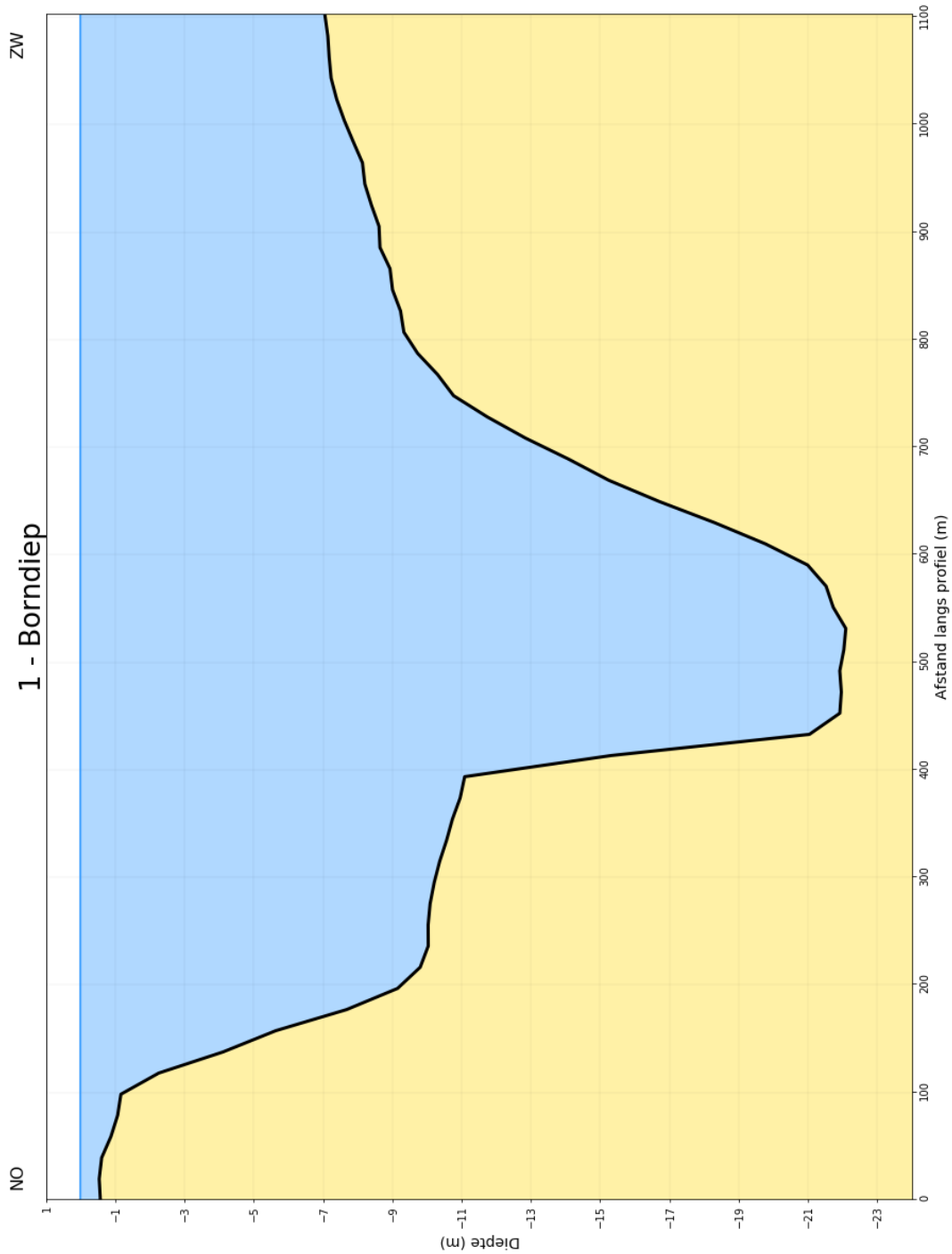
Locatie 2 (Figuur 2.16) ligt ten zuiden van locatie 1 en in het verlengde van het Borndiep. De geulwand in de buitenbocht wordt gekenmerkt door een klein, maar opvallend plateau op 16 m -NAP. Iets ondieper, op 15 m -NAP is de geulbodem op locatie 3 (Figuur 2.17) opvallend vlak. Een boring op ongeveer 200 meter afstand van locatie 2 beschrijft op deze diepte een dunne Holocene kleilaag. Deze kleilaag zou de veroorzaker kunnen zijn van het plateau in de geulwand en de vlakke geulbodem verder oostwaarts. Het is echter zeer de vraag of zo'n dunne kleilaag toch voor langere tijd een grote invloed kan hebben op de geulmorfologie. Bovendien is dezelfde kleilaag niet in alle nabijgelegen boringen terug te vinden. De kleilaag ligt net buiten het door Hijma (2017a) gekarteerde gebied voor Holocene klei- en Pleistocene potkleilagen.

Op locatie 4 (Figuur 2.18) heeft de geulwand een 200 meter breed plateau op 15 m -NAP. Verder naar het oosten (locatie 5) ligt de geulbodem op 15 -NAP en ook hier lijkt de geul op een erosie-resistente laag te stuiten. Er zijn geen direct in de buurt gelegen boringen die een eenduidig beeld kunnen geven over de herkomst van deze laag. De kleilaag die aan de basis van de geulbodem is gevonden op locatie 5 (Figuur 2.19) is bijvoorbeeld niet terug te vinden op locatie 4. Wel is 2 km ten noorden van locatie 4 een 2 m dikke kleilaag gevonden tussen 16 en 18 m -NAP. Deze laag zou door kunnen lopen naar het zuiden en de oorzaak zijn van het plateau op locatie 4. Dit is echter met weinig zekerheid te zeggen. Het convexe profiel van de geulwand op locatie 5 houdt mogelijk verband met een andere 2 m dikke Holocene kleilaag die in de boring 500 m ten zuiden van het profiel is aangetroffen.

Op locatie 6 (Figuur 2.20) in het Boschgat ligt een relatief ondiep plateau op 4 m -NAP. Alhoewel dit een subgetijdegebied is, zijn er op basis van boringen in de buurt geen aanwijzingen dat het plateau is ontstaan door een erosie-resistente laag.



Figuur 2.14. Overzicht van locaties in gebied C. Geulwanden en -bodems waarvan vermoed wordt dat hun vorm door erosiebestendige lagen wordt bepaald zijn omkaderd. De verbreiding van erosiebestendige lagen volgens Hijma (2017a) is ook ingetekend.



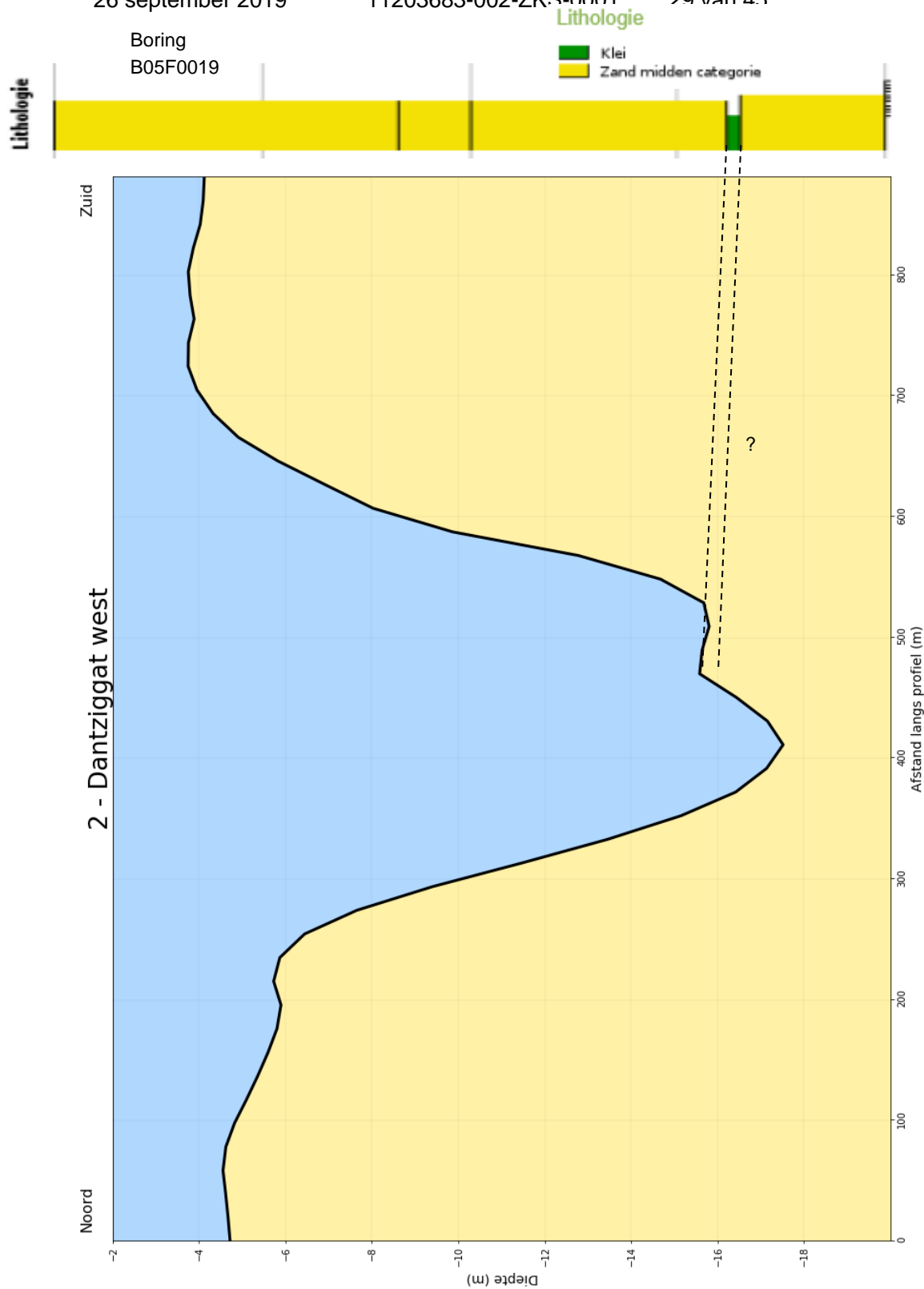
Figuur 2.15. De geul ten westen van Ameland in het Borndiep is een schoolvoorbeeld van een geulwand en -bodembodem die in dit geval door erosiebestendige kleilagen worden beïnvloed. Zie Figuur 3.3 in Forzoni et al. (2018)



Datum
26 september 2019

Ons kenmerk
11203683-002-ZKS-0001

Pagina
29 van 45



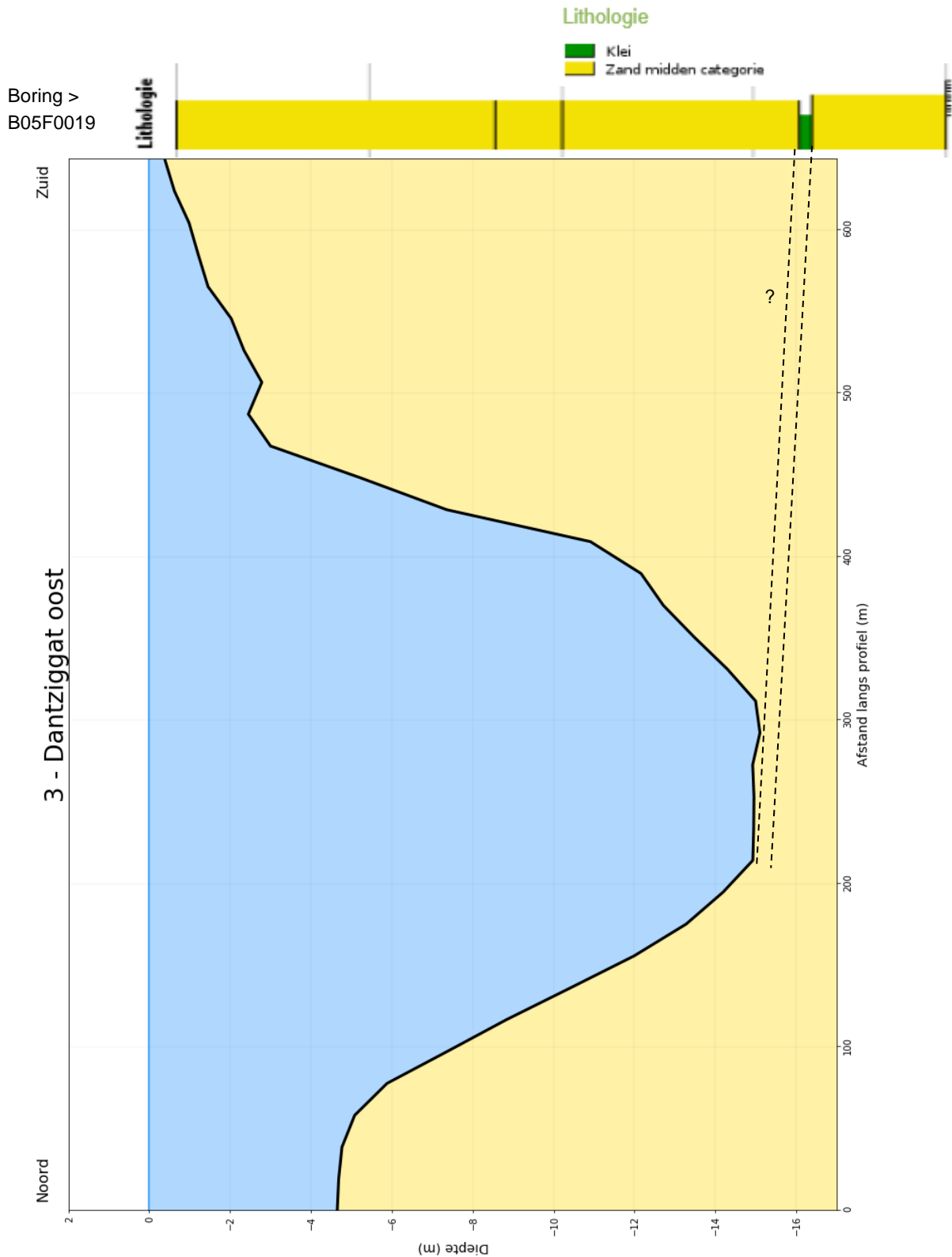
Figuur 2.16. De geulwand in de buitenbocht heeft een opvallend plateau op 16 m -NAP. Deze is te correleren aan een Holocene kleilaag.



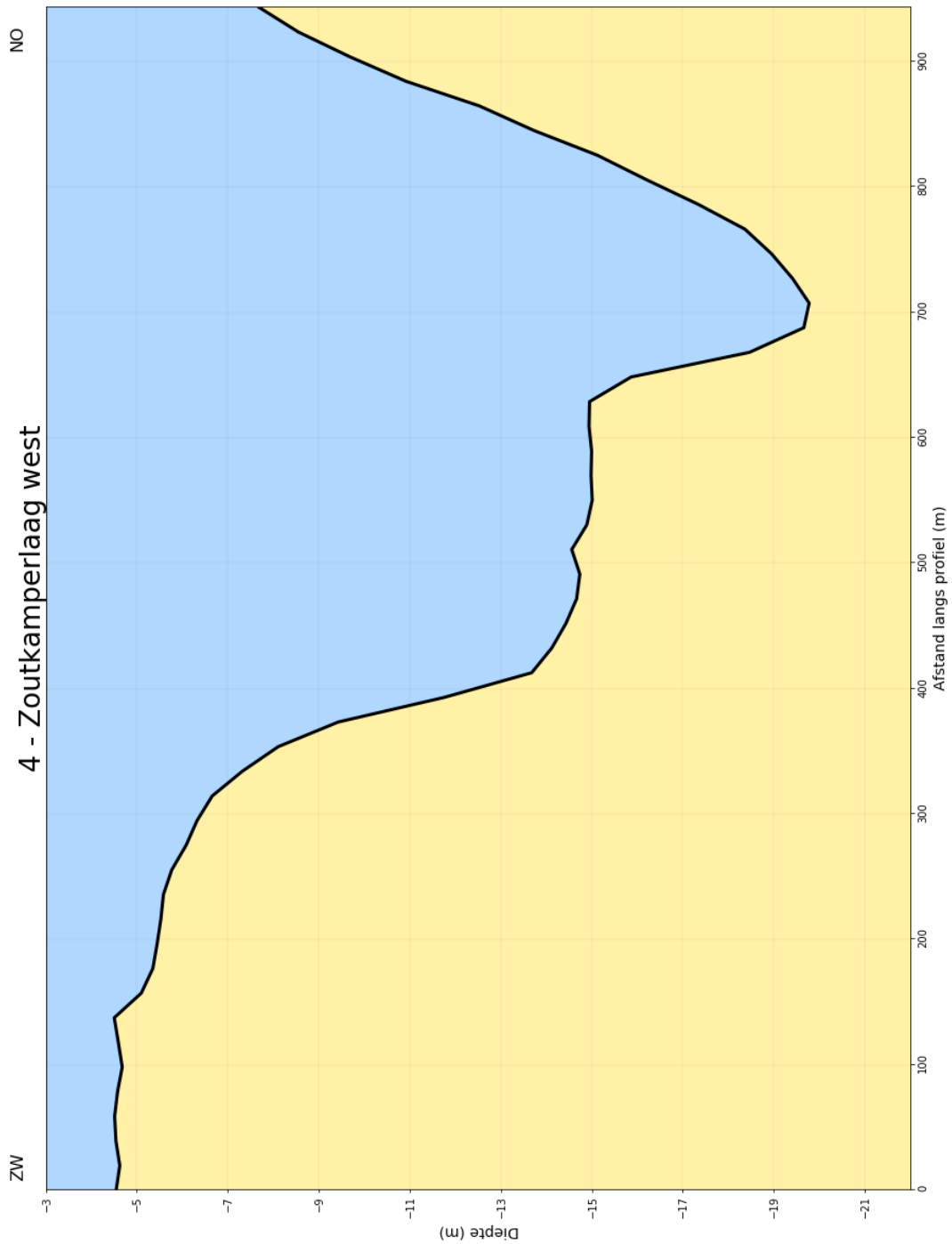
Datum
26 september 2019

Ons kenmerk
11203683-002-ZKS-0001

Pagina
30 van 45



Figuur 2.17. Iets verder ten oosten van de vorige locatie lijkt dezelfde erosiebestendige laag in dit geval de vorm van de geulbodem te beïnvloeden.



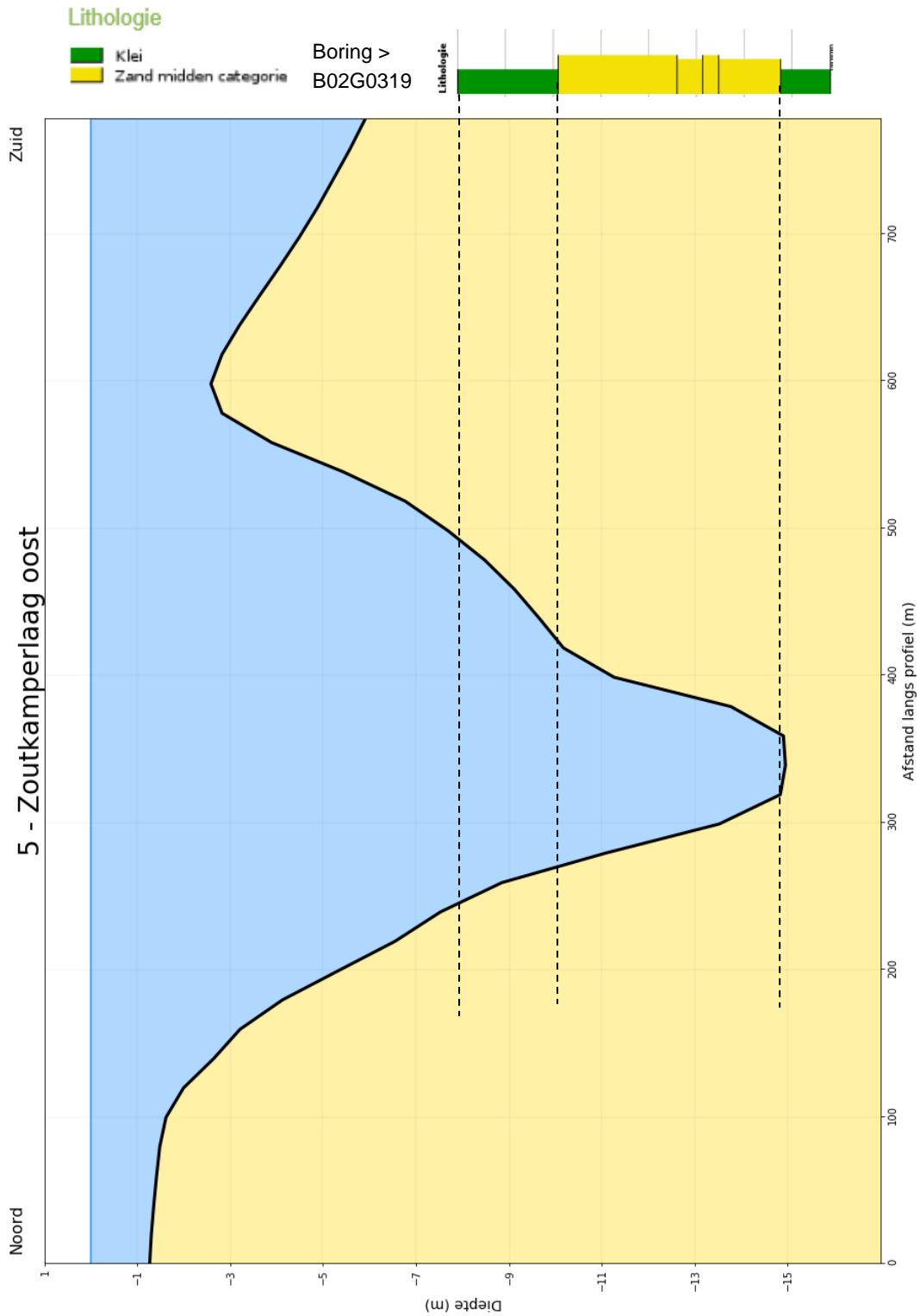
Figuur 2.18. Op deze locatie ligt een 200 m breed plateau op 15 m -NAP. Op deze locatie zijn geen boringen die op een erosiebestendige laag duiden.



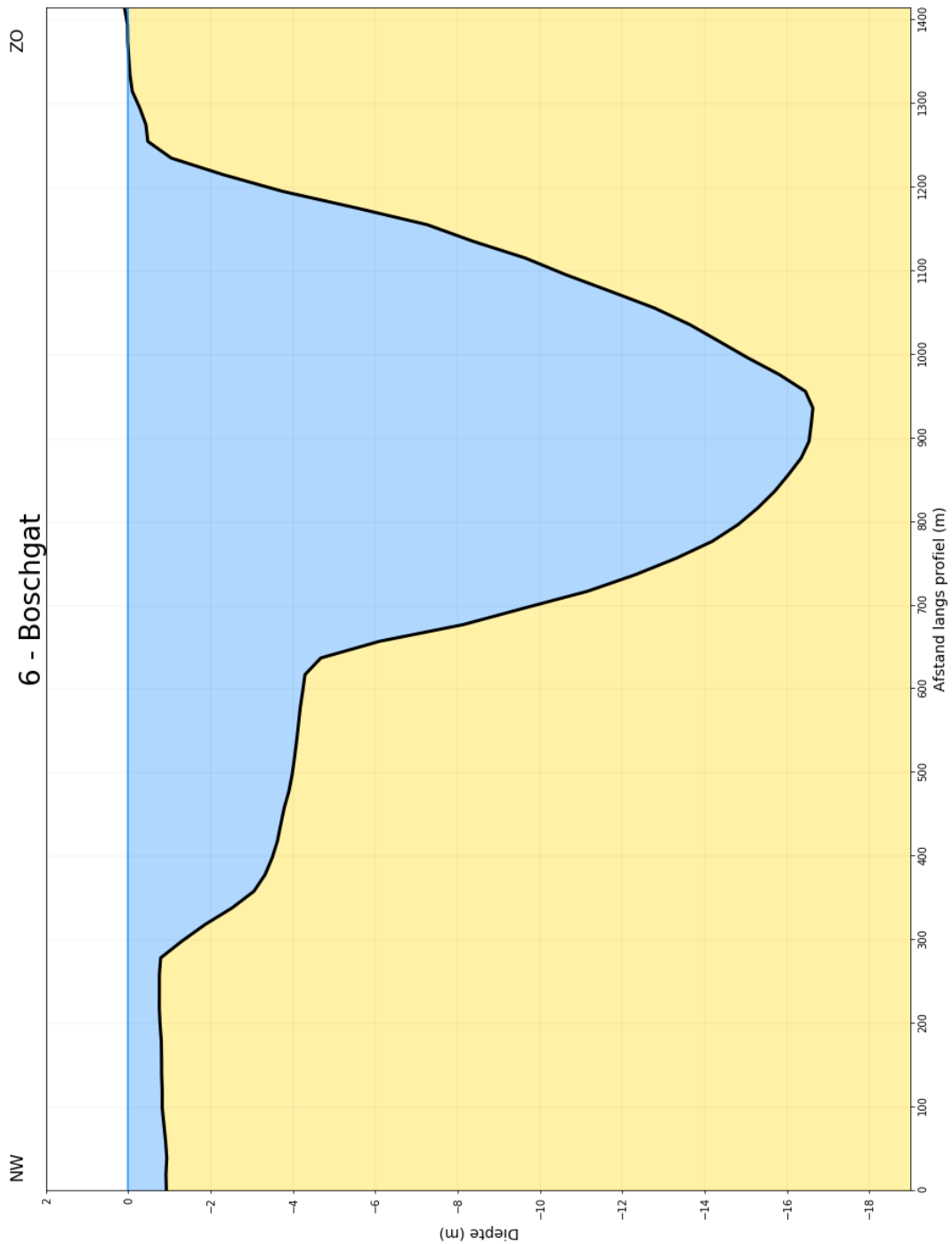
Datum
26 september 2019

Ons kenmerk
11203683-002-ZKS-0001

Pagina
32 van 45



Figuur 2.19. Iets verder ten oosten van locatie 4 is op de dezelfde diepte in dit geval de geulbodemplak over een breedte van ongeveer 50 m, mogelijk doordat dezelfde erosiebestendige laag ook hier aanwezig is.



Figuur 2.20. Voor het plateau op 4 m -NAP zijn geen aanwijzingen gevonden dat het ontstaan verband houdt met de geologie.

2.4 Resultaten Westerschelde

In de Westerschelde en de monding van de Westerschelde zijn in totaal 8 locaties aangemerkt waar een harde laag zeer waarschijnlijk een zichtbare uitwerking heeft gehad op de vorm van de geulbodembodem en/of -wand (Figuur 2.21). Op de meeste locaties is de stevige klei in het Laagpakket van Boom (Formatie van Rupel) de oorzaak.

Locatie 1 nabij Westkapelle (Figuur 2.22): de bodem van het Oostgat ligt hier op ongeveer 23 m -NAP en over een breedte van ongeveer 300 meter vrijwel vlak. Het gaat hier om een laag (zandige) klei van de Formatie van Oosterhout, een mariene afzetting die aan het einde van het Tertiair in het Pliocen is afgezet (5-2.5 miljoen jaar oud). Met name de kleien die hier aan de top van de Formatie van Oosterhout voorkomen zijn al enigszins geconsolideerd en vormen zodoende een erosie-resistente laag.

Locatie 2 in de monding van de Westerschelde ten noordwesten van Breskens (Figuur 2.23): Hier zijn twee plateaus herkenbaar: op ongeveer 21 m -NAP en op 26 m -NAP. Vermoedelijk gaat het hier om klei uit het Laagpakket van Boom van de Formatie van Rupel voor het laagste plateau en tevens het Laagpakket van Boom of klei van de Eem Formatie voor het hoger gelegen plateau. In nabijgelegen boringen bestaat de zeebodem uit een laag klei.

Locatie 3 bij Vlissingen (Figuur 2.24): in de Sardijngeul is de bodem vlak op een diepte van 19 m -NAP en over een breedte van ongeveer 150 m. Dit niveau komt overeen met een kleiige eenheid binnen de Formatie van Oosterhout (dezelfde laag als bij locatie 1)

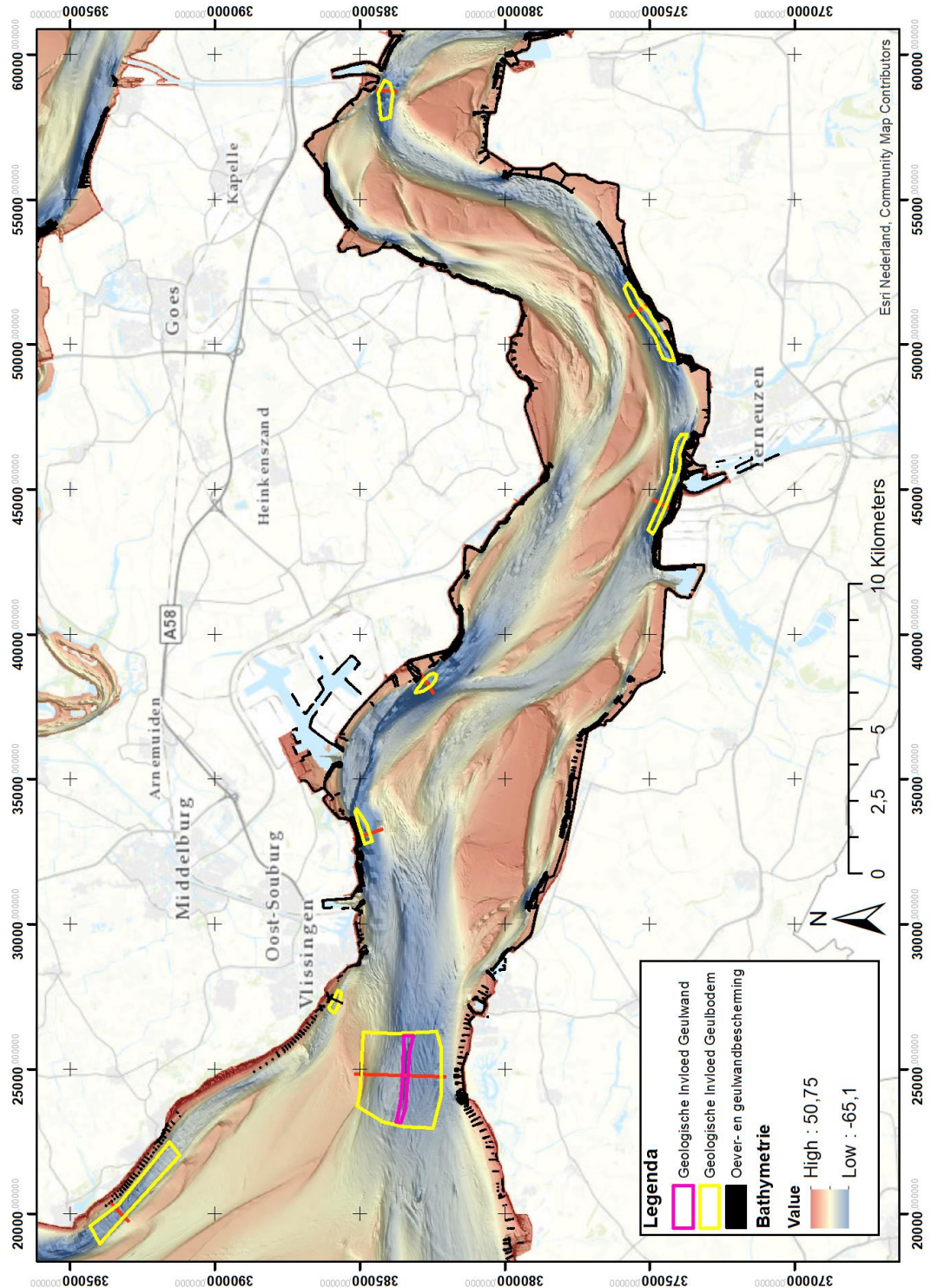
Locatie 4 ten zuiden van Rhitem (Figuur 2.25): De bodem is hier afgevlakt op een diepte van ongeveer 47 m -NAP. Dit betekent dat geul deels al in het Laagpakket van Boom ligt. Op basis van het REGIS II ondergrondmodel ligt een zandige eenheid van de Formatie van Tongeren 4 meter onder de huidige geulbodembodem.

Locatie 5 ten westen van Borssele (Figuur 2.26): De geulbodembodem is op 60 meter diepte vlak over een breedte van 200 meter. De steile geulwand in het noordoosten wordt veroorzaakt door de daar aangelegde oeverbescherming, waardoor verdere verbreding naar het noordoosten wordt verhinderd. Op deze diepte is de geul tevens op stevige klei van het laagpakket van Boom gestuit.

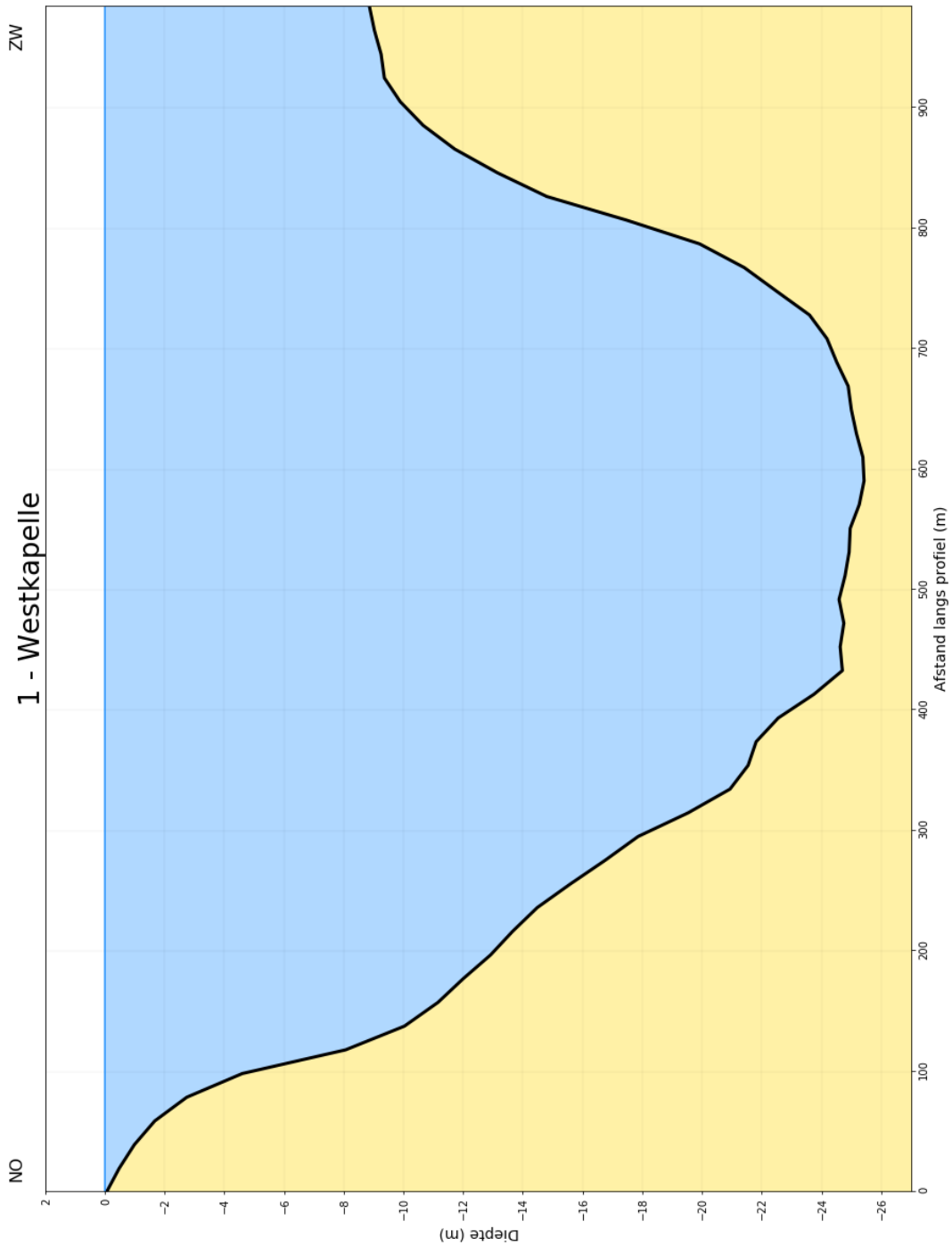
Locatie 6 bij Terneuzen (Figuur 2.27): Langs dit stuk in de Pas van Terneuzen ligt het Laagpakket van Boom aan de geulbodembodem op een diepte variërend tussen 28 en 42 m -NAP. De bodem van de geul is in het figuur vlak op een diepte van ongeveer 34 m -NAP. Vlak voor de jachthaven van Terneuzen ligt een gat met een diepte tot 54 m -NAP. De geul is hier volledig door de klei heen gesneden tot in een zandige eenheid van de Formatie van Tongeren.

Locatie 7 bij Griete (Figuur 2.28): Iets verder stroomopwaarts is de situatie vergelijkbaar met die bij locatie 6. Insnijding van de geul wordt verhinderd door stevige klei van het Laagpakket van Boom op een diepte van 35 m -NAP.

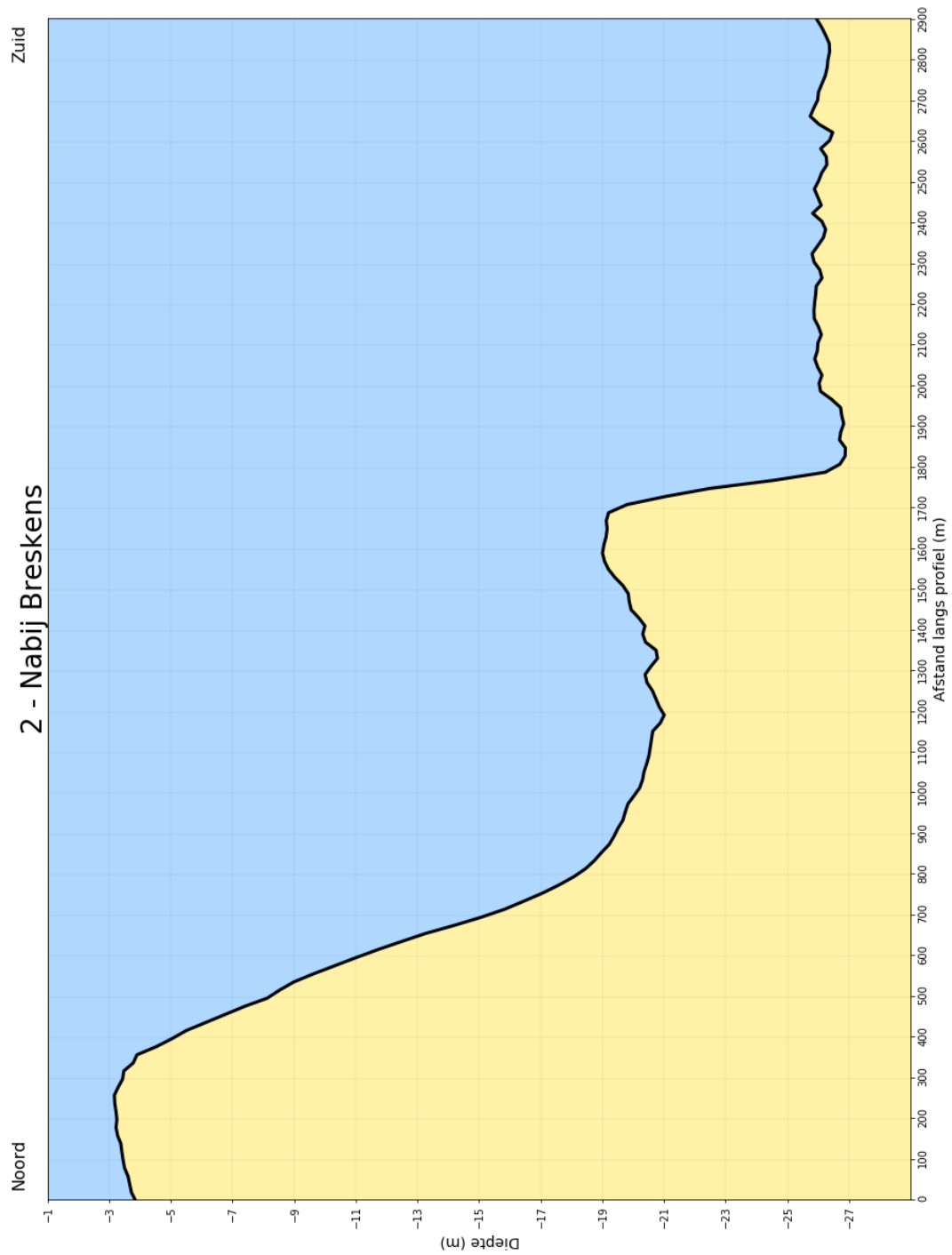
Locatie 8 ten zuiden van Hansweert, beter bekend als de put van Hansweert (Figuur 2.29): Uitdieping van de put van Hansweert wordt op een maximale diepte van 36 m -NAP verhinderd door een laag klei behorend tot de formatie van Oosterhout.



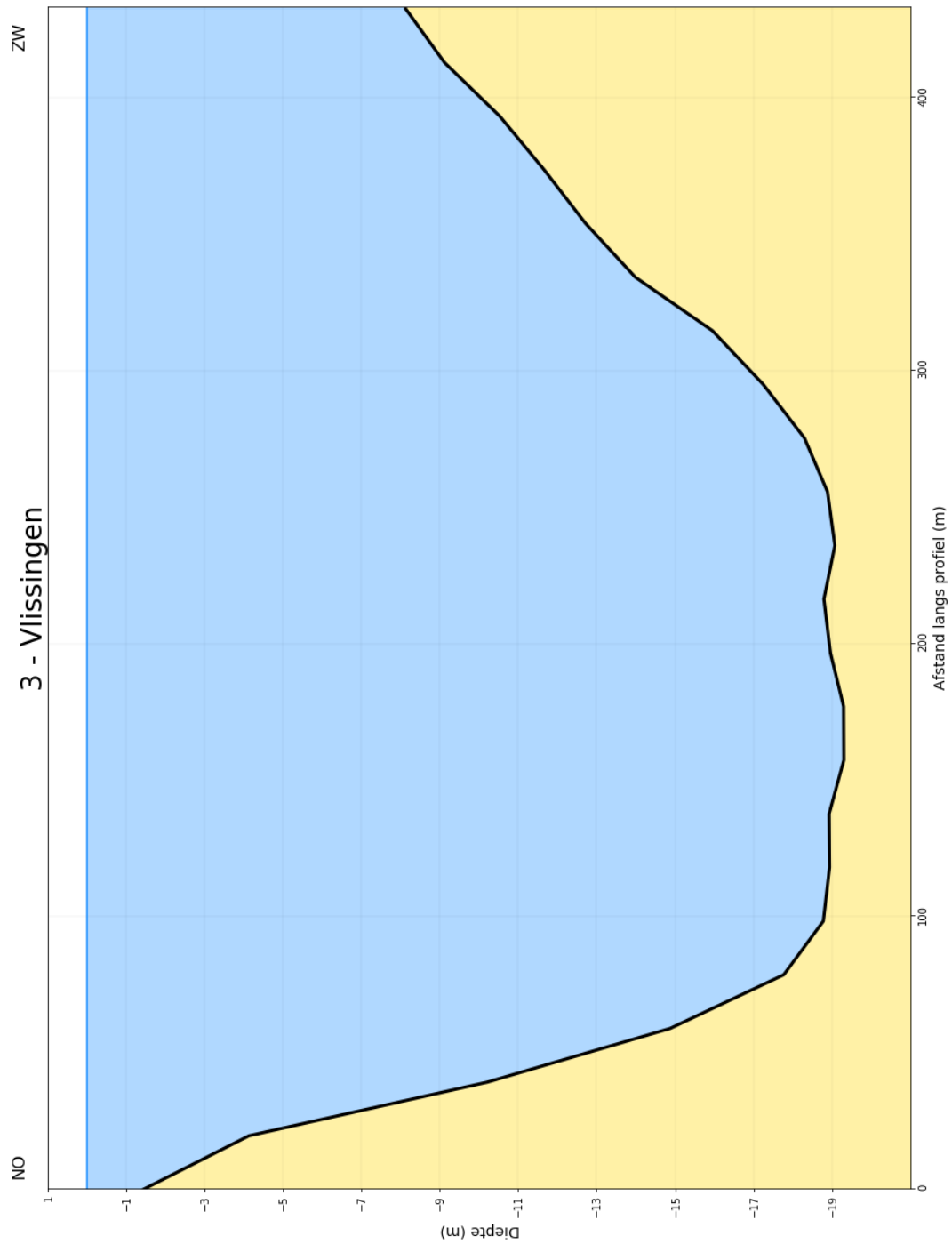
Figuur 2.21 Overzicht van locaties in de Westerschelde waar de geul waarneembaar beïnvloed wordt door erosie-resistente lagen.



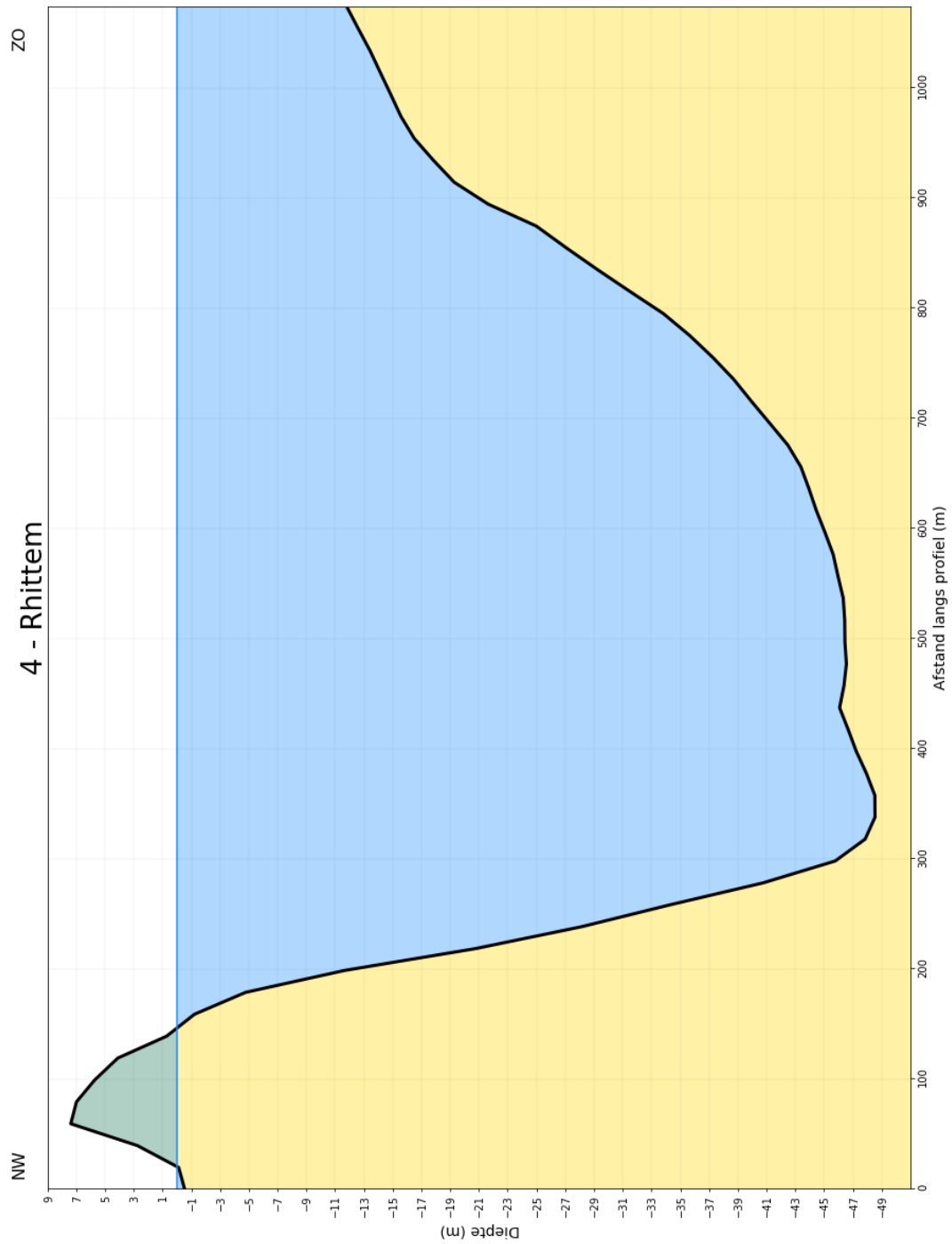
Figuur 2.22 Aan de basis van de geul ligt een laag klei behorende tot de Formatie van Oosterhout



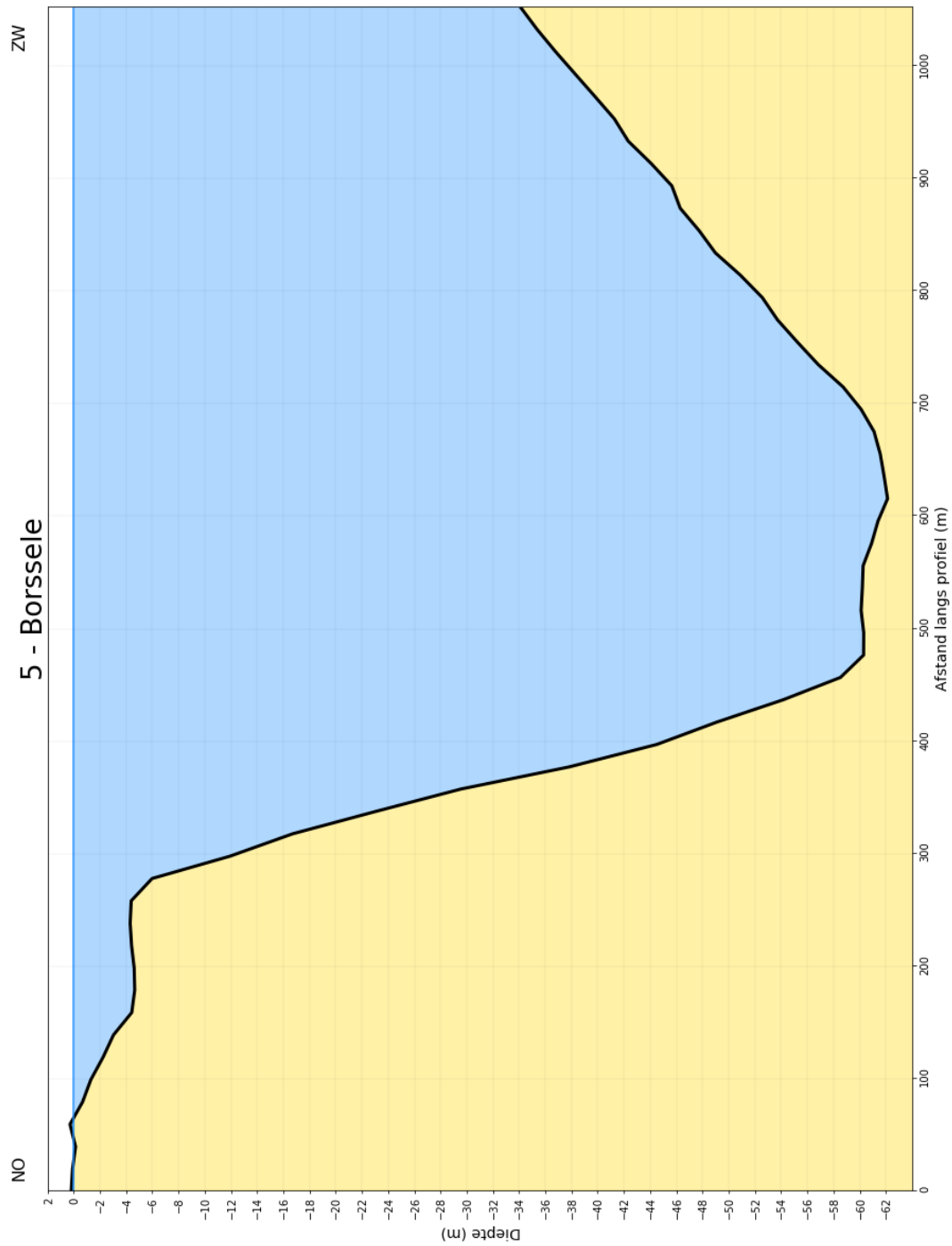
Figuur 2.23 De twee plateaus worden in diepte beperkt door de aanwezigheid van stevige klei uit het Laagpakket van Boom en/of de Eem formatie.



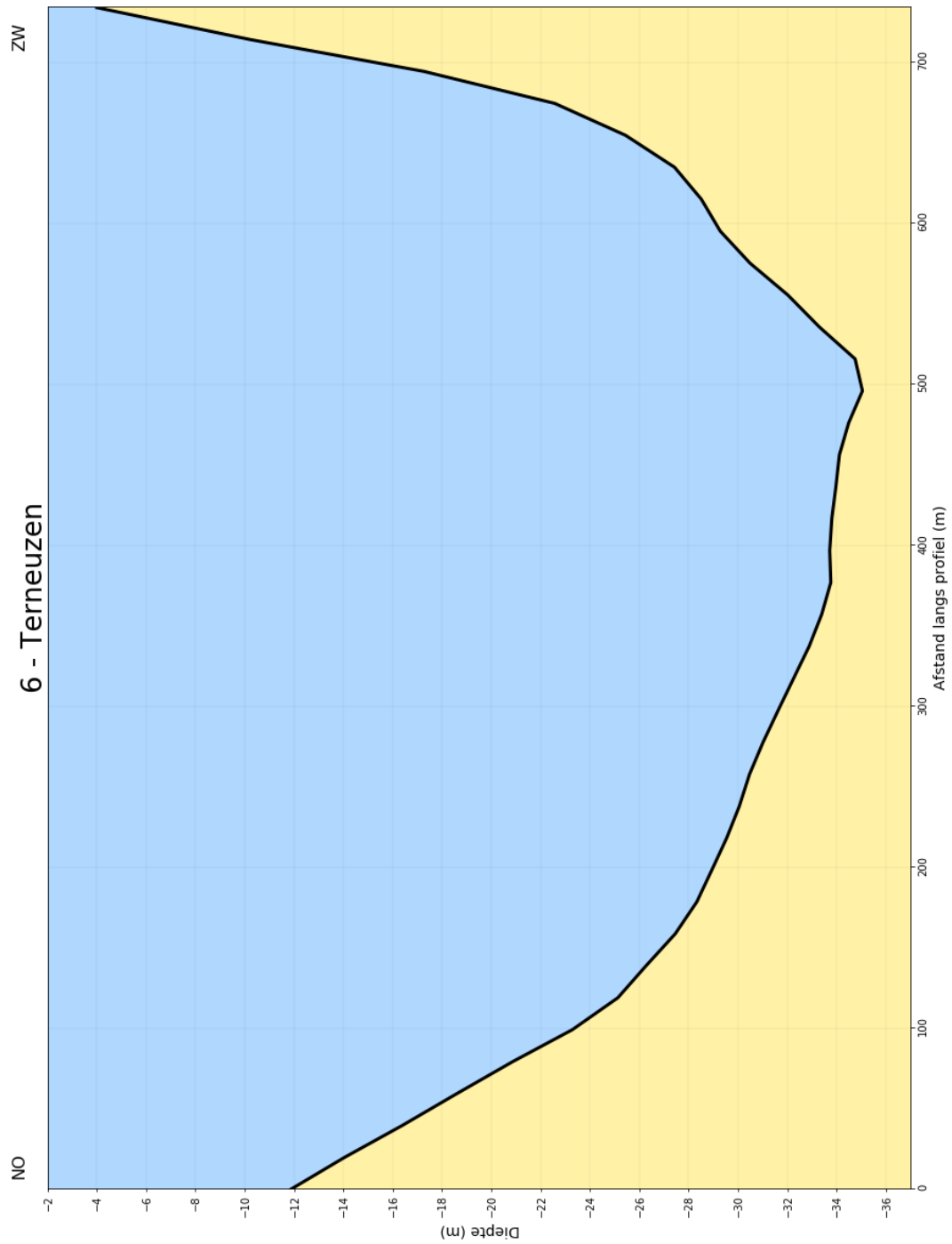
Figuur 2.24 Aan het oppervlak van de vlakke geulbodern ligt stevige klei uit het Laagpakket van Boom.



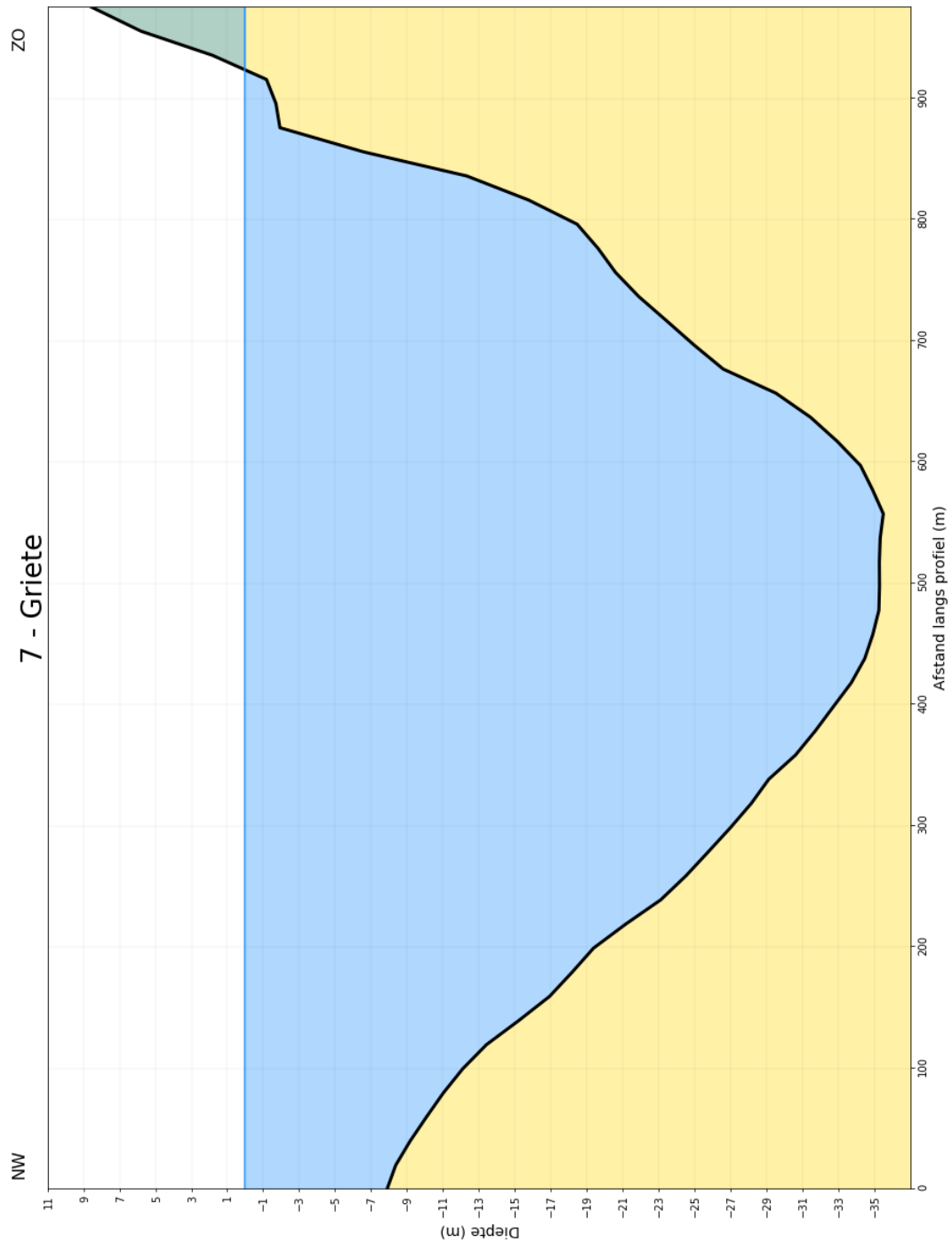
Figuur 2.25 Ook hier is het Laagpakket van Boom verantwoordelijk voor het beperken van erosie van de geulbodem.



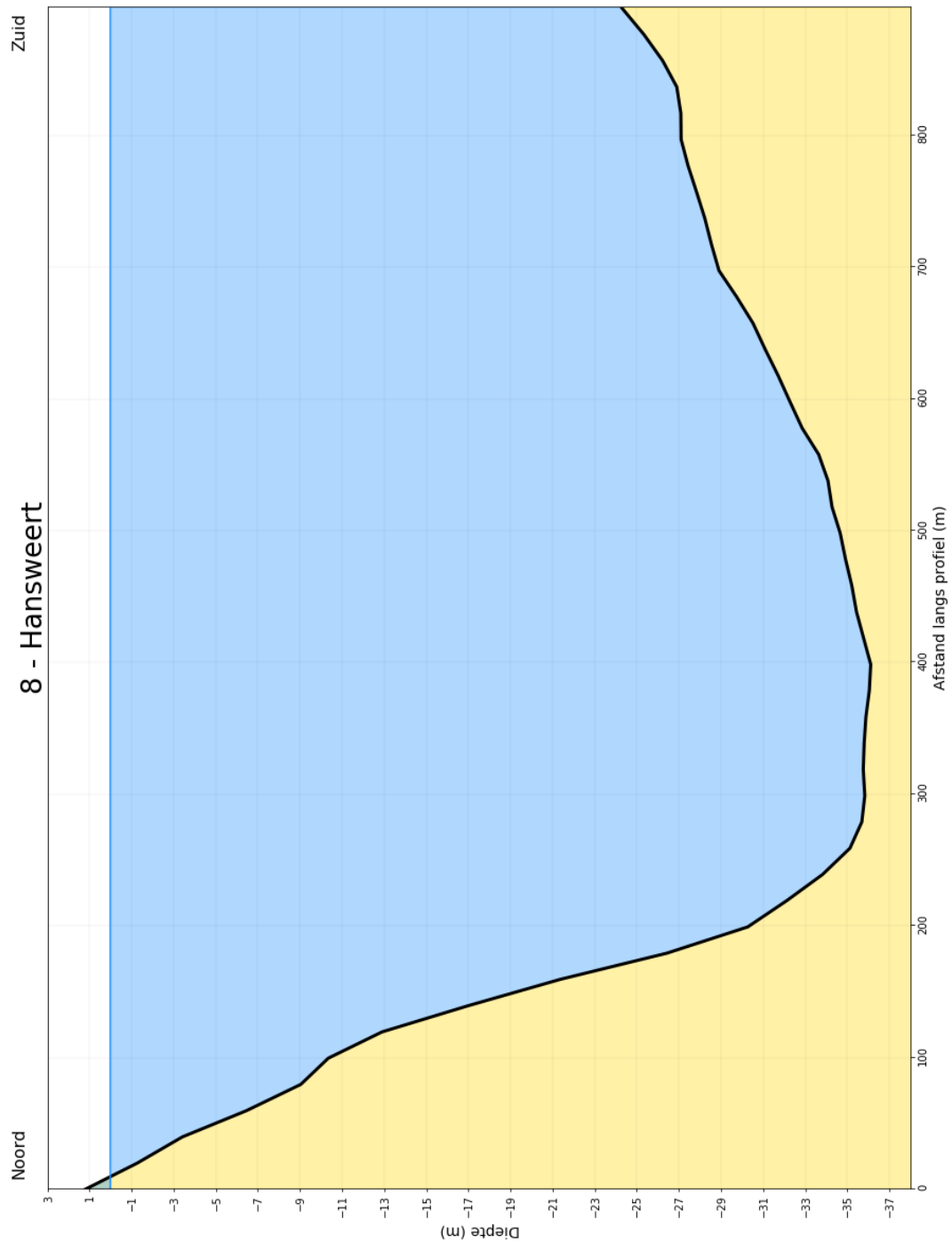
Figuur 2.26 Op een diepte van 60 m -NAP is de geul hier op het Laagpakket van Boom gestuit



Figuur 2.27 Aan de basis van de geul ligt een laag klei behorende tot het Laagpakket van Boom



Figuur 2.28 Aan de basis van de geul ligt een laag klei behorende tot het Laagpakket van Boom.



Figuur 2.29 Aan de basis van de put van Hansweert ligt een erosie-resistente laag klei van de Formatie van Oosterhout

3 Aanbevelingen

De in hoofdstuk 2 beschreven locaties waar de geulmorfologie aanwijzingen geeft voor de invloed van erosie-resistente lagen zijn de meest in het oog springende. De resolutie van de bathymetrie (20x20 m) maakt het onmogelijk om relatief kleinschalige steilwanden en plateaus te onderscheiden en verwacht mag worden dat een bathymetrische dataset van hogere resolutie zal leiden tot de identificatie van meer locaties waar geologie een sturende factor is. Beseft moet blijven worden dat ondergrondgegevens om de invloed van geologie te bevestigen vaak ontbreken. Aanbevolen wordt daarom om bij toekomstig grondonderzoek in de Waddenzee, voor wat dan reden dan ook, ook rekening te houden met bovenstaande locaties en gericht grondonderzoek in te plannen.

Wat kan men verder met bovenstaande informatie? Het beschreven onderzoek is uitgevoerd om de opgedane kennis over de invloed van erosie-resistente lagen op de geulmorfologie te gebruiken om locaties te identificeren, feitelijk zonder boringen, waar geologie mogelijk een rol speelt. De werkwijze is succesvol gebleken en verschillende locaties zijn geïdentificeerd. Een volgende stap zou kunnen zijn om de geulmorfologie in de laatste decennia op deze locaties te analyseren en te vergelijken met nabijgelegen delen van dezelfde geul die ogenschijnlijk niet door geologie beïnvloed worden. Op die manier wordt verder inzicht verkregen in de invloed van geologie op migratiesnelheid en geulvorm. Alleen door een toename van inzicht kan deze invloed uiteindelijk ingebed worden in modellen als Delft3D en kan geulgedrag over termijn van jaren-decennia beter voorspeld worden. Recent onderzoek laat zien dat het mogelijk is om erosie-resistente lagen op een geologische manier binnen Delft3D te gebruiken (Xu, 2019). In de komende jaren zou hierop voortgeborduurd moeten worden.

Ten slotte vormt bovenstaand onderzoek een extra informatiebron voor de beheerders van de Waddenzee. Het kweekt begrip over het gedrag van de geulen, wat nuttig is bij het interpreteren van geulgedrag en het plannen van bestortingen en/of onderwatersuppleties. Het laat zien dat geologie op veel plaatsen een rol speelt, de opbouw van de ondergrond vaak relatief slecht bekend is, en dat het dus loont om extra grondonderzoek uit te voeren op locaties waar beheersvragen spelen. Daarnaast vormt de kaart met erosie-resistente lagen een nuttig informatiemiddel dat mensen bewust maakt van de invloed van geologie en een startpunt voor verdere discussie.

4 Referenties

- Cohen, K.M., Stouthamer, E., Pierik, H.J., Geurts, A., 2012. Digitaal Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas Delta / Rhine-Meuse Delta Studies' Digital Basemap for Delta Evolution and Palaeogeography. Dept. Physical Geography. Utrecht University. Digital Dataset.
- Forzoni, A., Hijma, M.P., Vermaas, T., 2018. Geologie en morfodynamiek getijdengeulen - Casus Borndiep, Zuidwest Ameland, Deltares report 11202190-001-ZKS-0002, Utrecht, The Netherlands, 26 pp.
- Hijma, M.P., Cohen, K.M., Hoffmann, G., Van der Spek, A.J.F., Stouthamer, E., 2009. From river valley to estuary: the evolution of the Rhine mouth in the early to middle Holocene (western Netherlands, Rhine-Meuse delta). *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw*, 88 (1), 13-53.
- Hijma, M.P., 2017a. 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.
- Hijma, M.P., 2017b. Geology of the Dutch Coast, Deltares report 1220040-007-ZKS-0003, Utrecht, The Netherlands, 43 pp.
- Medusa, 2010. Interpretatie geologische opbouw vaarweg Eemshaven-Noordzee, Medusa rapport 2010-P-310V1pp.
- Pierik, H.J., Busschers, F.S., Kleinhans, M.G., 2019. De rol van resistente lagen in de historische morfologische ontwikkeling van het Eems-Dollard estuarium vanaf de 19e eeuw, Departement Fysische Geografie, Universiteit Utrecht. Conceptrapport i.o. Rijkswaterstaat WVL ten behoeve van het ED2050 programmapp.
- Pierik, H.J., Leuven, J.R.F.W., Busschers, F.S., Hijma, M.P., Kleinhans, M.G., 2019 (verwacht). Depth-limiting resistant layers fix dimensions and positions of estuary channels and bars.
- Van Alphen, J.S.L.J., Damoiseaux, M.A., 1987. A morphological map of the Dutch shoreface and adjacent part of the continental shelf (1:250.000), Rijkswaterstaat - Directie Noordzee NZ-N-87.21/MDLK-R-87.1822 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.
- Van Heteren, S., Van der Spek, A.J.F., 2008. Waar is de delta van de Oude Rijn? Grondboor en Hamer, 3/4, 72-76 (in Dutch).
- 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.
- Xu, S., 2019. The effect of erosion-resistant layers in the subsurface on the morphological evolution of the schematized Ameland inlet system. M.Sc.-thesis, Utrecht University/Deltares.