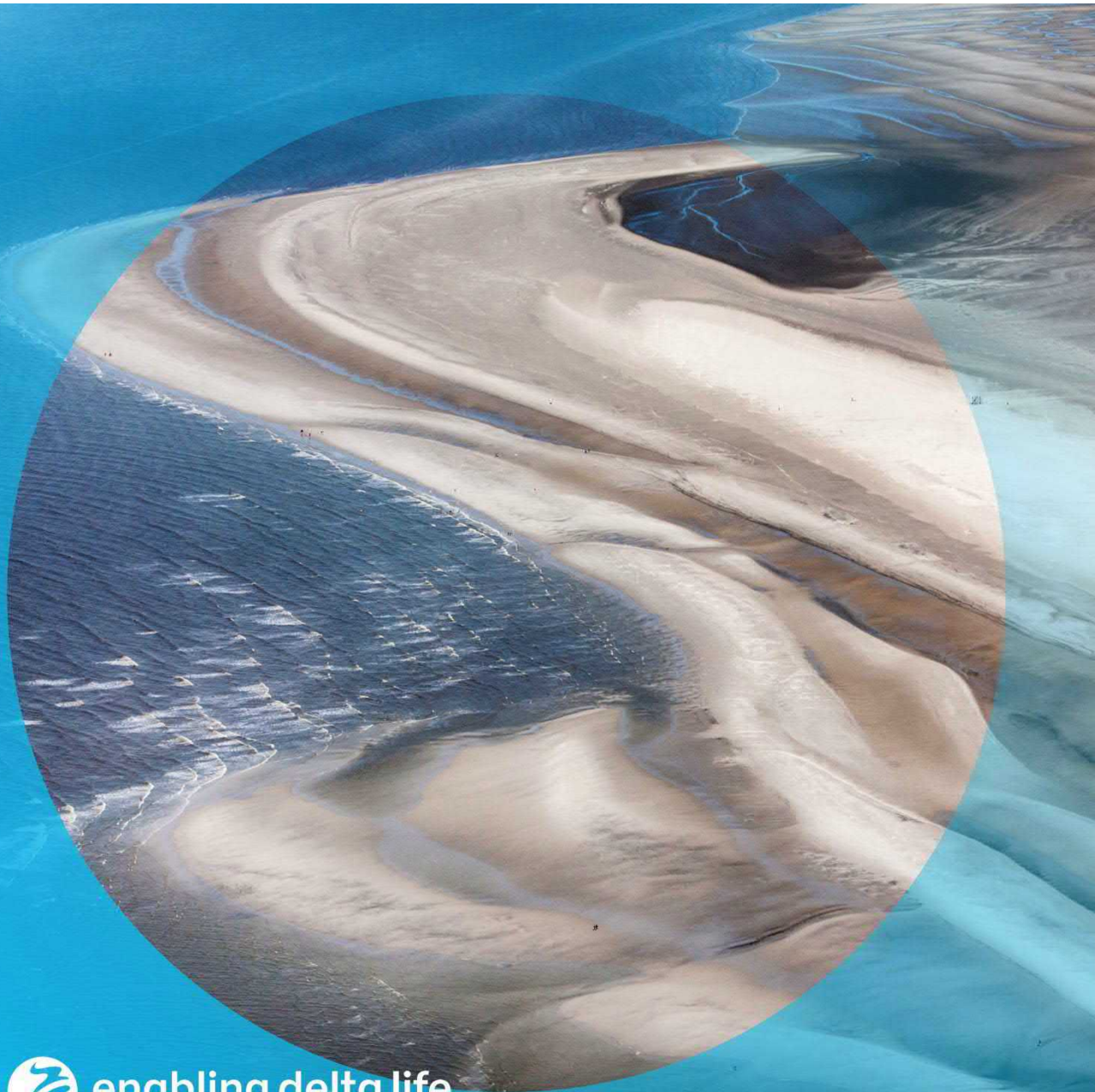


Moeilijk erodeerbare lagen in de Waddenzee en Westerschelde

Kartering en effect of morfologische ontwikkeling van geulen



Moeilijk erodeerbare lagen in de Waddenzee en Westerschelde
Kartering en effect op morfologische ontwikkeling van geulen

Auteur(s)

Erik van Onselen

Moeilijk erodeerbare lagen in de Waddenzee en Westerschelde

Kartering en effect of morfologische ontwikkeling van geulen

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
---------------	--

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	01-10-2020
Projectnummer	11205236-002
Document ID	11205236-002-ZKS-0005
Pagina's	97
Status	Definitief

Auteur(s)

	Erik van Onselen	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	 Erik van Onselen	 Marc Hijma	 Toon Segeren	

Samenvatting

Het voorliggende rapport geeft een overzicht van drie jaar werk aan de kartering en invloed van erosie-resistente lagen in de Waddenzee en Westerschelde. Het doel van het onderzoek is om inzichtelijk te maken waar langs de kust de ontwikkeling gestuurd wordt door erosie-resistente lagen en om verwachtingen in morfologische ontwikkelingen als gevolg daarvan in beeld te krijgen. Het rapport bestaat uit drie delen:

- (1) het karteren van erosie-resistente lagen, uitgevoerd in 2018
- (2) het identificeren van in totaal 23 locaties (15 in de Waddenzee, 8 in de Westerschelde) waar erosie-resistente lagen invloed hebben (gehad) op de morfologie van geulen, uitgevoerd in 2019 en
- (3) het analyseren van historische morfologische ontwikkeling op deze locaties, uitgevoerd in 2020.

In Hijma (2017a) wordt een conceptueel model beschreven voor de morfologische ontwikkeling van een getijdengeul in aanwezigheid van erosie-resistente lagen. Hierin wordt gesteld dat als de geul met zijn bodem een dergelijk laag raakt, de geul u-vormig en relatief breed wordt. En dat als de laag zich in de geulwand bevindt er een trapsgewijs wandprofiel ontstaat. In het laatste geval werd tevens verondersteld dat de laterale migratiesnelheid van een geul afneemt. Om dit model te kunnen toetsen zijn vaklodingdata van 1926 tot 2019 gebruikt om de historische morfologische ontwikkeling in kaart te brengen. Dit is gedaan voor de 23 locaties in de Waddenzee en Westerschelde waarvan op basis van geulvorm werd vermoed dat er sprake was van een erosie-resistente laag. De analyse van deze historische ontwikkeling bevestigt de ontwikkeling van u-vormige geulen en getrapte geulwanden uit het conceptuele model van Hijma in geval van aanwezigheid van erosie-resistente lagen.

Het onderzoek heeft ook laten zien dat het conceptuele model verder verfijnd kan worden. Er zijn namelijk vier locaties in de Waddenzee gevonden waar de aanwezigheid van erosie-resistente lagen in de wand leidt tot sterk verschillende erosiesnelheden met de diepte. Hierbij neemt typisch de snelheid waarmee de geulwand erodeert af onder de erosie-resistente laag, terwijl erboven deze snelheid juist toeneemt. Dit bovenste deel van de geulwand kan hierdoor sneller migreren in vergelijking met het onderste deel. Aan het wateroppervlak betekent dit dat de geul versneld breder wordt en dat naastgelegen zandplaten of de kustlijn sneller zullen eroderen.

Op veel locaties waar erosie-resistente lagen in de Westerschelde vermoed worden is de geul nauwelijks van vorm veranderd tussen 1926 en 2019 en op acht locaties in de Westerschelde is de geul op z'n plek blijven liggen. Op veel plekken is de geulbodem in de Westerschelde in contact met een erosie-resistente laag, waardoor hier verdere verdieping van de geul wordt vertraagd. Dit leidt niet tot het versneld verbreden van de geul, zoals in de Waddenzee het geval kan zijn.

Een belangrijke kanttekening bij de resultaten van dit onderzoek is dat de morfologische ontwikkelingen niet alleen afhankelijk zijn van de aanwezige erosie-resistente lagen. De kombergingsgebieden, de zeegaten en buitendelta's, zijn dynamische gebieden die vaak een cyclisch gedrag vertonen in het activeren, verleggen en verlaten van getijdegeulen. De precieze relatie tussen deze grootschalige ontwikkelingen en de aanwezigheid van erosie-resistente lagen kon op basis van de in dit rapport gebruikte bathymetrische data niet worden afgeleid, maar zal het onderwerp zijn van toekomstige studies waarbij de verkregen inzichten gecombineerd worden met model simulaties.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	7
1.1	Erosie-resistente lagen en morfologie	7
1.2	Aanleiding voor dit onderzoek	7
1.3	Leeswijzer	8
2	Beschrijving en kartering erosie-resistente lagen	9
2.1	Zuidwestelijk kustgebied	9
2.2	Centraal kustgebied: Hollandse kust	11
2.3	Westelijke wadden: Texel-Vlieland-Terschelling	12
2.4	Oostelijke wadden: Ameland-Schiermonnikoog-Rottumeroog	13
2.5	Eems-Dollard	14
3	Methoden	16
3.1	Onderzoeksgebieden	16
3.2	Data en methoden (identificatie harde lagen)	16
3.3	Data en methoden (morfologische ontwikkeling)	16
3.3.1	Vaklodgingen	16
3.3.2	Verwerking van rasterdata	17
3.3.3	Visualisatie en analyse	18
4	Resultaten	20
4.1	Achtergrond	20
4.2	Resultaten Waddenzee – Gebied A	20
4.2.1	Locatie 1 - Malzwin	22
4.2.2	Locatie 2 – Texelstroom	25
4.2.3	Locatie 3 - Doove Balg	28
4.2.4	Locatie 4 – Robbengat	31
4.3	Resultaten Waddenzee - Gebied B	34
4.3.1	Locatie 1 – Vlieree	35
4.3.2	Locatie 2 - Noord Meep	38
4.3.3	Locatie 3 - Oost Meep	41
4.3.4	Locatie 4 - West Meep	44
4.3.5	Locatie 5 – Vliestroom	47
4.4	Resultaten Waddenzee - Gebied C	50
4.4.1	Locatie 1 – Borndiep	51
4.4.2	Locatie 2 & 3 – Dantziggat	54
4.4.3	Locatie 4 & 5 – Zoutkamperlaag	59
4.4.4	Locatie 6 – Boschgat	64
4.5	Resultaten Westerschelde	67

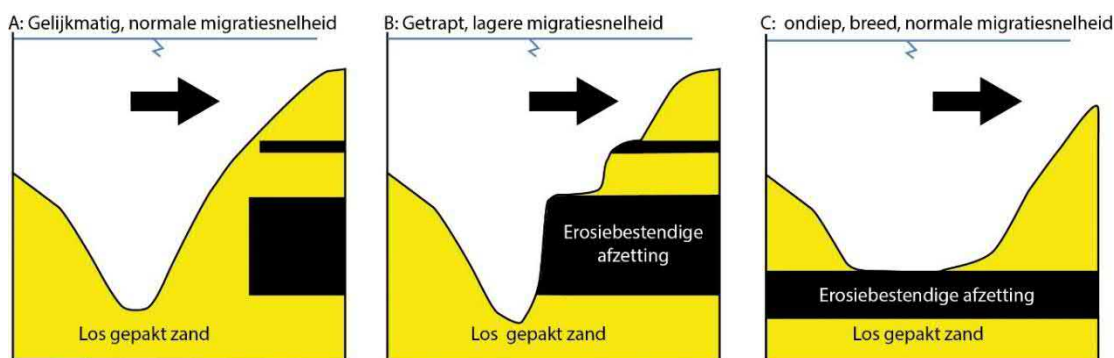
4.5.1	Locatie 1 – Wespkapelle	68
4.5.2	Locatie 2 – Breskens	71
4.5.3	Locatie 3 – Vlissingen	74
4.5.4	Locatie 4 – Ritthem	77
4.5.5	Locatie 5 – Borselle	80
4.5.6	Locatie 6 – Terneuzen	83
4.5.7	Locatie 7 – Griete	86
4.5.8	Locatie 8 – Hansweert	89
5	Discussie en conclusies	92
5.1	Verandering van vorm	92
5.2	Versnelling/vertraging geulwandmigratie	92
5.3	Overige effecten	93
5.4	Verschil Westerschelde en Waddenzee	93
5.5	Morfologie op grotere schaal	93
5.6	Verbeterde detectie erosie-resistente lagen	94
	Referenties	95

1 Introductie

1.1 Erosie-resistente lagen en morfologie

De morfologie van natuurlijk gevormde (vaar)geulen in de Waddenzee, Westerschelde, Eems-Dollard en langs de Hollandse Kust wordt mede bepaald door de erosiegevoeligheid van de bodem waarin de geul zich verticaal insnijdt en lateraal in beweegt. De geologie is om die reden onlosmakelijk verbonden aan de morfologie en morfologische ontwikkeling van geulen en is om die reden het onderwerp van verschillende onderzoeksprojecten.

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 Pleistocene 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).



Figuur 1.1. Invloed van erosie-resistente afzettingen op de morfologie en migratiesnelheid van een geul (Hijma, 2017a).

1.2 Aanleiding voor dit onderzoek

In deelproject 3, onderdeel A1 van het meerjarenprogramma BenO Kust 2020-2024 is kennis van de ondergrond in relatie tot de beïnvloeding van (vaar)geulen opgenomen. Dit onderdeel is een continuering van onderdeel 4C1 uit het voorgaande meerjarenplan. In het nieuwe meerjarenprogramma is het doel van dit deelproject als volgt gesteld:

“Doel is inzichtelijk te maken waar langs de kust de ontwikkeling gestuurd wordt door erosie-resistente lagen en om verwachtingen in morfologische ontwikkelingen als gevolg daarvan in beeld te krijgen.”

Binnen de voorganger van dit deelproject hebben de activiteiten van Deltares zich toegespitst op het karteren van erosie-resistente lagen op basis van geologische informatie en zijn in 2019 de belangrijkste locaties geïdentificeerd waar geulen in de Waddenzee en Westerschelde reeds beïnvloed worden door deze harde lagen. Parallel hieraan is gewerkt aan het toevoegen van harde lagen aan Delft3D modellen van het Borndiep en de Westerschelde (Xu, 2019). Daarnaast is, los van dit KPP-onderdeel, op basis van geologische modeldata en bathymetrie de ligging van harde lagen ten opzichte van geulen in de Westerschelde inzichtelijk gemaakt (Van der Vegt et al., 2020).

In 2020 is verder gewerkt aan het analyseren van de historische morfologische ontwikkeling op de reeds geïdentificeerde locaties in de Westerschelde en de Waddenzee. Inzicht in historische gedraging van geulen onder de invloed van erosie-resistente lagen kan gebruikt worden om een algemeen inzicht te krijgen in zowel lokale en grootschalige effecten op morfologische ontwikkeling van het gebied. Deze kennis kan gebruikt worden voor gerelateerde beleids- en onderhoudsvraagstukken.

De in 2019 geïdentificeerde locaties waren gebaseerd op het handmatig zoeken naar plekken waar in de bathymetrie een vlakke geulbodem of plateau in de geulwand voorkwam, twee eigenschappen die duiden op de invloed van een niet of moeilijk erodeerbare laag. Door het gebruik van historische data voor morfologische analyse is deze methode verder verbeterd in 2020 en is een kaart geproduceerd van zoeklocaties voor potentieel actieve erosie-resistente lagen.

Het voorliggende rapport is een verzameling van drie jaar werk en bestaat uit de volgende onderdelen:

1. Kartering van erosie-resistente lagen. Uitgevoerd in 2018, geactualiseerd in 2019. Oorspronkelijk opgeleverd als memo. In dit rapport opgenomen in hoofdstuk 2.
2. Identificatie van geulen op basis van hellingkaarten. Uitgevoerd in 2019. Oorspronkelijk opgeleverd als memo. Resultaten hiervan zijn in dit rapport opgenomen in hoofdstuk 4.
3. Analyse morfologische ontwikkeling op de locaties uit onderdeel 2. Nieuw werk KPP B&O kust onderdeel 3A1. Uitgevoerd in 2020. Resultaten hiervan zijn in dit rapport tevens opgenomen in hoofdstuk 4.

1.3 Leeswijzer

Dit rapport is ingedeeld volgens de hierboven genoemde onderdelen. In hoofdstuk 2 worden de erosie-resistente lagen kort beschreven en gekarteerd (onderdeel 1). In hoofdstuk 3 worden zowel de methode om geulen te herkennen die worden beïnvloed door erosie-resistente lagen (bovenstaand onderdeel 2), als de methode die gebruikt is voor het analyseren van de morfologische ontwikkeling beschreven (onderdeel 3). In hoofdstuk 4 worden in totaal 23 locaties aangewezen waar invloed van erosie-resistente lagen vermoedelijk het geval is (onderdeel 2) en wordt het effect daarvan op morfologische ontwikkeling beschreven (onderdeel 3). Aan het eind van dit rapport worden algemene conclusies en aanbevelingen gegeven.

2 Beschrijving en kartering 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 2.1) 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 1.3), 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 Borndiep 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.

2.1 Zuidwestelijk kustgebied

Gebied	Omschrijving
ZW1 - Westerschelde - Wielingen - Westgat	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). 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.
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 - Vlake v/d Raan	De Vlake 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 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 ontkrachten.
ZW5 - Geulen Oosterschelde	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-Glaciale/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.

2.2 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 Nieuw 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).

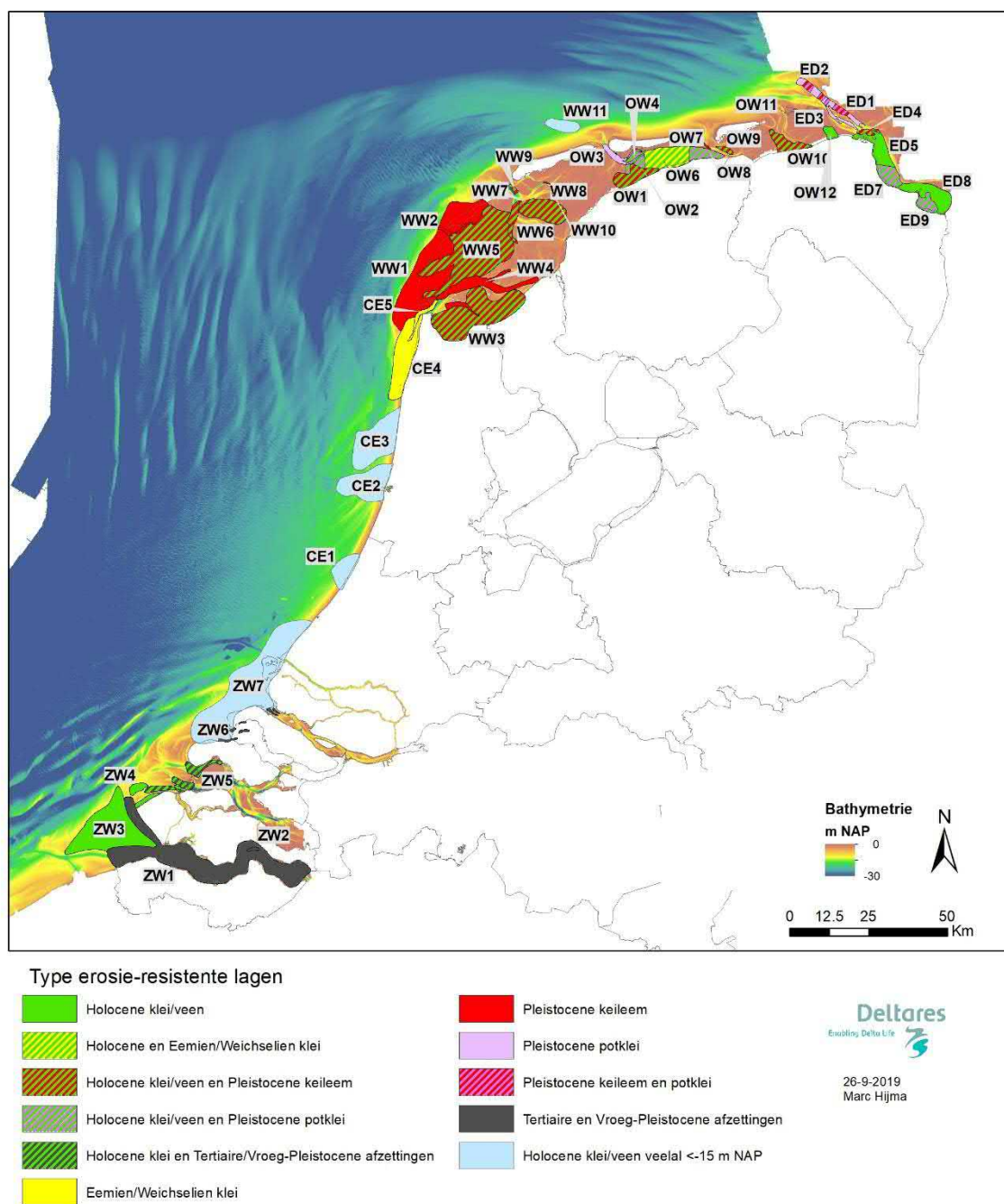
Gebied	Omschrijving
WW1 - Vooroevers Texel en Vlieland	Keileem is aanwezig boven de -15 m NAP aan zowel de Noordzee- als de Waddenzeekant van Texel en Vlieland.
WW2 - Getijdengaten Texel en Vlieland	De top van de keileem ligt hier naar verwachting rond de -10 m NAP, een diepte waar beneden de geulbodems 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 - Vlake 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.
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 kleiig opgevuld zijn. Dit volgt uit seismische profielen (Ad van der Spek, pers. comm.).

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 geulbodem 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), Bortel (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 Bortel, 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 metersdikke kleilagen. Ook in het Holocene pakket komen kleilagen voor, soms is ook het basisveen aanwezig.
OW7 - Wierumerwad	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.
OW8 - Zoutkamperlaag	De aanwezigheid van erosie-resistente lagen wordt vermoed door de aanwezigheid van een breed plateau op -15 m NAP. Er zijn geen boring 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.
OW9 - Brakzand	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.

OW10 - Groningerwad	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.
OW11 - Rottumerplaat	Er is weinig informatie bekend over de diepere ondergrond van dit eiland. In 2016 is bij een handboring op 11 m diepte keileem aangetroffen.
OW12 - Uithuizerwad	Tussen -12/-13 m en -15/-20 m NAP komen dikke Holocene klei- en veenlagen voor.

2.5 Eems-Dollard

Gebied	Omschrijving
ED1 - Oude Westereems	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.
ED2 - Westereems	Er zijn weinig boringen beschikbaar, maar wel seismische lijnen (Medusa, 2010). In deze delen van de Westereems ligt regelmatig potklei aan de basis.
ED3 - Westereems	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.
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.



Figuur 2.1 Kaart met de verbreiding van erosie-resistente lagen langs de Nederlandse Kust

3 Methoden

3.1 Onderzoeksgebieden

Het onderzoeksgebied omvat de Waddenzee (§3.3) en de Westerschelde (§3.4). De Eems-Dollard en het buitengaats gebied zijn vooralsnog 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. Borndiep, Zoutkamperlaag en Boschgat.

3.2 Data en methoden (identificatie harde lagen)

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 3.1). 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 **Error! Reference source not found.**) zijn in dit rapport 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.

3.3 Data en methoden (morfologische ontwikkeling)

3.3.1 Vaklodingen

Voor de analyse van historische morfologische ontwikkeling zijn vaklodingen gebruikt. Vaklodingen zijn sinds medio jaren 1920 beschikbaar voor zowel zoute als zoete wateren. In de Waddenzee zijn dit singlebeam metingen en recenter multibeam. In de Westerschelde gaat het om singlebeam metingen met een raai afstand van 100 m in het oostelijke deel en 200 m in het westelijke deel. Tegenwoordig wordt hier een combinatie van singlebeam en laseraltimetrie voor droogvallende delen gebruikt. De data wordt in gedefinieerde vakken roulerend opgenomen. Dit gebeurt in principe in cycli van 1x per 3 jaar of 1x per 6 jaar, echter was met name voor de jaren '70 de frequentie veel lager. Bijvoorbeeld: in het Borndiep, één van de onderzoekslocaties in dit rapport, zijn voor de jaren '70 enkel metingen van 1926 en 1948 beschikbaar. Pas vanaf 1971 werd hier ongeveer om de 6 jaar diepte ingemeten. De bathymetrische data van een vakloding wordt samengesteld tot een 20x20 m grid. In dit project zijn alle beschikbare vaklodingen tussen 1926 en 2019 gebruikt.

3.3.2 Verwerking van rasterdata

Als gevolg van de cyclische opname binnen gedefinieerde vakken zijn de vaklodingen onregelmatig verspreid in zowel ruimte als tijd. Om een goed beeld te krijgen van morfologische ontwikkeling is het van belang om de individuele rasters naar een regelmatige tijdas te interpoleren, waarin alle missende jaren voor een gegeven gebied zijn aangevuld door middel van lineaire interpolatie tussen de laatst bekende en eerstvolgende dieptemeting. Tevens zijn naast helling ook de minimum bathymetrie en verticale snelheid belangrijke afgeleiden.

De rasters zijn in eerste instantie herschikt naar hetzelfde grid en coördinatenstelsel. Vervolgens is de data ondergebracht in een enkele dataset. Vanuit deze dataset zijn de volgende afgeleide rasterdata geproduceerd voor elke 20x20 m cel waar ooit minimaal twee metingen zijn verricht:

1. **Geïnterpoleerde bathymetrie (m)**

De bathymetrische data is lineair geïnterpoleerd tussen bekende metingen, waardoor missende jaren zijn aangevuld. Er is tevens een interpolatie van om de 3 maanden berekend voor het creëren van vloeiende animaties.

2. **Minimum bathymetrie (m)**

Dit geeft het laagste niveau aan dat ooit is bereikt en kan een indicator zijn van erosie-resistente lagen als deze ervoor hebben gezorgd dat het hier nooit dieper kon worden.

3. **Verskil laatste meting en minimum bathymetrie (m)**

Dit geeft het hoogteverschil tussen de laatst gemeten diepte (de 'huidige' diepte) en de minimale diepte die daar ooit gemeten is. Dit is een belangrijke indicator voor erosie-resistente lagen die momenteel 'actief' zijn. Hier zal de huidige bodemligging ongeveer gelijk zijn aan de minimum bathymetrie (als dat niet het geval is ligt er namelijk sowieso recent afgezet en los gepakt sediment op de bodem).

4. **Verticale snelheid (dz/dt) (m/dag)**

Met verticale snelheid wordt bedoeld: de gemiddelde snelheid in meter per dag waarmee de bodemhoogte veranderd is. Dit is gebaseerd op de geïnterpoleerde bathymetrische data. Merk op dat gezien de tijd van soms meerdere jaren tussen metingen alleen bodemhoogteveranderingen op de tijdschaal van jaren geanalyseerd kunnen worden. De migratie van een geul of plaat is goed uit deze data te halen, maar relatief snel bewegende ribbelvormen bijvoorbeeld niet.

- a. **Gemiddelde verticale snelheid van de afgelopen 10 jaar (m/dag)**

De gemiddelde verticale snelheid in het recente verleden kan een indicatie zijn van erosie-resistente lagen die momenteel 'actief' zijn. Op een dergelijke locatie wordt verwacht dat er lichte erosie (verdieping) heeft plaatsgevonden. Sedimentatie of juist zeer sterke erosie duiden erop dat er geen sprake is van een erosie-resistente laag.

- b. **Maximale verticale erosiesnelheid (m/dag)**

Daar waar in een geul de verticale erosiesnelheid altijd laag is geweest, zou het zo kunnen zijn dat dit veroorzaakt is door een erosie-resistente laag.

5. **Helling (°)**

Voor onderdeel 2 (hoofdstuk 3) is tot nu toe alleen de helling gebruikt voor het opsporen van erosie-resistente lagen. De helling kan een indicatie zijn als een erosie-resistente laag ervoor zorgt dat er een vlak plateau in de geulwand of op de geulbodem ontstaat.

6. **Hellingsverandering (°/m)**

De mate waarin de helling veranderd is kan op de volgende manieren een indicatie zijn van morfologie die verband houdt met een erosie-resistente laag: (1) geen hellingsverandering in combinatie met een lage helling duidt op een plateau; en (2) een zeer hoge waarde van hellingsverandering wordt verwacht op plekken waar een steilrand voor een abrupte overgang zorgt.

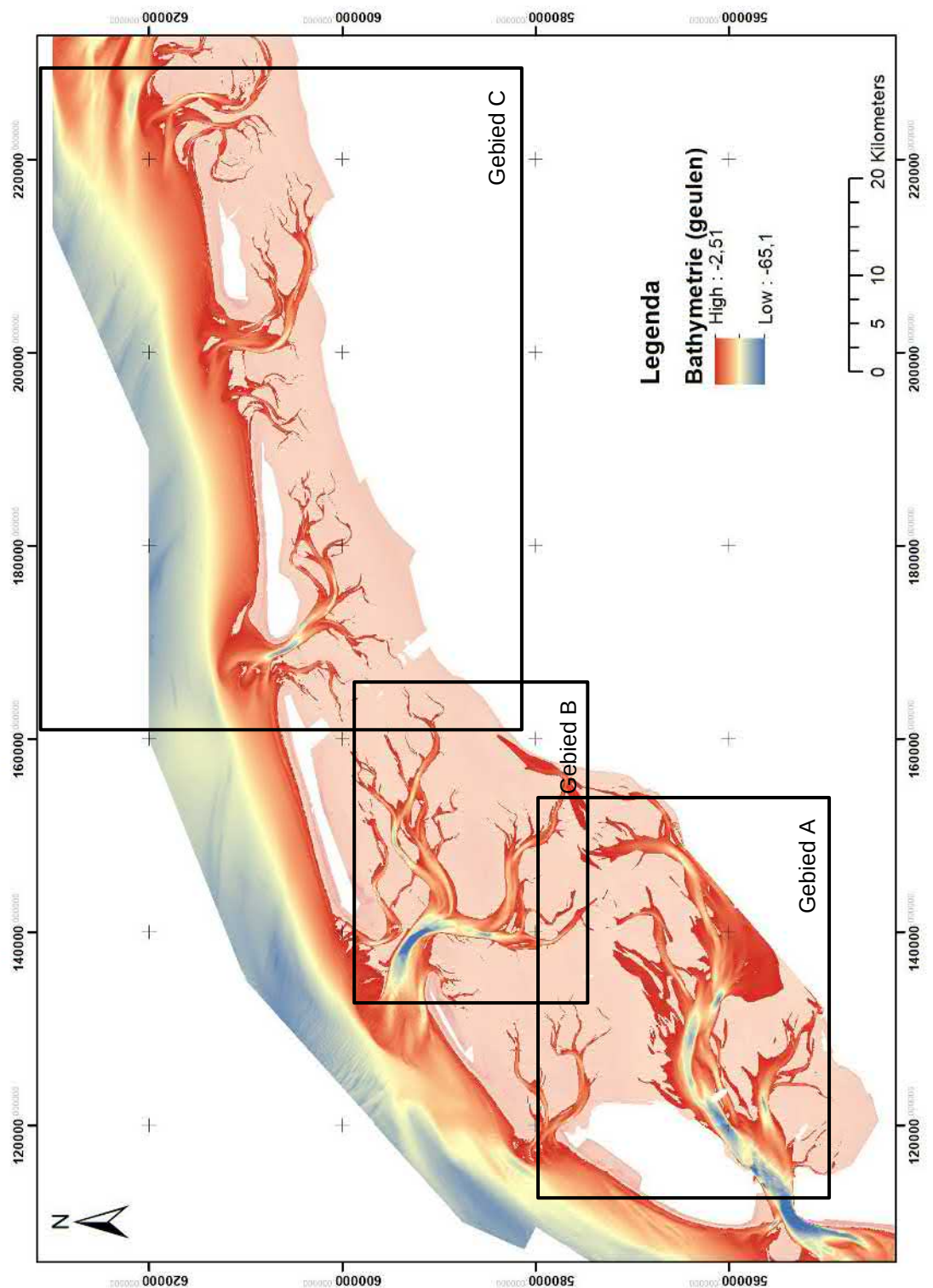
Het verwerken van vaklodingen tot een geïnterpoleerde dataset is niet nieuw. In 2011-2012 heeft Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat reeds eenzelfde exercitie uitgevoerd, destijds gebruikmakend van OpenEarth Tools in Matlab¹. Vanwege de specifieke eisen ten aanzien van morfologische analyse en detectie van erosie-resistente lagen is voor dit project echter gekozen om gebruik te maken van de open-source Python programmeertaal voor alle databewerkingen en visualisaties. De pythonmodule die hieruit is voortgekomen is ontworpen om alle relevante bathymetrische en morfologische data af te leiden uit de ingegeven rasters (in dit geval: de vaklodingen). De module leunt sterk op bestaande pythonmodules als xarray, imod-python en rasterio (voor het werken met grote, gelabelde rasterdatasets), GeoPandas (voor het werken met vectordata), en Numpy in combinatie met Numba (voor berekeningen, zoals bv. het interpoleren en de helling bepalen).

3.3.3 Visualisatie en analyse

De hierboven genoemde afgeleide rasterdata is per gebied gevisualiseerd in een kaart. Het grote aantal (geïnterpoleerde) bathymetrische rasters is per onderzoekslocatie in de vorm van een animatie gevisualiseerd. Tevens is voor elke onderzoekslocatie de ontwikkeling langs een dwarsprofiel in beeld gebracht door middel van een figuur waar de verschillende metingen ingetekend zijn. Ook zijn er animaties gemaakt van de ontwikkeling langs het profiel. De animaties bieden een intuïtief inzicht in de morfologische ontwikkeling en zijn mede gebruikt voor het kwalitatief beschrijven van de morfologische ontwikkeling. De animaties worden apart meegeleverd met dit rapport.

Aangezien het niet mogelijk is om zonder model- en/of proefresultaten de alternatieve scenario's zonder erosie-resistente lagen te kwantificeren, is de analyse van het effect van deze lagen op de morfologische ontwikkeling kwalitatief beschreven op basis van de afgeleide rasterdata en bathymetrische profielen. De analyse focust zich op de directe omgeving van de geul in kwestie (lokale schaal).

¹ <https://publicwiki.deltares.nl/display/OET/Dataset+documentation+Vaklodingen>



Figuur 3.1. Overzicht van het onderzoeksgebied en onderverdeling daarvan. De gebieden die onder 2.5 m -NAP liggen zijn voornamelijk onderdeel van getijdengeulen.

4 Resultaten

4.1 Achtergrond

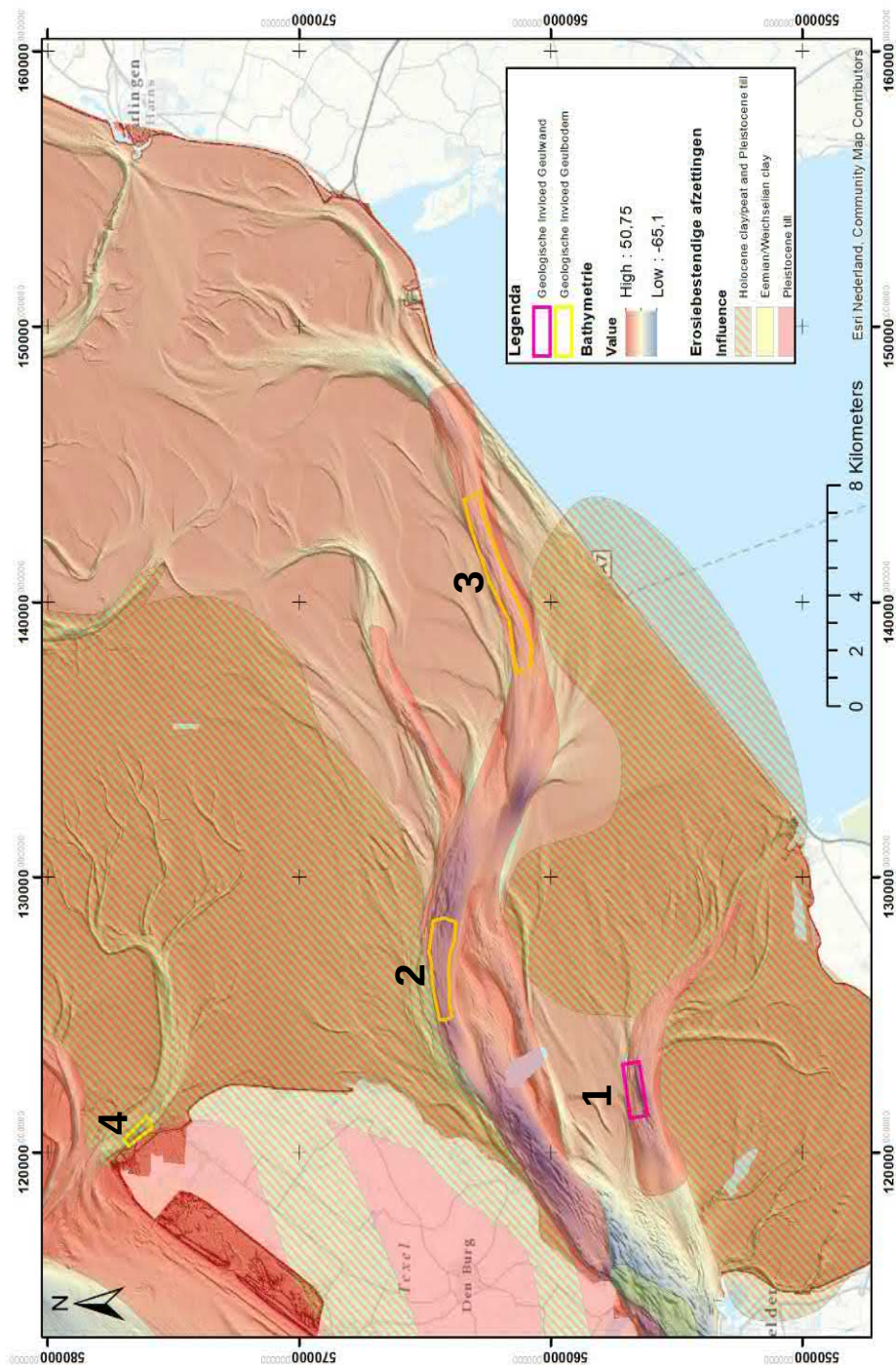
Hoofdstuk 2 van dit rapport laat zien dat op veel plaatsen langs de Nederlandse kusten erosie-resistente lagen aanwezig zijn die naar alle waarschijnlijk de morfologische ontwikkeling beïnvloeden. Er is echter slechts weinig informatie over de opbouw van de ondergrond aanwezig om dit te onderbouwen. 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. In totaal zijn er 23 locaties geïdentificeerd.

In de nieuwe onderzoekslijn voor 2020 staat de morfologische ontwikkeling van de 23 hiervoor geïdentificeerde onderzoekslocaties centraal. Dit hoofdstuk geeft tevens per onderzoekslocatie een kwalitatieve beschrijving van de historische morfologische ontwikkelingen. In een aantal gevallen die in dit hoofdstuk beschreven zijn, heeft de analyse van morfologische ontwikkeling geleid tot een aanvulling op of verbetering van de in onderdeel 2 verkregen resultaten.

4.2 Resultaten Waddenzee – 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 4.1).

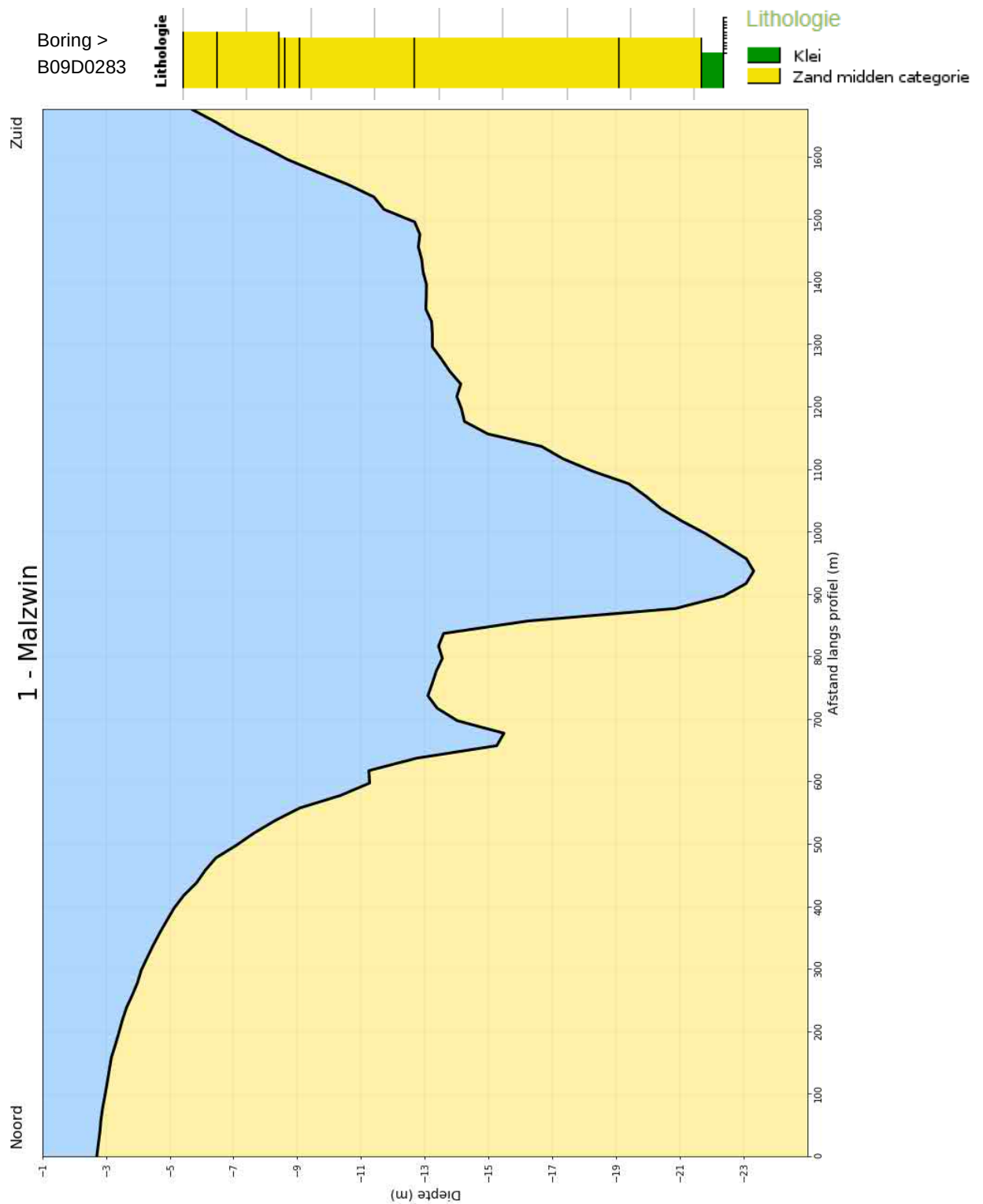


Figuur 4.1. Overzicht van locaties in gebied A. Geulwanden en -bodems waarvan vermoed wordt dat hun vorm door erosie-resistente lagen wordt bepaald zijn omkaderd. De verbreiding van erosie-resistente lagen volgens Hijma (2017a) is ook ingetekend.

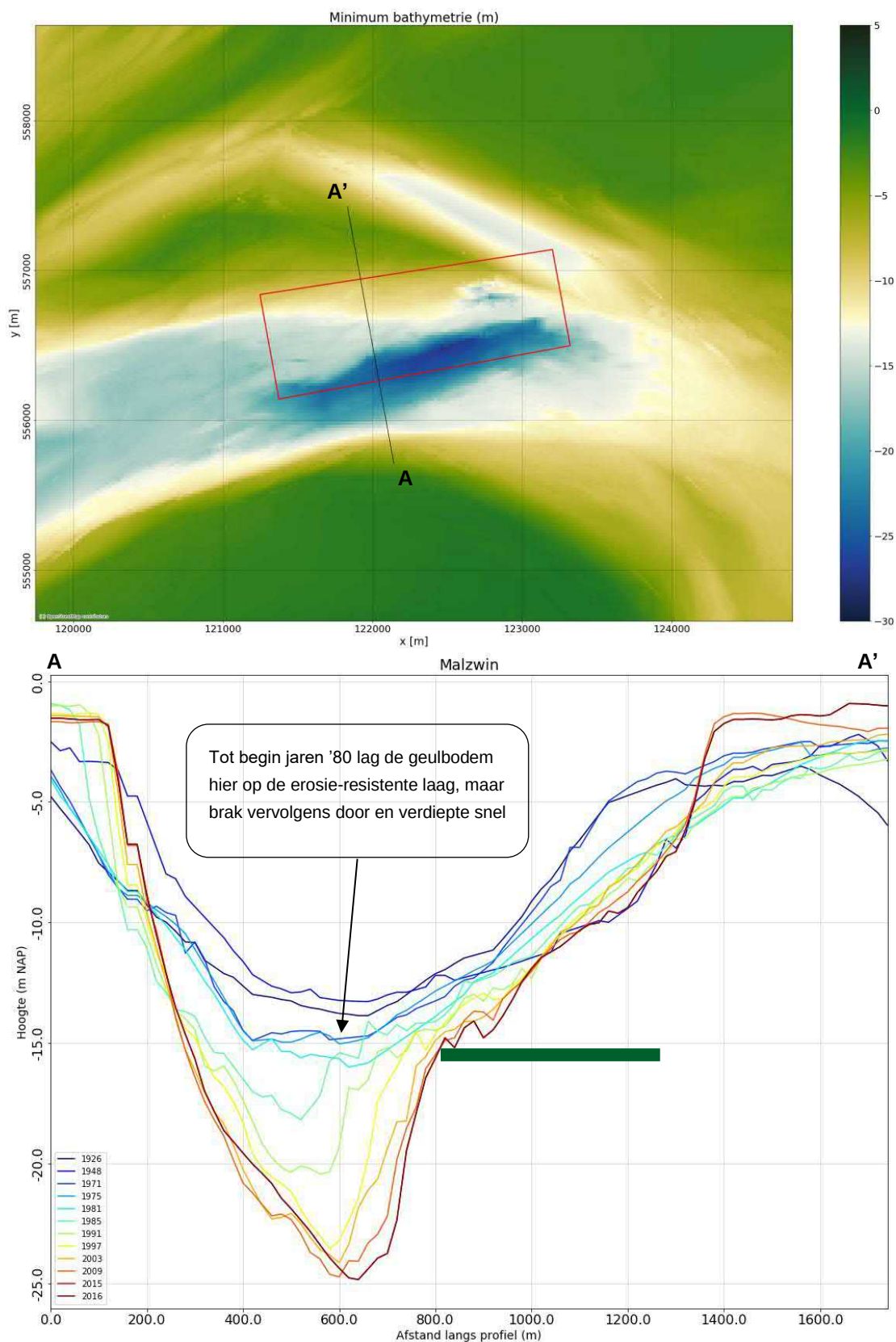
4.2.1 Locatie 1 - Malzwin

Geologie (Figuur 4.2): Er is 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).

Morfologische ontwikkeling (Figuur 4.3): Hier wordt een erosie-resistente laag op 13 m -NAP vermoed die zich in de huidige geulwand bevindt. Voor 1980 was de geul op deze locatie echter veel ondieper en was het de geulbodem die direct op deze vermoedelijke kleilaag lag. In de 30 jaar tussen 1950 en 1980 verdiepte de geul zich met slechts 2 m. en was de geulbodem buiten verhouding breed en vlak, zoals verwacht wordt van een door erosie-resistente lagen diepte-gelimiteerde geul. Na 1980 'breekt' de geul echter door de kleilaag heen en verdiept de geul zich in de 30 jaar tussen 1980 en 2010 met ongeveer 10 m. De geul lijkt zich in noordwaartse richting te willen verplaatsen, dat tussen 2010 en 2016 volledig verhinderd werd door de nog altijd aanwezige kleilaag in de geulwand. In 2016 is de geulwand dusdanig steil geworden, dat te verwachten is dat de kleilaag langzaam ondergraven gaat worden en er alsnog een noordwaartse migratie plaats zal vinden. Echter zal deze migratie met name onder de kleilaag waarschijnlijk langzamer gaan, zoals ook voor de vergelijkbare situatie in het Borndiep het geval is.



Figuur 4.2. 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.

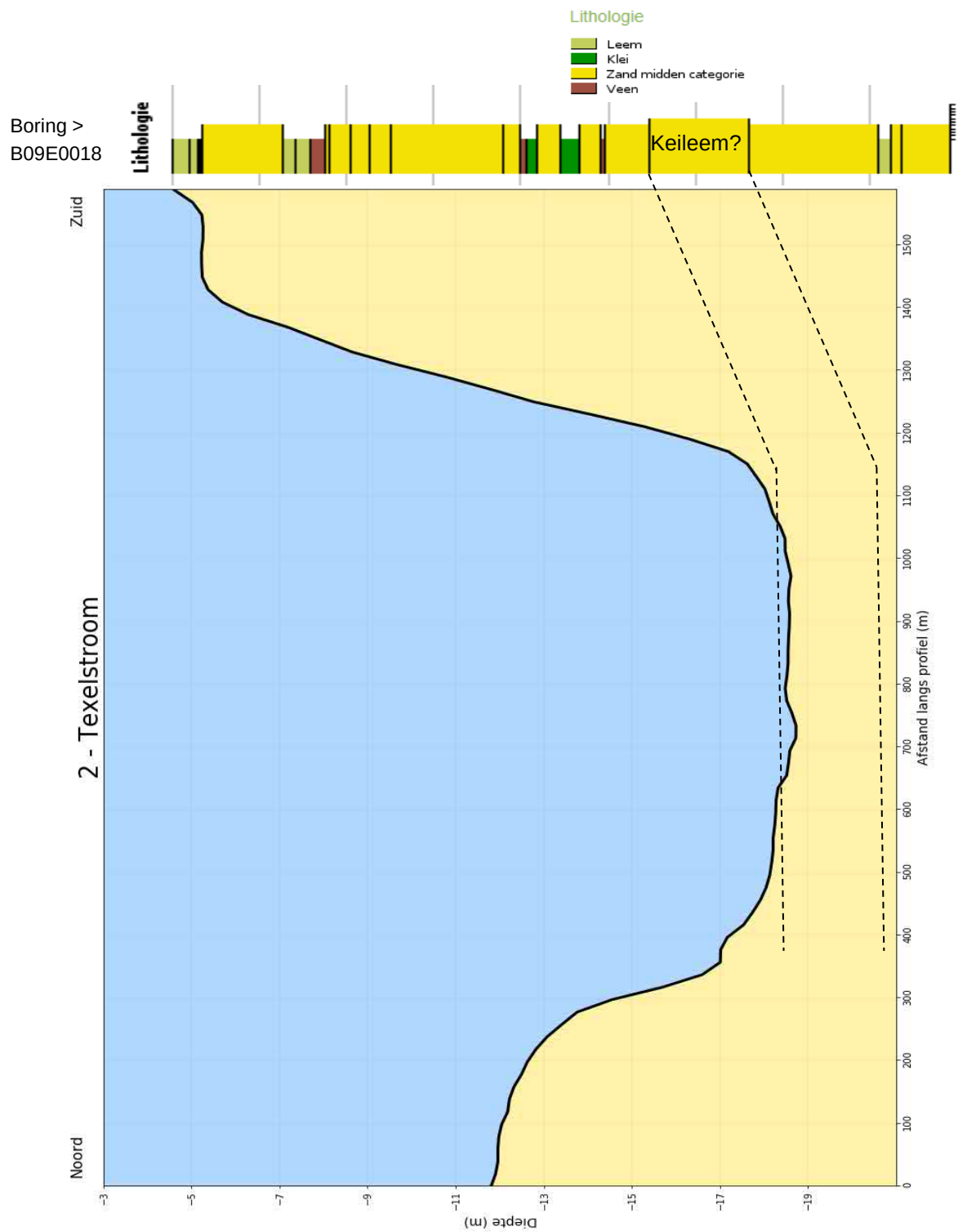


Figuur 4.3. Minimum bathymetrie Malzwin (top) en profielen (onder). De kleilaag op 15 m -NAP was hier onderdeel van de geulbodem, maar werd begin jaren '80 doorbroken, waardoor het effect momenteel alleen in de geulwand te zien is.

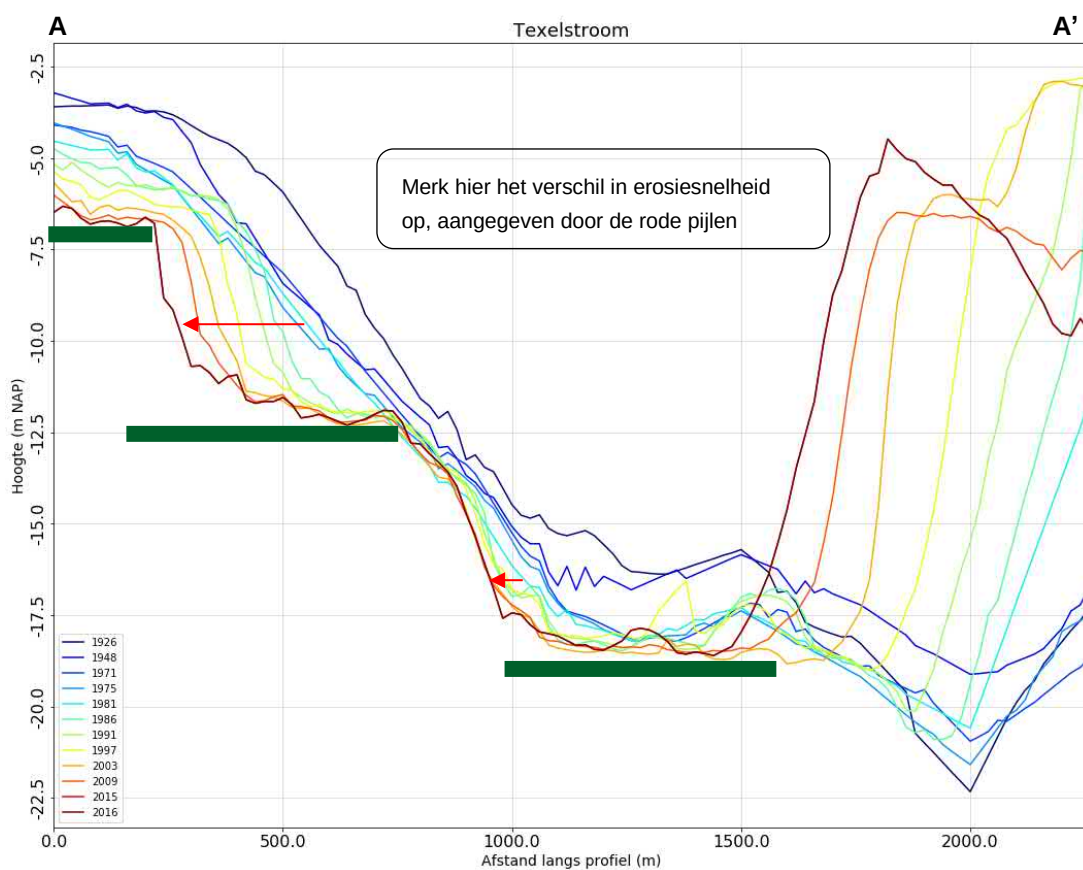
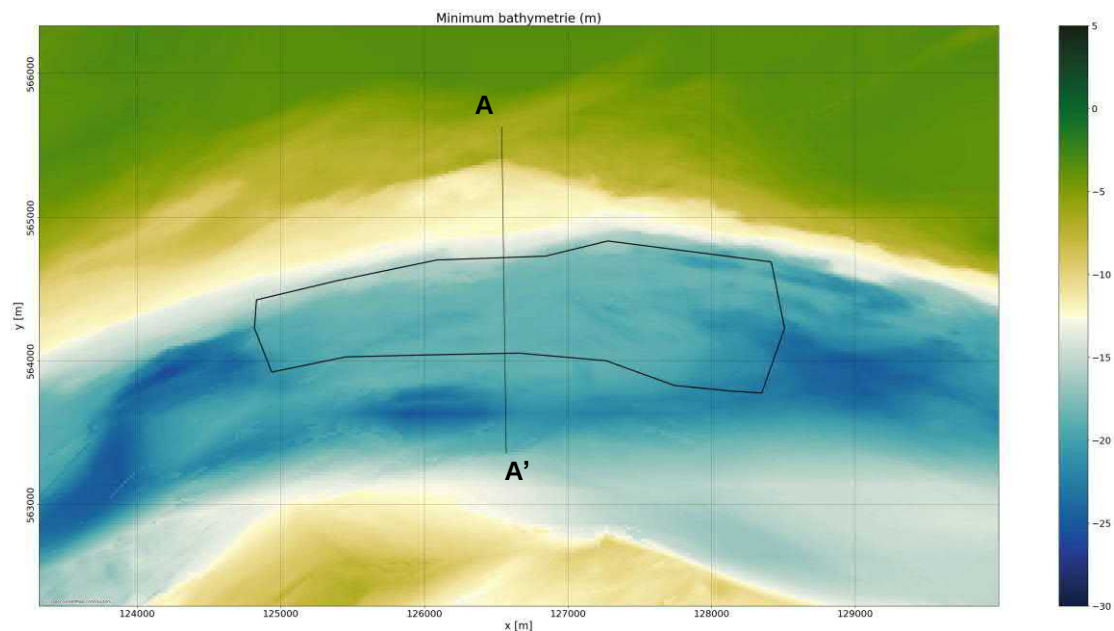
4.2.2 Locatie 2 – Texelstroom

Geologie (Figuur): dit is een goed voorbeeld van een geul die zich heeft verbreed omdat verdere verdieping onmogelijk was (paneel C in **Error! Reference source not found.**). 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.

Morfologische ontwikkeling (Figuur 4.5): Op locatie 2 ligt er mogelijk een laag keileem op de huidige geulbodem. Voor 1980 lag het diepste gedeelte van de geulbodem verder zuidelijk en op grotere diepte dan de huidige vlakke geulbodem. Vanaf 1980 migreert de geul noordwaarts, maar blijft de maximale diepte van de bodem strak op 18 m -NAP steken. Vanaf 1990 worden er plateau's op ongeveer 12 en 7 m -NAP zichtbaar in de noordelijke geulwand. Vermoedelijk worden ook die veroorzaakt door erosie-resistente lagen die nog niet waren gevonden in onderdeel 2. Door het verhinderen van zowel verdieping voorbij 18 m -NAP en laterale migratie van de noordelijk geulwand onder 12 m -NAP, vindt er momenteel boven 12 m -NAP een snelle noordwaartse migratie plaats waardoor de geul snel breder wordt en het wad net ten noorden van de geul verdwijnt.



Figuur 4.4. 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.

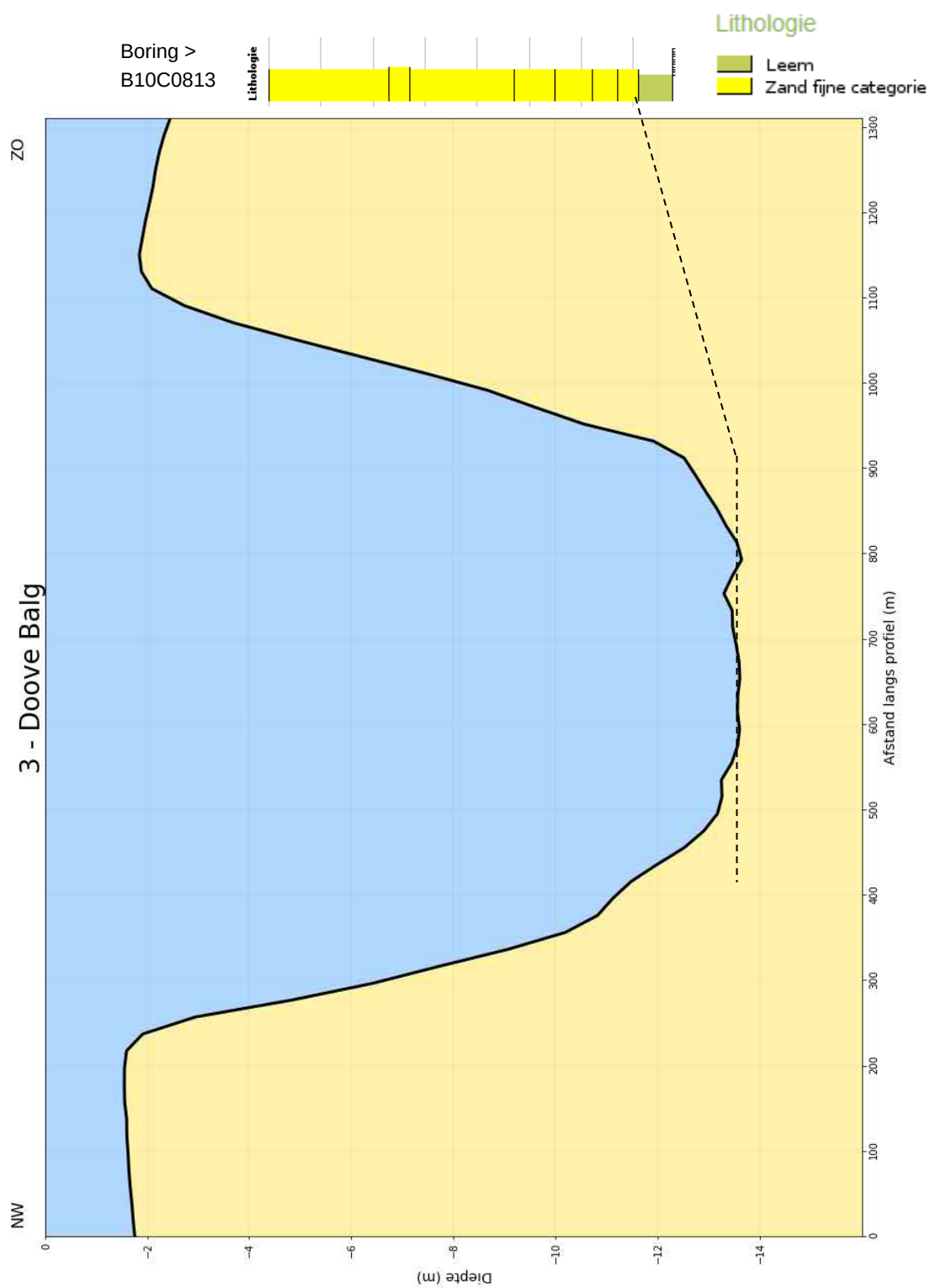


Figuur 4.5. Minimum bathymetrie Texelstroom (top) en profielen (onder). De geul en geulwand wordt op drie niveau's gestuurd door erosie-resistente lagen. Momenteel vindt de meeste migratie boven de laag van 12 m -NAP plaats terwijl tussen de onderste en middelste laag de migratie nagenoeg is gestopt (zie pijlen).

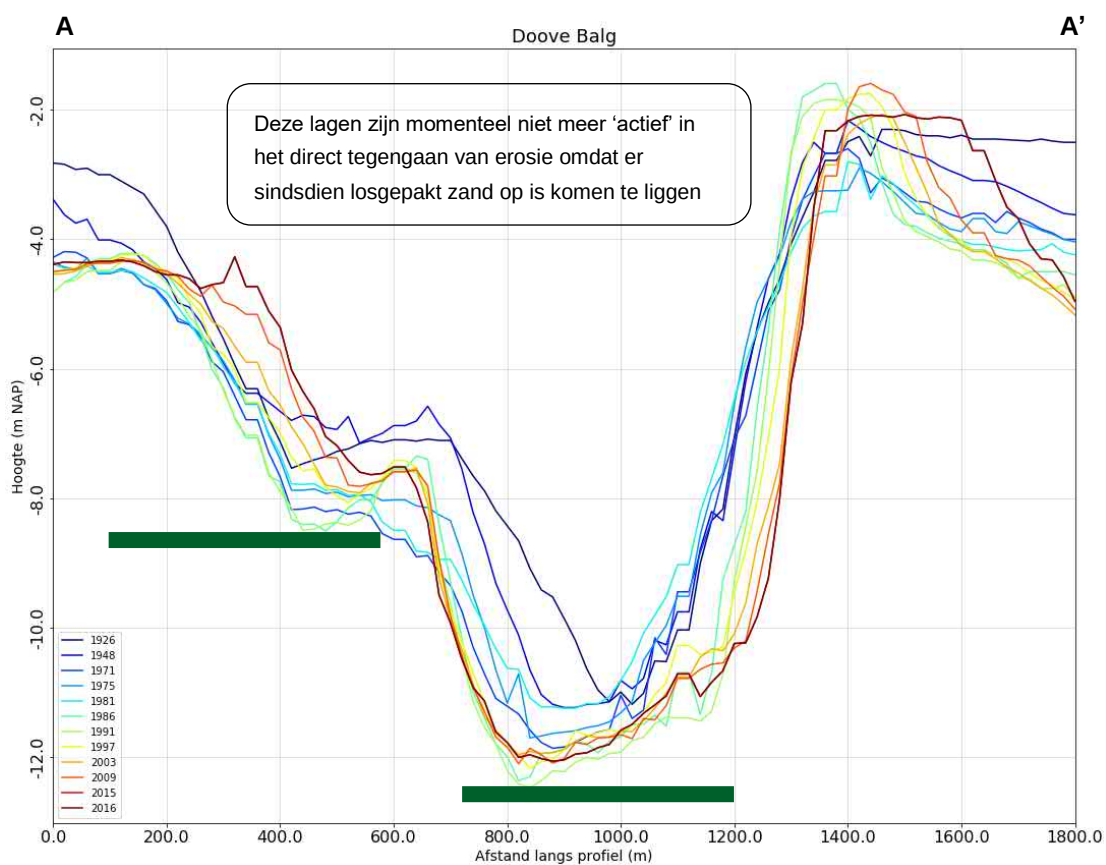
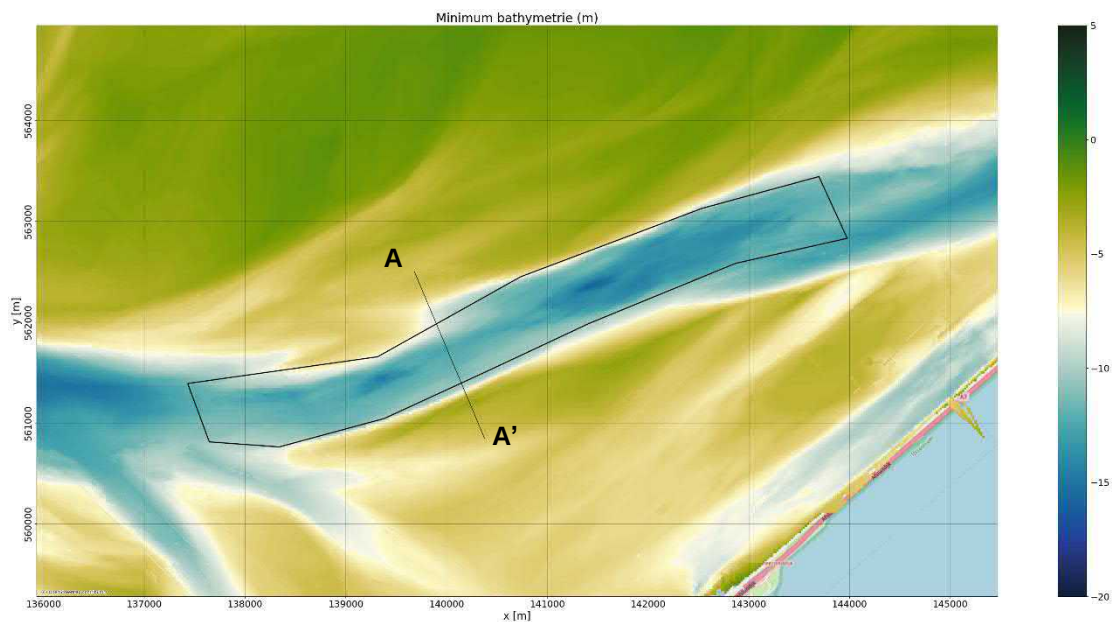
4.2.3 Locatie 3 - Doove Balg

Geologie (Figuur): Op locatie 3 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.

Morfologische ontwikkeling (Figuur): Op locatie 3 is het mogelijk een laag keileem op 12 m -NAP die verdieping van de geulbodem verhindert. De geul is hier in de periode van 90 jaar tussen 1926 en 2016 weinig verplaatst. Behalve de geulbodem, lijkt op 9 m -NAP ook de noordelijke geulwand beïnvloed te zijn door een erosie-resistente laag. Tussen 1950 en 1980 ontstaat hier een plateau dat in deze 30 jaar slechts 2 m zijwaarts erodeert. Sinds 1980 heeft hier sedimentatie plaatsgevonden en is dit plateau begraven onder enkele meters zand, waardoor de geulwand hier niet wordt herkend als een locatie waar momenteel invloed is van een erosie-resistente laag. Het laagste niveau van de geulbodem werd in 1990 bereikt. Sindsdien ligt er afwisselend een dunne (actieve) zandlaag op de bodem. De geul lijkt dus niet de neiging te hebben om te migreren of verder te verdiepen. Mocht deze tak in de toekomst een grotere rol krijgen (een groter deel van het getijdeprisma doorvoeren), dan is te verwachten dat de geul zich weinig kan verplaatsen.



Figuur 4.6. 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

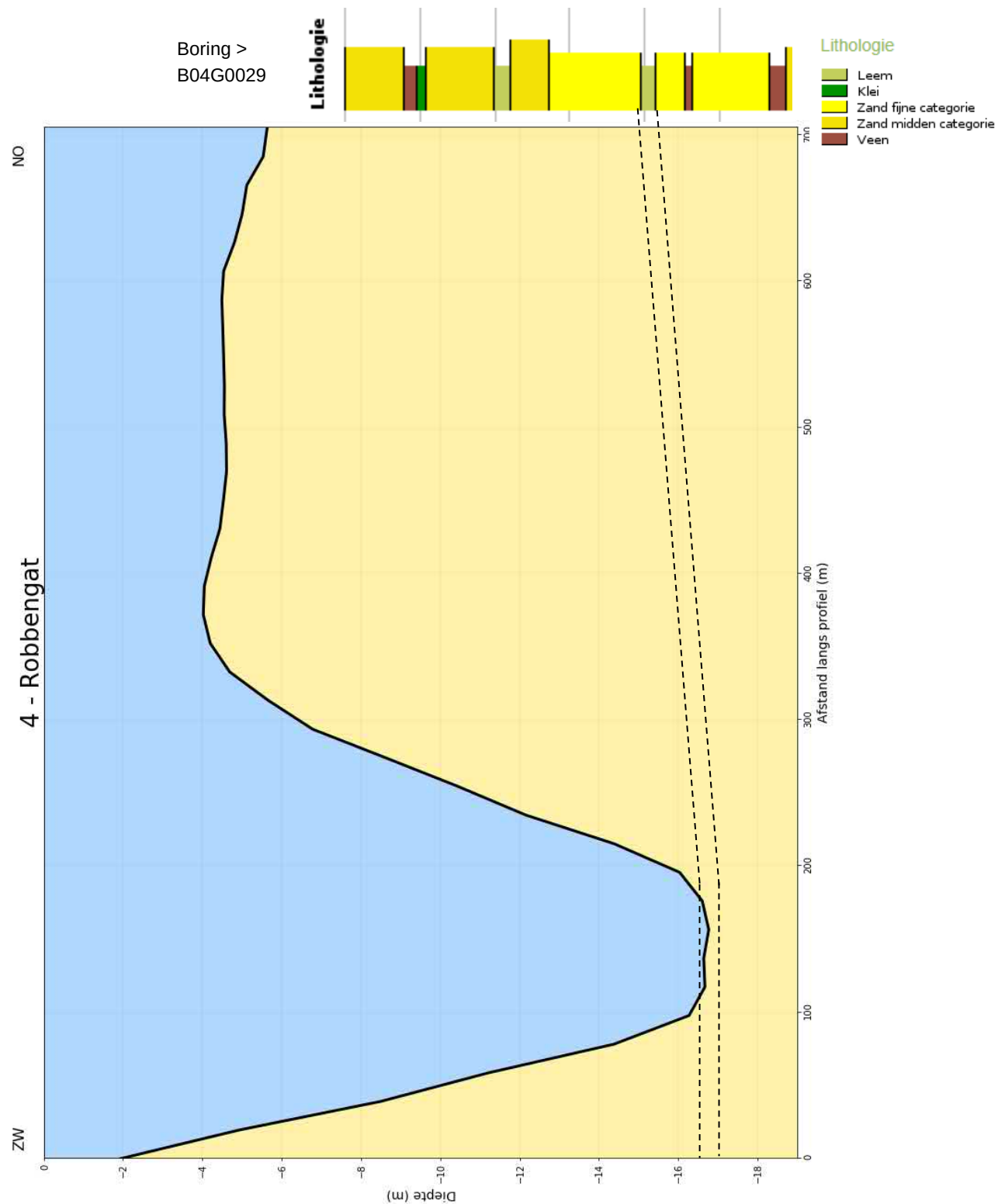


Figuur 4.7. Minimum bathymetrie Doove Balg (top) en profielen (onder). De geul is relatief statisch geweest gedurende 90 jaar. Er zijn voor deze locatie nieuwe aanwijzingen dat er rond 8 m -NAP ook een erosie-resistente laag een rol heeft gespeeld in het vastleggen van deze geul.

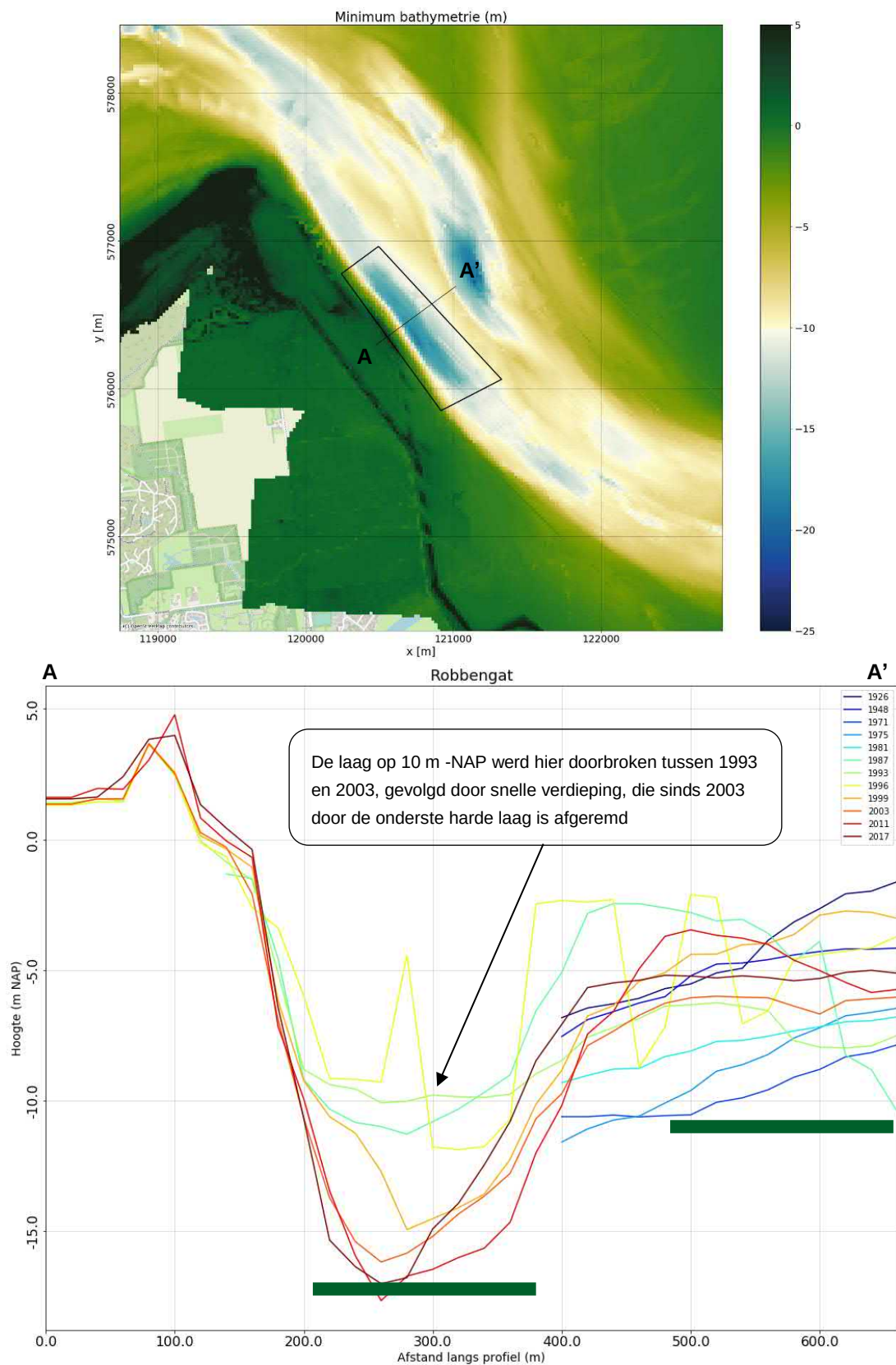
4.2.4 Locatie 4 – Robbengat

Geologie (Figuur): Op locatie 4 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.

Morfologische ontwikkeling (Figuur): Op locatie 4 is slechts data sinds 1992 beschikbaar. Op dat moment lag de geulbodem op 10 m -NAP, waar vermoedelijk een andere niet eerder aangetoonde erosie-resistente laag ligt. De geul ligt strak tegen de harde oeververdediging aan. De geul heeft de neiging om kustwaarts te migreren, waardoor de geul in 20 jaar 7 m dieper is geworden. Tussen 15 en 17 m -NAP nam de verticale snelheid duidelijk af, wat een aanwijzing is voor de vermoedelijke aanwezigheid van een laag keileem of klei. Sinds 2011 vult de geul zich op.



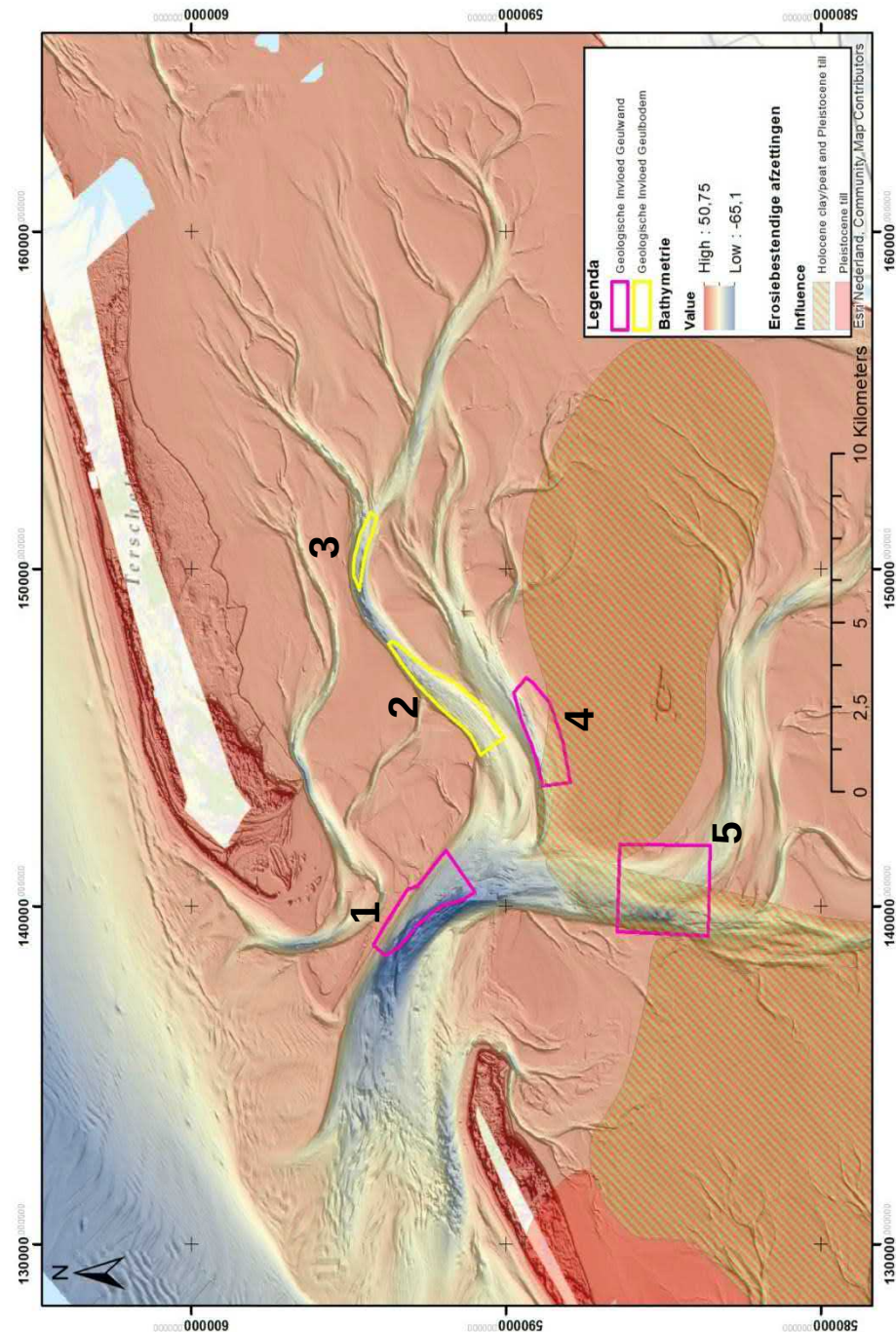
Figuur 4.8. Op locatie 4 (Robbengat) is de geulbodem is erg vlak op 17 m -NAP.



Figuur 4.9. Minimum bathymetrie Robbengat (top) en profielen (onder). Sinds 1993 lijkt de erosie-resistente laag op 10 m -NAP (nieuw gevonden, niet vermeld in onderdeel 2) doorbroken te zijn. Tussen 2003 en 2011 gaat de verdieping echter veel langzamer, mogelijk door de aanwezigheid van een erosie-resistente laag.

4.3 Resultaten Waddenzee - 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

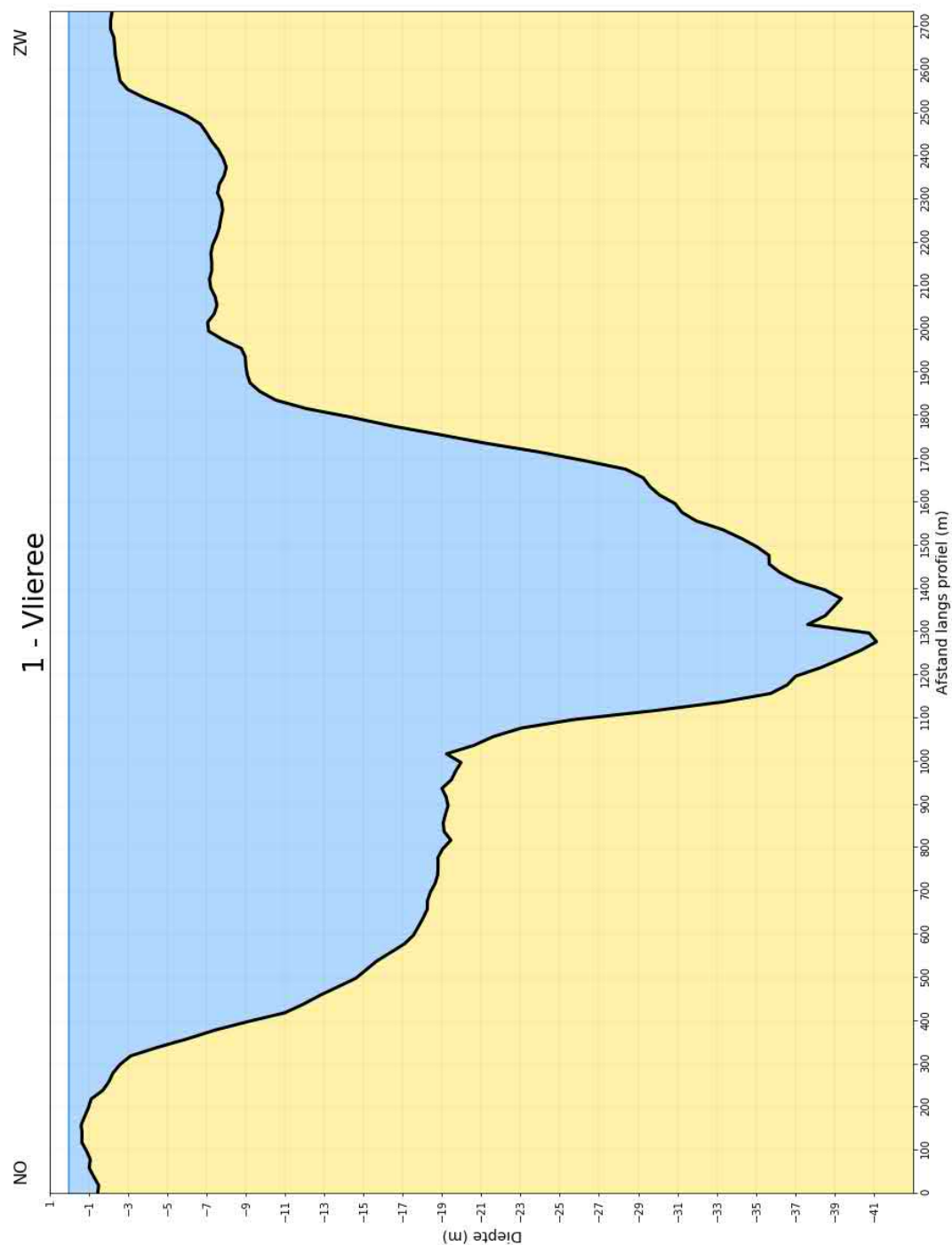


Figuur 4.10. Overzicht van locaties in gebied B. Geulwanden en -bodems waarvan vermoed wordt dat hun vorm door erosie-resistente lagen wordt bepaald zijn omkaderd. De verbreiding van erosie-resistente lagen volgens Hijma (2017a) is ook ingetekend.

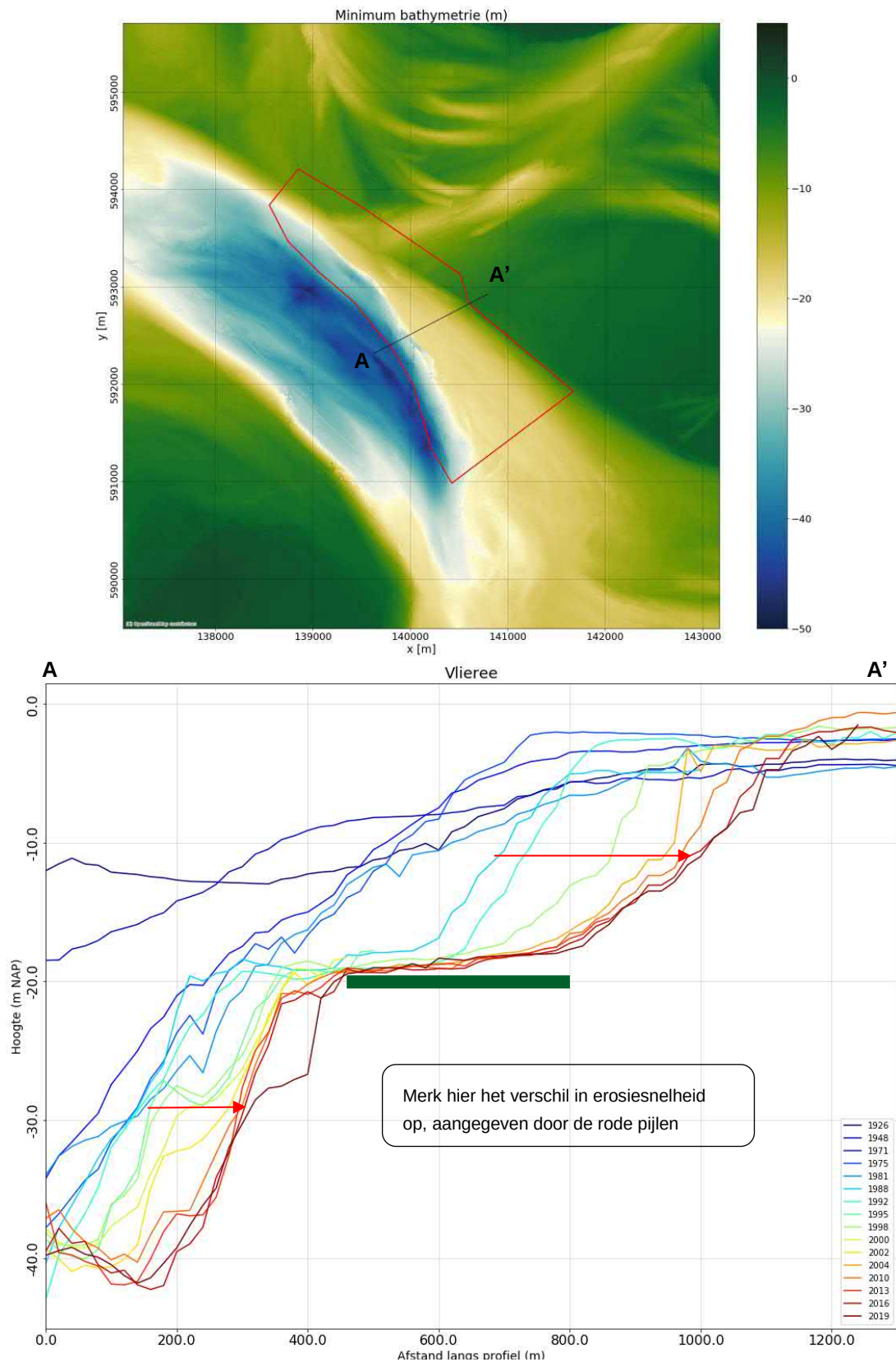
4.3.1 Locatie 1 – Vlieree

Geologie (Figuur): Op locatie 1 zijn er twee grote plateaus 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.

Morfologische ontwikkeling (Figuur): Op locatie 1 werd de meest duidelijk invloed op 19 m -NAP gezien. In 1926 lag de geul nog veel verder richting het westen en migreerde deze in oostelijke richting. Ongeveer vanaf 1980 kwam de geul hierdoor in aanraking met de erosie-resistente laag op 19 m -NAP, met als gevolg dat de migratie van de geul onder dit niveau vertraagde en er een plateau ontstond. Boven de 19 m -NAP kon de laterale migratie in oostelijke richting nog ongehinderd doorgaan. Ter vergelijking: onder de erosie-resistente laag migreerde de geul 100 m in 30 jaar (1986-2016), terwijl boven deze laag dit ruim 300 m bedroeg.



Figuur 4.11. Locatie 1, Vliereedijk, 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.

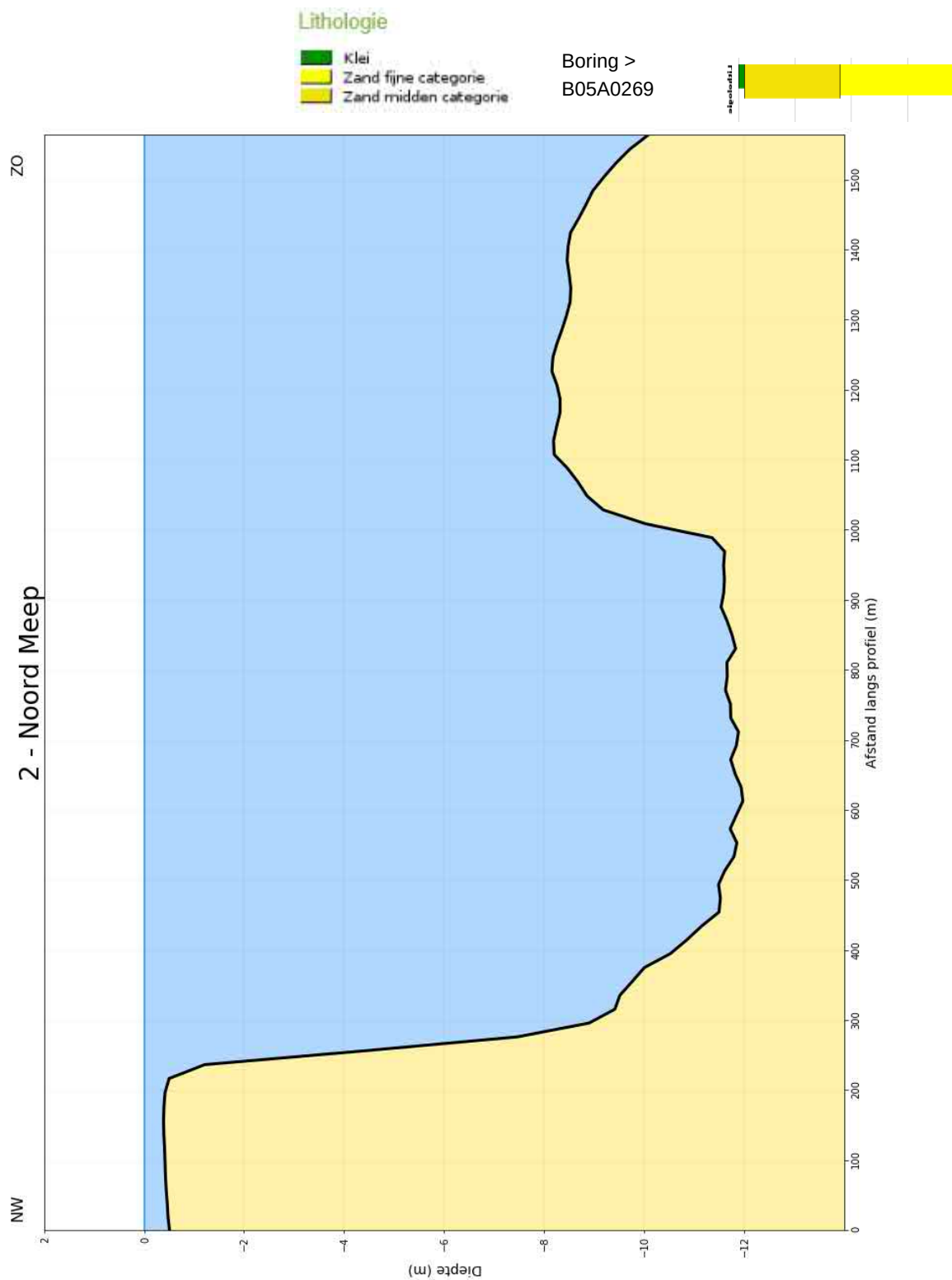


Figuur 4.12. Minimum bathymetrie Vliere (top) en profielen (onder). Duidelijk zichtbaar is het effect van de erosie-resistente laag vanaf 1980, waardoor de geulwand onder deze laag langzamer oostwaarts migreerde, maar boven deze laag juist sneller (aangegeven door de peilen)

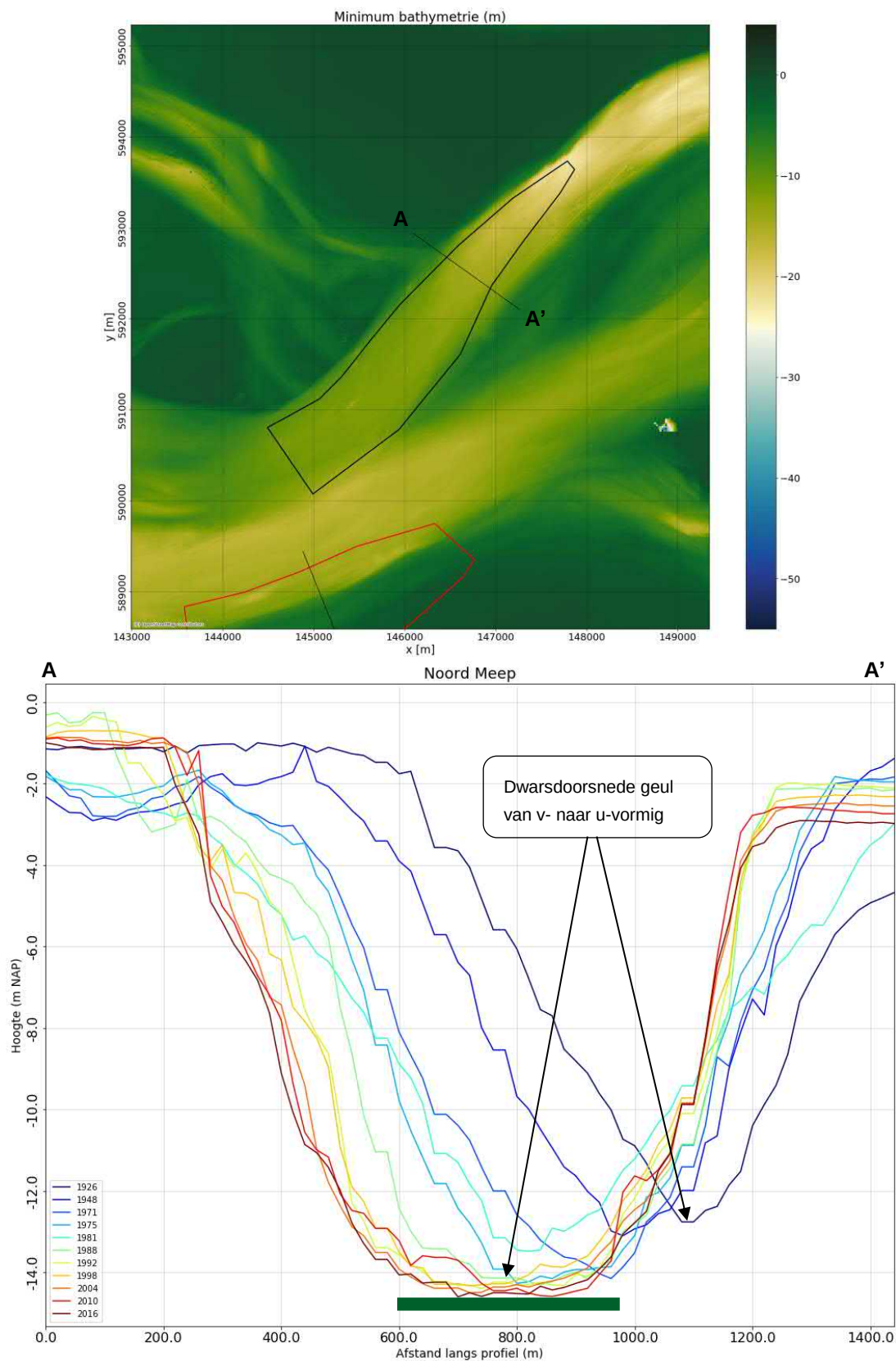
4.3.2 Locatie 2 - Noord Meep

Geologie (Figuur): In de Noord Meep 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.

Morfologische ontwikkeling (Figuur): Op locatie 2 heeft de geul zich nauwelijks verplaatst gedurende 90 jaar. In die tijd is de geul slechts 200 m in noordwaartse richting verplaatst. De geul was eerst v-vormig en bereikte een diepte van 13 m -NAP. Sinds begin jaren '70 is de geulbodem op 14 m -NAP in contact gekomen met een vermoedelijke erosie-resistente laag (op de locatie van het profiel, deze diepte lijkt in oostelijke richting sterk af te nemen). Vanaf dat moment vond er in 40 jaar een verdieping van slechts 0.5 m plaats, terwijl de geul breder werd en een platte geulbodem kreeg. De laterale migratiesnelheid is ongeveer gelijk gebleven.



Figuur 4.13. In de Noord Meep is de geulbodem vlak over een breedte van 600 meter. Nabijgelegen boringen vinden op deze diepte matig tot uiterst grof zand.



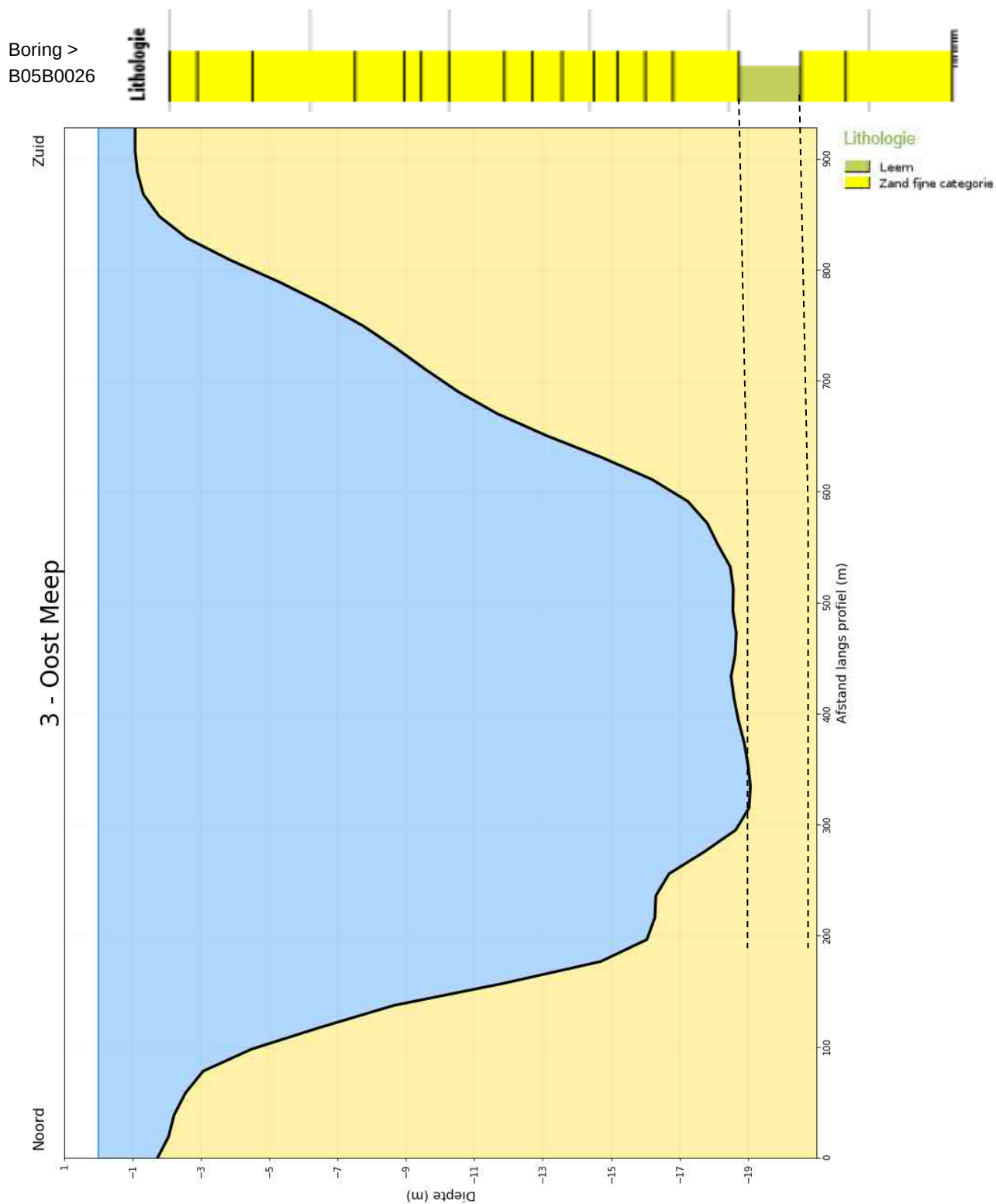
Figuur 4.14. Minimum bathymetrie Noord Meep (top) en profielen (onder). De eerst v-vormige geul heeft zich ontwikkeld tot een geul met een platte bodem. De laterale migratiesnelheid niet is toegenomen.

4.3.3

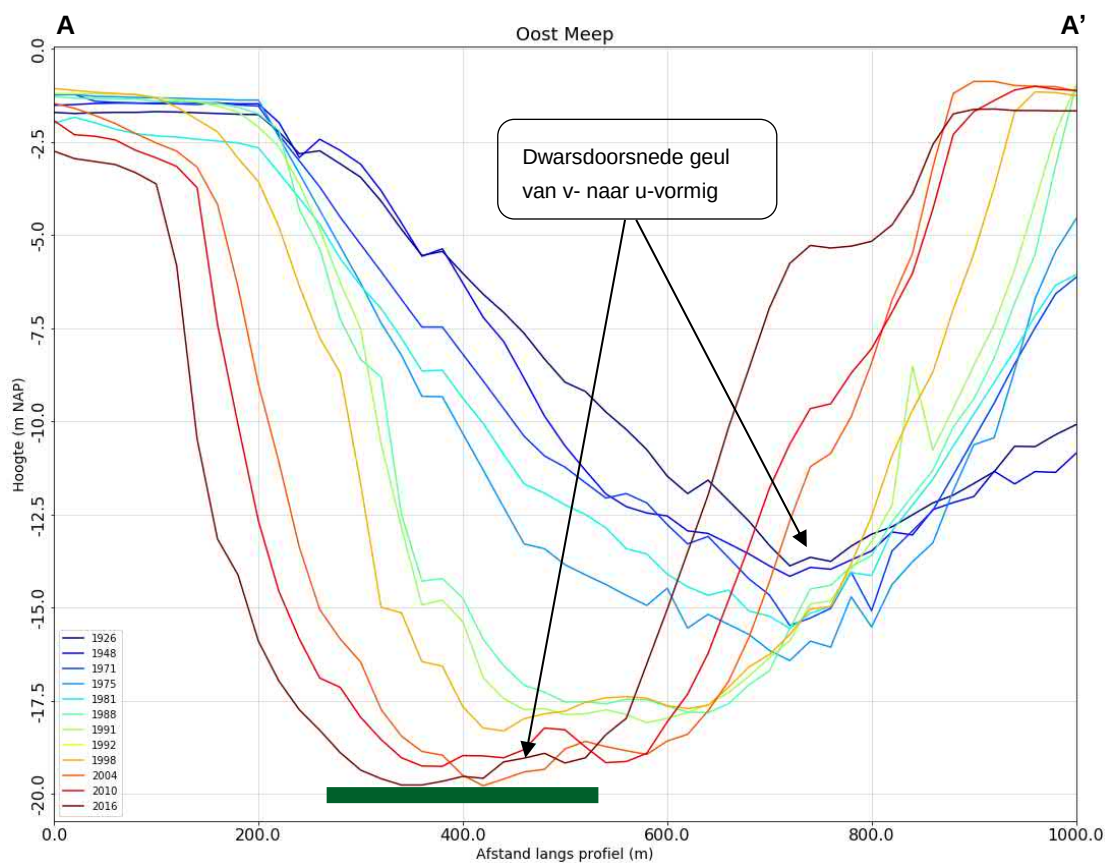
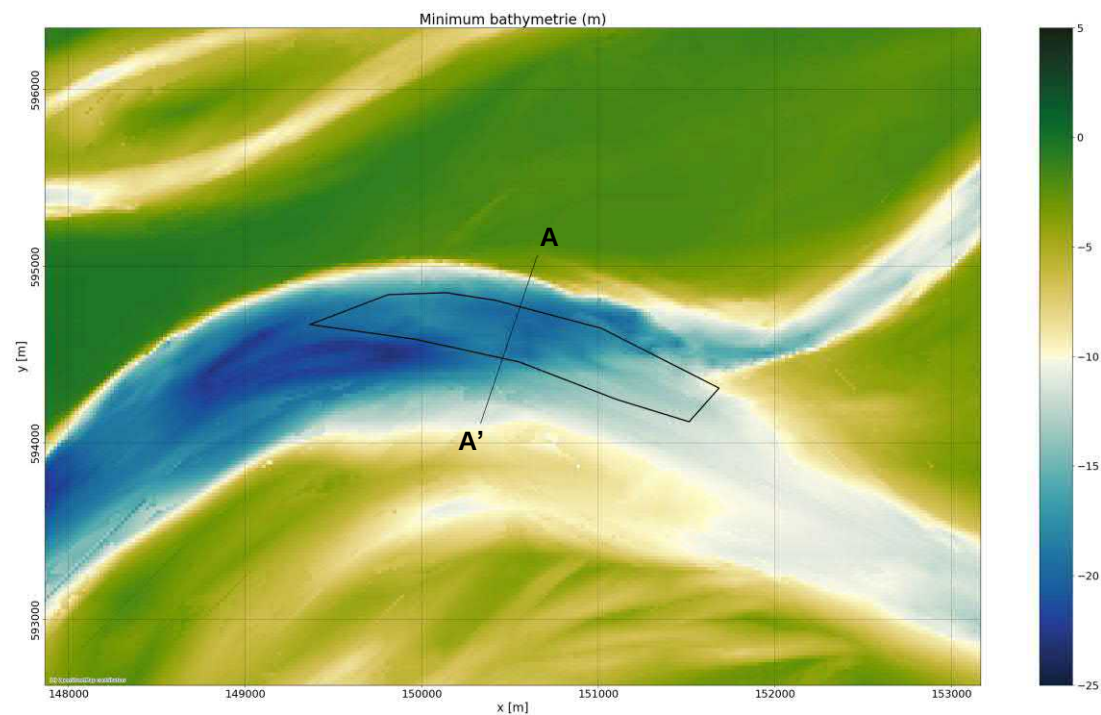
Locatie 3 - Oost Meep

Geologie (Figuur): Locatie 3 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.

Morfologische ontwikkeling (Figuur): Op locatie 3 in het verlengde van locatie 2, heeft zich dezelfde ontwikkeling afgespeeld. Echter kwam de geul pas sinds begin jaren '90 in contact met de vermoedelijke laag keileem die rond 20 m -NAP. De geul is in noordelijke richting verplaatst. De noordwaartse migratie lijkt in een versnelling te zijn geraakt door het niet (snel) verder kunnen verdiepen van de geul: in de 65 jaar tussen 1925 en 1990 is de geul ongeveer 200 m noordwaarts gemigreerd. In de 25 jaar tot aan 2015 migreerde de geul eveneens ongeveer 200 m, ruim 2.5 keer zo snel als voor het in aanraking komen met de erosie-resistente laag.



Figuur 4.15. 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.

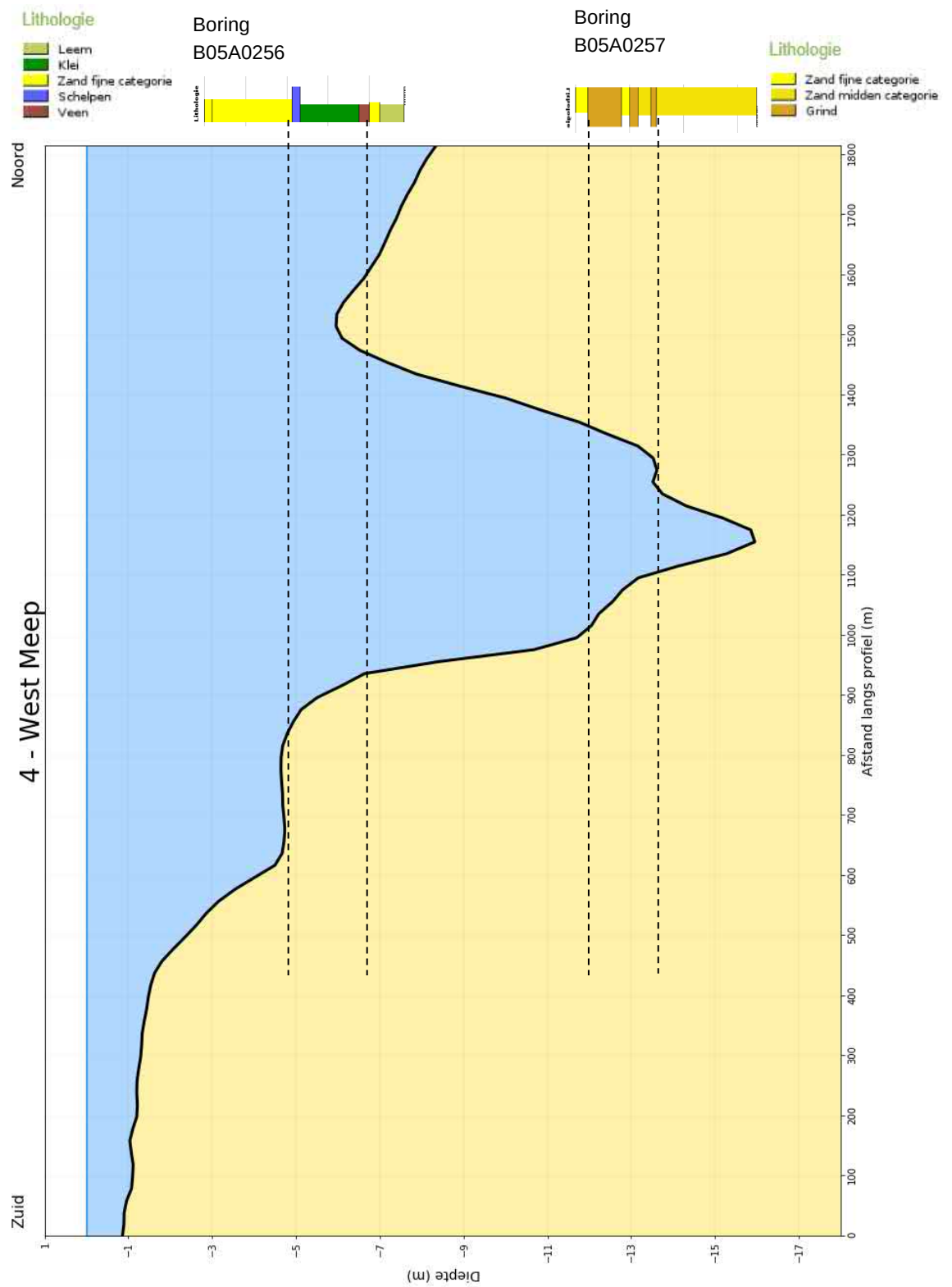


Figuur 4.16. Minimum bathymetrie Oost Meep (top) en profielen (onder). De ontwikkeling is vergelijkbaar met die in de Noord Meep, met het verschil dat de migratiesnelheid van de geul in noordelijke richting wel is toegenomen.

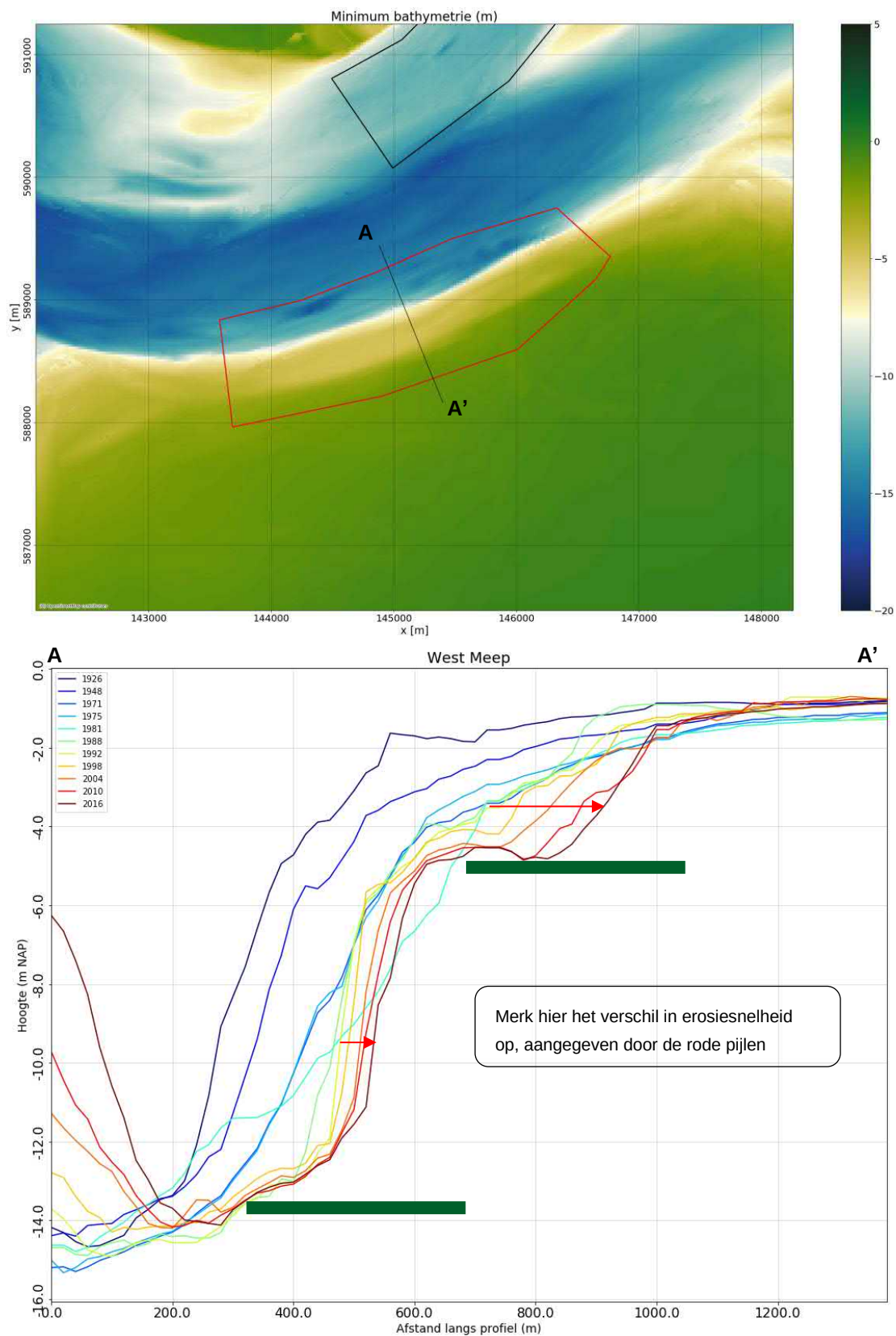
4.3.4 Locatie 4 - West Meep

Geologie (Figuur): Op locatie 4 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 1.1*. 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.

Morfologische ontwikkeling (Figuur): Op locatie 4 is vermoedelijk op zowel 5 als 13 m -NAP een erosie-resistente laag actief die voor een trapsgewijs profiel in de geulwand zorgt. Voor eind jaren '80 lag de geul verder noordwaarts en migreerde deze in 60 jaar tijd ongeveer 300 m naar het zuiden. Sindsdien is de geul tegelijkertijd met beide erosie-resistente lagen in contact gekomen, waardoor de migratie in zuidelijke richting is afgeremd. In de laatste 30 jaar is de geul ongeveer 100 m verder opgeschoven. Boven de erosie-resistente laag van 5 m -NAP is de erosie van de geulwand juist versneld. In de afgelopen 30 jaar schoof de geulwand daar 200 m op.



Figuur 4.17. Op deze locatie spelen twee verschillende erosie-resistente lagen een rol. Rond 5 en 13 m - NAP. Nabijgelegen boringen bevestigen de aanwezigheid hiervan.

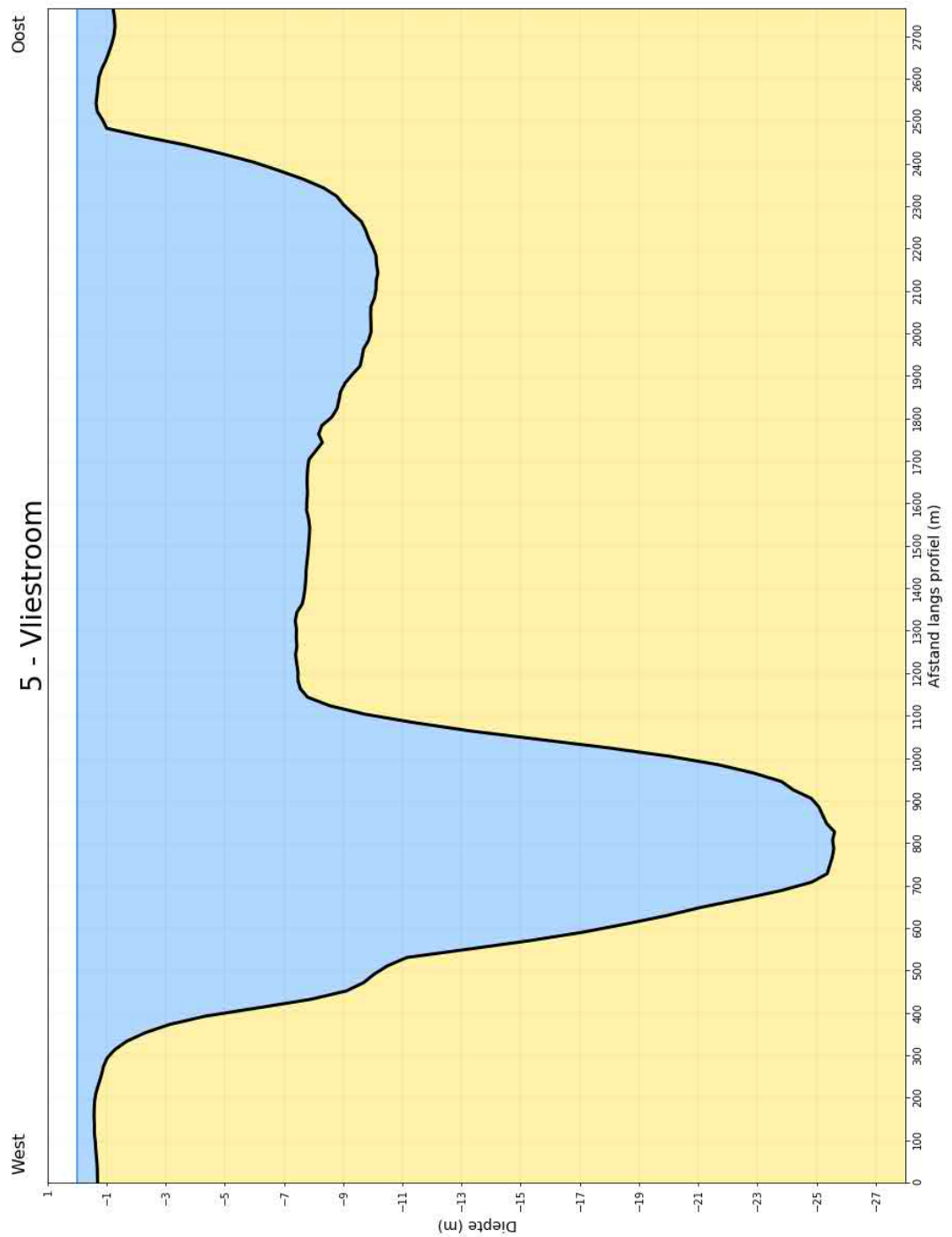


Figuur 4.18. Minimum bathymetrie Zuid Meep (top) en profielen (onder). Twee erosie-resistente lagen beïnvloeden hier de ontwikkeling van het profiel. Tussen de twee lagen is de migratiesnelheid van de geulwand sterk afgenomen, terwijl boven de kleilaag van 5 m -NAP er juist een toename heeft plaatsgevonden.

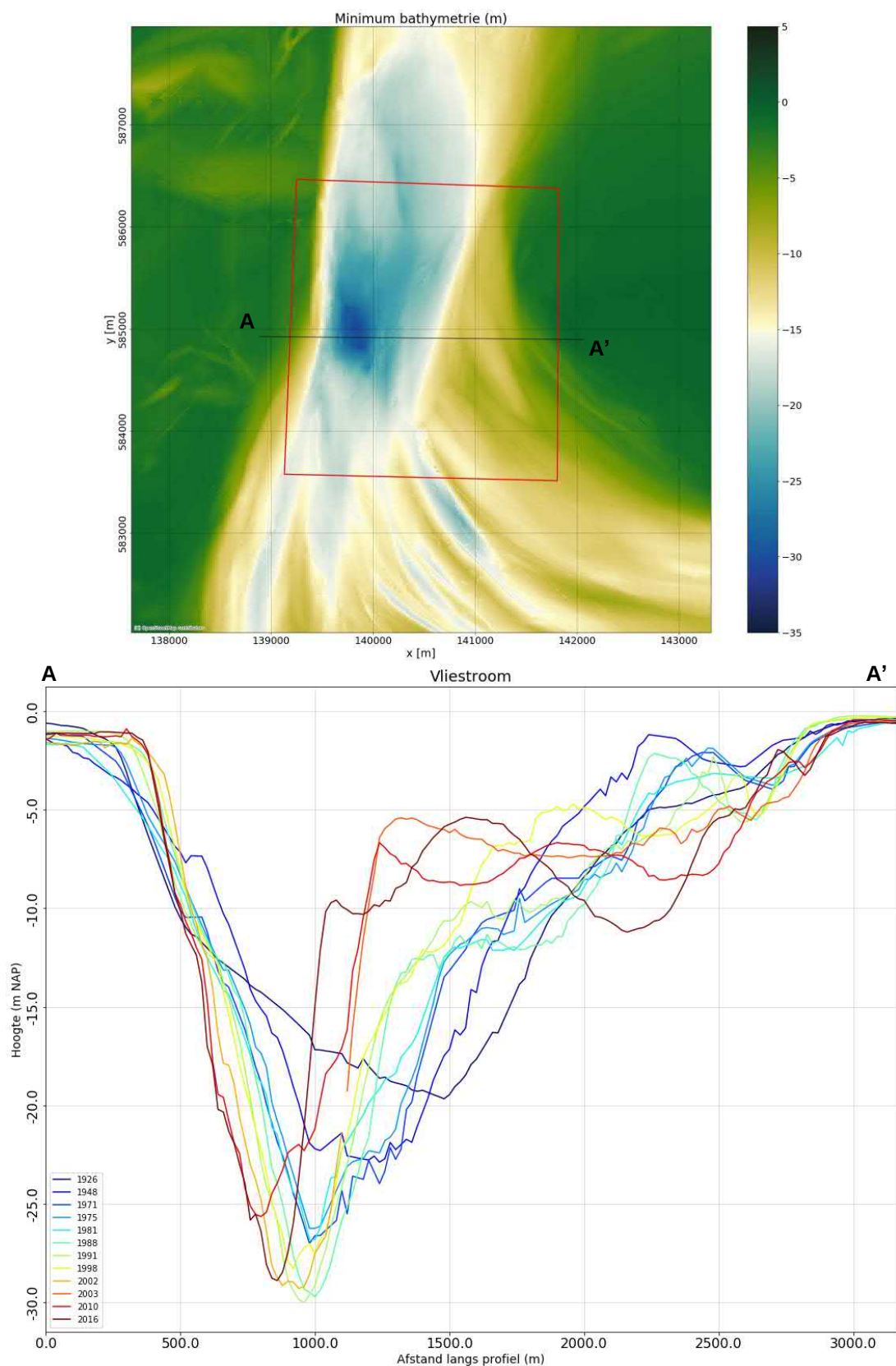
4.3.5 Locatie 5 – Vliestroom

Geologie (Figuur): Locatie 5 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.

Morfologische ontwikkeling (Figuur): Voor locatie 5 werd reeds aangegeven dat het hier mogelijk niet om een erosie-resistente laag ging die het plateau op 7 m -NAP veroorzaakt. Dit lijkt inderdaad het geval. Het gaat hier om recent afgezet sediment dat in een redelijk groot gebied tussen het Pannengat en de Wolfshoek is afgezet. Deze locatie is verkeerd geïdentificeerd



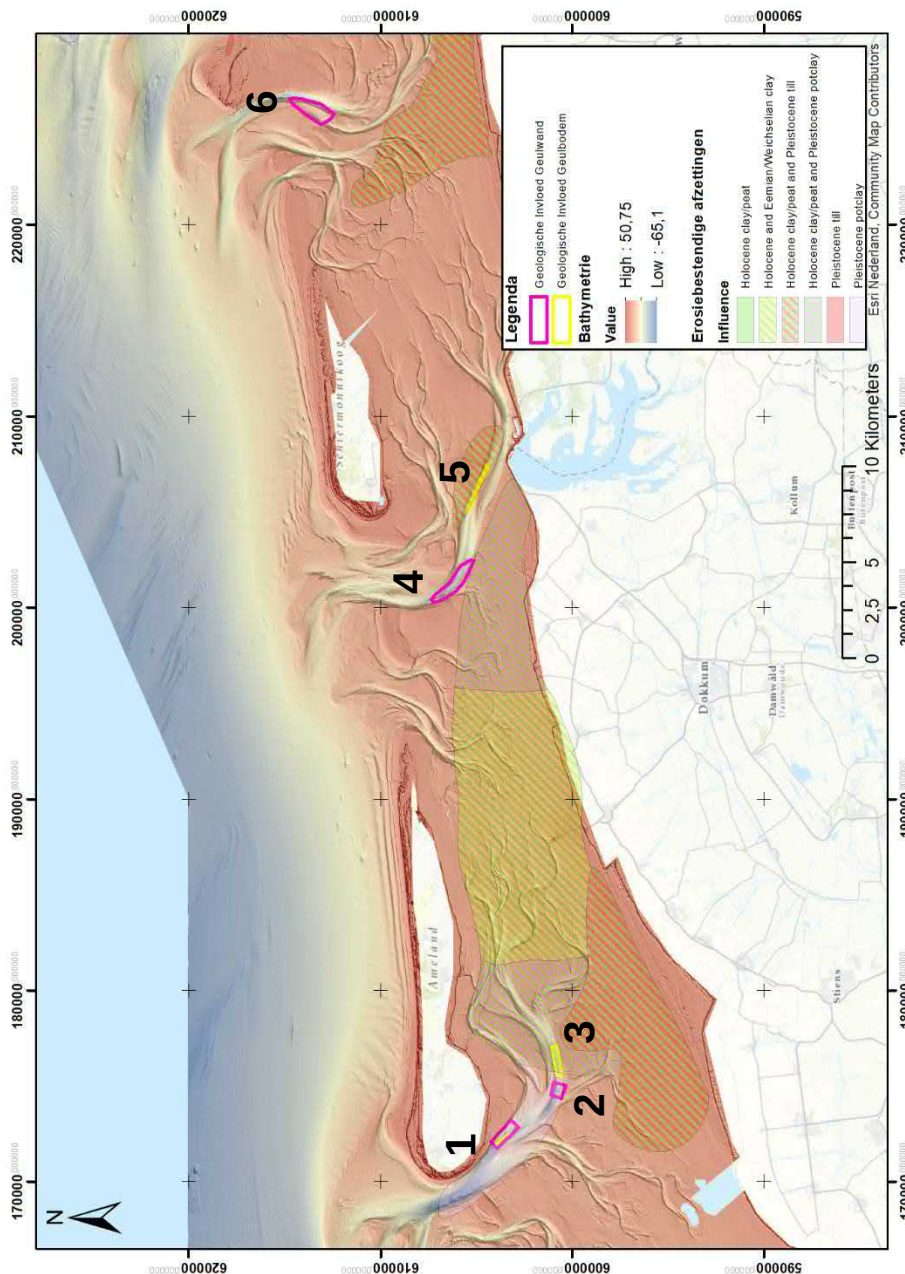
Figuur 4.19. Op deze locatie springt het plateau op 7 m -NAP in het oog. Er zijn echter geen boringen in de buurt die aanwijzingen geven voor een erosiebestendige laag op deze diepte.



Figuur 4.20. Minimum bathymetrie Vliestroom (top) en profielen (onder). Er is niets dat hier specifiek wijst op erosie-resistente lagen. Deze locatie is dus verkeerd geïdentificeerd in onderdeel 2.

4.4 Resultaten Waddenzee - 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 (geulbodembodem) ten zuiden van Ameland en net ten oosten van locatie 2, (4) De Zoutkamperlaag (geulwand) ten zuidwesten van Schiermonnikoog, (5) De Zoutkamperlaag (geulbodembodem) 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 .

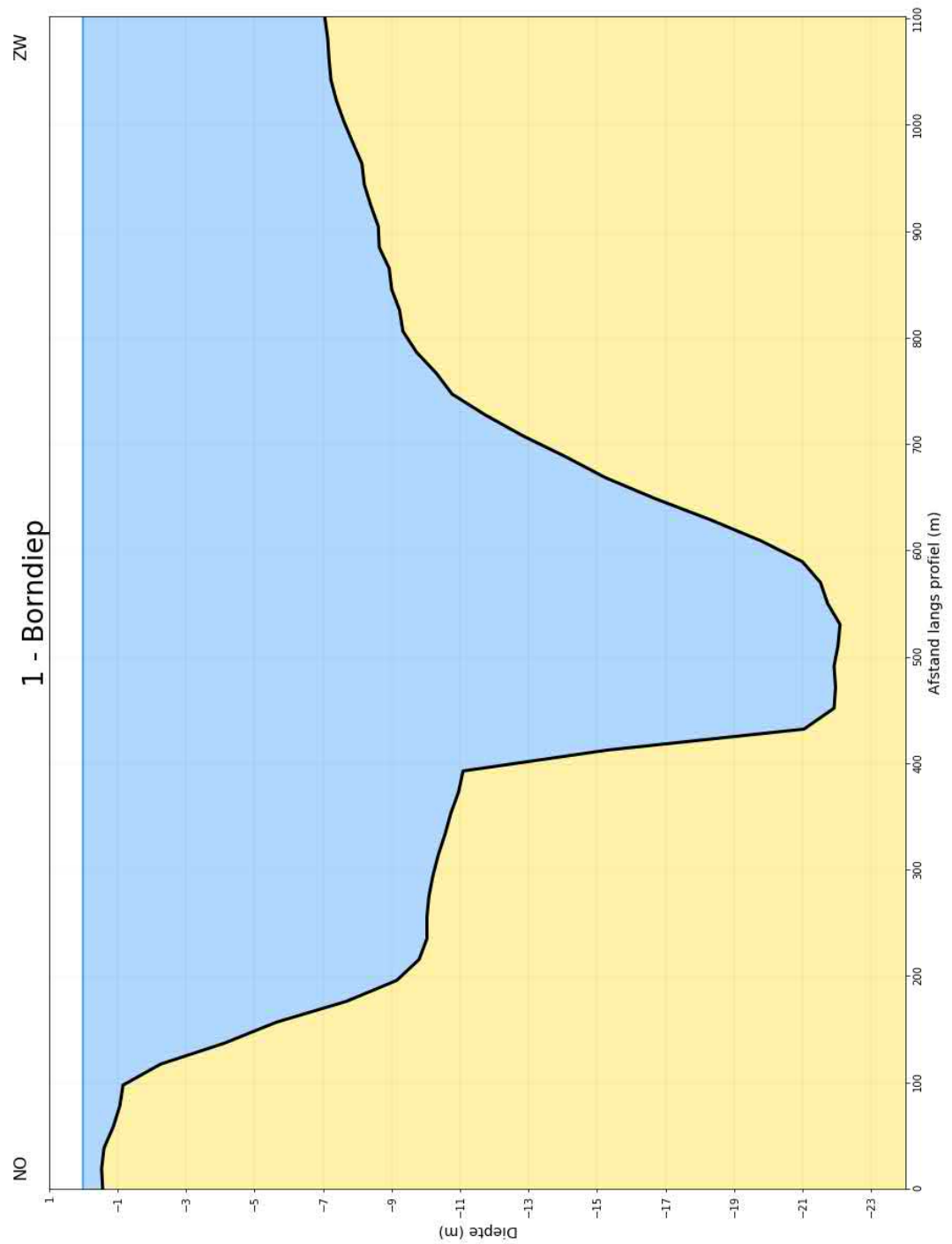


Figuur 4.21.. Overzicht van locaties in gebied C. Geulwanden en -bodems waarvan vermoed wordt dat hun vorm door erosiebestendige lagen wordt bepaald zijn omkaderd. De verbreiding van erosiebestendige lagen volgens Hijma (2017a) is ook ingetekend.

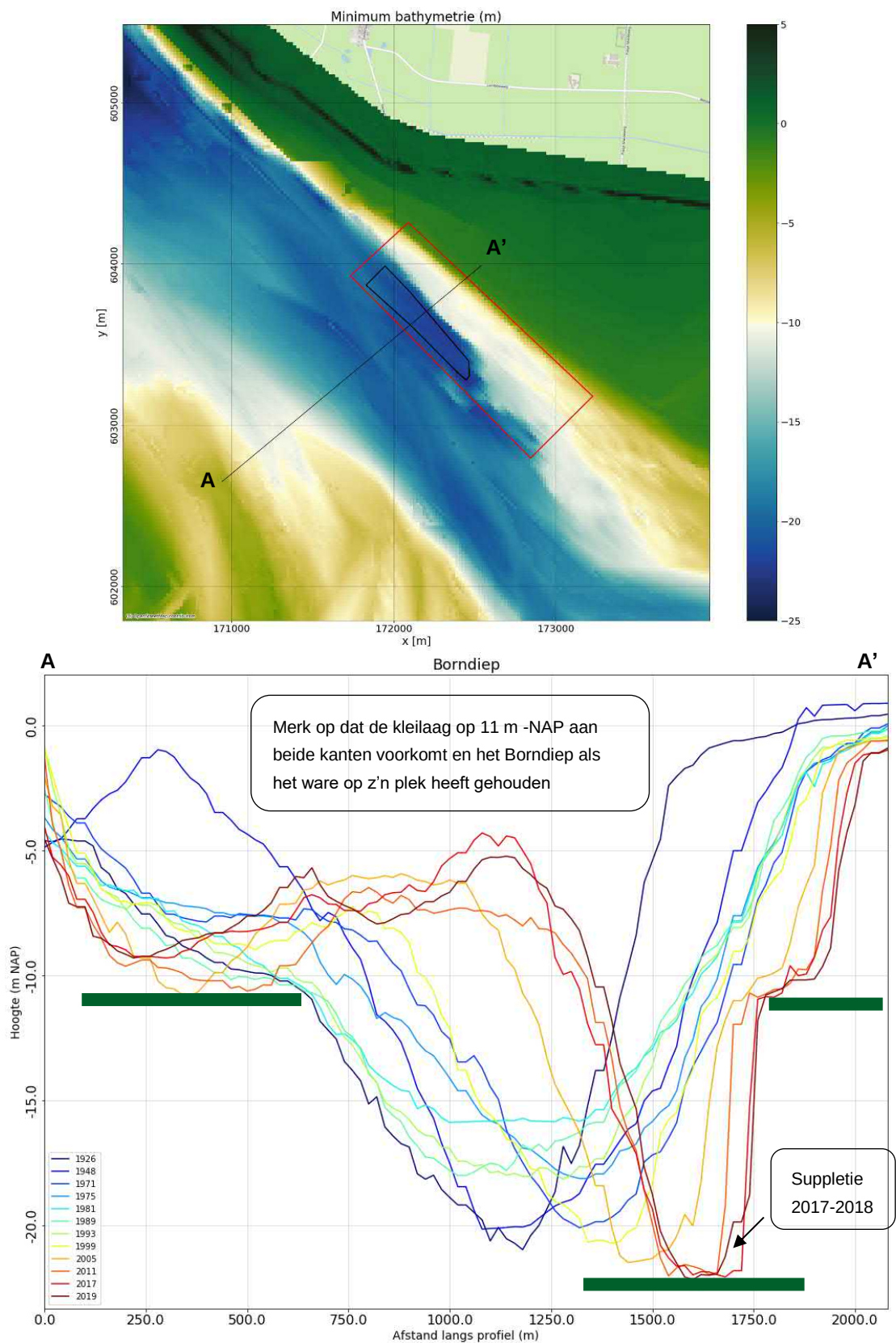
4.4.1 Locatie 1 – Borndiep

Geologie (Figuur): 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).

Morfologische ontwikkeling (Figuur 4.): In het Borndiep zijn er twee kleilagen aan beide kanten van de geul die een belangrijke rol speelden in de ontwikkeling. Tussen 1925 en 1970 migreerde de geul richting de kust van Ameland. Vanaf 1970 volgde een korte periode waarin het Borndiep zich opvulde en van de kust af bewoog. Begin jaren '80 begon de geul weer richting Ameland te bewegen, mogelijk als gevolg van het niet verder westwaarts kunnen migreren door de daar aanwezige kleilaag. Sinds het begin van deze eeuw kan de geulbodem niet verder verdiepen door de laag potklei op ongeveer 21 m -NAP en is er een plateau ontstaan in de geulwand door de kleilaag die op ongeveer 11 m -NAP ligt in het gekozen profiel. Intussen heeft zich in deze tijd een tweede geul gevormd verder naar het westen (in het profiel tussen 0 en 750 m). Deze geul is vermoedelijk op dezelfde kleilaag van 11 m -NAP gestuit, maar in dit geval vormt het de bodem van de geul. Deze nieuwe geul heeft zich als gevolg van de erosie-resistente laag verbreed en had een nagenoeg platte bodem over een breedte van 400 m. Sinds 2011 is deze nieuwe geul verder opgevuld en is de hoogte van de zandbank tussen de nieuwe geul en de hoofdgeul gegroeid. In de laatste vaklodging van 2019 is het restant van de in 2017-2018 aangelegde geulwandsuppletie zichtbaar.



Figuur 4.22. De geul ten westen van Ameland in het Borndiep is een schoolvoorbeeld van een geulwand en -bodem die in dit geval door erosiebestendige kleilagen worden beïnvloed. Zie Figuur 3.3 in Forzoni et al. (2018)

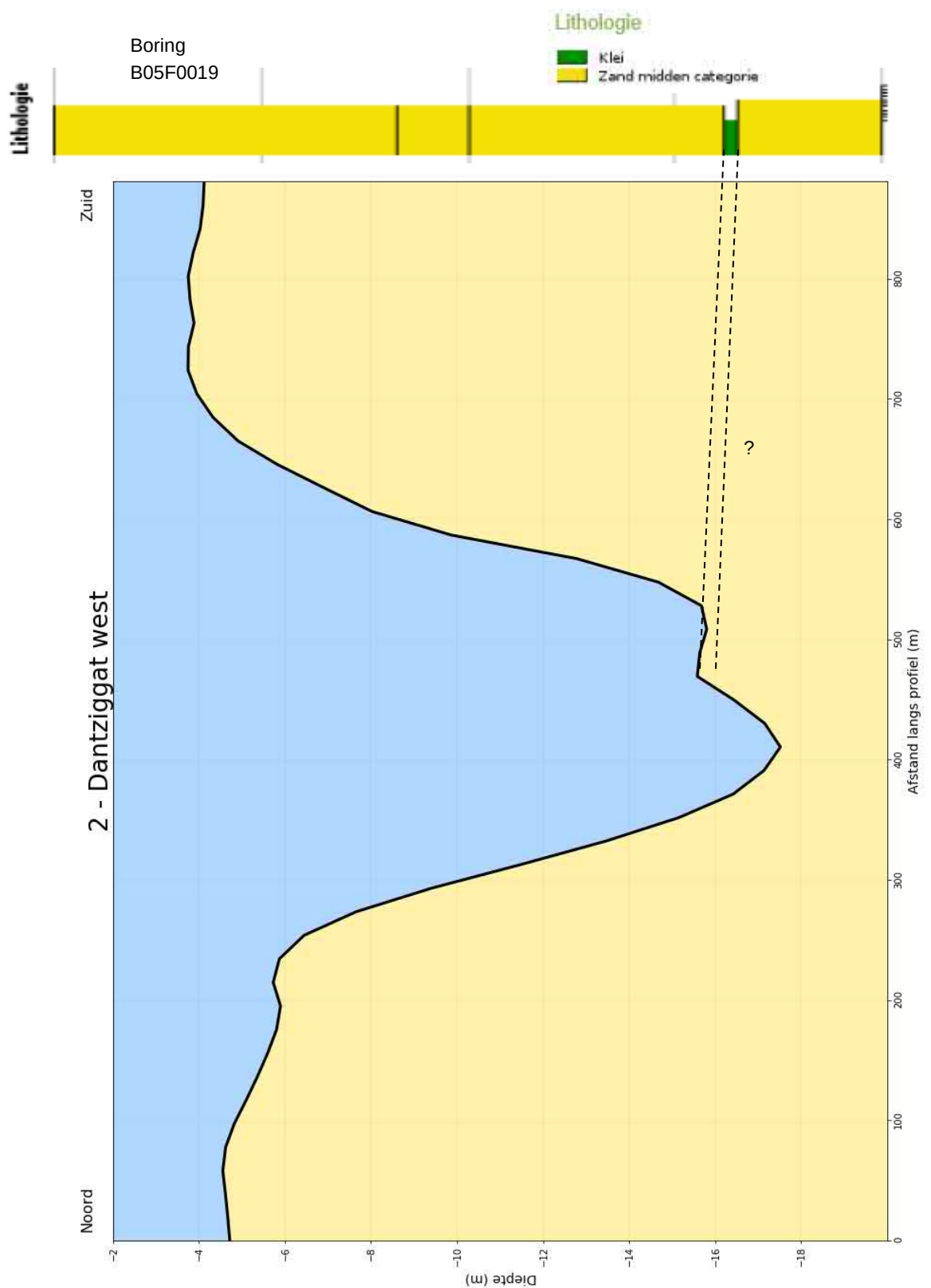


Figuur 4.23. Minimum bathymetrie Borndiep (top) en profielen (onder). De kleilaag op 11 m -NAP heeft het Borndiep aan twee kanten beperkt in zijn laterale migratie. De laag rechts in het figuur zorgde rond 1980 voor een getrapt profiel in de geulwand, maar verhindert nu de verdieping van een nieuw gevormde geul (tussen 0 en 750 m in dit figuur)

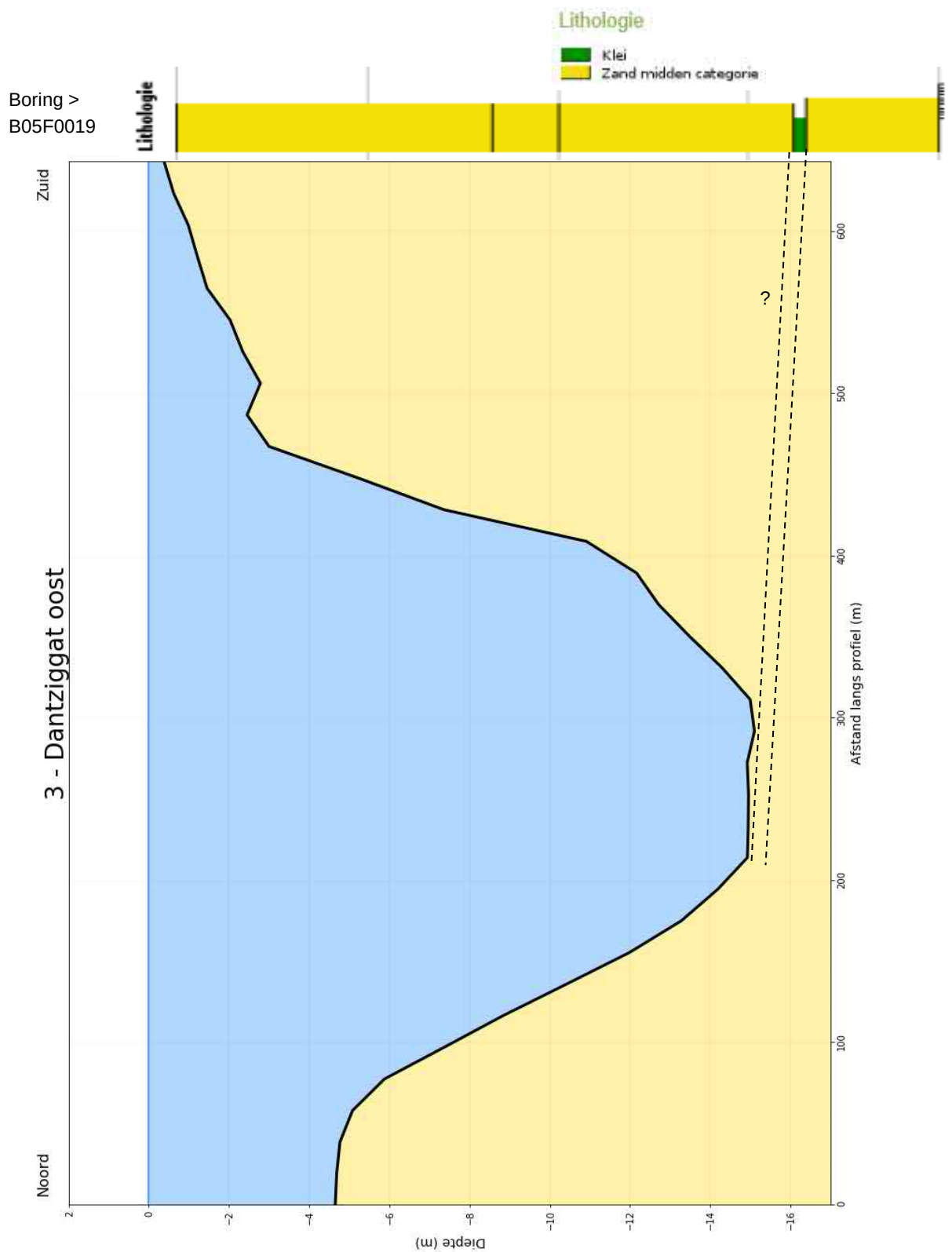
4.4.2 Locatie 2 & 3 – Dantziggat

Geologie (Figuur en 4.25): Locatie 2 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) 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.

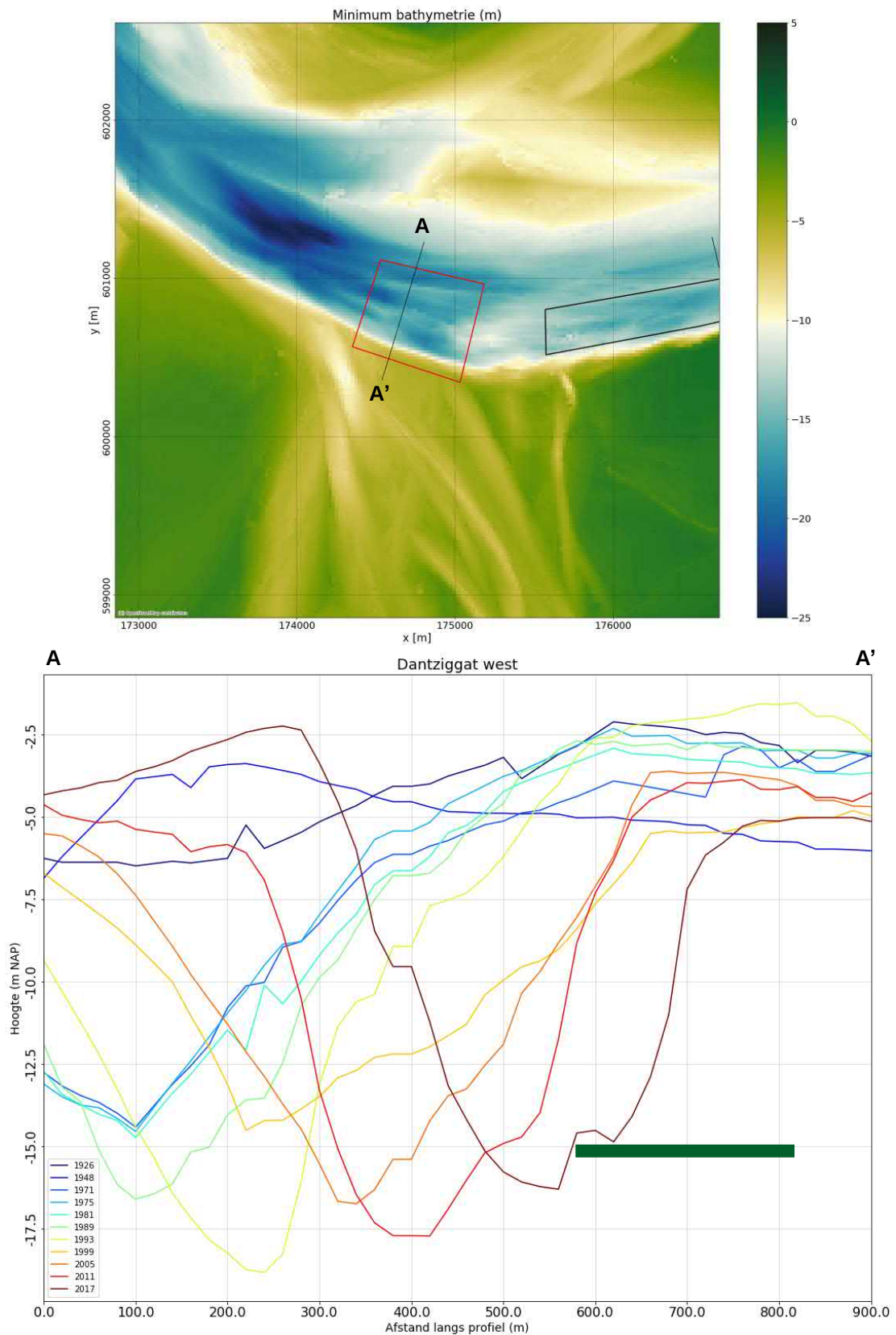
Morfologische ontwikkeling (Figuur Figuur): Op locatie 2 en 3 is het vermoedelijk dezelfde Holocene kleilaag die voor een getrappt profiel van de geulwand (locatie 2) en een vlakke geulbodem zorgt (locatie 3). Op beide locaties is het aansnijden van de vermoedelijke kleilaag nog dusdanig recent, dat een effect van deze laag op morfologische ontwikkeling nog niet te beschrijven is en er veel onzekerheid heerst of het hier daadwerkelijk om een erosie-resistente laag gaat. Ook is op locatie 3 niet uit te sluiten dat de geul tussen 2005 en 2011 dieper is geweest dan in 2011 gemeten is en momenteel opgevuld wordt, waardoor de geulbodem vlak is. Op locatie 3 is in de meting van 2017 wederom opvulling van de geul waargenomen.



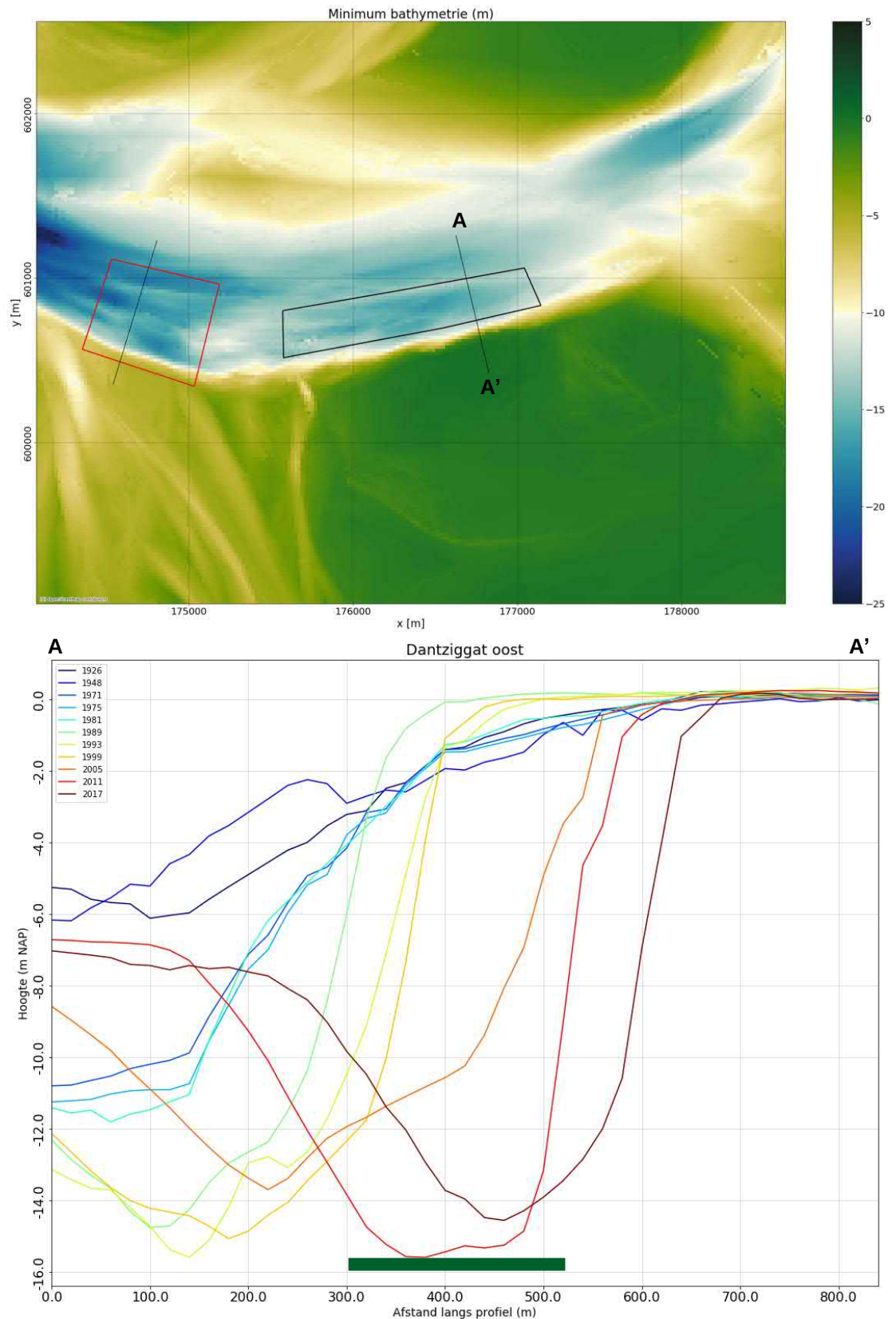
Figuur 4.24. De geulwand in de buitenbocht heeft een opvallend plateau op 16 m -NAP. Deze is te correleren aan een Holocene kleilaag.



Figuur 4.25. Iets verder ten oosten van de vorige locatie lijkt dezelfde erosiebestendige laag in dit geval de vorm van de geulbodem te beïnvloeden.



Figuur 4.26. Minimum bathymetrie Dantziggat west (top) en profielen (onder). Enkel in de vaklodging van 2011 en 2017 is er een effect op de geulwand zichtbaar. Tussen 2011 en 2017 heeft er een zeer snelle erosie van de geulwand plaatsgevonden.



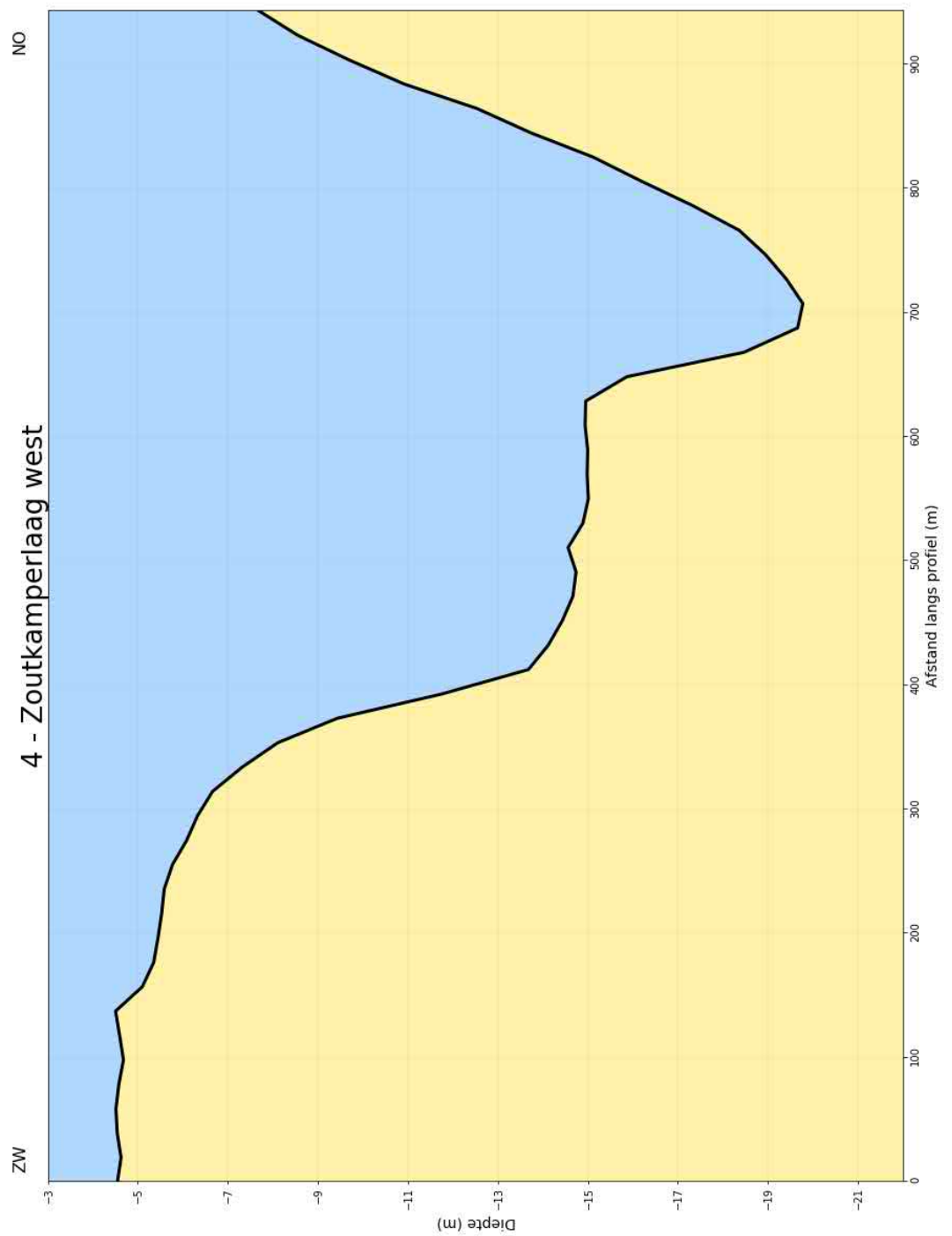
Figuur 4.27. Minimum bathymetrie Dantziggat oost (top) en profielen (onder). Enkel in de vakloding van 2011 is er een effect op de geulbodem zichtbaar. In de meting van 2017 is weer opvulling zichtbaar.

4.4.3 Locatie 4 & 5 – Zoutkamperlaag

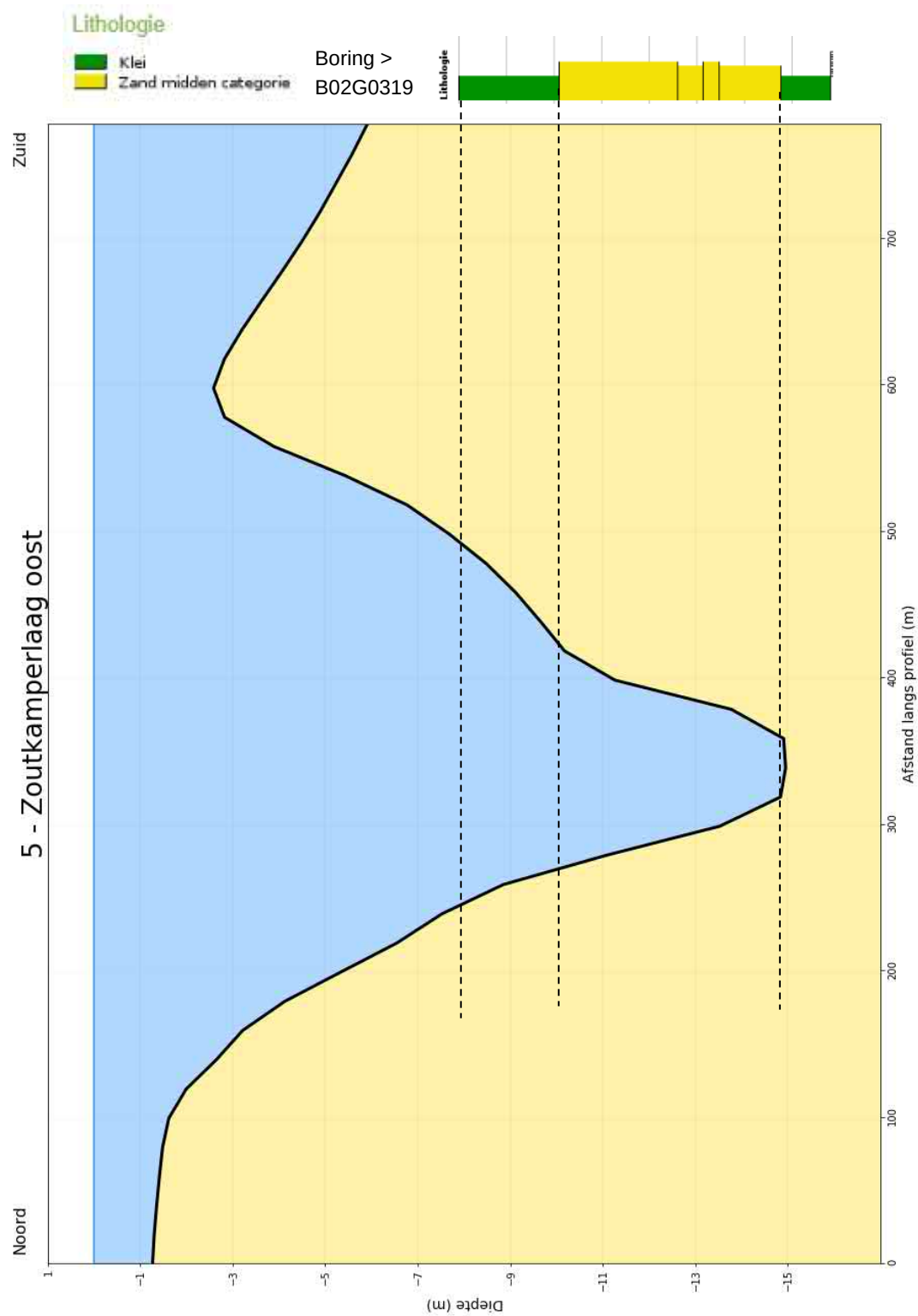
Geologie (Figuur en 4.29): Op locatie 4 heeft de geulwand een 200 meter breed plateau op 15 m -NAP. Verder naar het oosten (locatie 5) ligt de geulbodem op 15 -NAP en ook hier lijkt de geul op een erosie-resistente laag te stuiten. Er zijn geen direct in de buurt gelegen boringen die een eenduidig beeld kunnen geven over de herkomst van deze laag. De kleilaag die aan de basis van de geulbodem is gevonden op locatie 5 (Figuur) 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.

Morfologische ontwikkeling (Figuur 4. en 4.31): Op locatie 4 is er pas sinds eind jaren '90 een plateau in de geulwand ontstaan, waardoor er weinig bekend is van de langdurige morfologische effecten. Tot in de jaren '80 stroomden hier afwisselend ondiepe getijdegeulen die nooit tot op het niveau van de vermoedelijke erosie-resistente laag kwamen. Sindsdien ontwikkelde zich een diepere geul die in zuidwestelijke richting migreerde. Eind jaren 90 kwam de geulwand in contact met de erosie-resistente laag, waardoor de laterale migratie boven deze laag ongeveer gelijk bleef (~200 m tussen 2000 en 2012), maar onder deze laag een steile geulwand ontstond die minder snel opschoof (~100 m tussen 2000 en 2012). In de laatste meting van 2019 lijkt de geul zich op te vullen. Dit zou in verband kunnen staan met het niet (snel) verder kunnen migreren van de geul, en/of is gerelateerd aan grootschaliger morfologische ontwikkelingen, bijvoorbeeld een wisseling van de dominante getijdengeul.

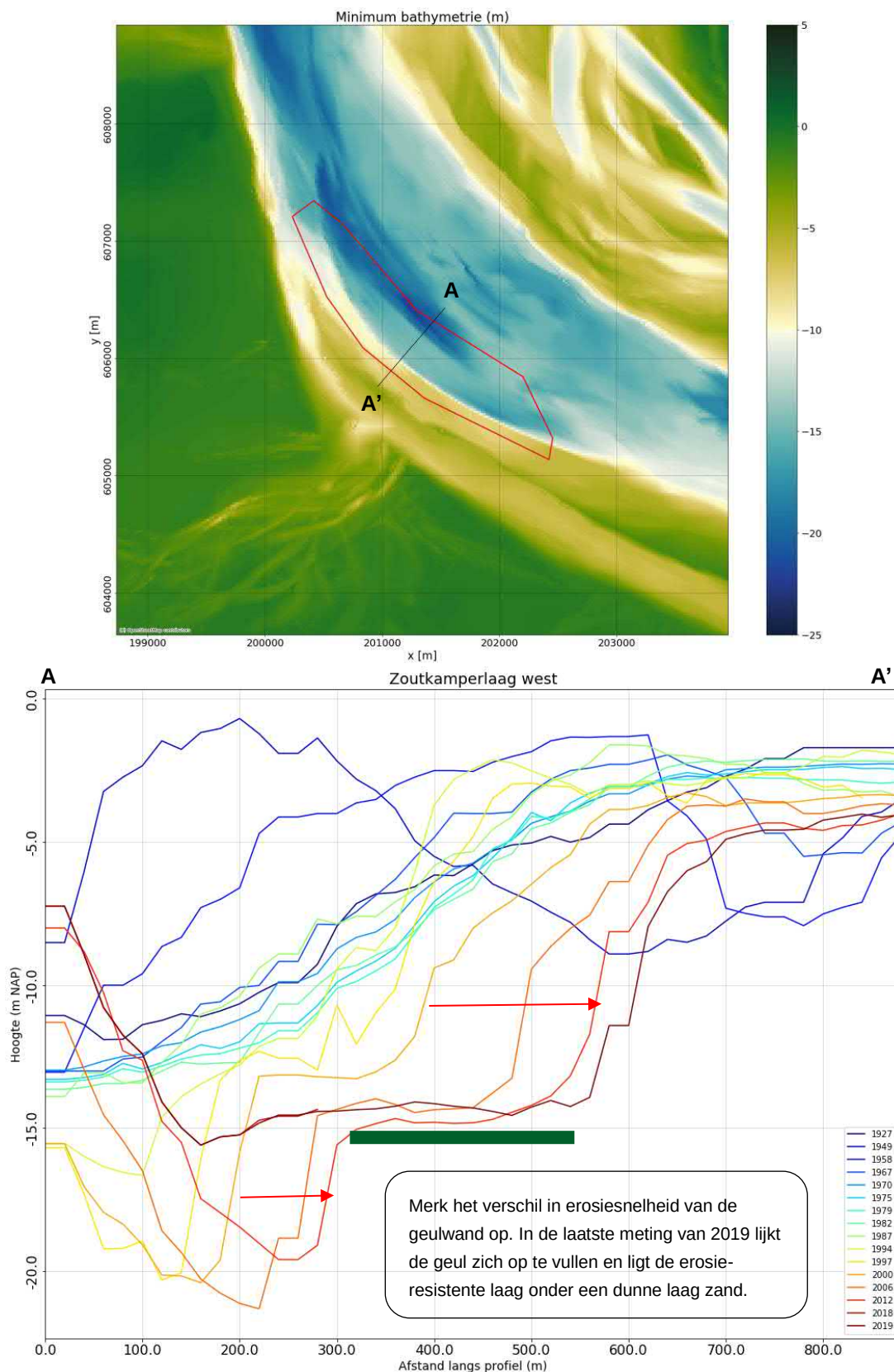
Op locatie 5 (Figuur 4.) is de geul in kwestie pas sinds het begin van deze eeuw ontwikkeld. Daarvoor concentreerde de stroom zich in een zuidelijker gelegen getijdegeul totdat in 1969 de Lauwerszee werd afgesloten en deze als gevolg hiervan begon op te vullen. Een degelijke analyse van het effect van deze erosie-resistente laag is nog niet te geven. Het laagste niveau van de geulbodem, dat in 2012 bereikt werd, was in 2019 bedekt met een dunne laag zand, wat erop kan duiden dat de geul zich niet verder door de erosie-resistente laag probeert in te snijden. Anderzijds zou het hier om een (op het moment van opname) tijdelijk aanwezige actieve laag kunnen gaan.



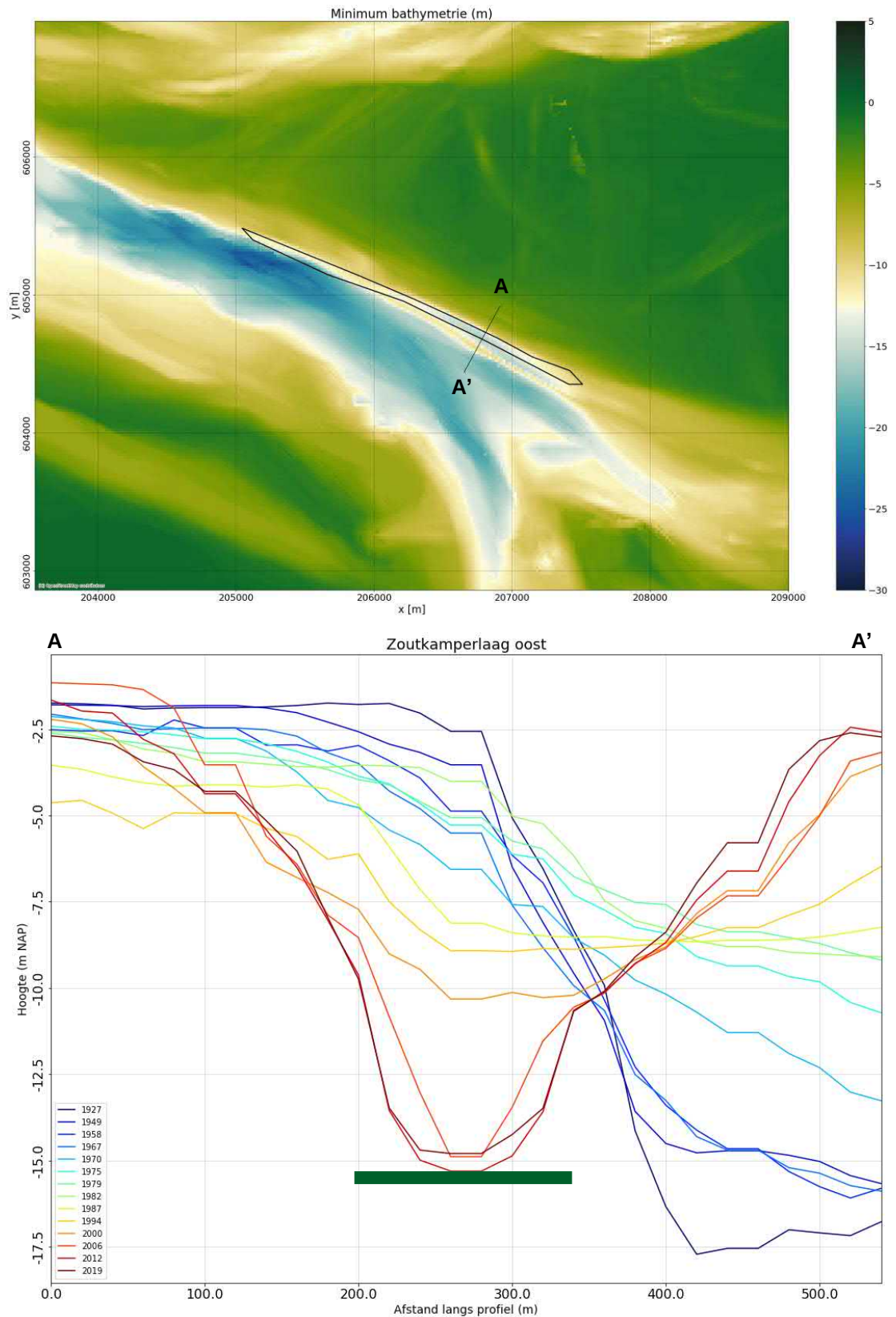
Figuur 4.28. Op deze locatie ligt een 200 m breed plateau op 15 m -NAP. Op deze locatie zijn geen boringen die op een erosiebestendige laag duiden.



Figuur 4.29. Iets verder ten oosten van locatie 4 is op de dezelfde diepte in dit geval de geulbodem vlak over een breedte van ongeveer 50 m, mogelijk doordat dezelfde erosiebestendige laag ook hier aanwezig is.



Figuur 4.30. Minimum bathymetrie Zoutkamperlaag west (top) en profielen (onder). Sinds het begin van deze eeuw heeft het plateau in de geulwand zich ontwikkeld, wat invloed heeft gehad op de migratiesnelheid van de geulwand zowel boven als onder de erosie-resistente laag. Inmiddels is de geul begonnen met opvullen en ligt er een laag zand op de erosie-resistente laag.

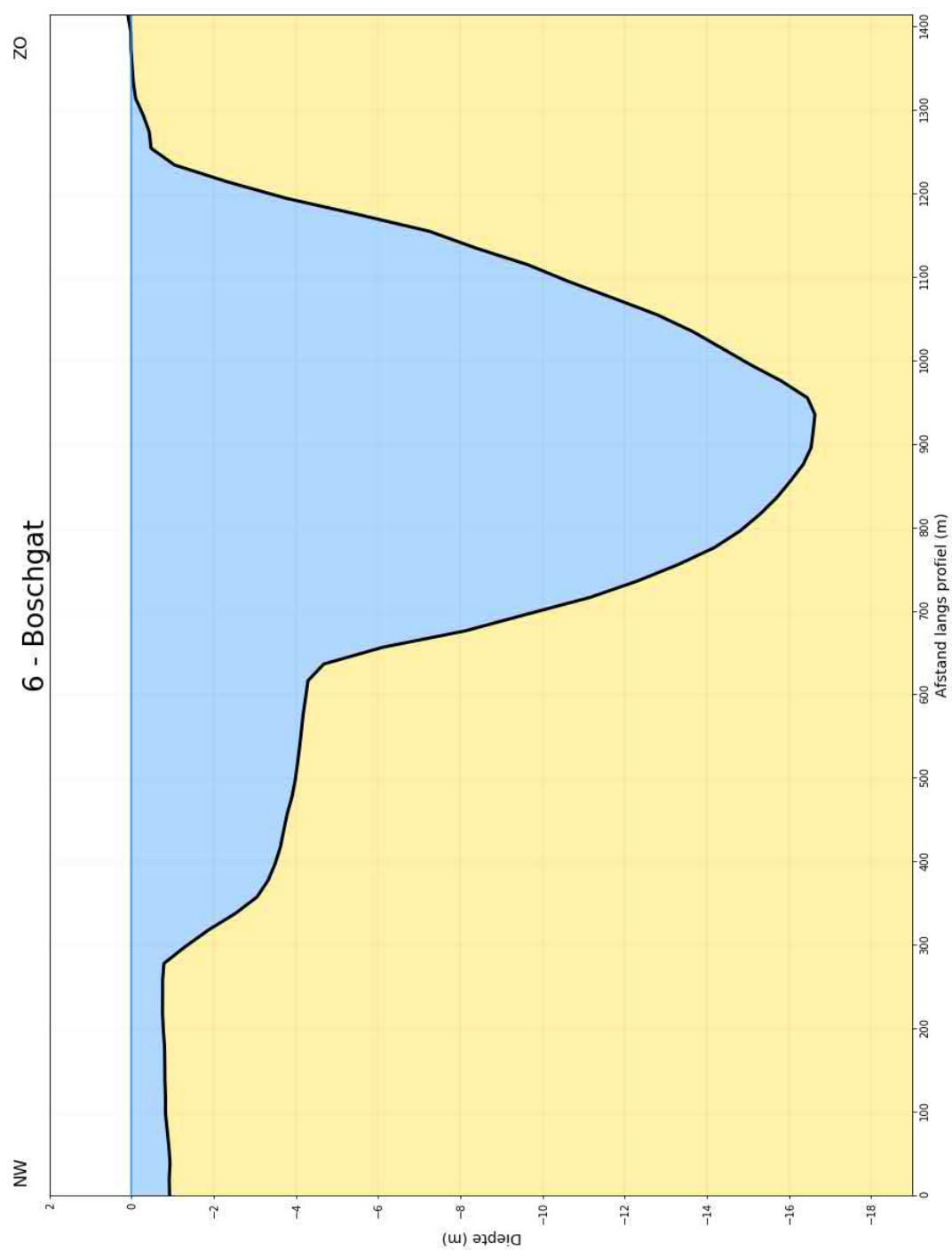


Figuur 4.31. Minimum bathymetrie Zoutkamperlaag oost (top) en profielen (onder). Uit de minimum bathymetrie is duidelijk te zien hoe de voorganger van de huidige geul ten zuiden stroomde. De opvulling van deze geul vond tussen 1969 (afsluiting Lauwerszee) en medio jaren '90 plaats. De huidige geul is sinds het begin van deze eeuw ontwikkeld.

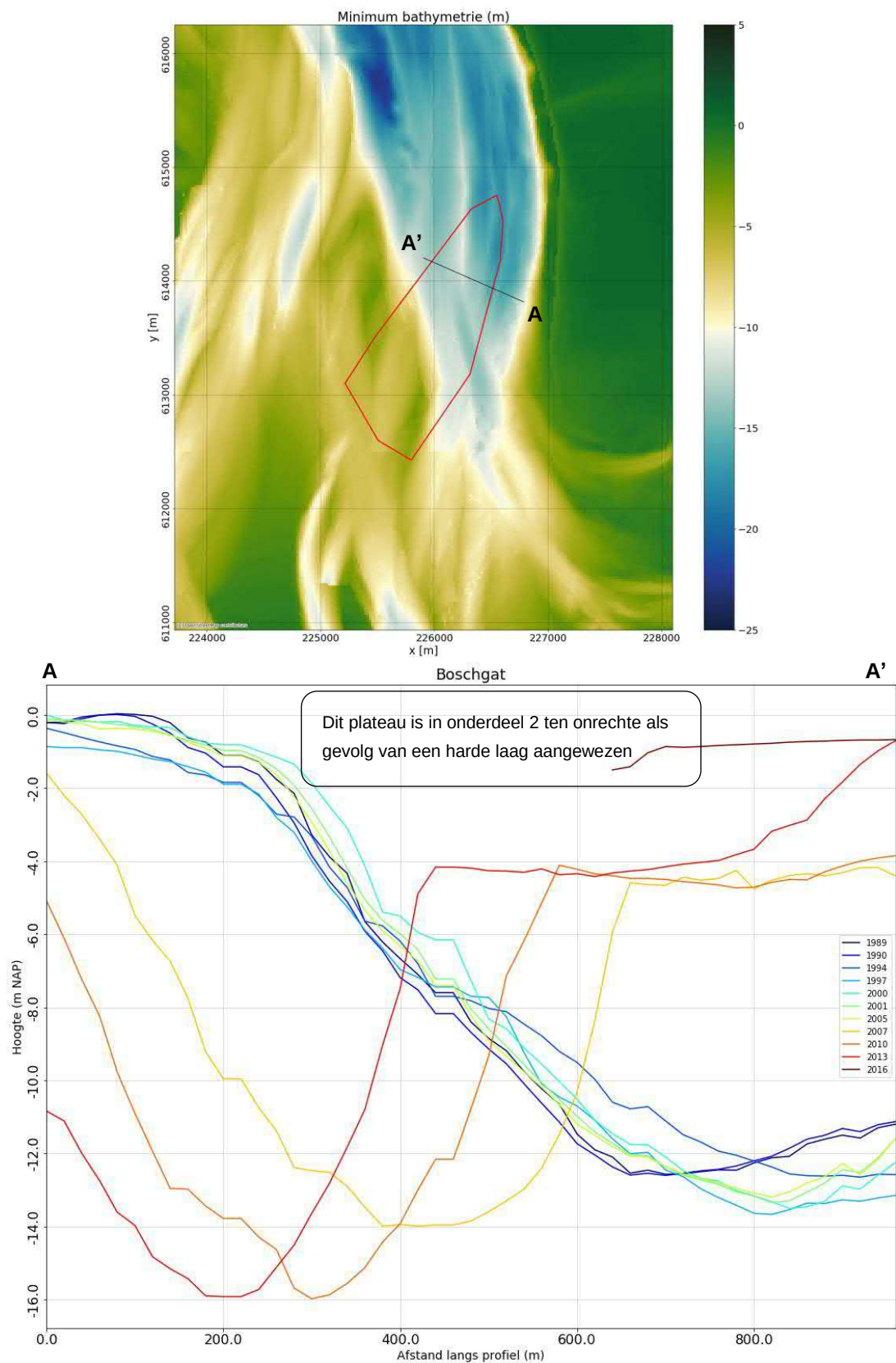
4.4.4 Locatie 6 – Boschgat

Geologie (Figuur): Op locatie 6 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.

Morfologische ontwikkeling (Figuur 4.1): Op locatie 6 werd al het vermoeden uitgesproken dat het geobserveerde plateau in de geulwand het gevolg zou kunnen zijn van opvulling. Tussen 2005 en 2007 is het Boschgat hier van actieve geul gewisseld, waardoor de westelijke geul zich snel opvulde (en nu het plateau is dat ten onrechte werd aangezien voor het effect van een erosie-resistente laag), terwijl de actieve geul zich heeft verlegd naar het oosten.



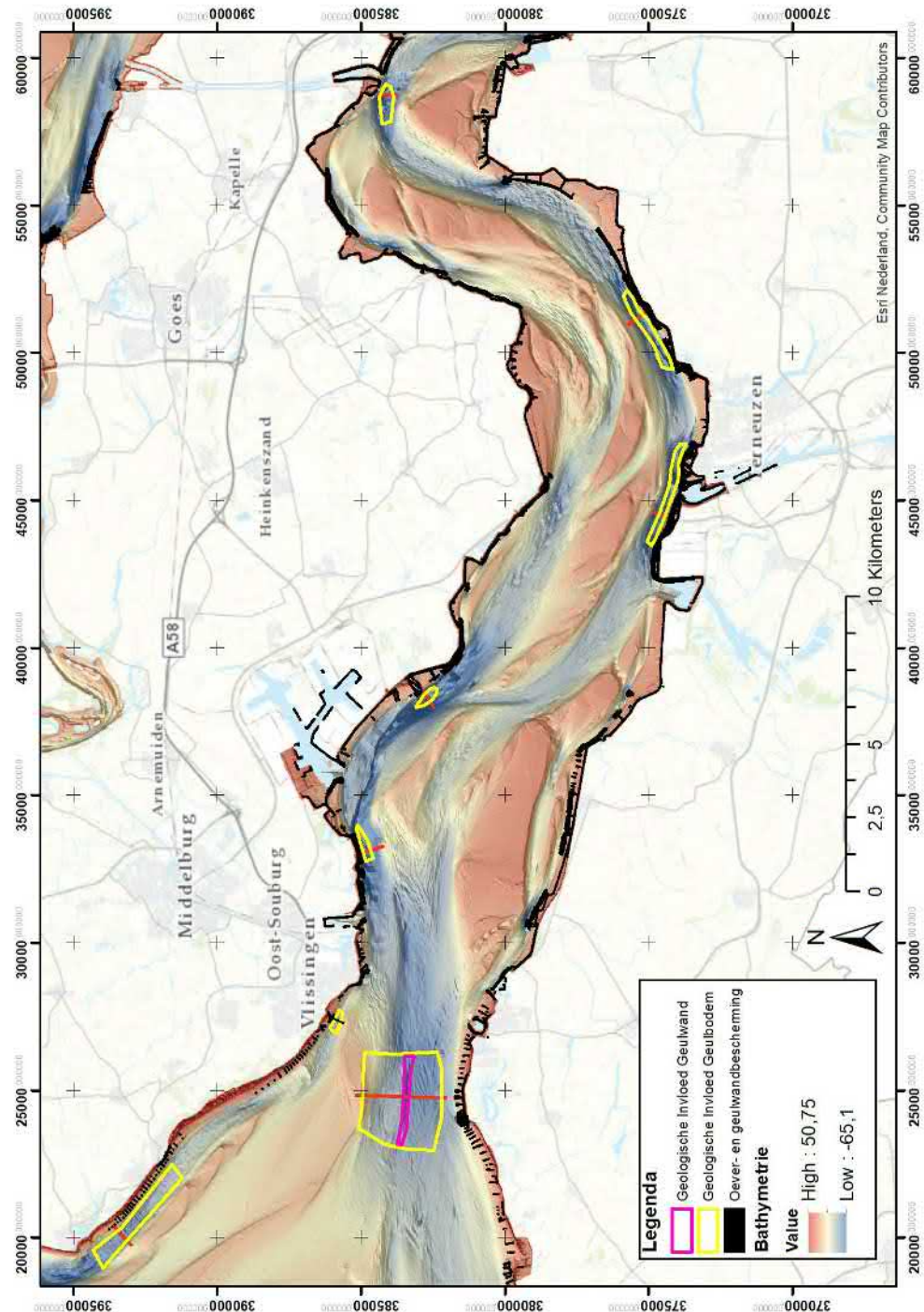
Figuur 4.32. Voor het plateau op 4 m -NAP zijn geen aanwijzingen gevonden dat het ontstaan verband houdt met de geologie.



Figuur 4.1. Minimum bathymetrie Boschgat (top) en profielen (onder). Hier blijkt het plateau op 4 m -NAP het gevolg van opvulling, nadat de oorspronkelijke geul werd verlaten en de stroom zich verder oostwaarts concentreerde.

4.5 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 geulbodem en/of -wand (Figuur). Op de meeste locaties is de stevige klei in het Laagpakket van Boom (Formatie van Rupel) de oorzaak.

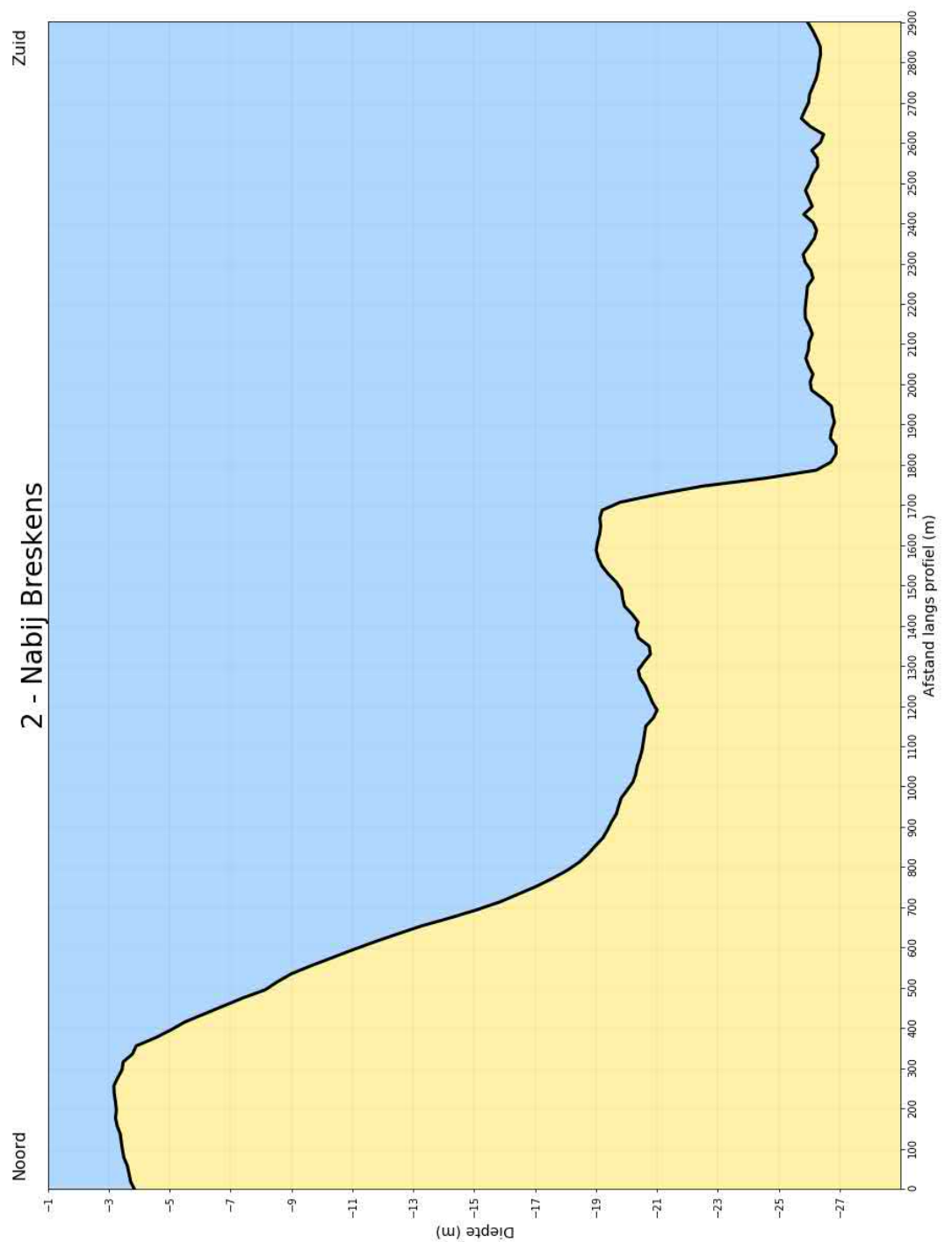


Figuur 4.34.. Overzicht van locaties in de Westerschelde waar de geul waarneembaar beïnvloed wordt door erosie-resistente lagen.

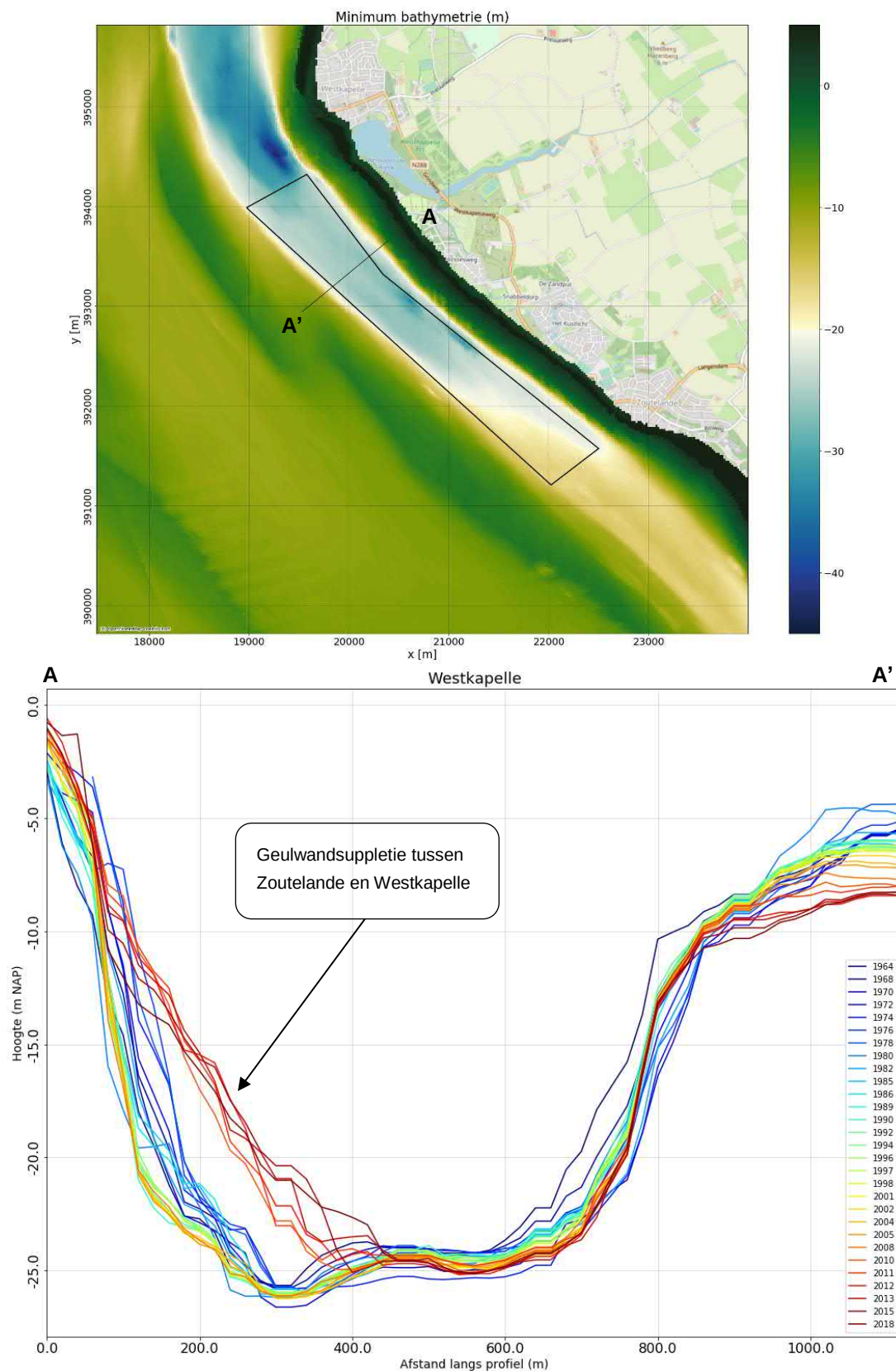
4.5.1 Locatie 1 – Westkapelle

Geologie (Figuur): 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 Pliocene 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.

Morfologische ontwikkeling (Figuur 4.36): De bodem van de geul is hier tussen begin jaren '60 en 2008 nauwelijks verplaatst of van vorm veranderd. De noordelijke geulwand wordt hier op de locatie van het getoonde profiel middels een bestorting beschermd, waardoor er geen verdere kustwaartse migratie werd waargenomen in deze tijd. De geulbodem was nagenoeg vlak over een breedte van 400 m. Medio jaren '90 lag er een dunne (~0.5 m dikke) actieve laag op de geulbodem. In de profielen is de geulwandsuppletie tussen Zoutelande en Westkapelle (aangelegd in 2006, uitgebreid in 2008/2009) goed zichtbaar (Vermaas & Bruens, 2013). Mogelijk heeft de zwakke-schakel vooroeversuppletie voor de kust van Westkapelle ook een kleine bijdrage geleverd aan de volumetoename (Elias et al., 2014). Het deel van de geulbodem dat niet door de suppleties bedekt werd, is nog steeds vlak op een diepte van 25 m -NAP.



Figuur 4.35. De twee plateaus worden in diepte beperkt door de aanwezigheid van stevige klei uit het Laagpakket van Boom en/of de Eem formatie.

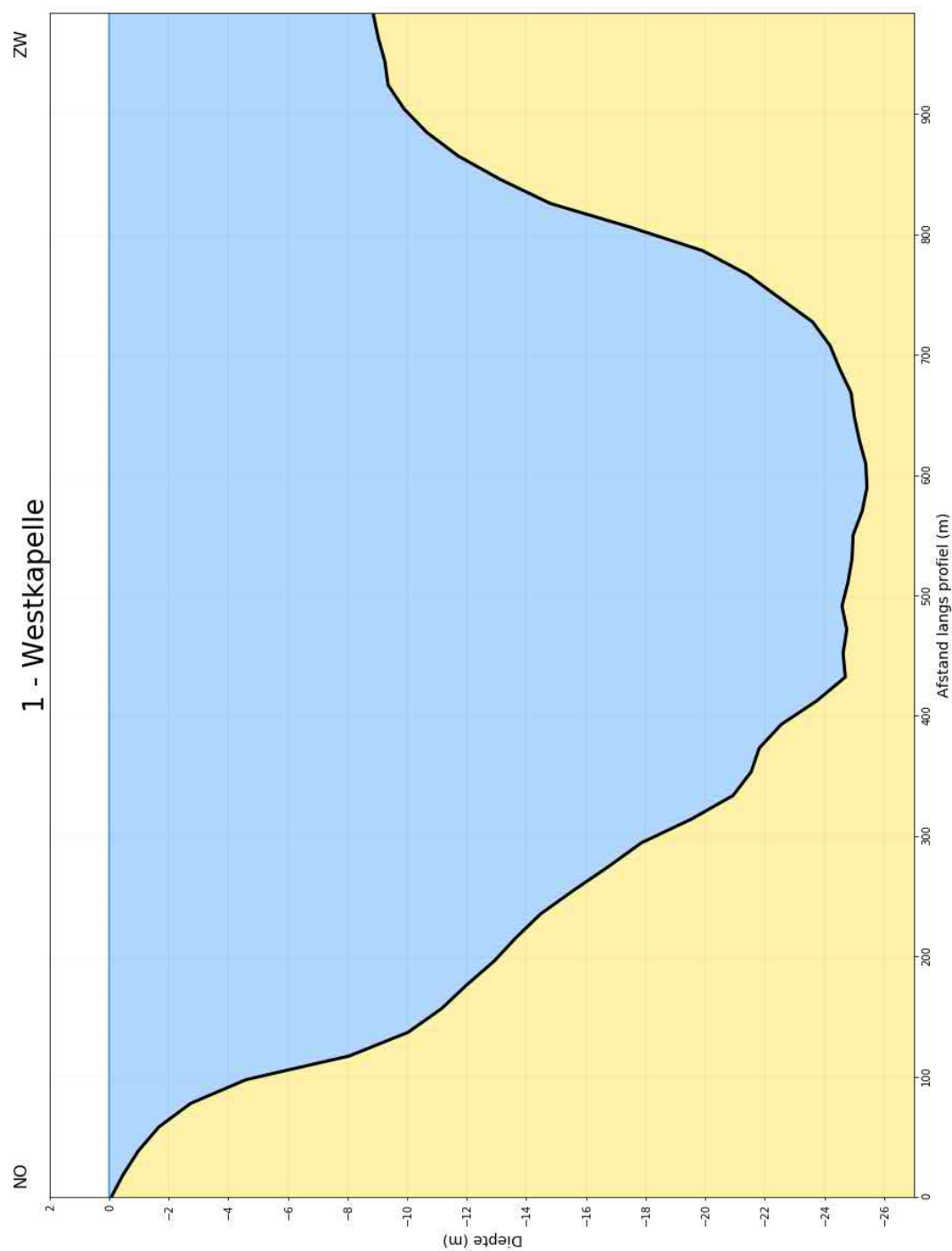


Figuur 4.36. Minimum bathymetrie Westkapelle (top) en profielen (onder). De grootste zichtbare verandering is door de geulwandsuppleties die tussen Zoutelande en Westkapelle zijn aangelegd. De geul lijkt gedurende 50 jaar niet verder te verdiepen dan 25 m -NAP, met uitzondering van het noordoostelijke deel van de geul.

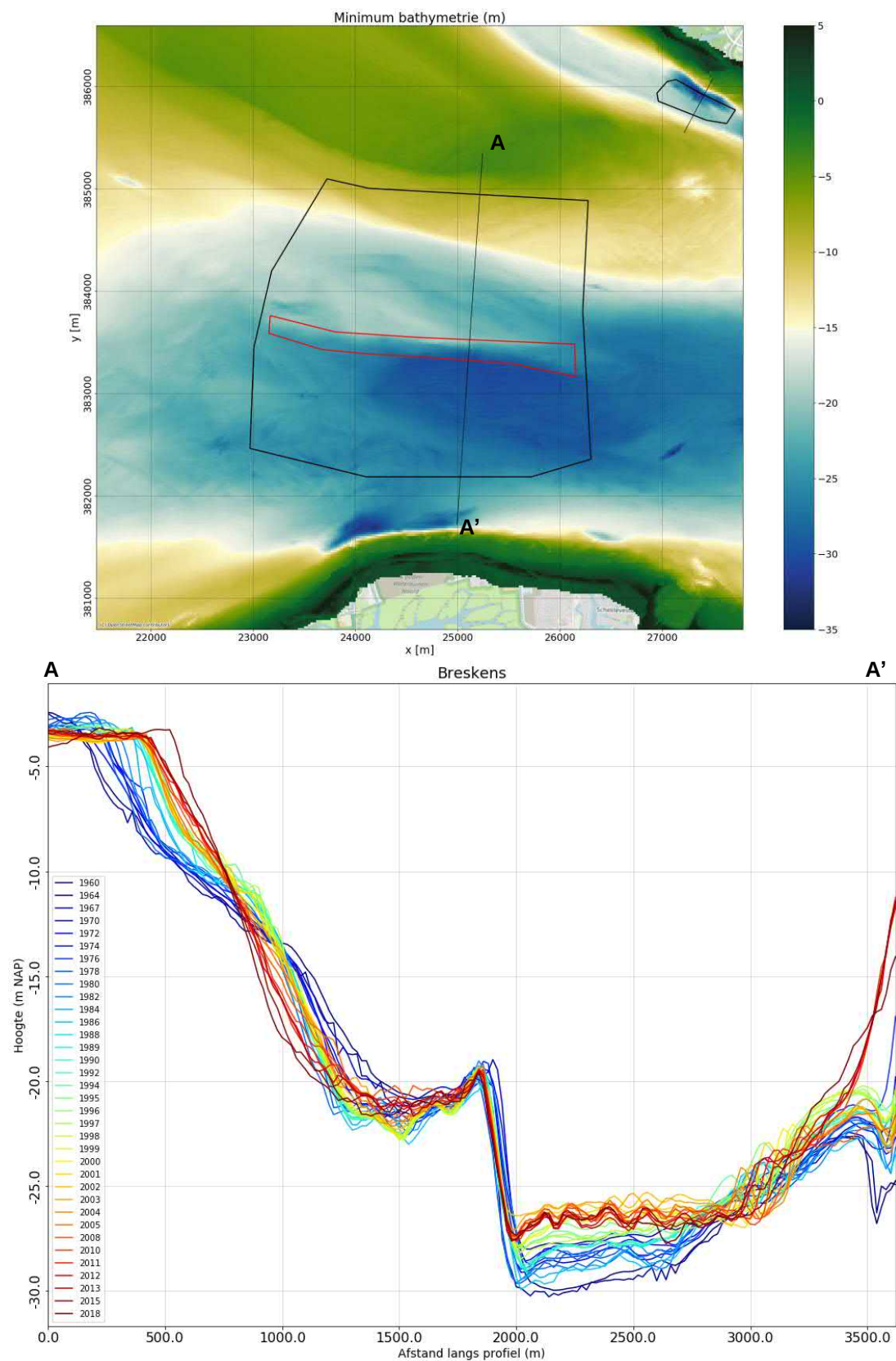
4.5.2 Locatie 2 – Breskens

Geologie (Figuur): 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.

Morfologische ontwikkeling (Figuur): Tussen 1959 en de laatste bekende meting in 2015 heeft hier nauwelijks verandering plaatsgevonden. Er is geen laterale migratie geweest, wat in verband zou kunnen staan met de erosie-resistente laag die vermoedelijk op 21 m -NAP ligt.



Figuur 4.37. Aan de basis van de geul ligt een laag klei behorende tot de Formatie van Oosterhout

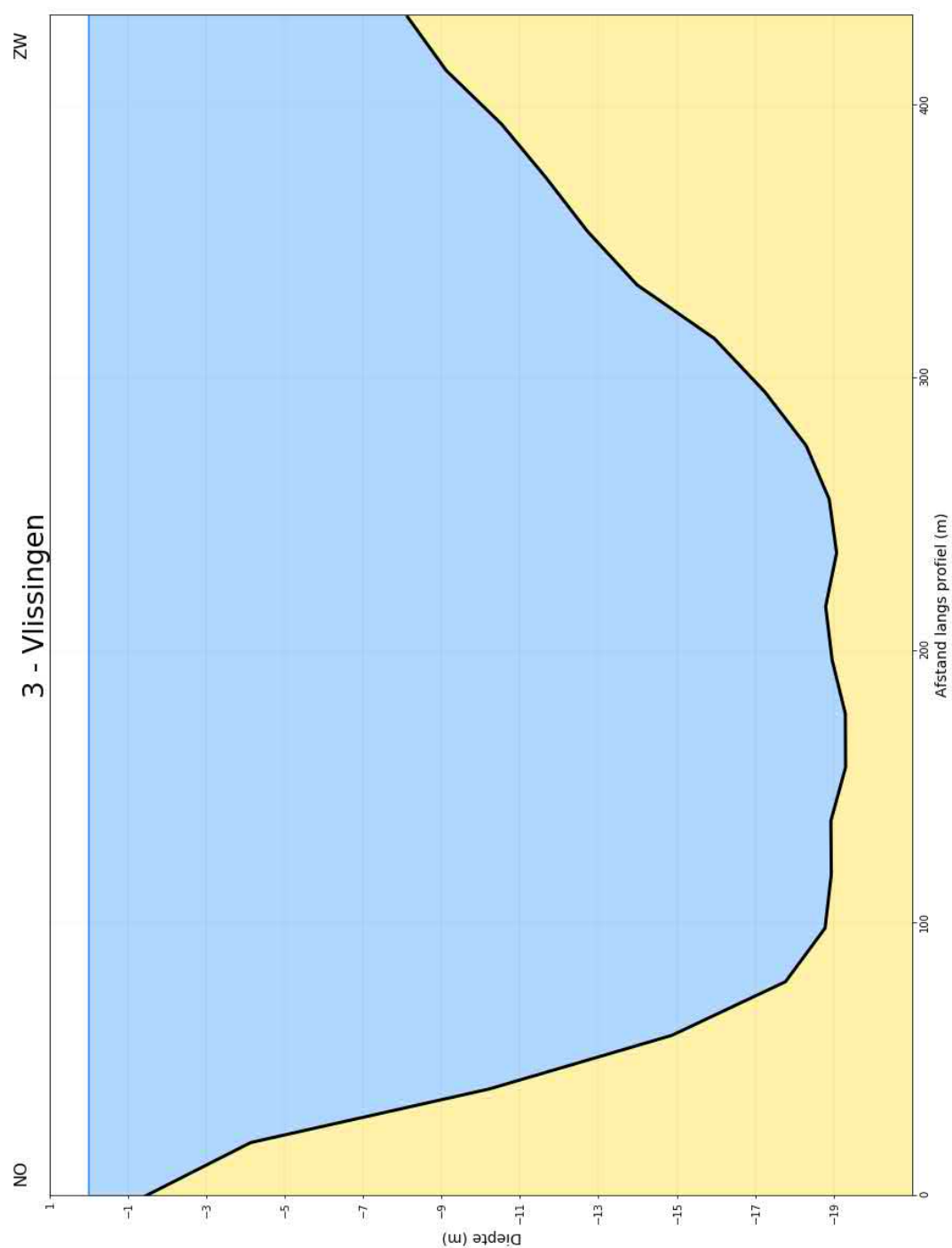


Figuur 4.38.. Minimum bathymetrie Breskens (top) en profielen (onder). Hier is weinig morfologische verandering geweest. Het plateau op 26 m -NAP komt door opvulling van de geul.

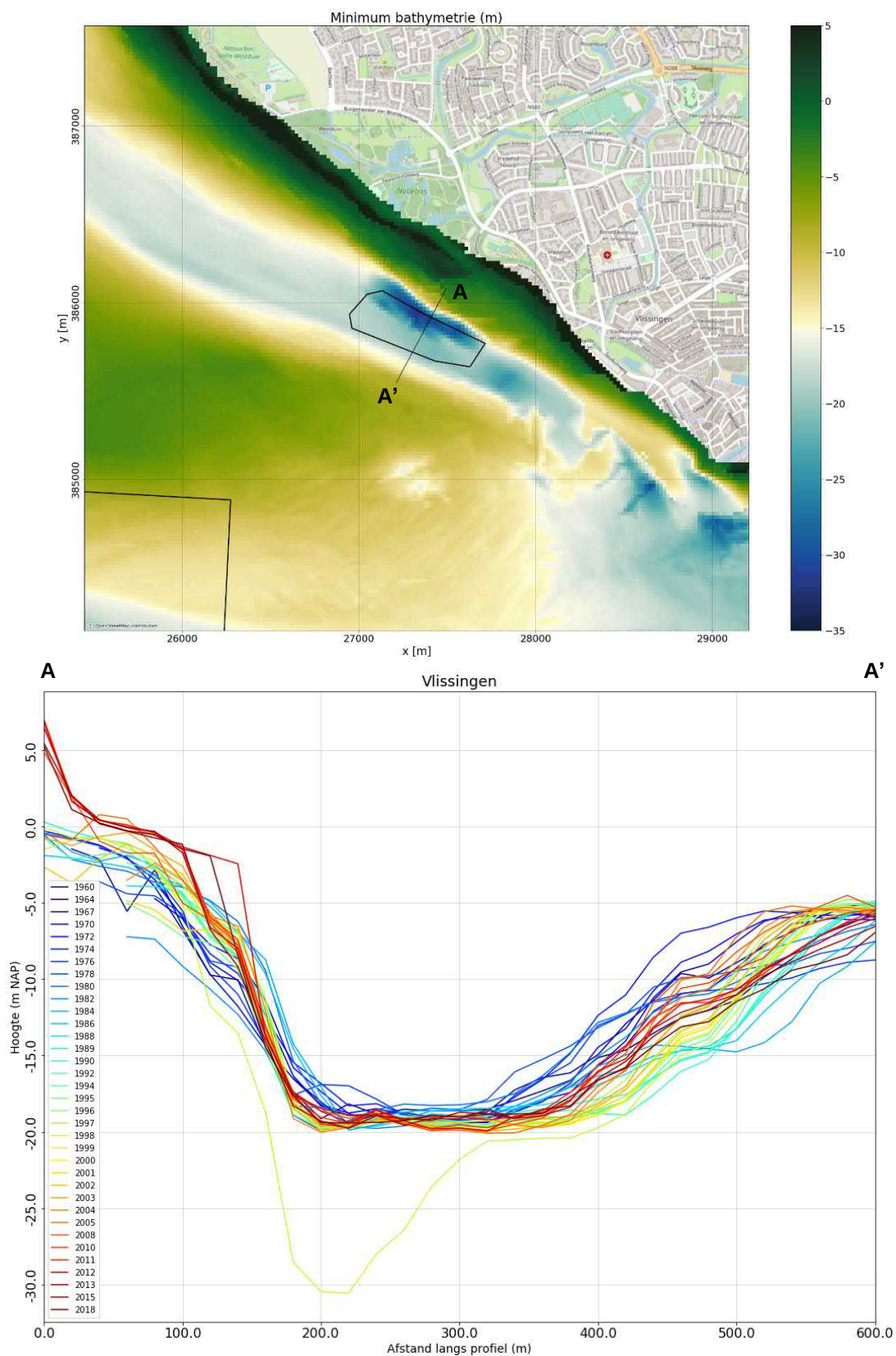
4.5.3 Locatie 3 – Vlissingen

Geologie (Figuur): 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)

Morfologische ontwikkeling (Figuur): De geul is hier gedurende 45 jaar tussen 1970 en 2015 nauwelijks van plaats veranderd. In 2005 werd echter een diepe kuil tot 30 m -NAP gemeten, terwijl de vlakke geulbodem op 20 m -NAP ligt. Waarschijnlijk gaat hier om een meetfout.



Figuur 4.39. Aan het oppervlak van de vlakke geulbodem ligt stevige klei uit het Laagpakket van Boom.

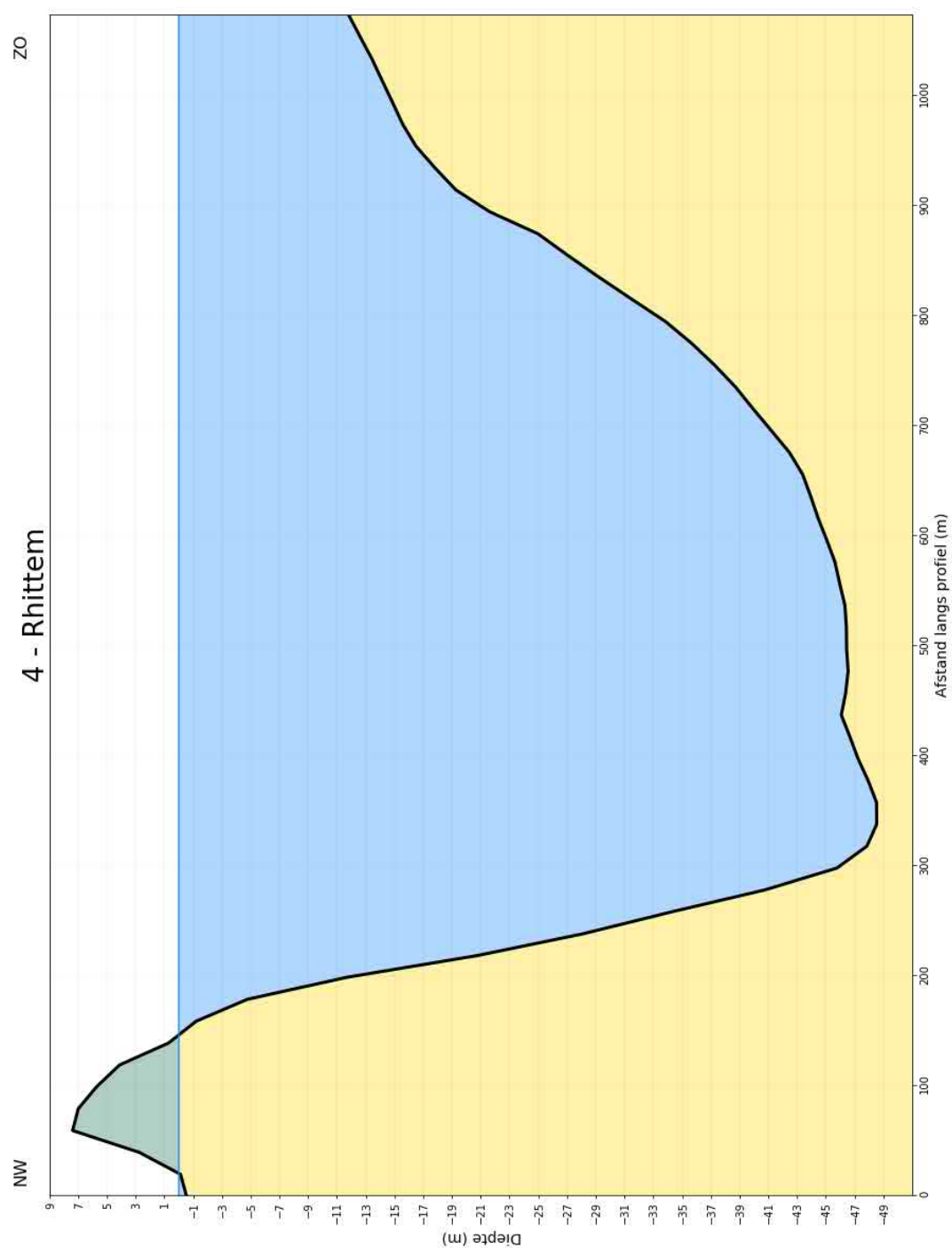


Figuur 4.40.. Minimum bathymetrie Vlissingen (top) en profielen (onder). De geul verplaatst nauwelijks. Onbekend is waarom de meting van 1999 dusdanig sterk afwijkt.

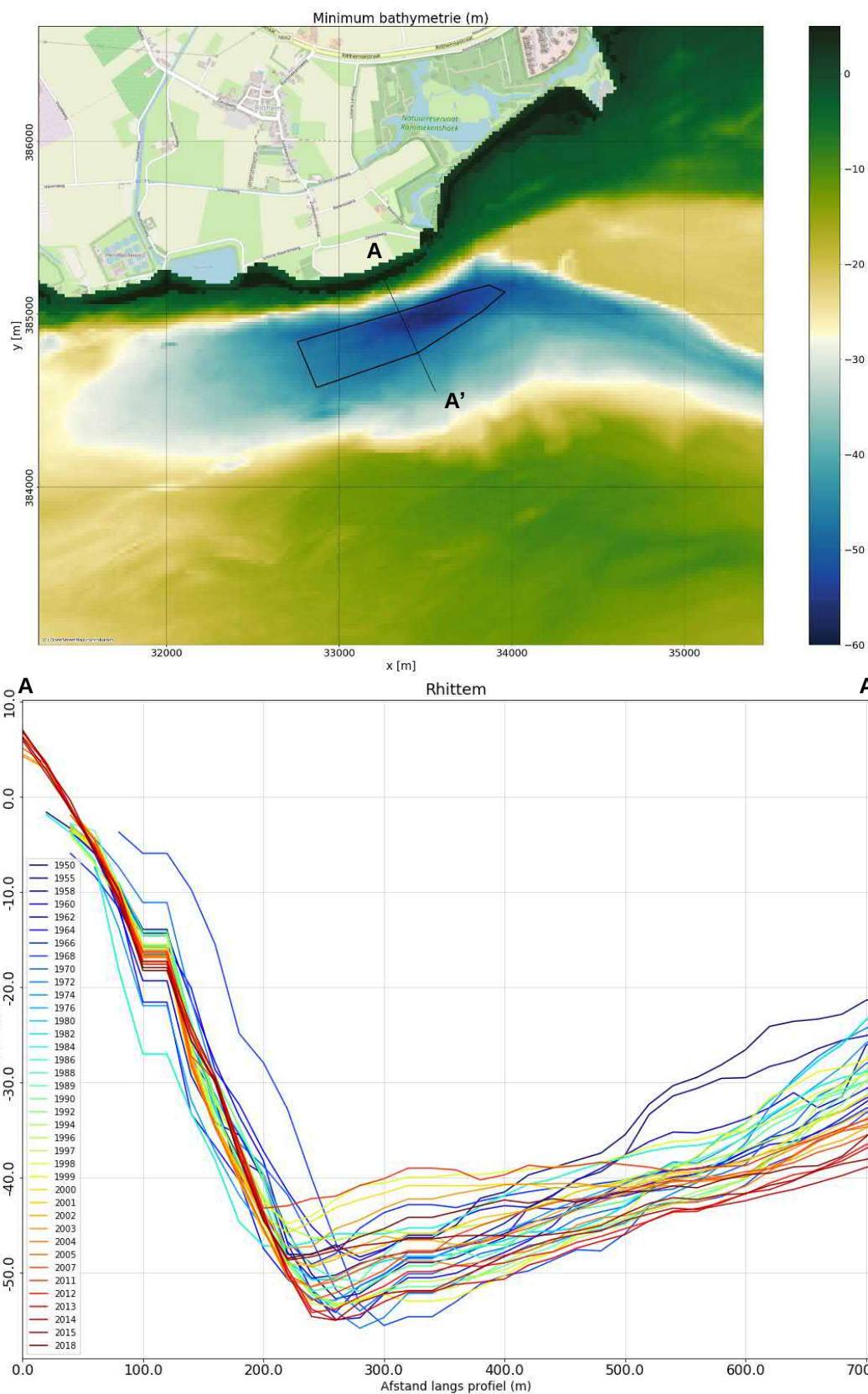
4.5.4 Locatie 4 – Ritthem

Geologie (Figuur): 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 geulbodem.

Morfologische ontwikkeling (Figuur 4.): Hier is de geul nauwelijks bewogen in de periode van 1950 tot 2015. Wel is de geul over de vrijwel de gehele breedte van het profiel dieper geworden, met uitzondering van de bestorte geulwand aan de noordkant. De huidige geul is op de locatie van het getoonde profiel al enkele meters in de Boomse klei gesneden en wordt hierdoor vertraagd. Op sommige plaatsen is de geul al bijna door de kleilaag gesneden (Van der Vegt et al., 2020). Indien de resterende klei doorsneden wordt zou de geul op deze locatie versneld kunnen verdiepen.



Figuur 4.41.. Ook hier is het Laagpakket van Boom verantwoordelijk voor het beperken van erosie van de geulbodem.

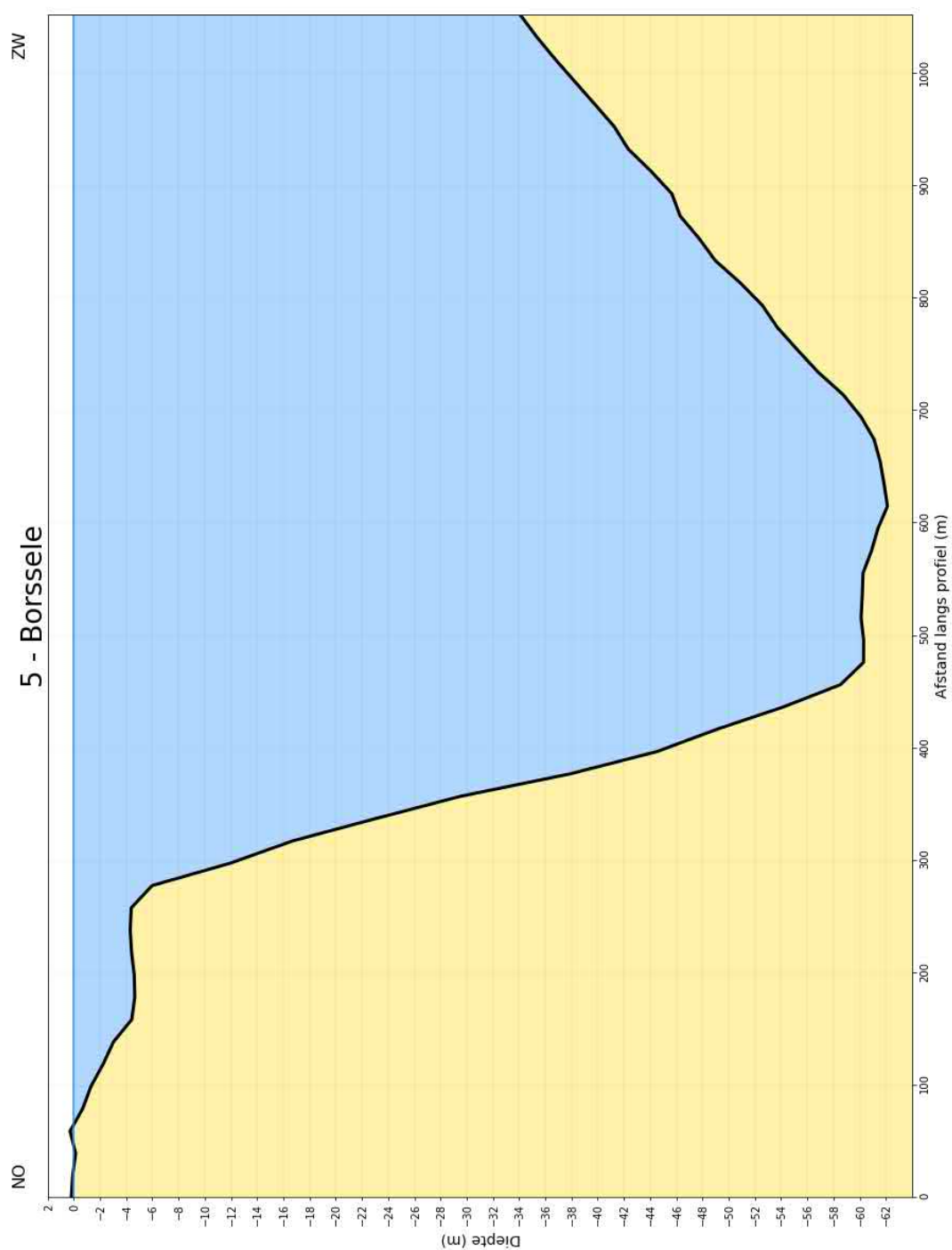


Figuur 4.42. Minimum bathymetrie Rhitterm (top) en profielen (onder). De geul is in ruim 60 jaar op z'n plaats gebleven. In het zuiden is de binnenbocht van de geul zo'n 10 m dieper geworden.

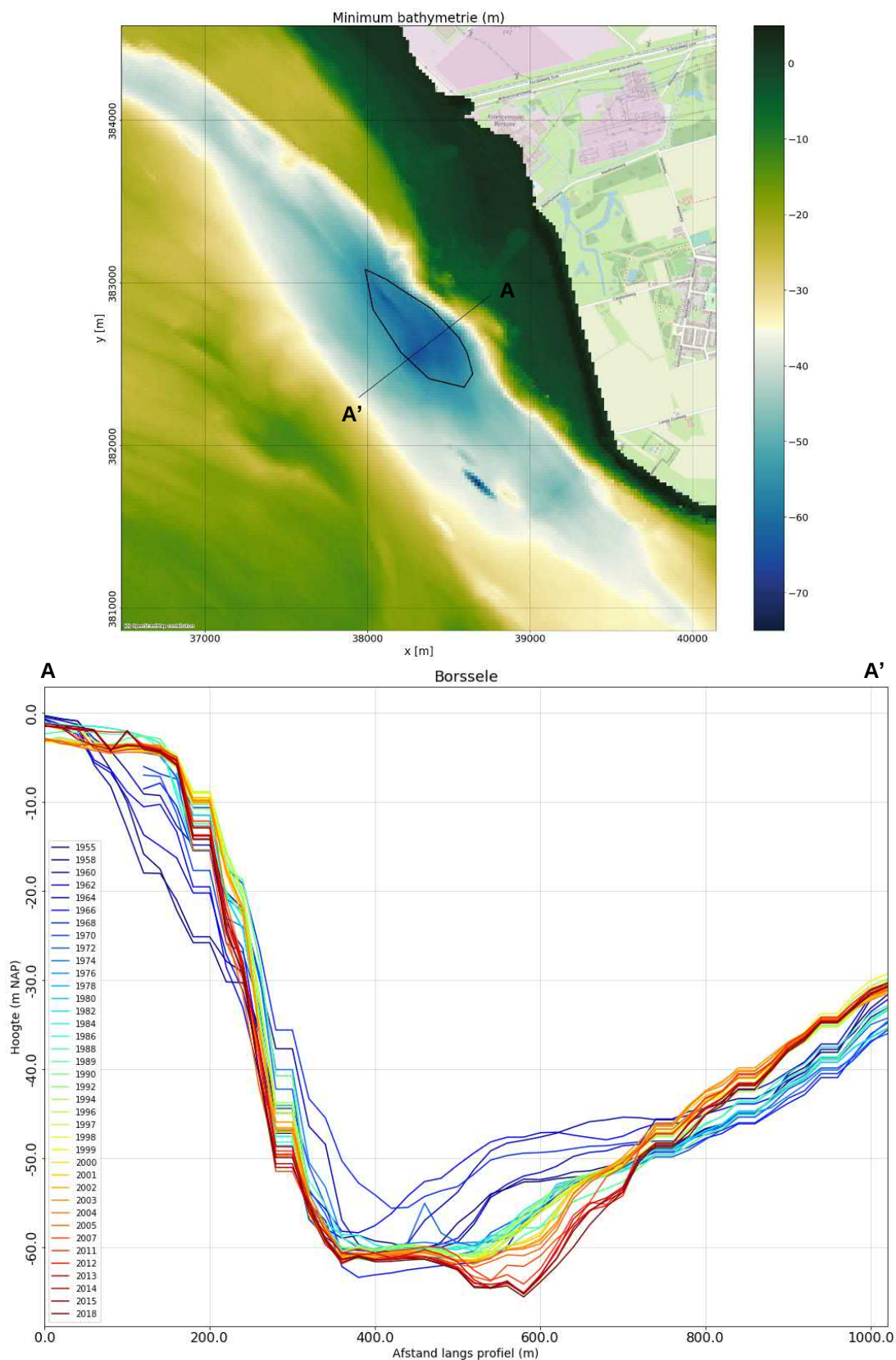
4.5.5 Locatie 5 – Borselle

Geologie (Figuur): De geulbodem 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.

Morfologische ontwikkeling (Figuur 4.). Ook deze geul heeft zich door de tijd heen nauwelijks verplaatst. Rond 600 m in het profiel heeft de geul zich sterk verdiept, maar leek deze verdieping te stabiliseren tussen 1980 en 2000 rond 60 m -NAP. Sindsdien is dit deel van de geul verder verdiept, mogelijk door de Boomse klei heen, die hier aan de geulbodem verwacht wordt.



Figuur 4.43. Op een diepte van 60 m -NAP is de geul hier op het Laagpakket van Boom gestuit

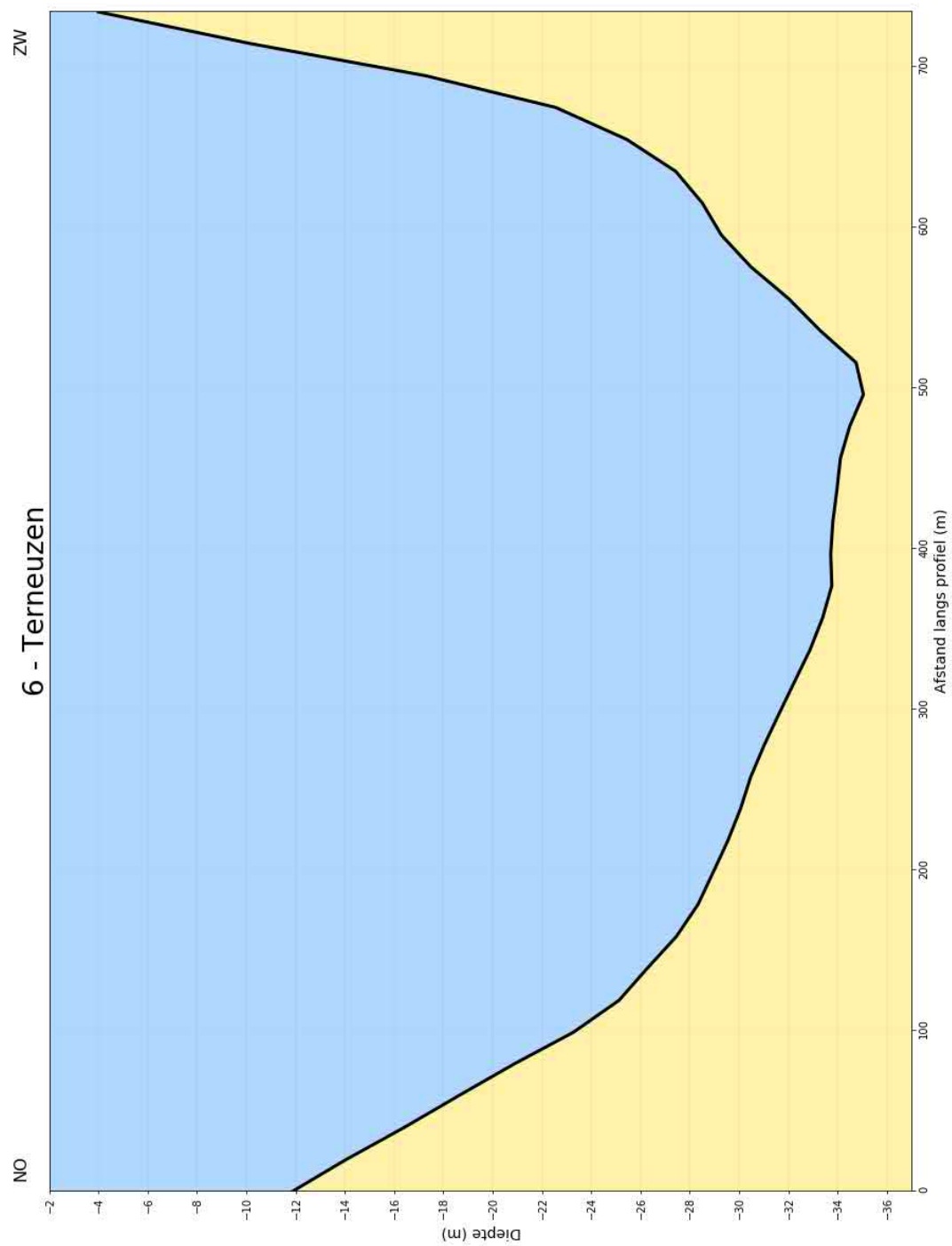


Figuur 4.44. Minimum bathymetrie Borssele (top) en profielen (onder). Het zuidwestelijke deel van de geulbodem is in ruim 60 jaar tijd zo'n 15 m dieper geworden en lijkt sinds 2011 door (een deel van) de erosie-resistente laag op ongeveer 60 m -NAP geërodeerd te zijn.

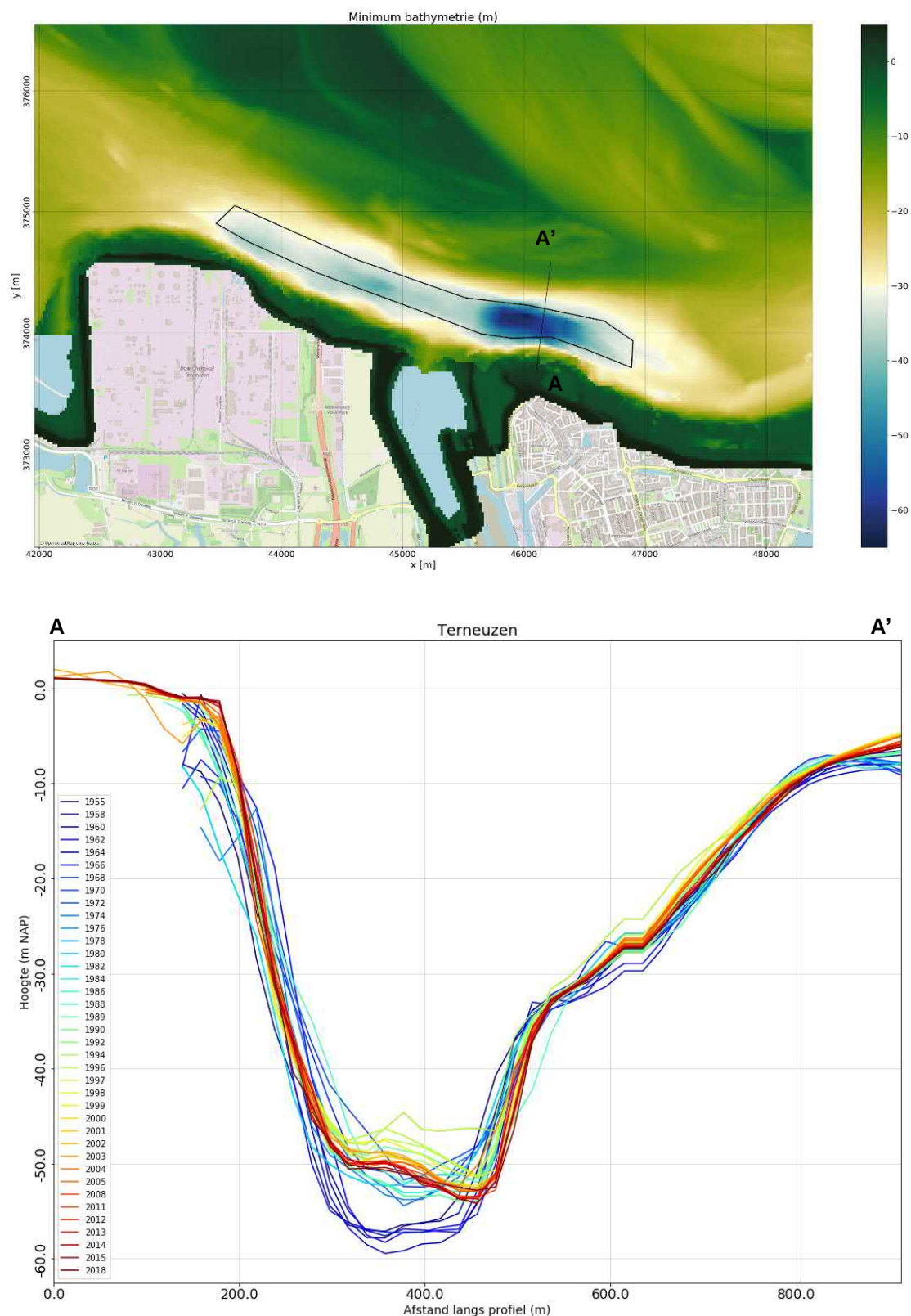
4.5.6 Locatie 6 – Terneuzen

Geologie (Figuur): Langs dit stuk in de Pas van Terneuzen ligt het Laagpakket van Boom aan de geulbodem 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.

Morfologische ontwikkeling (Figuur 4.): Bij Terneuzen is was de geul in vergelijking met nu zo'n 5-8 m dieper in de jaren '50 en '60. Er lijkt om die reden momenteel geen sprake te zijn van een erosie-resistente laag aan de geulbodem. Gezien de geologie werd al gesteld dat de geul door de stugge Boomse klei gesneden moet zijn. Dit blijkt dus al voor 1950 gebeurd te zijn. De huidige platte geulbodem is enkel een gevolg van opvulling.



Figuur 4.45. Aan de basis van de geul ligt een laag klei behorende tot het Laagpakket van Boom



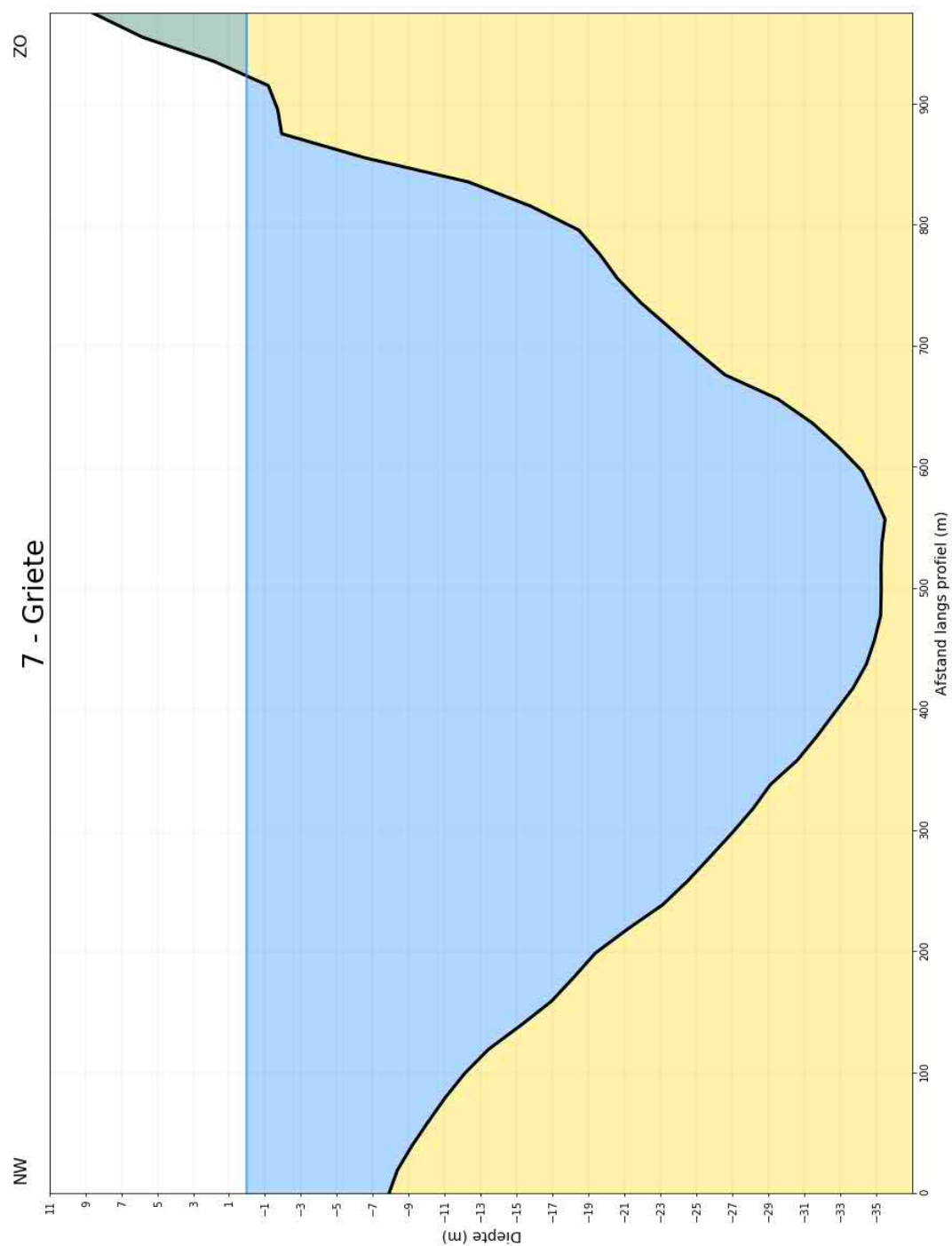
Figuur 4.46. Minimum bathymetrie Terneuzen (top) en profielen (onder). In de jaren '50 en '60 was de geul hier dieper dan in de afgelopen jaren.

4.5.7

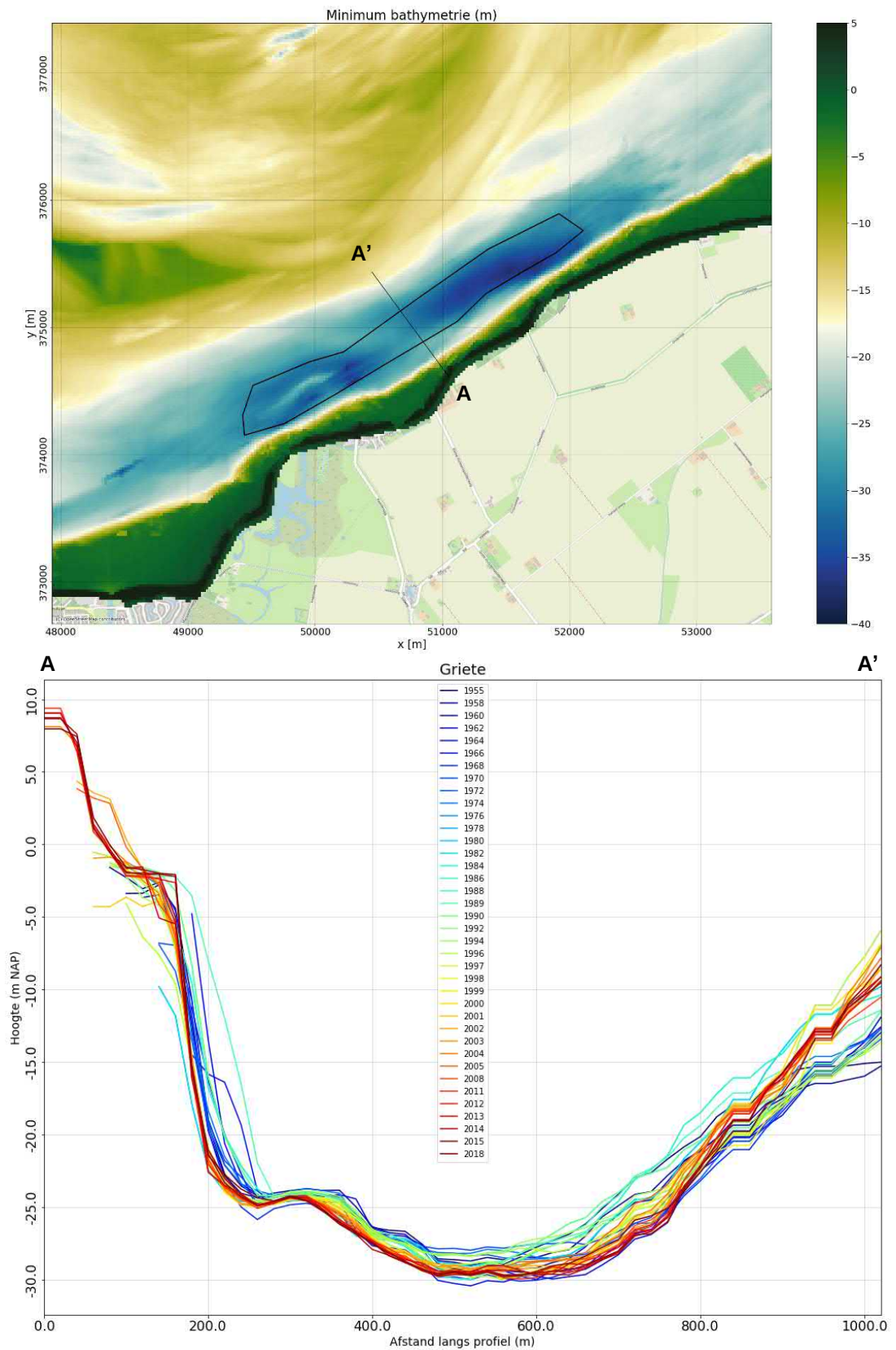
Locatie 7 – Griete

Geologie (Figuur): 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. De geul is al voor een groot deel in de klei gesneden (Van der Vegt et al., 2020)

Morfologische ontwikkeling (Figuur 4.). De geul is hier gedurende ruim 60 jaar nauwelijks verlegd of van vorm veranderd. De huidige bathymetrie komt ongeveer overeen met de minimum bathymetrie.



Figuur 4.47. Aan de basis van de geul ligt een laag klei behorende tot het Laagpakket van Boom.

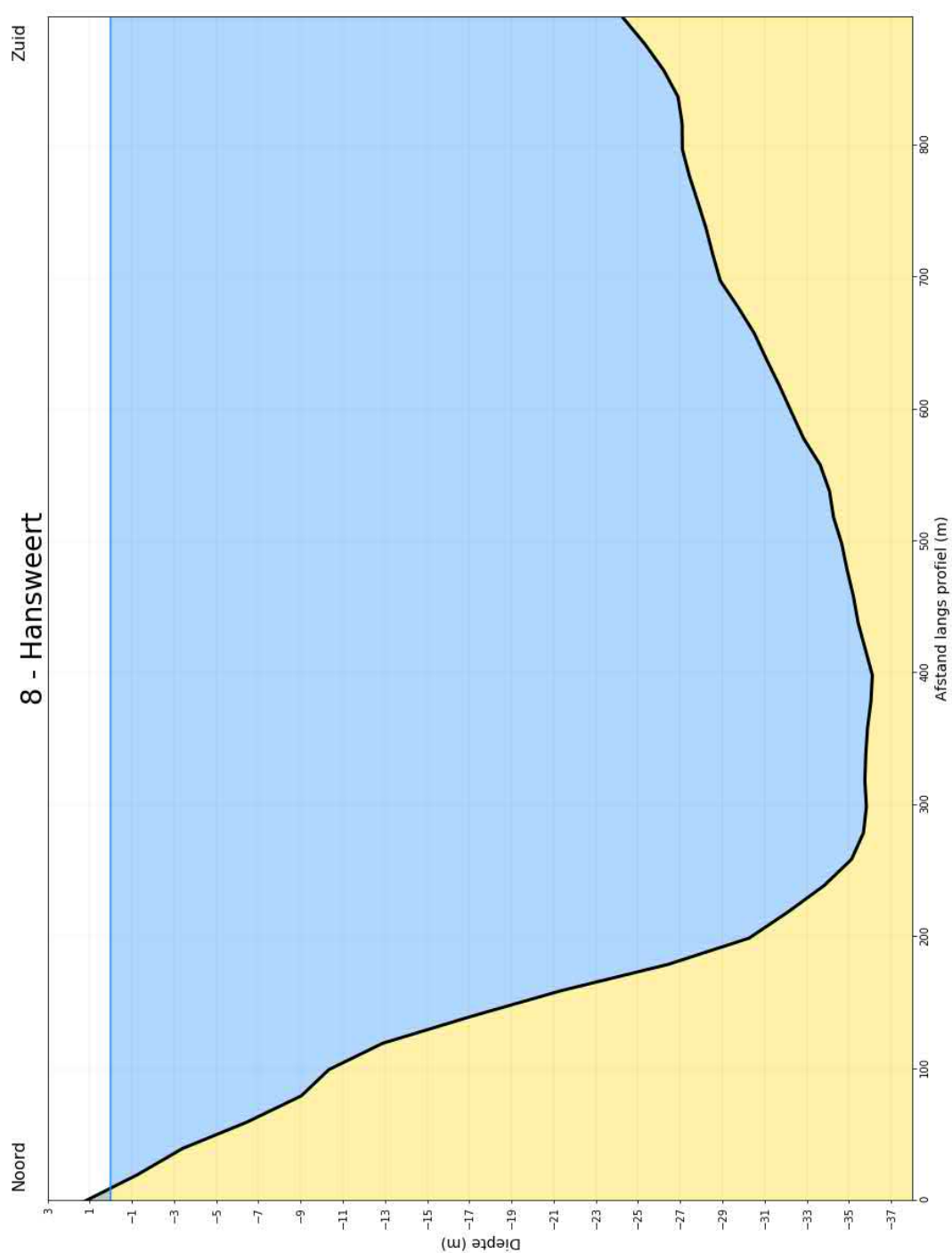


Figuur 4.48. Minimum bathymetrie Griete (top) en profielen (onder). De geul heeft zich niet verplaatst en is niet van vorm veranderd. Momenteel is op 30 m -NAP het laagste niveau bereikt en wordt een snelle verdieping van de geul verhinderd.

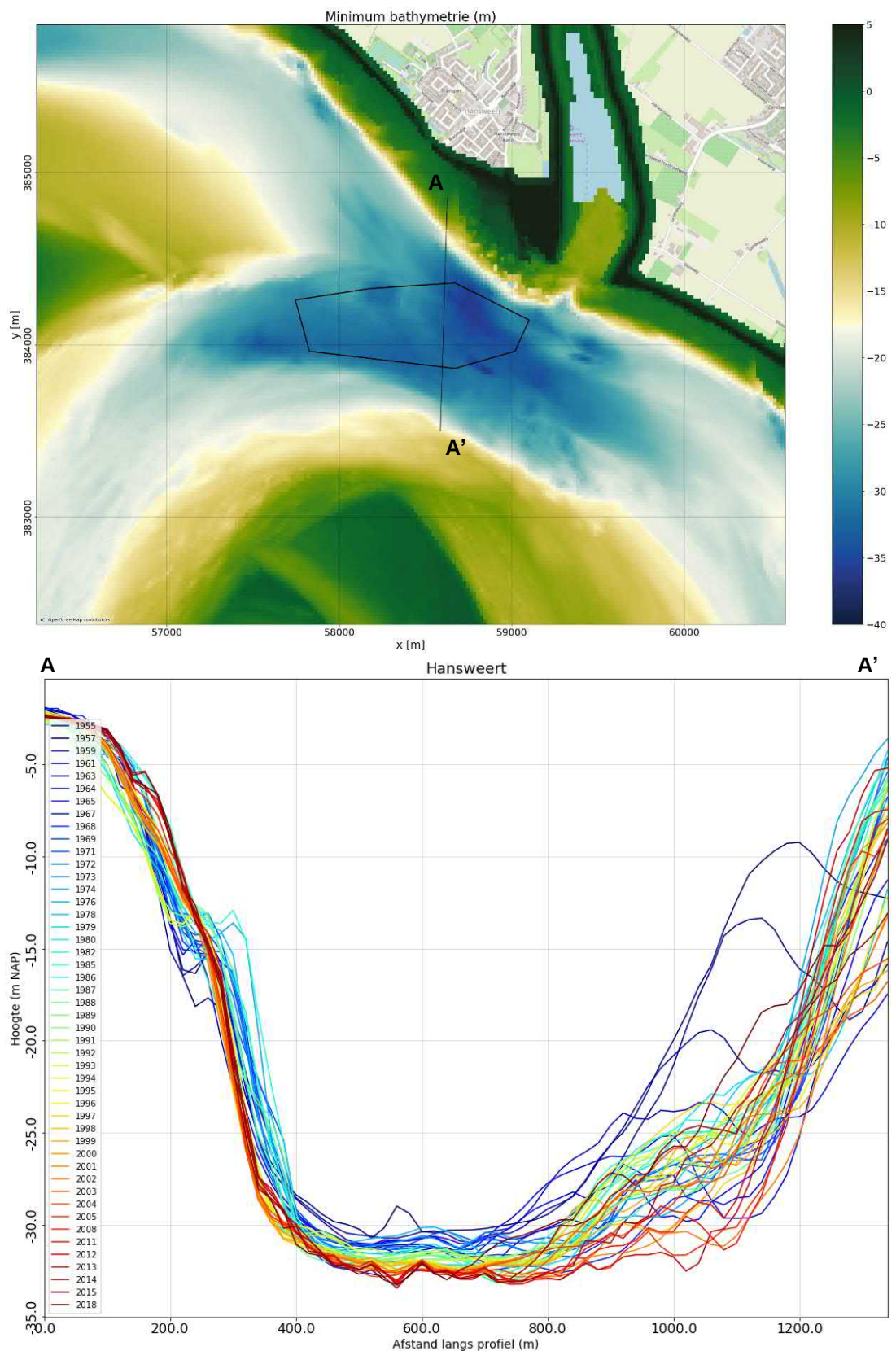
4.5.8 Locatie 8 – Hansweert

Geologie (Figuur): Beter bekend als de put van Hansweert. 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.

Morfologische ontwikkeling (Figuur): Beter bekend als de put van Hansweert. De diepte op de locatie van dit profiel is in ruim 60 jaar nauwelijks veranderd.



Figuur 4.49. Aan de basis van de put van Hansweert ligt een erosie-resistente laag klei van de Formatie van Oosterhout.



Figuur 4.50. Minimum bathymetrie Hansweert (top) en profielen (onder). De kleilaag die hier op de bodem ligt, zorgt er al ruim 60 jaar voor dat het hier niet dieper kan worden. Elders in de put van Hansweert is de geul wél door deze kleilaag gebroken.

5 Discussie en conclusies

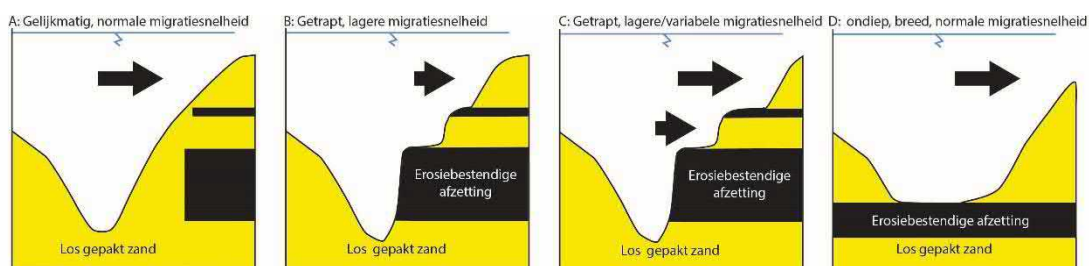
Dit hoofdstuk beschrijft de waargenomen effecten van erosie-resistente lagen op de morfologische ontwikkeling, gebaseerd op de 23 locaties die in dit rapport zijn uitgelicht.

5.1 Verandering van vorm

Het veranderen van de vorm wordt uitgebreid toegelicht in Hijma (2017a) (zie ook het conceptuele model in Figuur 1.1). Het in een dwarsprofiel u-vormig worden van een geul die niet verder kan verdiepen en/of de ontwikkeling van een trapsgewijs profiel in de geulwand vormde de basisaannames voor het identificeren van geologische invloed in dit onderzoek. De historische bathymetrische data bevestigt de ontstaanswijze van deze geulvormen. In enkele voorbeelden is de overgang van een v-vormige naar u-vormige geul na contact met een erosie-resistente laag zeer goed te zien (Texelstroom, Doove Balg, Noord Meep, Oost Meep, Borndiep en Dantziggat oost). Ook de overgang van een rechte geulwand naar een trapsgewijs profiel volgt uit de historische bathymetrie (Malzwin, Texelstroom, Vlieree, West Meep, Borndiep en Zoutkamperlaag west).

5.2 Versnelling/vertraging geulwandmigratie

In tegenstelling tot de aanname dat erosie-resistente lagen er juist toe leiden dat de laterale bewegingsvrijheid van een geul wordt beperkt, zijn er ook locaties waar het tegenovergestelde is waargenomen in de historische ontwikkeling. Op enkele locaties waar de geulwand een trapsgewijs profiel heeft valt op dat de erosiesnelheden tussen deze lagen enorm kan verschillen. Voorbeelden hiervan zijn de locaties Texelstroom, Vlieree, West Meep en Zoutkamperlaag west. Hier neemt typisch de snelheid waarmee de geulwand erodeert af onder de erosie-resistente laag, terwijl erboven deze snelheid juist toeneemt. Dit bovenste deel van de geulwand kan hierdoor sneller migreren in vergelijking met het onderste deel. Hierdoor wordt de geul breder, terwijl het oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de waterloop niet significant toe- of afneemt. Dit effect is het sterkst als de geul zich tegelijkertijd niet kan verdiepen (Texelstroom, West Meep, tot 4 keer snellere migratie bovenste deel geulwand) en is minder sterk als dit niet het geval is (Vlieree, Zoutkamperlaag west, ongeveer 2 keer snellere migratie bovenste deel geulwand). Alhoewel het onderste deel van de geulwand juist minder snel migreert, zorgt de versnelde migratie van het bovenste deel ervoor dat de geul versneld breder wordt en dat naastgelegen zandplaten of de kustlijn sneller zullen eroderen. Onder constante hydrodynamische condities is dit een aannemelijk effect: het minder snel migreren van het moeilijk-erodeerbare deel van de geulwand wordt als het ware gecompenseerd door het sneller migreren van het makkelijk-erodeerbare deel. Het onder deze condities breder worden van geulen werd ook in het Eems-Dollard estuarium gevonden door Pierik et al. (2018) en in de modelstudie door Xu (2019). Dit inzicht heeft geleid tot een uitbreiding van het conceptuele model van Hijma (2017a) (Figuur 5.1).



Figuur 5.1. Uitbreiding van het conceptuele model van Hijma (2017a), waarin paneel C de situatie beschrijft met variabele migratiesnelheden tussen erosie-resistente lagen.

Volgens hetzelfde principe kan het breder worden van een geul ook enkel het gevolg zijn van niet verder kunnen verdiepen van de geul. Dit is alleen waargenomen in de Oost Meep.

5.3 Overige effecten

In enkele voorbeelden begint de geul op te vullen binnen enkele jaren nadat het minimum niveau is bereikt. Dit is bijvoorbeeld het geval voor het Robbengat en beide locaties in het Dantziggat. Of dit een direct gevolg is van de erosie-resistente laag is niet met zekerheid te zeggen.

Het Borndiep is uniek omdat sinds de eerste meting van 1926 de geul aan beide kanten is beïnvloed door dezelfde erosie-resistente laag. De oostwaartse migratie tussen 1970 en 1990 werd abrupt beëindigd toen de geul op de erosie-resistente laag stuitte en zette zich sindsdien voort in westelijke richting. Mogelijk was de geul verder richting het westen gemigreerd als deze laag er niet lag. Tevens werd door dezelfde laag tussen 2005 en 2010 de vorming van een nieuwe, westelijk gelegen geul tegengegaan. Als deze geul zich volledig had kunnen ontwikkelen, was mogelijk een deel van de eb- en vloedstroom door deze geul gegaan, wat op de korte termijn verdere uitbreiding van het Borndiep richting Ameland had kunnen voorkomen of vertragen.

5.4 Verschil Westerschelde en Waddenzee

Op veel locaties in de Westerschelde is de geul niet of nauwelijks van vorm veranderd en is deze in het geval van de beschouwde locaties op z'n plek blijven liggen sinds het begin van de metingen. Op de onderzochte locaties in de Waddenzee hebben de getijdengeulen zich daarentegen vrijer bewogen door de tijd. Een simpele verklaring voor de verminderde dynamiek in de Westerschelde is dat de geulwanden op sommige locaties beschermd worden door 'harde' maatregelen zoals bestortingen (aangegeven in Figuur 3.20). Dit zijn veelal plekken in de buitenbocht van de getijdengeul, waardoor migratie van de geul wordt tegengegaan en deze op z'n plek blijft. Bovendien wordt de hoofdvaargeul onderhouden voor de scheepvaart, waardoor er minder ruimte is voor natuurlijke dynamiek. Op veel plekken is de geulbodem wel in contact met een erosie-resistente laag en lijkt lokaal verdere verdieping van de geul vertraagd te worden. Dit leidt echter niet tot het versneld verbreden van de geul, zoals in de Waddenzee het geval kan zijn. Dit komt mogelijk door verminderde aanwezigheid van resistente lagen in de wanden van de geul en beperktere ruimte in de breedte. Aan de bodem zit regelmatig een harde laag en in de laatste honderden jaren hebben de geulen waarschijnlijk de meeste klei- en veenlagen in de wand opgeruimd en bewegen de geulen zich nu vooral in hun eigen zandlichaam. Over het algemeen is het effect van de erosie-resistente lagen op geulen in de Westerschelde lastiger vast te stellen dan in de Waddenzee, waar concrete effecten goed waarneembaar zijn.

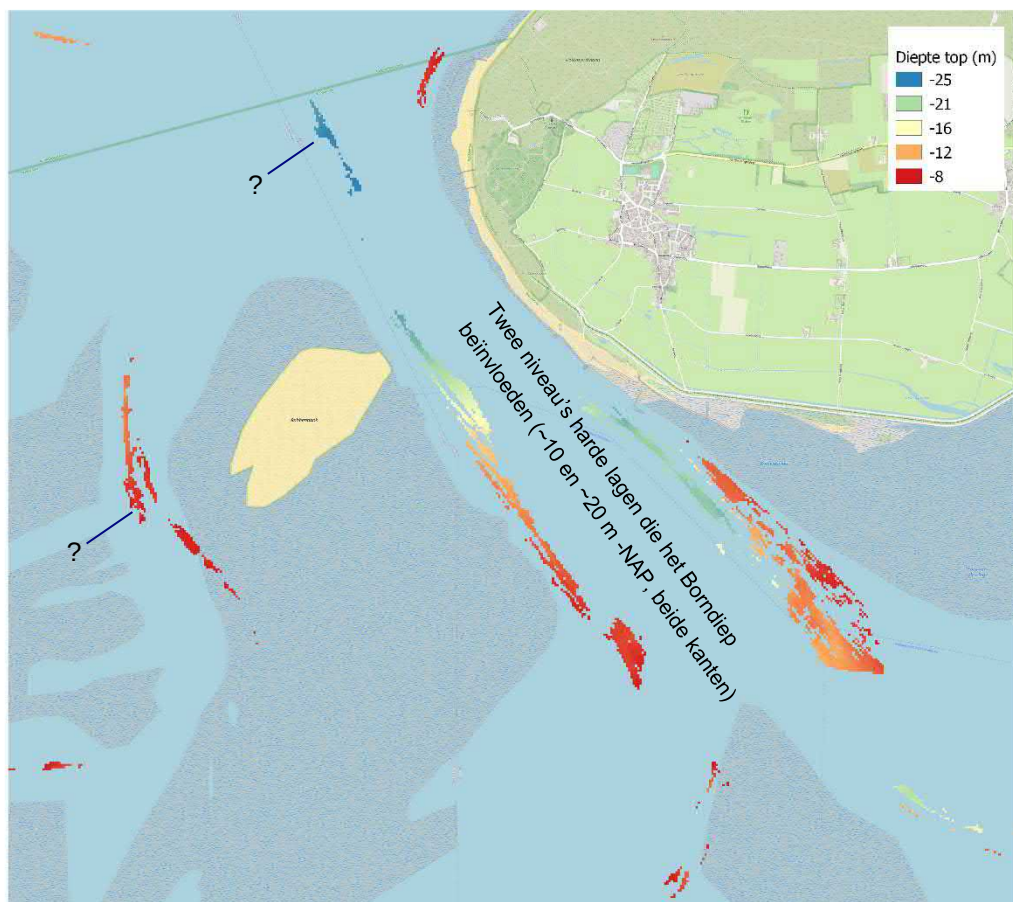
5.5 Morfologie op grotere schaal

De morfologische ontwikkelingen kunnen niet alleen in het licht van de aanwezige erosie-resistente lagen gezien worden. De kombergingsgebieden, maar met name de zeegaten en buitendelta's, zijn dynamische gebieden die vaak een cyclisch gedrag vertonen in het activeren, verleggen en verlaten van hun getijdegeulen. De precieze relatie tussen deze grootschalige ontwikkelingen en erosie-resistente lagen kon niet op basis van de in dit rapport gebruikte bathymetrische data worden afgeleid. Mogelijk kan het niet verder kunnen verdiepen of verbreden van een geul er elders in het systeem toe leiden dat een andere getijdengeul op ten duur een belangrijkere rol krijgt. Omgekeerd kan een morfologische verandering in een getijdengeul losstaan van het effect van een erosie-resistente laag, maar enkel of deels het gevolg zijn van een grotere/kleinere rol krijgen in het doorvoeren van de eb- en vloedstroom.

Hoe de morfologie op de schaal van een kombergingsgebied of zeegat wordt beïnvloed door erosie-resistente lagen zou het onderwerp kunnen zijn van een modelstudie. Xu (2019) heeft een eerste proof-of-concept studie gedaan naar het toepassen van geologie in Delft3D. In het meerjarenprogramma 2020-2024 is verdere uitbreiding van deze onderzoekslijn opgenomen en op basis van de resultaten in dit rapport wordt bevestigd dat dit een belangrijke volgende stap is, samen met het kwantificeren van erosiegevoeligheid (Van der Vegt et al., 2020).

5.6 Verbeterde detectie erosie-resistente lagen

Gedurende het werk aan dit project in 2020 is een begin gemaakt aan het verbeteren van de methode die in onderdeel 2 is gebruikt om de locaties te identificeren. De afgeleide rasterdata kan gebruikt worden om automatisch potentiële zoekgebieden voor 'actieve' erosie-resistente lagen aan te wijzen. Dit levert veel specifiekere zoekgebieden op dan de methode die in onderdeel 2 is gebruikt en heeft o.a. geleid tot het ontdekken van de erosie-resistente laag aan de westkant van het Borndiep (Figuur 5.2). Het verder verfijnen van deze methode zal moeten leiden tot een definitieve kaart met actieve erosie-resistente lagen in Nederland.



Figuur 5.2. Toepassing van nieuwe methode om actieve erosie-resistente lagen op te sporen. Voorbeeld van Ameland west en zuidwest. Aanwijzingen voor niet eerder beschreven invloed erosie-resistente lagen in het Borndiep bij Ameland-west (mogelijk zelfde laag potklei als Ameland-zuidwest) en in het Boschgat (mogelijk dezelfde vroeg-Holocene klei als Ameland-zuidwest).

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.
- Elias, E., Vermaas, T., Vonhögen-Peeters, L., Bruens, A., 2014. Ontwikkeling Zwakke-Schakel suppletie Westkapelle, Deltares report 1209381-008-ZKS-0001, Utrecht, The Netherlands, 67 pp.
- 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., Leuven, J., Hijma, M., Busschers, F., & Kleinans, M. (2018). Effects of inherited resistant layers on channel-bar shape and long-term morphological evolution of the Eems-Dollard Estuary (the Netherlands/Germany). *EGUGA*, 8010.
- Pierik, H.J., Busschers, F.S., Kleinans, 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., Kleinans, 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).
- Van der Vegt, H., Mastbergen, D., van der Werf, J., 2020. Moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde - Onzekerheden en gevolgen voor morfodynamiek, Deltares Report 1210301-015-ZKS-0014, Delft, The Netherlands, 57 pp.

- Vermaas, T., Bruens, A., 2013. Beheerbibliotheek Walcheren, Deltares report 1207724-004-ZKS-0014, Utrecht, The Netherlands, 119 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.\
- 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.

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

Deltares

www.deltares.nl