

Erosie-resistente lagen in het Westerschelde mondingsgebied en de invloed daarvan op de pilot-suppletie



Erosie-resistente lagen in het Westerschelde mondingsgebied en de invloed daarvan op de pilot-suppletie

Auteur(s)

Helena van der Vegt
Erik van Onselen
Ad van der Spek (A.J.F.)

Met Bijdragen van:

Chris Mesdag
Tess op den Kelder
Luuk van der Heijden

Erosie-resistente lagen in het Westerschelde mondingsgebied en de invloed daarvan op de pilot-suppletie

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Zee en Delta locatie Middelburg
Contactpersoon	Marco Schrijver
Referenties	
Trefwoorden	Schelde-monding, pilotsuppletie, ondergrond, erosie-resistente lagen, morfologie, ecologie

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	19-02-2021
Projectnummer	11203725-001
Document ID	11203725-001-ZKS-0012
Pagina's	53
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Helena van der Vegt	
	Erik van Onselen	
	Ad van der Spek	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Helena van der Vegt	Marc Hijma	Toon Segeren	
	Erik van Onselen			
	Ad van der Spek			

Samenvatting

Het doel van dit onderzoek is om de ondergrond in het mondingsgebied van de Westerschelde in kaart te brengen en een relatie met de morfologische ontwikkeling te leggen, ten behoeve van het ontwerp van een proefsuppletie in het gebied. De erosie-resistentie van de bodem van de Westerscheldemonding varieert doordat er lagen met een zeer verschillende samenstelling en ouderdom aanwezig zijn in de ondergrond. Deze variatie is in zowel horizontale als verticale richting aanwezig en heeft invloed op de vorm van de geulen en de manier waarop ze zich kunnen verplaatsen. Een aanvullend onderzoeksdoel is te bepalen in welke mate het voorkomen van erosie-resistente lagen een rol speelt bij de ecologische diversiteit in het onderzoeksgebied.

Voor dit onderzoek is een nieuw geologische model van erosie-resistente lagen in het onderzoeksgebied gemaakt. Dit geologische model is gebaseerd op seismiek uit 1996 waaruit de diepteligging van de bovenkant van deze erosie-resistente lagen bepaald is. De dikte van de geïnterpreteerde lagen is afgeleid uit bestaande boringen en geologische modellen. Door het nieuwe geologische model te combineren met de bathymetrie zijn gebieden geïdentificeerd waar erosie-resistente lagen kunnen dagzomen of nabij het oppervlak liggen en zodoende de morfologie en ecologie kunnen beïnvloeden.

De conclusie van deze studie is dat erosie-resistente lagen een belangrijke rol spelen in de morfodynamiek in het mondingsgebied van de Westerschelde. Daar waar erosie-resistente lagen dagzomen of dicht onder het oppervlak liggen worden geulen beperkt in hun verplaatsing of diepteontwikkeling. Maar er zijn nog veel onzekerheden over de exacte aanwezigheid van de verschillende lagen en de eigenschappen van de deze lagen, vooral over de mate van erosie-resistentie.

De seismiek laat twee prominente reflectoren zien (waarschijnlijk beide Holocene kleilagen) die vooral de morfologische ontwikkeling aan de zuid- en noordzijde van de Vlake van de Raan (een verhoogd gebied in het centrum van het mondingsgebied) beïnvloeden. In de diepe delen van de geulen (bij het Oostgat en ten zuiden van de Nolleplaat) komt een prominente reflector voor in de seismiek, die waarschijnlijk geassocieerd kan worden met kleirijke lagen van de Formaties van Oosterhout en/of Rupel.

Om een goed beeld te verkrijgen van de impact van aanwezige erosie-resistente lagen voor de pilotsuppletie moeten aanvullende vragen beantwoord worden omtrent de kwantificering van de erosie-resistentie van deze lagen en de invloed van erosie-resistente lagen op de sedimentdynamiek in het gebied en de ecologische diversiteit en vestigingsmogelijkheden van bodemdierengemeenschappen in het onderzoeksgebied. Deze vragen kunnen beantwoord worden door een combinatie van metingen en modelstudies uit te voeren.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Onderzoeksvragen en leeswijzer	7
2	Erosie-resistente lagen in het mondingsgebied: Achtergrond en nieuwe data	8
2.1	Achtergrond: de ontstaanswijze van erosie-resistente lagen	8
2.2	Reeds bekende geologische data uit het mondingsgebied	9
2.3	Methode voor het ontwikkelen van het nieuwe geologisch lagenmodel	10
2.4	Aangetroffen erosie-resistente lagen (reflectoren)	11
2.4.1	Reflector1: Holocene kleilaag die in het hele gebied voorkomt	11
2.4.2	Reflector2: sporadisch aangetroffen kleilaag aan flanken van Vlakte v/d Raan en in geulen	13
2.4.3	Hard1: stugge kleilaag in het Oostgat en ten zuiden van de Nolleplaat	13
2.4.4	Schelpenlaag: dunne schelpenlaag onder de Wielingen	13
3	Speelt de aanwezigheid van erosie-resistente lagen een rol bij de morfologische ontwikkeling in het mondingsgebied van de Westerschelde?	14
3.1	Welke effecten van de erosie-resistente lagen zien we ten noorden van de vlakte van de Raan?	16
3.2	Welke effecten van de erosie-resistente lagen zien we ten zuiden van vlakte van de Raan?	16
3.3	Welke effecten van de erosie-resistente lagen zien we op de vlakte van de Raan?	17
4	Zijn er overeenkomsten tussen locaties van ecologische habitats (met namen bodemdierengemeenschappen) en het dagzomen van erosie-resistente lagen in het mondingsgebied?	18
5	Conclusie voor de beoogde pilotsuppletie	20
5.1	Erosie-resistente lagen spelen een rol in de morfodynamiek in het gebied van de pilotsuppletie, maar er zijn nog veel onzekerheden.	20
5.1.1	Spelen deze lagen ook een rol bij sediment transport?	20
5.1.2	Op welke tijdschaal blijven deze lagen het gebied beïnvloeden?	20
5.1.3	Wat zou er gebeuren als deze moeilijk-erodeerbare lagen verdwijnen?	21
5.2	Interactie dagzomen erosie-resistente lagen en ecologie is nog niet te kwantificeren in het gebied van de pilotsuppletie.	21
6	Referenties	22
A	Gedetailleerde Methodologie	24
A.1	Seismiek	24
A.1.1	Aanwezige seismiek	24
A.1.2	Interpretatie van de seismiek	25
A.2	Diktebepaling erosie-resistente lagen	26

A.3	Interpolatie IMOD nieuwe geologische model harde lagen	27
A.4	Experimentele methode harde lagen	28
B	Volledige resultaten	30
B.1	Kaarten van aangetroffen lagen	30
B.2	Profielen	34
B.3	Geogerefererde kaarten van ontwikkeling 19 ^e en begin 20 ^e eeuw	44

1 Onderzoeksvragen en leeswijzer

In dit memo brengen we de ondergrond in het Westerschelde mondingsgebied en de relatie met de morfologische ontwikkeling in kaart t.b.v. het ontwerpen van een proefsuppletie in het gebied. Hiervoor worden drie onderzoeksvragen beantwoord:

- 1 Speelt de aanwezigheid van erosie-resistente lagen een rol bij de morfologische ontwikkeling in het mondingsgebied van de Westerschelde? (Hoofdstuk 3)
- 2 Zijn er overeenkomsten tussen locaties van ecologische habitats (met namen bodemdierengemeenschappen) en het dagzomen (aan het oppervlakte komen) van erosie-resistente lagen in het mondingsgebied? (Hoofdstuk 4)
- 3 Welke rol spelen erosie-resistente lagen in de morfologische dynamiek rondom de locatie van de beoogde pilotsuppletie in het mondingsgebied? (Hoofdstuk 5)

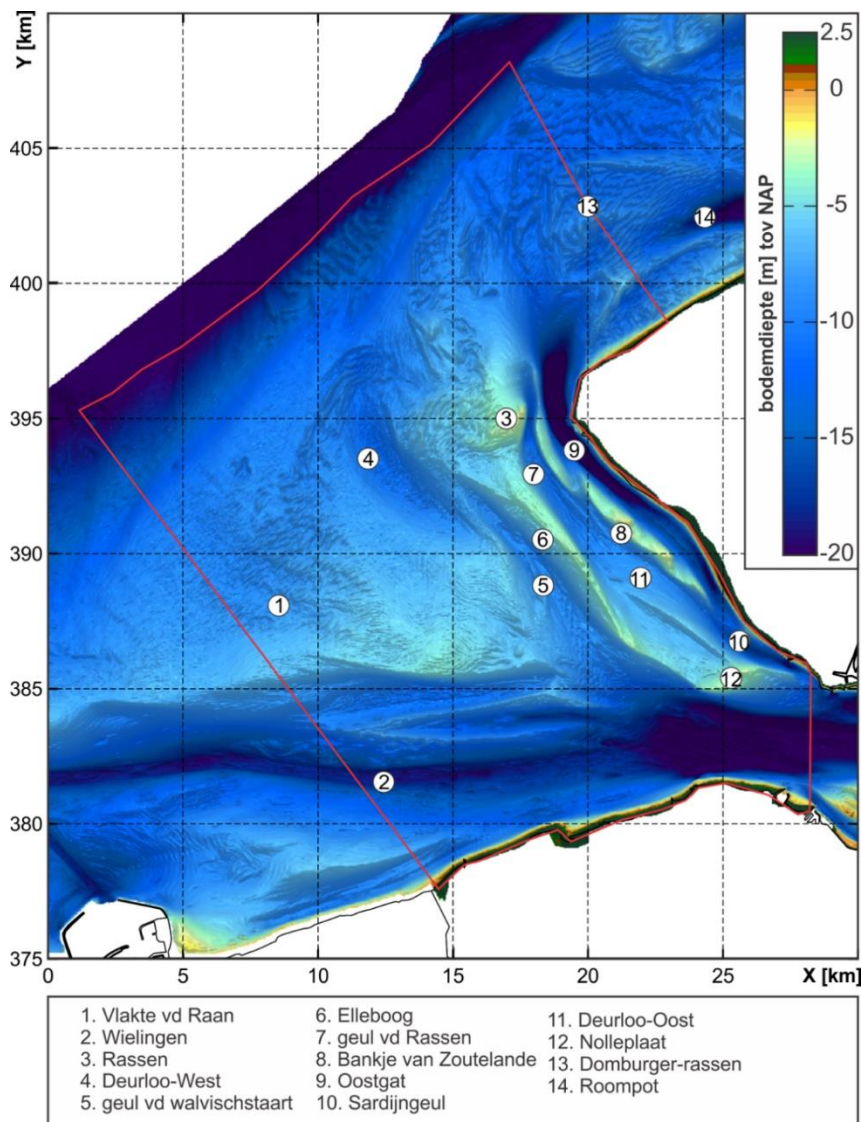
Om deze vragen te kunnen beantwoorden hebben we de aanwezigheid van erosie-resistente lagen in de ondergrond van de Westerscheldemonding in kaart gebracht. Dit is verwezenlijkt door bestaande metingen (seismiek, boringen), modellen en geologische kennis te combineren tot een nieuw geologisch lagenmodel (Hoofdstuk 2).

We verwijzen steeds naar gebieden in de monding van de Westerschelde welke we hier kort toelichten. Het onderzoeksgebied wordt gekenmerkt door de centraal gelegen Vlake van de Raan ([1] in Figuur 2-1) die direct ten noorden begrensd wordt door een complex stelsel van geulen en platen ([3 t/m 12] in Figuur 2-1). Ten zuiden ligt de Wielingen ([2] in Figuur 2-1), de hoofdvaargeul, die eenmalig in 1999, en verder sinds 2004 op een streefdiepte van ongeveer 18 m -NAP gehouden wordt door middel van baggerwerkzaamheden (Vroom en Schrijvershof 2015). Begin 2018 is er in een smal deel hiervan nog een zogenaamde maatwerkgeul aangelegd (extra verdieping van LAT -14,9 m naar LAT -15,8 m, orde ca. 600.000 m³), die nu ook op die grotere streefdiepte onderhouden wordt. Gebieden 13 en 14 vallen buiten het onderzoeksgebied voor deze studie.

2 Erosie-resistente lagen in het mondingsgebied: Achtergrond en nieuwe data

2.1 Achtergrond: de ontstaanswijze van erosie-resistente lagen

Erodeerbaarheid van de bodem van de Westerscheldemonding varieert ruimtelijk doordat lagen van zeer verschillende samenstelling en ouderdom aanwezig zijn. Deze variatie heeft invloed op de vorm en de manier waarop geulen zich verplaatsen. De ondergrond van het mondingsgebied van de Westerschelde bestaat voornamelijk uit zand- en kleilagen met incidenteel veen- en schelpenlaagjes. Harde, stugge sedimentlagen zijn ontstaan door ontwatering en belasting door overliggende sediment afzettingen (compactie). Hierdoor zijn oude (pre-Holocene) kleilagen moeilijker erodeerbaar dan jongere (Holocene) kleilagen. Daarnaast zijn oude zandlagen ook erosiebestendiger geworden door belasting door overliggend sediment en, in sommige gevallen, verkitting door langdurige geochemische processen. Verkitting is de binding tussen gronddeeltjes ten gevolge van het neerslaan van bijvoorbeeld kalk- en ijzerverbindingen en bepaalde organische stoffen.



Figuur 2-1. Overzicht van geulen en platen in de Westerscheldemonding

2.2 Reeds bekende geologische data uit het mondingsgebied

Een lithostratigrafische beschrijving van alle aanwezige formaties in de Westerschelde en het mondingsgebied is te vinden in van der Spek (1997), Gruijters et. al. (2004) en Hijma (2017) en van der Vegt et. al. (2020). Tabel 1 geeft een overzicht van eerdere kartering van erosie-resistente lagen in het Westerscheldegebied (Schelde-estuarium en mondingsgebied).

Tabel 1. Eerdere kartering erosie resistente lagen in het Westerschelde mondingsgebied

Publicatie		Gebruikte data	Resultaten/Bevindingen
van der Spek (1997)	Geologische opbouw van de ondergrond van het mondingsgebied van de Westerschelde en de rol hiervan in de morfologische ontwikkeling	Analoge seismiek, boringen en kaartbladen	Bevinding: Oudere, geconsolideerde afzettingen kunnen morfodynamiek van geulen aanzienlijk vertragen maar niet geheel belemmeren, zowel verticale als horizontale verplaatsing van geulen kunnen worden beïnvloed. De mate van invloed op morfodynamiek is niet te bepalen met beschikbare data
Gruijters et. al. (2004)	Kartering moeilijk erodeerbare lagen in het Schelde estuarium	Boor en sondeergegevens uit DINO database en archief Rijkswaterstaat Directie Zeeland:	Resultaat (product): Geïnterpoleerde 3D geologisch lagenmodel van erosie-resistente lagen per geologische eenheid
Van der Malen (2004)	Moeilijk erodeerbare lagen in de Westerschelde: koppeling met bodemligging vanaf 1800	Gruijters et. al. (2004) model; Bodemgegevens 1800, 1860, 1905, 1931, 1955, 1960, 1970, 1980, 1990, 2001	Resultaat (product): 3D geologisch lagenmodel gecorrigeerd voor oude morfodynamiek: insnijding oude geulen meegenomen
Dam (2013)	Harde lagen Westerschelde	Model van Rijkswaterstaat Directie Zeeland (van der Malen 2004) + vaklodgingen 1960 t/m 2011	Resultaat (product): Kaart met diepte ten opzichte van NAP van bovenste erosie-resistente laag. Dikte van erosie-resistente lagen niet meegenomen tijdens insnijding
Hijma (2017)	Geology of the Dutch coast - The effect of lithological variation on coastal morphodynamics	Analyse bestaande kennis	Bevinding: Vlakte van de Raan: ~5m zand op Holocene kleilaag. Diepere delen (Oostgat, Wielingen): voornamelijk beïnvloed door Boomse klei, Rupel fm. Kwantitatieve gegevens voor erodeerbaarheid van verschillende lagen zijn nauwelijks bekend.
Van der Vegt et. al. (2020)	Moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde - Onzekerheden en gevolgen voor morfodynamiek	Gruijters et. al. (2004) model; Vaklodgingen 1960 t/m 2016; Dam (2013) kaart	Resultaat (product): Kaart met diepte ten opzichte van NAP van bovenste moeilijk-erodeerbare laag. Kaart met geologische classificatie van bovenste erosie-resistente lagen Bevinding: harde lagen zijn wel erodeerbaar, maar insnijding vindt langzaam plaats. Op een aantal plaatsen zijn relaties tussen horizontaal en verticale erosie te zien.

2.3 Methode voor het ontwikkelen van het nieuwe geologisch lagenmodel

De volgende data en methodiek zijn gebruikt om een nieuw geologisch lagenmodel van erosie-resistente lagen te produceren. De volledige methodiek is beschreven in bijlage A.

1. Seismiek uit 1996 omgezet van scans van de originele papieren registraties naar een digitaal format (seggy)
2. Seismiek handmatig geïnterpreteerd voor erosie-resistente lagen (donkere reflectors). Deze lagen zijn vanaf boven naar beneden genoemd:
 - a. Reflector 1 – bovenste reflector in seismiek. Zover mogelijk, alleen geïnterpreteerd waar correlatie met andere voorkomende lagen evident is
 - b. Reflector 2 – eerstvolgende donkere reflector laag onder reflector 1
 - c. Hard 1 – zeer sterk contrasterende reflector, ook ten opzichte van andere donkere reflectors, op een diepere ligging dan Reflector 1 en 2, met name in de diepe delen zichtbaar.
 - d. Schelpenlaag - diepere reflector dan reflector 1 en 2, in een locatie waar (in boring B47H0031) schelpenafzettingen zijn aangetroffen
3. Dikte van lagen in reflectoren bepaald aan de hand van boringen en eerdere geologische modellen
 - a. Reflector 'reflector1' is gekoppeld aan de hoogst gelegen erosie-resistente laag in de Formatie van Naaldwijk - Laagpakket van Walcheren. De dikte is uit de dataset van Gruijters et al. (2004) afgeleid.
 - b. Reflector 'hard1' is in het Oostgat gekoppeld aan de Formatie van Oosterhout (dikte uit Gruijters et al (2004) dataset) en aan de Boomse klei uit de Formatie van Rupel ten zuiden van de Nolleplaat (dikte niet vast te stellen uit boringen gezien deze zijn niet diep genoeg zijn hier, aangenomen als 6 m)
 - c. Andere reflectoren zijn gekoppeld aan de dikte van corresponderende lagen in nabijgelegen boringen, waar mogelijk.
4. Aan de hand van de reflectoren (uit seismische lijnen) en laagdiktes (uit boringen) is een gebiedsdekkend model gemaakt door middel van 'ordinary kriging' in iMOD. Kriging is een interpolatiemethode waarbij de geïnterpoleerde waarden worden gemodelleerd door een Gauss-proces dat wordt beheerst door eerdere covarianties.
5. Nieuwe model is handmatig geëvalueerd gebaseerd op geologische kennis. De volgende verbeteringen zijn toegepast middels additionele volgende iteraties van stappen 2-4:
 - a. Maximale hoogte reflector gelimiteerd door minimum bathymetrie uit bestaande metingen
 - b. Locaties waar harde lagen dagzomen zijn geïdentificeerd en toegevoegd aan het lagenmodel. In eerste iteratie zijn alleen reflectoren geïdentificeerd welke niet aan de zeebodem dagzomen, gezien deze moeilijk te onderscheiden zijn van de zeebodem.
 - c. Vergelijking van reflectoren met boringen ter bepaling van de meest waarschijnlijke lithostratigrafische lagen die overeenkomen met de reflectoren.
6. Stap 2-4 herhaald met verbeterd inzicht uit stap 5 om tot uiteindelijke model te komen

2.4 Aangetroffen erosie-resistente lagen (reflectoren)

In Tabel 2 wordt een samenvatting gegeven van geïdentificeerde reflectoren die vermoedelijk de overgang van zand (relatief makkelijk erodeerbaar) naar klei/schelpen (moeilijk erodeerbaar) aangeven. De reflectoren geven een overgang aan in bodemeigenschappen en kunnen zodoende geïnterpreteerd worden als de overgang tussen twee verschillende geologische lagen, gegeven dat deze lagen een verschillende lithologie en/of compactiegraad hebben.

Tabel 2. Samenvatting van gevonden reflectoren en de bijbehorende interpretatie

Reflector	Vermoedelijke lithologie	Stratigrafische correlatie	Voorkomen
reflector1	Klei	Fm. van Naaldwijk (Laagpakket van Walcheren, Laagpakket van Wormer)	Hele gebied, behalve Oostgat en de Wielingen. Dikte tot 10 m rond Nolleplaat. Op Vlake van de Raan 2-5 m dik. Dunnere voorkomens ten zuiden grenzend aan Oostgat. Langs randen nabij oppervlak of dagzomend
reflector2	Klei	Onbekend, mogelijk Eem Fm. In het oostelijke deel van het gebied (van der Spek et al 1997)	Flanken Vlake vd Raan, Oostgat, Wielingen. Meestal < 2 m dik.
hard1	Klei (stug tot zeer stug)	Fm. Van Oosterhout, ook wel de Brielle Ground Fm. genoemd in de Noordzee (Oostgat); Fm. Van Rupel (ten zuiden van Nolleplaat)	Oostgat: > 5 m dik bij Zoutelande, dunner richting noordwesten (Westkapelle). Dagzomend. Nolleplaat: Aangenomen dikte van 6 m, dagzomend op bodem Wielingen
schelpenlaag	Schelpen, zand	Onbekend	Enkel in Wielingen op ca. 8 m onder de zeebodem. ~1 m dik.

2.4.1 Reflector1: Holocene kleilaag die in het hele gebied voorkomt

Reflector1 (Bijlagen B.1, Figuur B.1-1) wordt gekoppeld aan kleilagen binnen de Formatie van Naaldwijk. Waar de reflector relatief ondiep voorkomt, ruwweg boven de -10 m NAP, zullen de kleilagen voornamelijk in het Midden- tot Laat-Holoceen afgezet zijn (Laagpakket van Walcheren, TNO-GDN (2020(a)). Diepere kleilagen zijn uiteraard ouder (Vroeg-Midden Holoceen) en kunnen tot het Laagpakket van Wormer (TNO-GDN (2020b) gerekend worden. Uitgestrekte kleilagen zullen zijn afgezet op platen, kwelders of in lagunes, terwijl minder uitgestrekte kleilagen ook onderdeel kunnen zijn van geulopvullingen. Het type klei kan variëren van zandig tot sterk organisch.

De ouderdom van de kleilagen is nog niet gedateerd met koolstofdateringen (¹⁴C-dateringen), maar enkele kleilagen zijn wel gedateerd op basis van hun pollen inhoud. In boring BS100118 zijn twee kleilagen tussen -16 en -20 m NAP gedateerd op het Subboreaal (5660-2400 jaar geleden; Cleveringa, 1990, Figuur 2-2). In boring BS110284 is het kleitraject tussen -12 en -14 m NAP gedateerd op de periode 2000-500 jaar geleden (De Jong, 1988).

Vrijwel overal onder de Vlakte van de Raan komt de klei van reflector1 voor, waar het met name langs de randen van de vlakte op veel plekken in relatief ondiep water dagzoomt. Enkel het Oostgat en de Wielingen zijn diep genoeg ingesneden (geweest) om de klei op te ruimen. De dikste voorkomens worden in het zuidoosten van de monding gevonden nabij en net ten westen van de Nolleplaat. Hier kan het kleipakket lokaal tot 10 m dik zijn volgens de laagdiktegegevens uit de dataset van Gruijters et. al. (2004) en ook te zien in een enkele boring (B48C0900, DINOLoket, wel uit 1938). Op de Vlakte van de Raan is de dikte van het kleipakket meestal tussen de 2 en 5 m. Langs de seismische lijn die parallel net ten zuiden van het Oostgat loopt, zijn de diktes over het algemeen kleiner (tot ~2 m). Op veel plekken ligt deze kleilaag binnen 2 meter van de laatste gemeten ligging van de bodem uit 2017.



Figuur 2-2. Foto van boring BS100118 - .zijn twee kleilagen tussen -16 en -20 m NAP gedateerd op het Subboreaal (5660-2400 jaar geleden; Cleveringa, 1990). De diepste kleilaag daarvan ligt ongeveer tussen -19,5 en -19,8 m NAP; de bovenste kleilaag daarvan is niet zichtbaar in de foto. De kleilaag vanaf circa -24 m NAP bestaat uit klei van de Rupel Formatie.

2.4.2 Reflector2: sporadisch aangetroffen kleilaag aan flanken van Vlakte v/d Raan en in geulen

Reflector2 (Bijlagen B.1, Figuur B.1-2) kan op dit moment niet eenduidig aan een formatie of laagpakket binnen een formatie gekoppeld worden. Afhankelijk van de diepte zou reflector2 veroorzaakt kunnen zijn door oudere kleilagen uit de Formatie van Naaldwijk (ondiep voorkomen, tot ~ -15m NAP) of klei uit de Rupel formatie (oostelijke voorkomen, tot ~ -35m NAP) kunnen bestaan.

Reflector2 komt op enige diepte voor aan de flanken van de Vlakte van de Raan, in het Oostgat en de Wielingen. De dikte van het pakket(en) is over het algemeen < 2 m. Het is aannemelijk dat deze lagen in de geulwanden en op de bodem van de geulen dagzomen.

2.4.3 Hard1: stugge kleilaag in het Oostgat en ten zuiden van de Nolleplaat

Hard1 (Bijlagen B.1, Figuur B.1-3) is een sterk contrasterende reflector en is vermoedelijk een (zeer) erosie-resistente kleilaag. In het Oostgat komt de diepte van hard1 overeen met de gekarteerde diepteligging van de formatie van Oosterhout. Het betreft een erosie-resistente kleilaag die in een ondiep marien milieu is afgezet. Ten zuiden van de Nolleplaat komt de diepte van hard1 overeen met de Boomse klei van de Rupel formatie, waarvan bekend is dat deze op de geulbodem dagzoomt (van der Spek, 1997). Het betreft een zeer stugge, sterk gecompacteerde klei die in een ondiep marien milieu is afgezet.

In het Oostgat dagzoomt de Oosterhout klei tussen Zoutelande en Westkapelle aan de geulbodem. De dikte van het pakket is > 5 m nabij Zoutelande, maar neemt af in noordwestelijke richting, vermoedelijk door erosie van de getijdengeul die richting het noordwesten dieper wordt. Ten zuiden van de Nolleplaat is de hard1 reflector waargenomen en ligt deze vlak onder de bodem van de Wielingen. De dikte is aangenomen als 6 m. Elders in de Westerschelde is de Boomse klei tot meer dan 10 m dik. Reflector Hard1 komt hier in diepte overeen met Reflector2, een indicatie dat Reflector 2 in het huidige model hier waarschijnlijk onterecht Naaldwijk en Rupel formaties aan mekaar verbind. In een toekomstige iteratie zouden deze lagen in Reflector 2 losgekoppeld kunnen worden.

2.4.4 Schelpenlaag: dunne schelpenlaag onder de Wielingen

De schelpenlaag (Bijlagen B.1, Figuur B.1-4) komt binnen het onderzoeksgebied enkel in het westen van de Wielingen voor op ongeveer 8 m onder de zeebodem, waardoor deze in de recente historie niet dichtbij het oppervlak heeft gelegen. De schelpenlaag kon niet worden gecorreleerd aan een stratigrafische eenheid. De dikte bedraagt ongeveer 1 m.

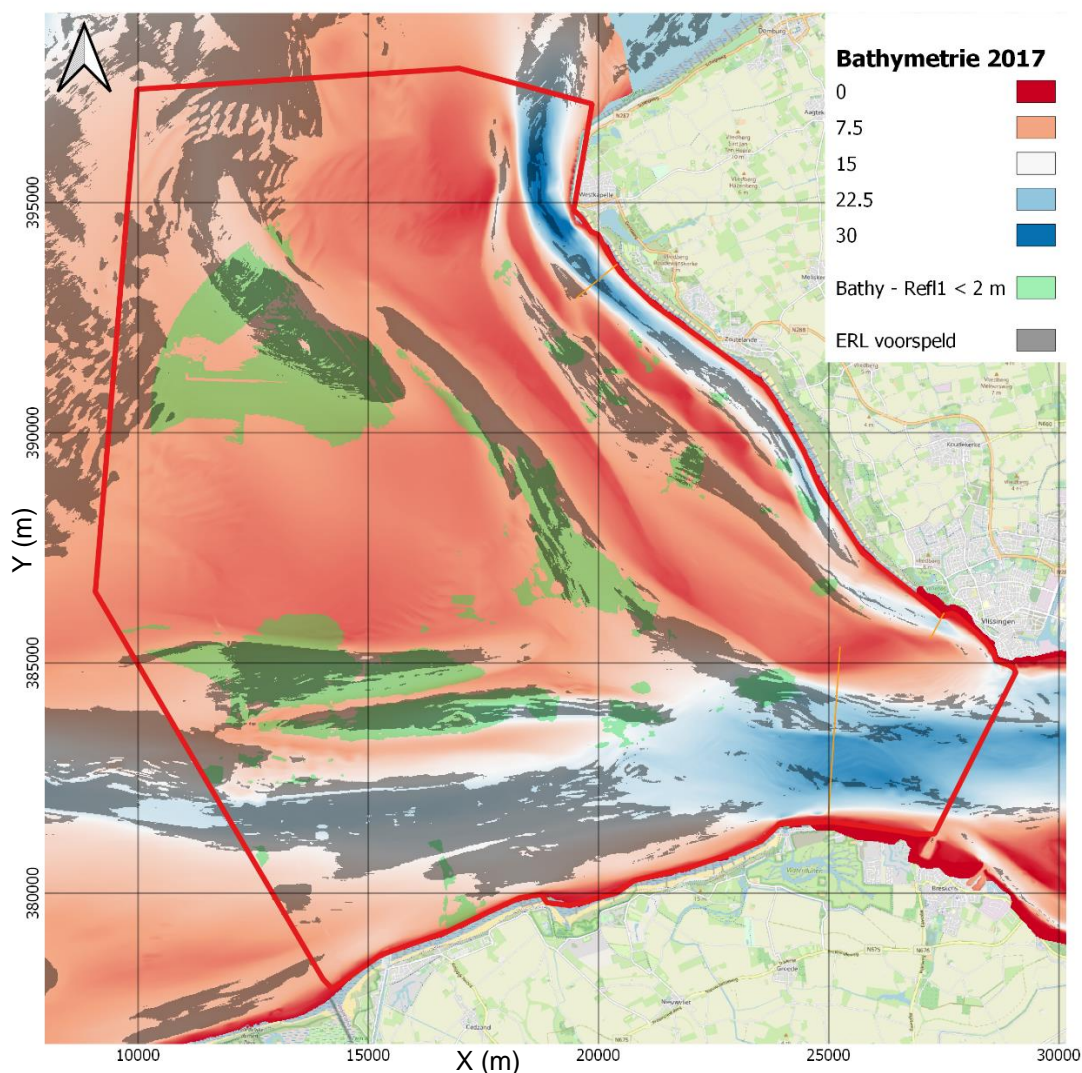
3 Speelt de aanwezigheid van erosie-resistente lagen een rol bij de morfologische ontwikkeling in het mondingsgebied van de Westerschelde?

De resultaten die gepresenteerd worden in dit memo laten zien dat rond de Vlake van de Raan harde lagen voorkomen en zeer waarschijnlijk een rol spelen in de morfologische ontwikkeling van de monding. Bijvoorbeeld: op de locaties waar “reflector 1” binnen 2 m onder de 2017 bodem ligt (Figuur 3-1, “Bathy – Refl1 < 2m” in groen), worden in de meeste gevallen ook kenmerkende morfologische ontwikkelingen gedetecteerd die bij erosie-resistente lagen verwacht worden (Figuur 3-1, “ERL voorspeld” in grijs). De methodiek hiervoor is nog in ontwikkeling en de resultaten zijn hier alleen gepresenteerd ter vergelijking met het geologische model. Zie Bijlagen A.4 voor een uitleg van deze detectiemethode. Zie bijlage B voor een overzicht van alle resultaten

De kleilaag van “reflector 1” speelt waarschijnlijk de belangrijkste rol in het sturen van morfologische ontwikkeling in de afgelopen twee eeuwen. Reflector 1 bevindt zich op een diepte tussen -10 en -20 m NAP en varieert in diepte. Lokaal wordt de top van deze laag bepaald door eerdere erosie van (inmiddels verlaten) getijdegeulen. Waargenomen effecten door toedoen van deze kleilaag komen overeen met effecten die geassocieerd worden met erosie-resistente lagen (van Onselen, 2020). Het gaat om:

- (1) het vertragen van geulmigratie na in contact komen van de geulwand met de kleilaag,
- (2) het vormen van een U-vormig dwarsprofiel als gevolg van toenemende horizontale erosie door het minder snel kunnen eroderen van de geulbodem,
- (3) het vormen van een ‘knik’ in het profiel van de geulwand, en
- (4) het ontstaan van een kleiplateau in het midden van een geul.

Afhankelijk van de locatie kunnen één of meerdere van de hierboven beschreven effecten gezien worden in de dwarsprofielen (Bijlagen B.2).



Figuur 3-1. Daar waar reflector1 binnen 2 m van de bodem ligt (groene vlakken), wordt in de meeste gevallen ook de invloed van een erosie-resistente laag voorspeld (donkergrijze vlakken). Met name in de twee scharen tussen de Vlakte v/d Raan en de Wielingen.

Erosie-resistente lagen kunnen de hydrodynamica in een gebied beïnvloeden. Van der Spek (1997) stelt dat de samenstelling van de ondergrond de morfologische ontwikkeling van de buitendelta niet aanstuurt, maar wel beïnvloedt en dat het aannemelijk is dat morfologische ontwikkeling voornamelijk gestuurd wordt door hydrodynamica. Echter zien we in de huidige dataset ten noorden en zuiden van de Vlakte van de Raan dat erosie-resistente lagen zowel de hydrodynamica als de morfologische ontwikkeling sterker kunnen beïnvloeden dan van der Spek (1997) inschat. Op het moment dat een geul een erosie-resistente laag heeft opgeruimd, kan de geul veel sneller verdiepen en een groter aandeel van het debiet krijgen in vergelijking tot een nabijgelegen geul die nog niet door de desbetreffende laag heen is geërodeerd. Hierdoor kan de groei van de eerste geul dan ook verder versterkt worden, terwijl harde kleilagen in gebieden ernaast juist minder/langzamer worden gerodeerd.

Op basis van de pollendateringen kunnen we stellen dat de kleilaag van reflector1 al lang een actieve rol heeft kunnen spelen in de ontwikkeling van de Westerscheldemonding. Sinds de inbraken van de zee in de vroege Middeleeuwen is dit een gebied met getijdenplaten en -geulen geworden. Het is daardoor te verwachten dat sinds die tijd getijdengeulen, net zoals in de afgelopen tientallen jaren, beïnvloed zijn geweest door de oudere, erosie-resistente kleilagen. Het valt hierbij te verwachten dat de wat oudere kleilagen (Vroeg-Midden Holocene) het meest erosie-resistent geweest zijn en dus de meeste invloed hebben gehad op de morfologische ontwikkelingen. Er bestaat echter nog veel onzekerheid over de ouderdom van de verschillende kleilagen in het gebied en er zijn ook weinig boringen beschikbaar om vast te stellen wat voor type afzetting reflector1 veroorzaakt. Door gericht aanvullend onderzoek zou het begrip omtrent de ouderdom, karakter en erosie-resistentie van deze kleilagen snel kunnen toenemen.

We beschrijven de morfologische ontwikkeling ten noorden en zuiden van de Raan/vlakte van de Raan hier aan de hand van het effect van erosie-resistente lagen. In 1804 bevindt er zich 2 geulen ten noorden van de Raan/vlakte van de Raan en twee ten zuiden. De hydrodynamica ten noorden en zuiden van de Raan/vlakte van de Raan verschilt. Getijamplitude neemt af van Zuid naar Noord, wat er mede voor zorgt dat het getijvolume dat door de Wielingen stroomt groter is dan door het Oostgat.

3.1 Welke effecten van de erosie-resistente lagen zien we ten noorden van de vlakte van de Raan?

De erosie-resistente laag van reflector 1 heeft zeer waarschijnlijk een belangrijke rol gespeeld bij de verandering van een twee-geulen systeem naar het huidige systeem met één dominante geul. Voor 1825 kwamen ten noorden van de vlakte van de Raan twee geulen voor, de Deurloo en het Oostgat, beide met een diepte tussen 10 en 20 m -NAP (Bijlagen B3, kaart 1804). Deze diepte komt overeen met Reflector 1 (Bijlage B2, profielen 10-14). In de profielen is te zien dat er weinig verticale erosie plaatsvindt wanneer geulbodems dichtbij Reflector 1 liggen (~2 km langs profielen 10-14) terwijl horizontale verplaatsing van het geulsysteem door blijft gaan (~3-4 km langs profielen 10-14).

Rond 1825 vond een verdieping van het Oostgat plaats tot 20 m -NAP (Bijlagen B3, kaart 1825), waarbij deze geul waarschijnlijk door de kleilaag van reflector 1 is gebroken. Sindsdien is het Oostgat de dominante geul in het noordelijke gebied en heeft zich in het gebied rond de Deurloo een complex systeem van migrerende geulen en banken ontwikkeld (Figuur 2-1: gebieden 3-8 en 11). De morfologische ontwikkeling van deze geulen is te zien in profielen 9 tot en met 14 (6B.2 B2). De diepte van deze geulen wordt zichtbaar gelimiteerd/afgeremd rond een diepte van 12 m -NAP, in overeenkomst met de ligging van Reflector 1 in dit gebied.

3.2 Welke effecten van de erosie-resistente lagen zien we ten zuiden van vlakte van de Raan?

Ook ten zuiden van de vlakte van de Raan beïnvloedde reflector 1 de morfologische ontwikkeling. Twee geulen waren aanwezig voor 1825 (De Spleet en Wielingen), beide met een diepte tussen 10 en 20 m -NAP (Bijlagen B.3 kaart 1804). Rond 1895 voegden de twee geulen zich samen tot één brede geul met een diepte tussen 10 en 20 m -NAP (Bijlagen B.3, kaart 1895). Profielen 1-5 (Bijlage B.2) laten zien dat de Wielingen reeds door de kleilaag van Reflector 1 heen erodeerde. Deze profielen laten slechts de ontwikkeling vanaf 1964 zien en bevestigen dat de Wielingen toen al door reflector 1 heen was gebroken. De profielen geven dus geen uitsluitsel wanneer die doorbraak plaatsvond.

Net als in het noorden is ook hier een gebied met ondiepere geulen en banken ontstaan tussen de Vlake van der Raan en de Wielingen, waar vroeger de Spleet liep. De diepte van deze ondiepere geulen, die parallel aan de Wielingen lopen wordt ook geremd door Reflector 1 (Profielen 1-5, bijlagen B26B.2). Profielen 2, 3, 4 en 7 (~2.5 km horizontaal) laten zien hoe de horizontale migratie van een geul afgeremd (maar niet gestopt) wordt door de kleilaag van reflector 1. Profielen 3, 4, 5 en 6 (~1-2 km horizontaal) laten zien hoe reflector 1 ook verdieping van een geul tegenhoudt.

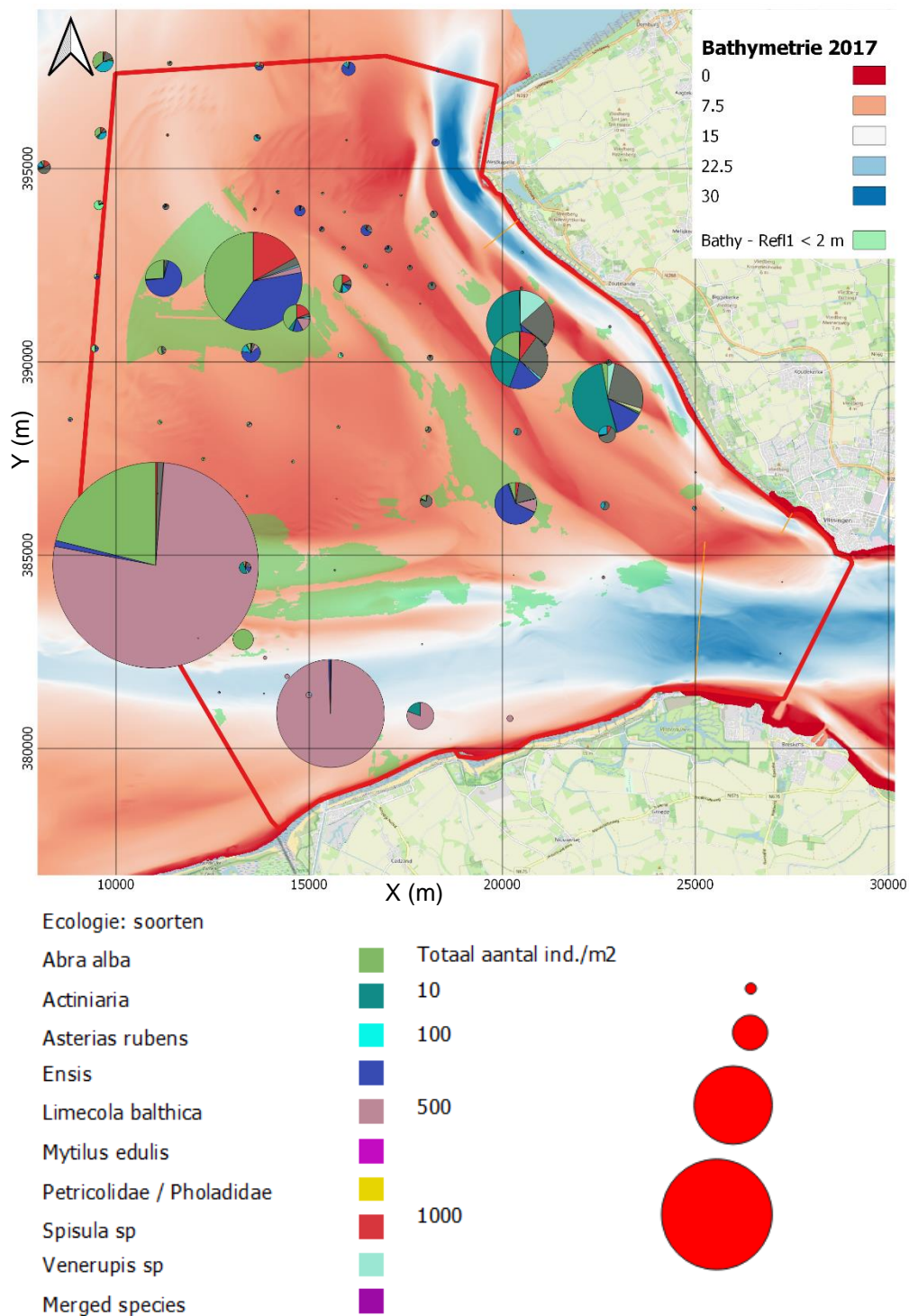
3.3 Welke effecten van de erosie-resistente lagen zien we op de vlakte van de Raan?

De Vlake van de Raan vormt een stabiel blok in het mondingsgebied van de Westerschelde. Onder een dunne laag zand, bestaat de vlakte waarschijnlijk uit enkele doorlopende kleilagen, afgewisseld door zandige afzettingen. Hierdoor wordt de noordwaartse migratie van de direct ten zuiden gelegen geul sterk vertraagd. Sinds 1964 is deze geul ongeveer 100 m opgeschoven naar het noorden.

4 Zijn er overeenkomsten tussen locaties van ecologische habitats (met namen bodemdierengemeenschappen) en het dagzomen van erosie-resistente lagen in het mondingsgebied?

Waar erosie-resistente lagen dagzomen kan een gunstige habitat ontstaan voor bepaalde soorten. Het substraat kan op meerdere manieren de vestiging van soorten beïnvloeden: (1) doordat organismen makkelijker houvast hebben, denk aan mossels op de stenen van een dijk (van Duren et al., 2017) of monopijlers van windturbines (Bouma & Lengkeek, 2013; Bureau Waardenburg, 2020); (2) doordat het bescherming biedt bijvoorbeeld tegen stroming en predatie, denk aan boomossels die zich in deze lagen boren en daar definitief vestigen (Bruyne et al., 1994; Tillin & Hill, 2016); (3) doordat door bioturbatie van gravende soorten organisch-rijk materiaal naar boven komt en beschikbaar wordt als voedsel voor niet-gravende soorten (Shull, 2009). Erosie-resistente lagen zijn slechts één factor in het bepalen van een abundant habitat voor de verschillende organismen die hier voorkomen. Meerdere fysische factoren spelen een rol in het bepalen van biomassa en soortenverspreiding, waaronder waterdiepte, korrelgrootte en bodemschuifspanning/stroomsnelheid. Zo toont de ecologische data uit verschillende jaren veel meer variatie dan het verandering in het dagzomen van erosie-resistente lagen.

In Figuur 4-1 geven we het populatie distributie weer zoals gemeten in 2017. In de gebieden ten noorden (Deurloo west) en ten zuiden (De Spleet) van de Vlake van de Raan wordt een hogere dichtheid aan schelpdieren waargenomen, waaronder *Limecola balthica* (zuidelijke kant), *Abra alba* (noordelijke en zuidelijke kant) en *Ensis leei* (noordelijke kant). In het geulen- en bankensysteem parallel aan de noordelijke kust (Deurloo oost) bevindt zich een relatief grote populatie van zeeanemonen (Actinaria). Op beide locaties dagzoomt de klei van reflector 1 of ligt deze binnen 2 m onder de 2017 bodem (Figuur 3-1). Uit de beschikbare data is het nog niet mogelijk te kwantificeren wat de invloed van de erosie-resistente lagen op de vestigingsmogelijkheden van bodemdierengemeenschappen zijn.



Figuur 4-1: Ecologische data, soortennamen en dichtheid, uit schelpdierenbestand (WOT-data) van 2017.

5 Conclusie voor de beoogde pilotsuppletie

5.1 Erosie-resistente lagen spelen een rol in de morfodynamiek in het gebied van de pilotsuppletie, maar er zijn nog veel onzekerheden.

Het beoogde gebied voor de pilotsuppletie komt overeen met het gebied ten zuiden van de Vlake van de Raan, in het gebied rond De Spleet. In dit gebied speelt de kleilaag van Reflector 1 een actieve rol in de morfologische ontwikkeling en ligt deze veelvuldig aan het oppervlak (Figuur 3-1). Zowel horizontale migratie als verdieping van de geulen worden afgeremd door de aanwezigheid van erosie-resistente lagen.

Er zijn nog veel onzekerheden over het type harde lagen onder en rond de Vlake van de Raan. Weinig boringen zijn diep genoeg om het meest uitgestrekte deel van reflector1 (rond 12 m -NAP) te bereiken en vast te stellen wat deze reflector veroorzaakt. Enkele boringen zijn wel diep genoeg, maar hebben alleen een lithologische beschrijving en geen stratigrafische beschrijving, waardoor de ouderdommen van de kleilagen niet bekend zijn. Boringen die op de locatie van relevante reflectoren gezet worden zouden hierbij kunnen helpen. Ook is het met de huidige boringen niet mogelijk om de diepte van reflectoren uit de seismiek te kalibreren, hiervoor zouden additionele boringen nodig zijn. Bij nieuwe boringen zou relatieve erosie-resistentie bepaald kunnen worden met een “pocket penetrometer” en ouderdom via pollenonderzoek of koolstofdateringen.

Om een goed beeld te krijgen van wat de aanwezigheid van erosie-resistente lagen betekent voor de pilotsuppletie moeten de volgende onderzoeksvragen beantwoord worden:

- Spelen deze lagen ook een rol bij sediment transport in het gebied? (Zie 5.1.1)
- Op welke tijdschaal blijven deze lagen het gebied beïnvloeden? (Zie 5.1.2)
- Wat zou er gebeuren als de erosie-resistente lagen verdwijnen? (Zie 5.1.3)

5.1.1 Spelen deze lagen ook een rol bij sediment transport?

Het dagzomen van een erosie-resistente laag kan een limiterend effect hebben op sediment transport. Er kan minder sediment transport plaatsvinden als er te weinig sediment beschikbaar is op de harde laag om in beweging gebracht te worden.

Om deze vraag goed te kunnen beantwoorden moeten de voorspelde gradiënten in sediment transportcapaciteit vergeleken worden met gemeten erosie(snelheden). Als er minder erosie plaatsvindt dan er voorspeld wordt op basis van transportcapaciteit, is de aanwezigheid van een erosie-resistente laag, dus een tekort aan sedimentbeschikbaarheid op de bodem, hier mogelijk de oorzaak van. In dat geval kan aangebracht sediment sneller verdwijnen. Deze vraag moet onderzocht worden in een modelstudie en data analyse.

5.1.2 Op welke tijdschaal blijven deze lagen het gebied beïnvloeden?

Meer onderzoek is nodig om te bepalen hoe lang erosie-resistente lagen nog invloed hebben op de morfologische ontwikkeling van het gebied. De interactie tussen dagzomende erosie-resistente lagen en zandsuppleties is niet bekend. Beschermst een suppletie juist de erosie-resistente laag? Of veroorzaakt een toename in bedload transport juist meer erosie door uitschuring van deze laag in het gebied rondom de suppletie? Dit zijn vragen die door middel van de monitoring na de aanleg van een pilotsuppletie onderzocht kunnen worden.

Om deze vraag te kunnen beantwoorden, is het tevens belangrijk om meer zekerheid te krijgen over de aanwezigheid en de dikte van erosie-resistente lagen. Meer data zou hierbij helpen: bijvoorbeeld door middel van sidescan sonaropnamen voor het bepalen van de micromorfologie en sedimenttextuur aan het oppervlak, multibeam bathymetrie voor beter bepalen van de positie van de dagzomende lagen en boringen dichtbij de seismische lijnen om uitsluitel te geven over de lithologie en het voorkomen van reflector 1.

5.1.3 Wat zou er gebeuren als deze moeilijk-erodeerbare lagen verdwijnen?

Op een aantal locaties is reflector 1 al doorbroken door de erosieve werking van geulen (meerdere voorbeelden te zien in profielen bijlagen B.2). Het is niet bekend welke impact het verdwijnen van deze erosie-resistente laag heeft op de morfodynamiek en wat daarvan de invloed is op de hydrodynamiek in de Westerscheldemonding. Met een morfodynamisch of een reeks morfostatische modellen zouden deze vraagstukken verder onderzocht kunnen worden.

5.2 Interactie dagzomen erosie-resistente lagen en ecologie is nog niet te kwantificeren in het gebied van de pilotsuppletie.

Er is nog veel onbekend over de interactie tussen erosie-resistente lagen en ecologie. Een belemmering voor betere correlatie is dat data voor ecologische analyse en analyse van dagzomende erosie-resistente lagen momentopnamen zijn in een dynamisch systeem. Deze momentopnames zijn niet op hetzelfde moment nog op dezelfde locatie genomen, en dus is enige correlatie tussen deze datapunten zeer speculatief. Op dit onderwerp is veel winst te behalen door nauwer samen te werken tijdens het plannen van meetcampagnes.

6 Referenties

- Bouma, S., Lengkeek, W. (2013). Benthic communities on hard substrates within the first Dutch offshore wind farm (OWEZ). *Nederlandse Faunistische Mededelingen*, 41, p. 59-68.
- Bruyne, R.H. de, R.A. Bank, Adema, J.P.H.M. & F.A. Perk, (1994). *Nederlandse naamlijst van de weekdieren (Mollusca) van Nederland en België*. Backhuys Publishers.
- Bureau Waardenburg. 2020. Options for biodiversity enhancement in offshore wind farms. Knowledge base for the implementation of the Rich North Sea Programme. Bureau Waardenburg Rapportnr.19-0153. Bureau Waardenburg, Culemborg.
- Cauwenberghe, C. van (1966). Hydrografische analyse van de Scheldemonding ten oosten van de meridiaan 3° 05' tot Vlissingen.
- Dam, Gerard. 2013. "Harde Lagen Westerschelde." LTV-rapport A-28, Vlaams-Nederlandse Scheldec commissie VNSC
- van Duren, L.A., Gittenberger, A., Smaal, A.C., van Koningsveld, M., Osinga, R., van der Lelij, J.A.C., de Vries, M.B. (2017). Rich Reefs in the North Sea. Exploring the possibilities of promoting the establishment of natural reefs and colonisation of artificial hard substrate. Deltares.
- Grujters, S. H. L. L., J. Schokker, en J. G. Veldkamp. 2004. "Kartering Moeilijk Erodeerbare Lagen in Het Schelde Estuarium." Rapport nr 03-213-B1208, TNO, Utrecht.
- Hijma, Marc. 2017. "Geology of the Dutch Coast," 41. Rapport nr 1220040-007-ZKS-0003, Deltares, Utrecht.
- Male, K van der. 2004. "Moeilijk Erodeerbare Lagen in de Westerschelde: Koppeling Met Bodemligging Vanaf 1800." RIKZ
- Onselen, E.P. van. 2020. "Moeilijk erodeerbare lagen in de Waddenzee en Westerschelde", Deltares report 11205236-002-ZKS-0005, Utrecht, The Netherlands,
- Shull D.H. (2009). Bioturbation. In: John H.S., Karl K.T., Steve A.T. (eds) *Encyclopedia of ocean sciences* (2nd edn). Academic Press, Oxford.
- Spek, A.J.F. van der. 1997. "De Geologische Opbouw Ondergrond van Het Mondingsgebied van de Westerschelde En Rol in Morfologische Ontwikkeling." Rapport nr NITG 97-284-B, TNO, Haarlem.
- Tillin, H.M. & Hill, J.M. (2016). Piddocks with a sparse associated fauna in sublittoral very soft chalk or clay. In Tyler-Walters H. and Hiscock K. (eds) *Marine Life Information Network: Biology and Sensitivity Key Information Reviews*, [on-line]. Plymouth: Marine Biological Association of the United Kingdom. DOI: <https://dx.doi.org/10.17031/marlinhab.152.1>
- TNO-GDN (2020)(a). Laagpakket van Walcheren. In: *Stratigrafische Nomenclator van Nederland*, TNO – Geologische Dienst Nederland. Geraadpleegd op 01-12-2020 op <http://www.dinoloket.nl/stratigrafische-nomenclator/laagpakket-van-walcheren>.

TNO-GDN (2020)(b). Laagpakket van Wormer. In: Stratigrafische Nomenclator van Nederland, TNO – Geologische Dienst Nederland. Geraadpleegd op 01-12-2020 op <http://www.dinoloket.nl/stratigrafische-nomenclator/laagpakket-van-wormer>.

Vegt, H. van der, Mastbergen, D., Werf, J. J., van der. 2020. "Moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde - Onzekerheden en gevolgen voor morfodynamiek", Delatres report 1210301-015-ZKS-0014 , Delft, The Netherlands.

Vroom, J., Schrijvershof, R., 2015. "Overzicht van menselijke ingrepen in de Westerschelde en haar mondingsgebied in de periode 1985-2014", Deltares Memo 1210301-001-ZKS-0005, Delft, The Netherlands.

A Gedetailleerde Methodologie

A.1 Seismiek

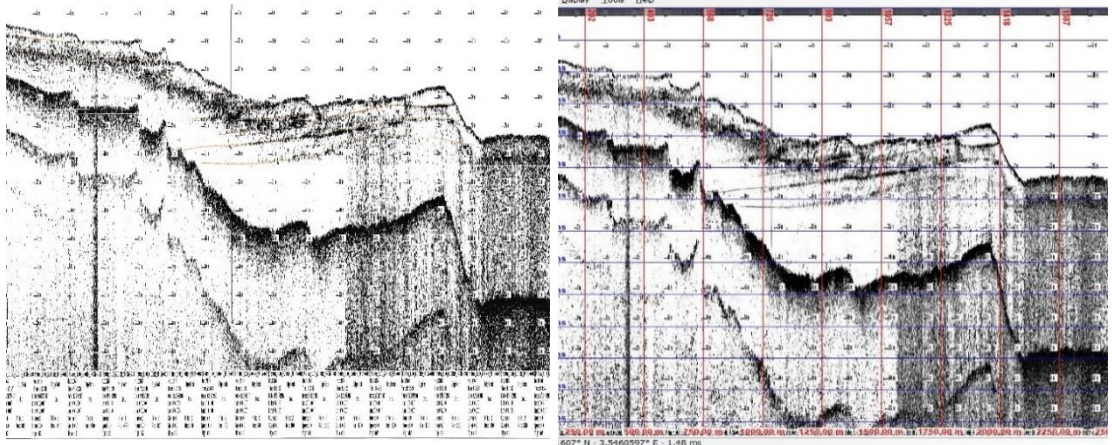
A.1.1 Aanwezige seismiek

In de monding van de Westerschelde werden al in 1996 seismische opnamen uitgevoerd (Van der Spek 1996). Dit betrof seismiek met de X-Star, een chirp-sonar systeem waarvan het signaal penetreert in de zeebodem, ongeveer 5 m in medium-grof zand en 10-15 m in silt en uiterst fijn zand. De chirp-sonar bestaat uit een sleepvis, type SB-408, die enkele meters van het schip en een paar meter diep hangt. Het systeem bestaat verder uit een Unix computer en een versterker voor de aansturing van de sleepvis en verwerking van het gereflecteerde signaal. Het gebruikte signaal was een frequentiegemoduleerde puls, 40 ms lang met frequenties oplopend van 1 – 6 kHz. Dit signaal wordt 4 keer per seconde uitgezonden, waardoor varend langs een raai een akoestisch profiel van de ondergrond verkregen werd.



Figuur Fout! Gebruik het tabblad Start om Heading 6 toe te passen op de tekst die u hier wilt weergeven.-1: Overzicht van de gevaren lijnen in 1996 (links) en het tewaterlating van de X-Star sleepvis type SB-512 (rechts). De SB-408, gebruikt voor de 1996 survey was iets groter.

Destijds werd het signaal op papier en op Exabyte tape geregistreerd. Helaas zijn de tapes verloren gegaan op een klein stukje van een van de lijnen na. De papieren registraties zijn echter allemaal nog wel aanwezig in het archief van de TNO-Geologische Dienst Nederland. Ze zijn ook allemaal gescand naar jpg-files op disk. TNO heeft op verzoek van Deltares die jpg-files omgezet naar Segy-files, een standaard format voor digitale akoestische informatie.



Figuur Fout! Gebruik het tabblad Start om Heading 6 toe te passen op de tekst die u hier wilt weergeven.-2: Voorbeeld van een scan van de registraties op papier van een van de lijnen (links) en het digitale versie van hetzelfde lijnstuk (rechts).

A.1.2 Interpretatie van de seismiek

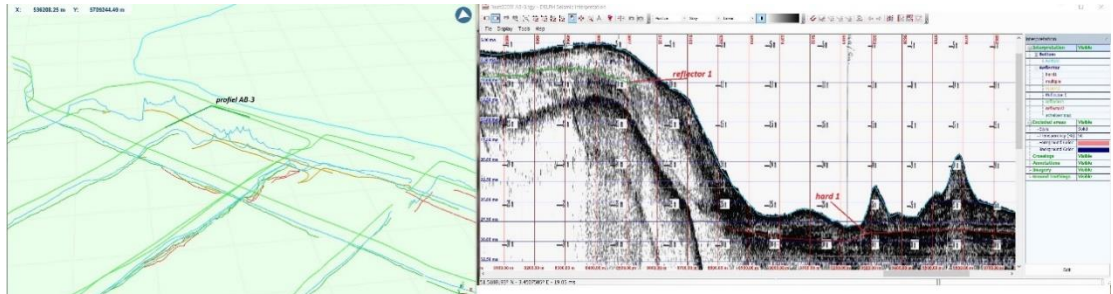
De seismiek is verwerkt door met behulp van interpretatie-software op de akoestische profielen de harde lagen aan te geven. Reflecties met een hoge amplitude (sterkte) ten opzichte van de achtergrondruis werden aangeduid als harde lagen, dat wil zeggen kleilagen en een enkele schelpenlaag. Voor dikke kleilagen, zoals de Boomse klei, geldt dat met name de bovenkant van de klei de reflectie veroorzaakt.



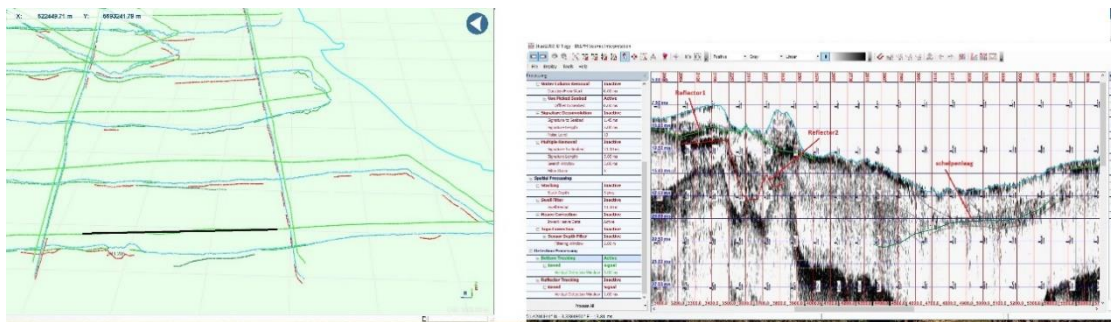
Figuur Fout! Gebruik het tabblad Start om Heading 6 toe te passen op de tekst die u hier wilt weergeven.-3: Overzicht van de akoestische lijnen met de meeste afgebeeld als een soort hekwerk in een vogelvluchtafbeelding kijkend naar het noordoosten.

De reflecties die geïnterpreteerd zijn als harde lagen zijn aangeduid met namen zoals 'reflector 1', 'reflector 2' en 'hard 1'. De reflectors 1 en 2 zijn kleilagen, vermoedelijk in de Naaldwijk en/of Eem Formaties, terwijl reflector 'hard 1' een harde kleilaag is uit het Tertiair, voornamelijk in de seismiek voorkomend aan de noordostrand van het Oostgat en in de Wielingen voor Vlissingen. Reflector 1 is telkens de bovenste kleilaag in de ondergrond.

Er is verder ook in de Wielingen, op grond van een boring aldaar, een schelpenlaag aangeduid. Een tekortkoming van de seismische gegevens is het niet kunnen identificeren van dagzomende kleilagen. In dat geval valt de top van de kleilaag samen met de zeebodem en is er dus maar één reflector te zien, namelijk die van de zeebodem. Voor alle situaties waar dit soort 'gaten' zichtbaar zijn, is handmatig gekeken of het hier gaat om dan wel afwezigheid of het dagzomen van de kleilaag.



Figuur Fout! Gebruik het tabblad Start om Heading 6 toe te passen op de tekst die u hier wilt weergeven.-4: Interpretatie van een deel van het profiel van lijn AB-3. Het diepe deel is het Oostgat en links de ondiepte er ten zuidwesten van.



Figuur Fout! Gebruik het tabblad Start om Heading 6 toe te passen op de tekst die u hier wilt weergeven.-5: Interpretatie van een deel van het profiel van lijn IJ-1. Hier is het diepe deel de Wielingen. Ook is te zien dat reflector 2 hier de onderkant is van een opgevulde geul.

A.2 Diktebepaling erosie-resistente lagen

Voor het produceren van een lagenmodel is naast de diepteligging van contrasterende lagen ook informatie nodig over de dikte van deze lagen. Laagdiktes zijn waar mogelijk uit de TNO 2004 grids gehaald (Gruijters et. al. 2004). Indien dit niet mogelijk was, zoals op van plekken die niet gedekt worden door de grids of waar reflectoren niet eenduidig gekoppeld kunnen worden aan een formatie, is naar nabijgelegen boringen gekeken voor het afleiden van de laagdiktes.

Voor het koppelen aan boringen wordt binnen een horizontale zoekradius van 4 km gekeken naar lagen die op ongeveer dezelfde diepte liggen als de top van de reflector in kwestie. De verticale zoekradius is gegeven door:

$$\text{Maximale afstand} = 1 + \left(\frac{\text{Afstand}}{1000} \right) \quad (2.1)$$

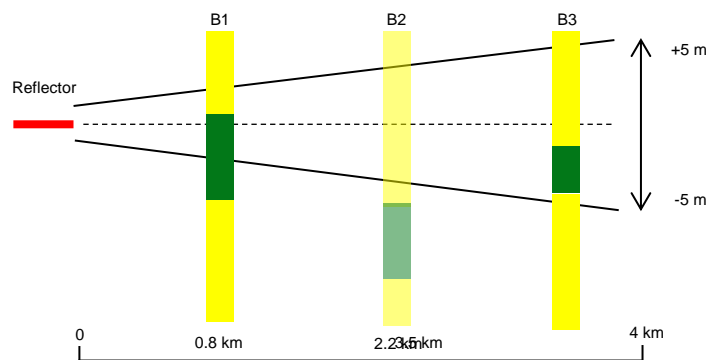
Op een afstand van 4 km is het maximale verschil tussen de reflector en de top van de laag die gekoppeld kan worden dus 5 m. Lagen die buiten dit verticale zoekbereik vallen komen niet in aanmerking voor diktebepaling (B2 in Figuur **Fout! Gebruik het tabblad Start om Heading 6 toe te passen op de tekst die u hier wilt weergeven.**-1). De dikte die wordt toegekend aan de locatie van de reflector wordt berekend door middel van inverse distance weighting:

$$Dikte = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \cdot D_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (2.2)$$

Waarbij D_i de dikte is van een in aanmerking komende laag in boring i en w_i gegeven is door:

$$w_i = \frac{1}{A_i^2} \quad (2.3)$$

Waarbij A_i de afstand is tussen het punt waar de reflector is waargenomen en boring i .



Figuur Fout! Gebruik het tabblad Start om Heading 6 toe te passen op de tekst die u hier wilt weergeven.-1: Illustratie diktebepaling door boringen. Stel dat de (in groen ingetekende) kleilaag in boring B1 5 m en in B3 2 m dik is, dan volgt uit vergelijking 2.2 en 2.3 dat de dikte op locatie van de reflector op 4.85 m wordt geschat.

Reflector1, geïnterpreteerd als een bovenste kleilaag in de Formatie van Naaldwijk, is in verband gebracht met de dikte van het corresponderende grid van Gruijters (2004) (dikte_nawa.asc) welke het beste overeenkomt met reflector1. Op basis van de diepte en enkele pollendateringen is wel aan te nemen dat deze erosie-resistente laag eerder uit het oudere Laagpakket van Wormer dan uit Laagpakket van Walcheren komt, maar in Gruijters (2004) wordt deze laag tot het Laagpakket van Walcheren gerekend. Hard1 is gekoppeld aan de dikte van het grid voor de Formatie van Oosterhout (dikte_oo.asc) in het Oostgat en is aangenomen als 6 m dik ten zuiden van de Nolleplaat, waar bekend is dat de Boomse klei uit de Formatie van Rupel in de diepste delen van de geul dagzoomt. De schelpenlaag en reflector2 konden niet met zekerheid gekoppeld worden aan een bekende formatie. Voor de diktebepaling van deze lagen is overal teruggevallen op de hierboven beschreven methode met boringen.

A.3 Interpolatie IMOD nieuwe geologische model harde lagen

Voor de interpolatie is de software IMOD gebruikt. iMOD is een combinatie van een Graphical User Interface en een versnelde Deltares versie van MODFLOW met snelle, flexibele en consistente sub-domein modelleringstechnieken. iMOD faciliteert grote, complexe, hoge resolutie MODFLOW grondwatermodellen en geo-editing van de ondergrond.

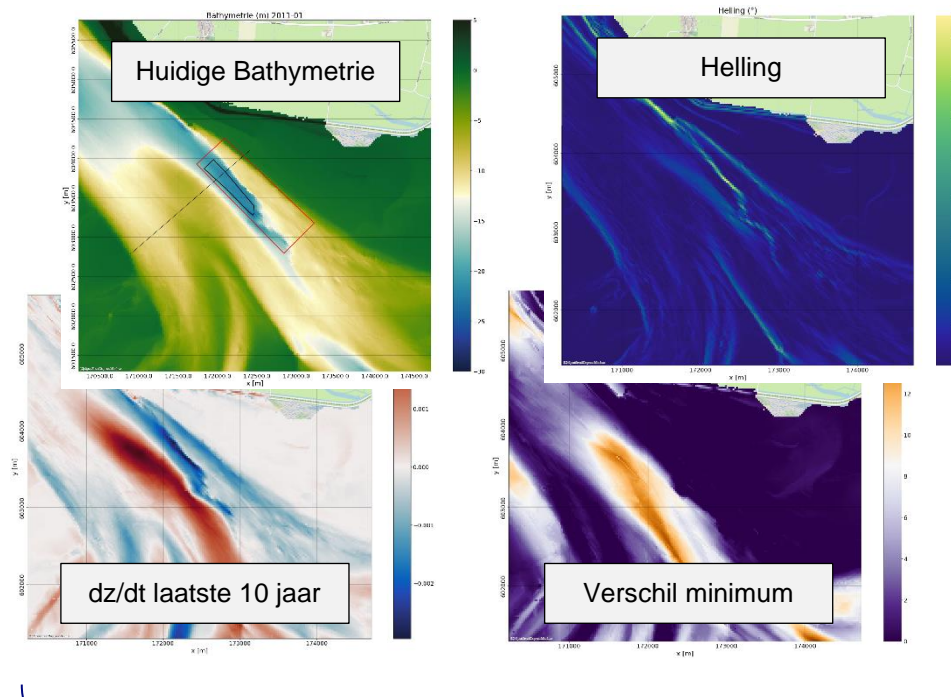
De geïnterpreteerde seismische data is omgezet naar het IPF data format en de diktes zijn berekend met behulp van de iMOD batch-functie XYZTOIDF. De Ordinary Kriging methode is gebruikt voor de interpolatie met een range van 4 km. Vervolgens zijn de bovenkant en de onderkant van de geologische formaties berekend met de iMOD batch-functie LAYERSFROMTHICKNESS. De lagen die hieruit komen zijn MF6 lagen, dit betekent dat alle formaties voor het gehele modeldomein een waarde hebben voor de bovenkant en de onderkant van de laag en dat vervolgens de dikte van de laag bepaald of een formatie voorkomt, i.e. een laagdikte van 0 m betekent dat de formatie niet aanwezig is. De bovenkant van het geologisch model wordt bepaald door de bathymetrie die een resolutie heeft van 20 m. Na de interpolatie zijn incorrecte interpolatie artefacten geïdentificeerd en gecorrigeerd. Reflector 1 is niet aanwezig in de dataset wanneer deze aan het oppervlak aanwezig is. Om dit te corrigeren zijn de gebieden geselecteerd en de geïnterpoleerde diktes in deze gebieden zijn verwijderd. Vervolgens zijn de gebieden opgevuld met een nearest neighbour interpolatie, dit zorgde ervoor dat de diktes regelmatig blijven zonder grote sprongen. In dezelfde gebieden is de bovenliggende zandlaag in dikte verminderd. Hiernaast is ook in een aantal gebieden de dikte naar 0 gebracht voor reflector 1 en hard 1. In deze gebieden was het al bekend dat deze formaties daar niet voorkomen.

A.4 Experimentele methode harde lagen

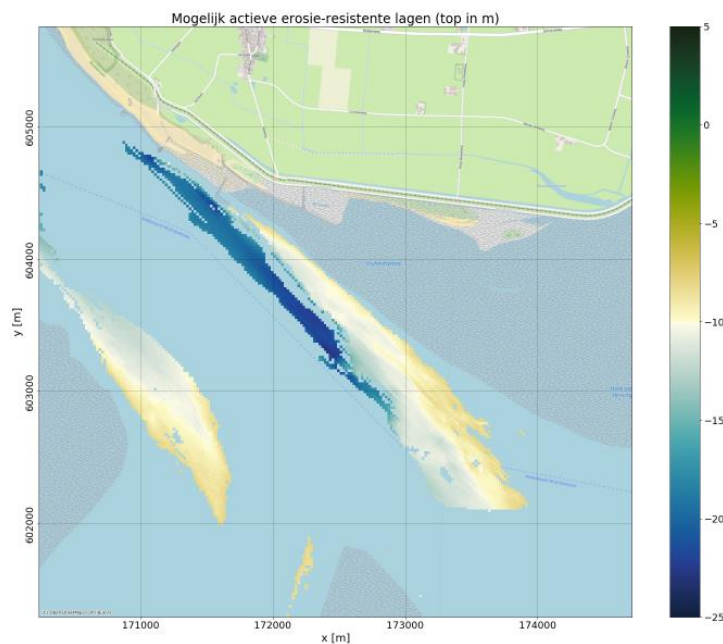
Voor de verbeterde methode om potentiële locaties met actieve erosie-resistente lagen aan te wijzen, is gebruik gemaakt van afgeleide rasterdata gebaseerd op vaklodgingen die sinds 1963 voor de Westerscheldemonding ingewonnen zijn (van Onselen, 2020). Met actief wordt hier bedoeld dat de erosie-resistente laag in het recente verleden aan het oppervlakte heeft gelegen en erosie heeft verhinderd. Een plek waar bijvoorbeeld een geul is opgevuld nadat deze in het verleden een erosie-resistente laag aansneed, wordt dus niet meegenomen. De verschillende afgeleide rasterdata in een gegeven cel moet aan een aantal voorwaarden voldoen om geïnterpreteerd te worden als locatie waar mogelijk een erosie-resistente laag actief is (Figuur A.4-1). Deze voorwaarden zijn gekalibreerd aan de hand van bekende locaties en zijn als volgt:

- De minimum bathymetrie ligt binnen 0.5 m van de huidige bathymetrie
Dit betekent dat, mocht het minimum niveau bepaald zijn door een erosie-resistente laag, er momenteel hooguit een dunne actieve zandlaag op ligt.
- Verticale snelheid van de afgelopen 10 jaar < 0 m/dag en > 0.002 m/dag
Dit betekent dat er (gemiddeld) een lichte erosie heeft plaatsgevonden, typisch voor een geul die een erosie-resistente laag aansnijdt
- De helling is kleiner dan 1° óf groter dan 8°
Een kleine helling kan duiden op een platte geulbodem of trede in de geulwand. Een grote helling kan veroorzaakt worden door een erosie-resistente laag in de geulwand.
- De hellingverandering is kleiner dan 0.1 °/m óf groter dan 0.4 °/m
Hiervoor geldt dezelfde logica: een vlak gebied heeft een onveranderlijke helling. Indien er een overgang is naar een zeer steil deel van de geulwand, verandert de helling snel: zowel aan de basis als aan de top.
- De diepte is minimaal 8 m.
Met deze simpele voorwaarde worden zandplaten eruit gefilterd.

Als een gebied aan deze voorwaarden voldoet, geeft dit echter geen garantie dat hier sprake is van een erosie-resistente laag. De bovenstaande methode kan ook resulteren in plekken waar een geul simpelweg langzaam een zandige bodem erodeert. Handmatig nagaan of het hier daadwerkelijk om een erosie-resistente laag gaat blijft daarom van belang. Deze methode werkt bovendien alleen voor getijdegeulen.



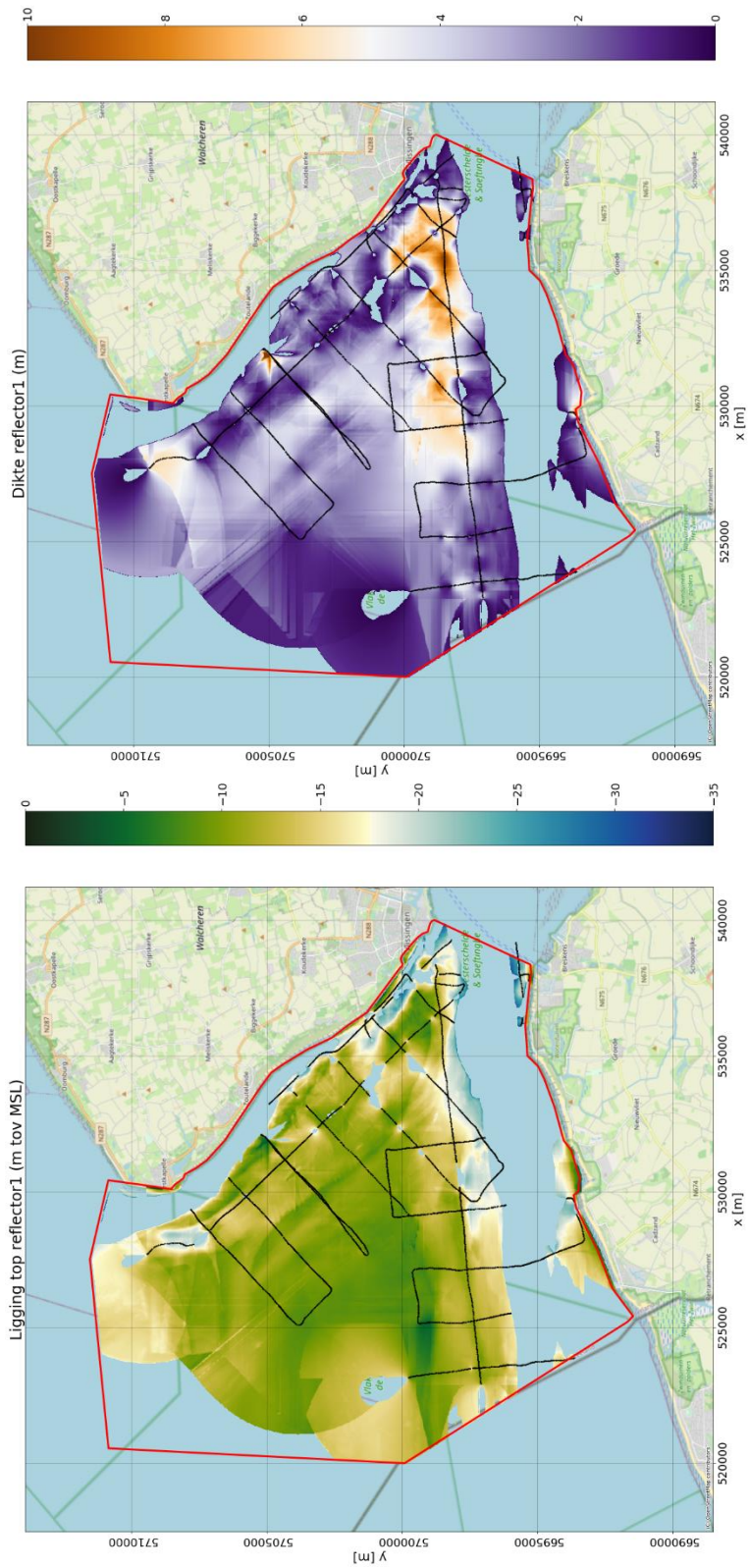
Voorwaarden

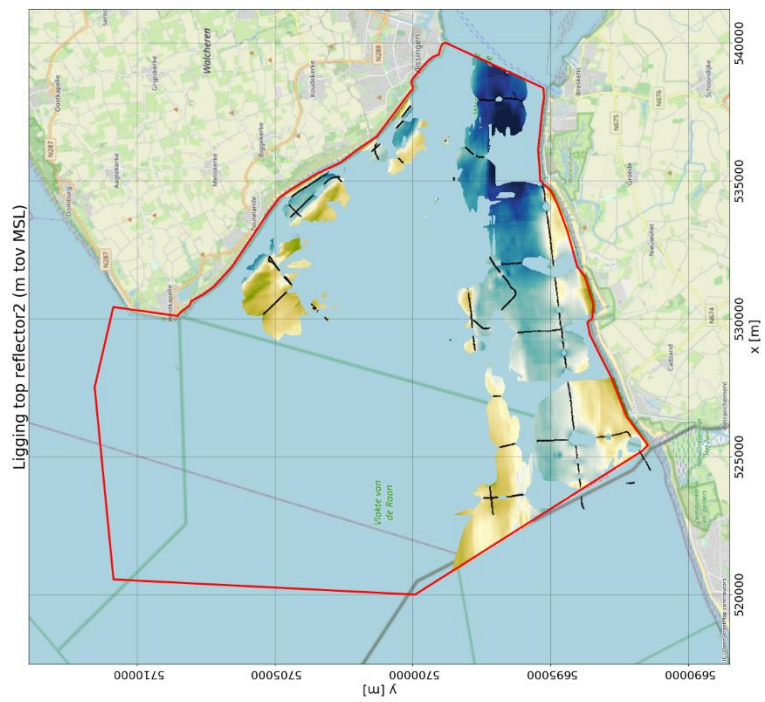
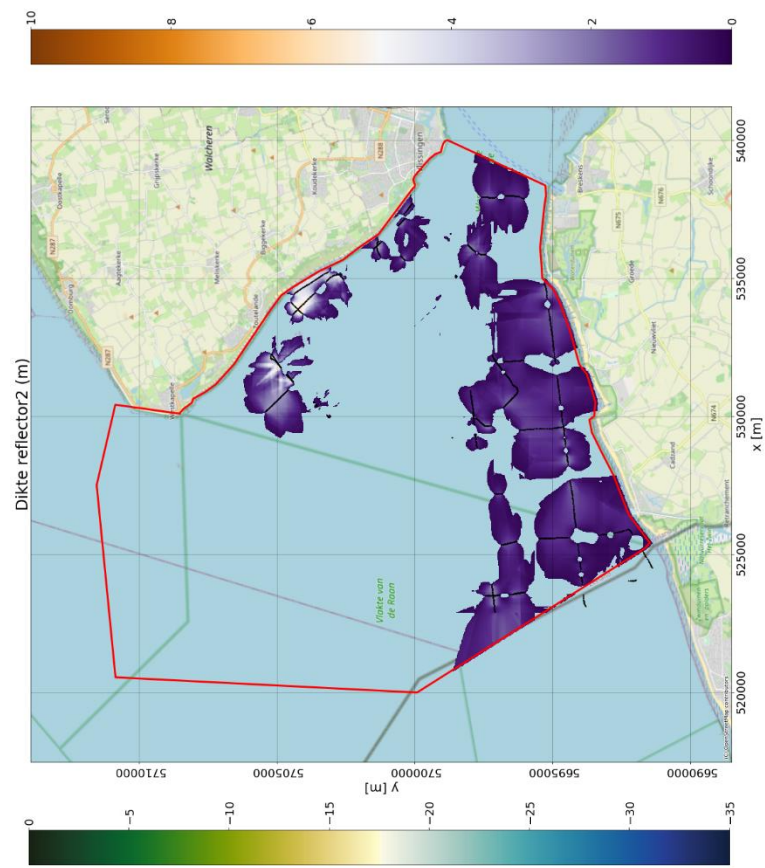


Figuur Fout! Gebruik het tabblad Start om Heading 6 toe te passen op de tekst die u hier wilt weergeven.-1. Overzicht methode. De verschillende afgeleide rasterdata worden vergeleken met de in dit hoofdstuk opgestelde voorwaarden. Hier komt een grid uit met cellen die een waarde 0 (voldoet niet) of 1 (voldoet aan alle voorwaarden) kunnen hebben. In het voorbeeld van het Borndiep is de diepte geprojecteerd op cellen waar aan alle voorwaarden voldaan wordt. Hiermee kan de Holocene kleilaag rond de 10 m -NAP en de potklei onder 20 m -NAP duidelijk onderscheiden worden.

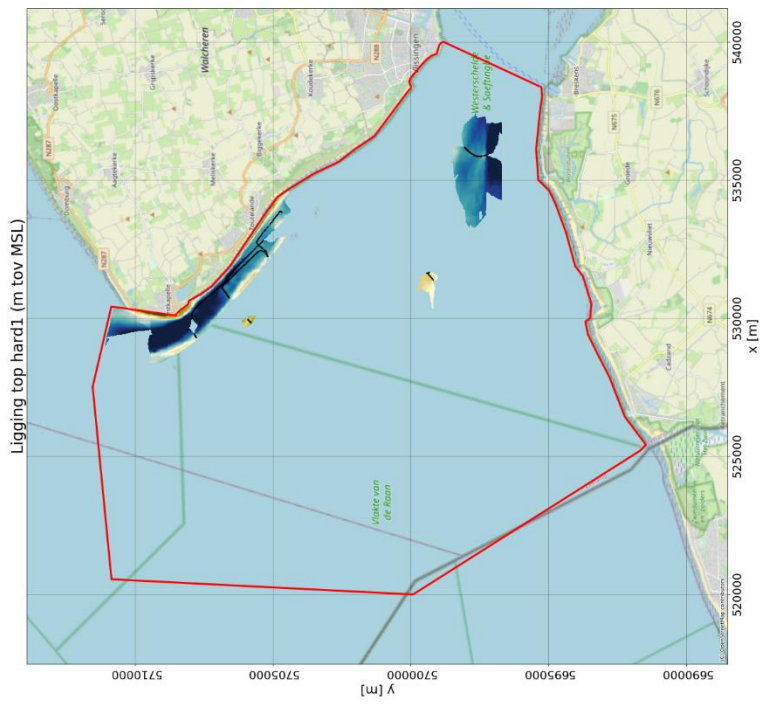
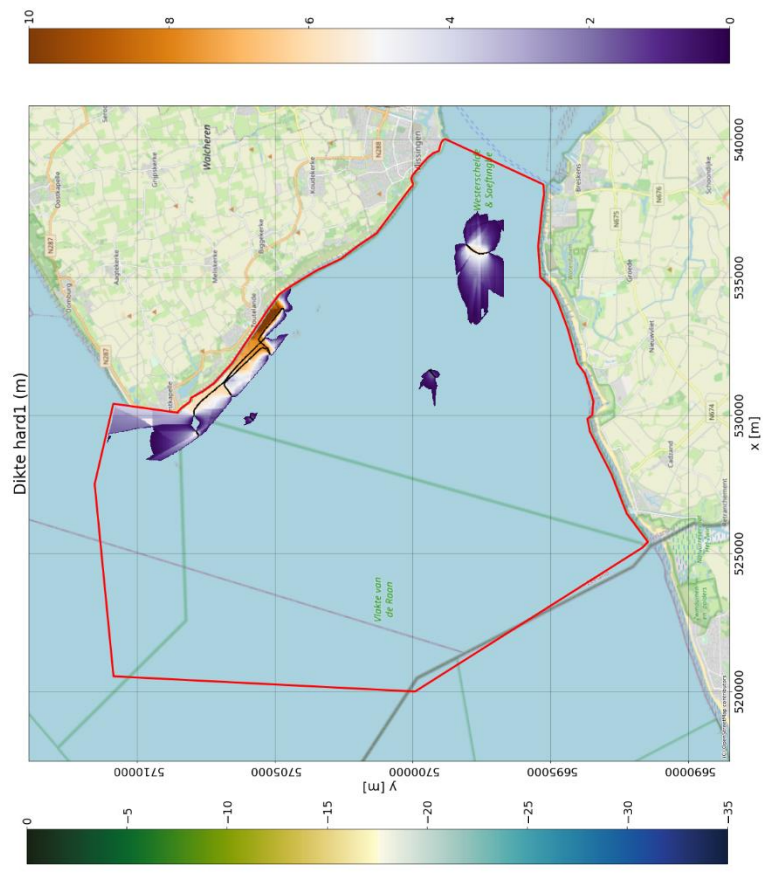
B Volledige resultaten

B.1 Kaarten van aangetroffen lagen

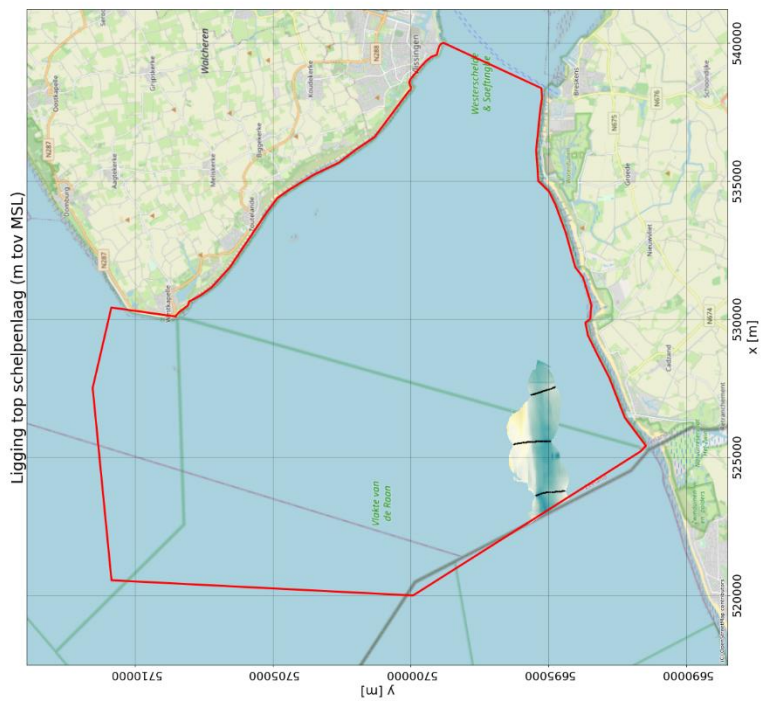
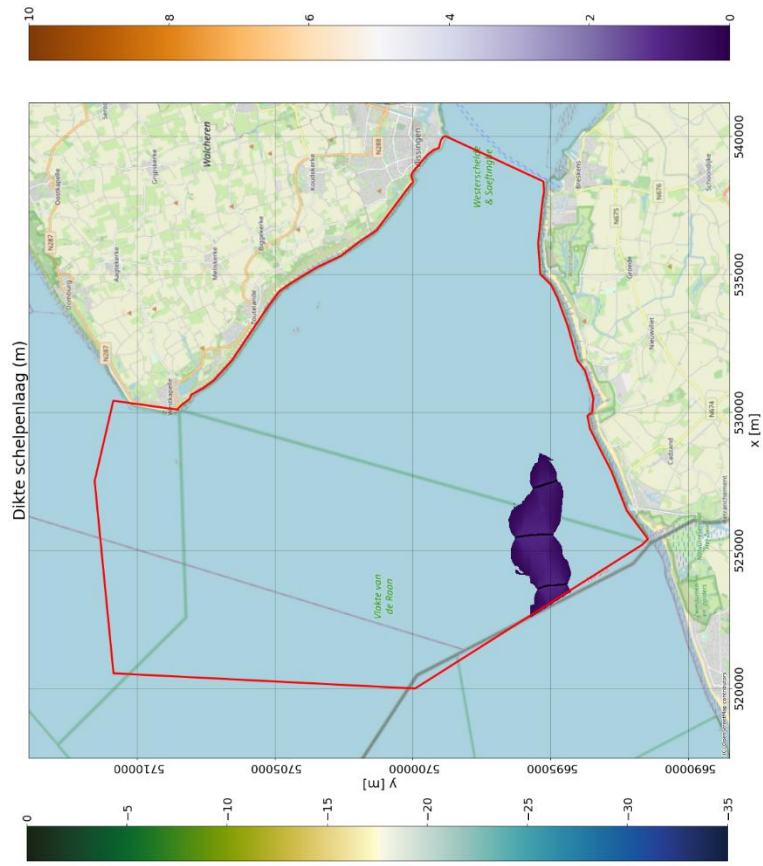




... en model van Gruijers et. al. (2004) (rechts). Langs de zwarte lijnen is reflector2 geïnterpreteerd in de seismiek



model van Gruijers et al. (2004) (rechts). Langs de zwarte lijnen is hard1 geïnterpreteerd in de seismiek



en (rechts). Langs de zwarte lijnen is schelpenlaag geïnterpreteerd in de seismiek

B.2 Profielen

Er zijn in totaal veertien profielen gemaakt (Figuur **Fout! Gebruik het tabblad Start om Heading 6 toe te passen op de tekst die u hier wilt weergeven.-1**). Er is gekozen om deze profielen overeen te laten komen met de vaarlijnen waarlangs de seismiek is ingewonnen. Hier hebben we de meeste zekerheid, omdat de top van reflectoren één-op-één uit de scans volgt en daarmee onnauwkeurigheden door toedoen van de interpolatie zijn uitgesloten. De enige uitzondering is profiel 7, die zo'n 400 m ten zuiden parallel aan een vaarlijn loopt en drie keer een vaarlijn kruist. Dit profiel is gekozen omdat het een uniek inzicht geeft in een plateau dat midden in een insnijdende geul is blijven staan. De gekarteerde reflectoren worden steeds aangegeven met een dikke lijn. Het lichtgroene gekleurde vlak onder reflector 1 is afgeleid uit boringen en het model van Gruijters (2004) en komt overeen met de dikte van het eerste erosie-resistente laag van de Laagpakket van Walcheren in zijn kartering. Dit betekent niet dat de erosie-resistente laag van reflector 1 deze dikte heeft.

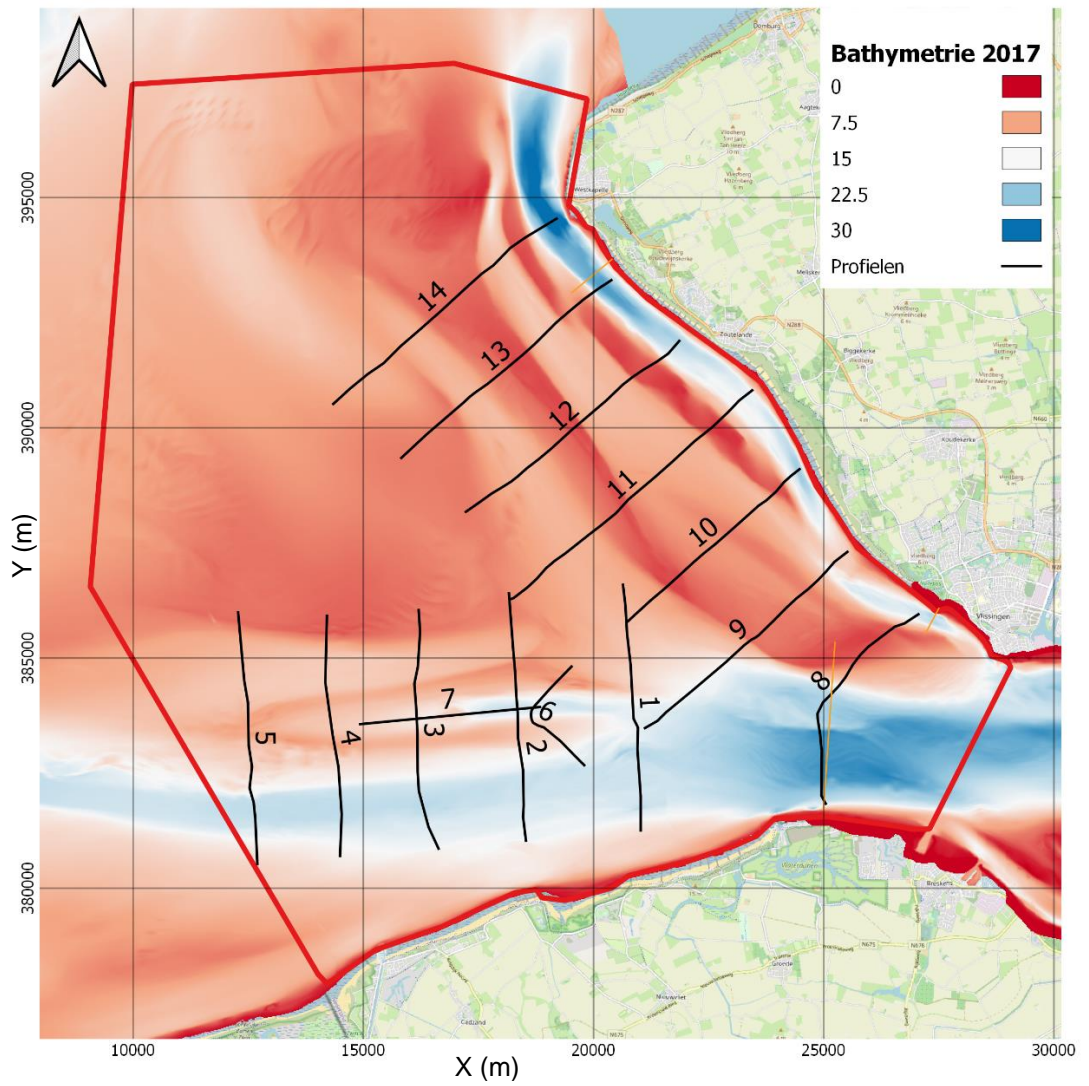
In de profielen worden de mogelijke effecten van erosie-resistente lagen gegeven door een nummer, zoals beschreven in Hoofdstuk 4:

- 1) vertraging geulmigratie na in contact komen van de geulwand met de kleilaag
- 2) de vorming van een U-vormig dwarsprofiel als gevolg van toenemende horizontale erosie door het minder snel verticaal kunnen eroderen van de geulbodem
- 3) het vormen van een 'knik' in het profiel van de geulwand, en
- 4) het ontstaan van een kleiplateau in het midden van een geul

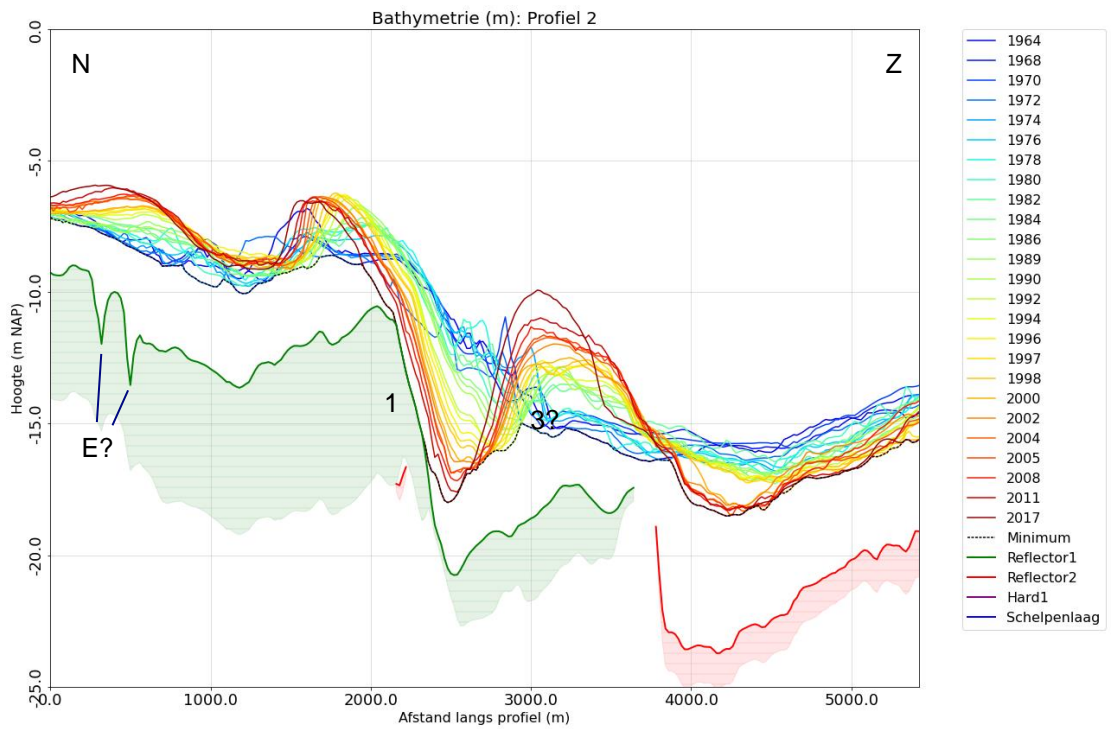
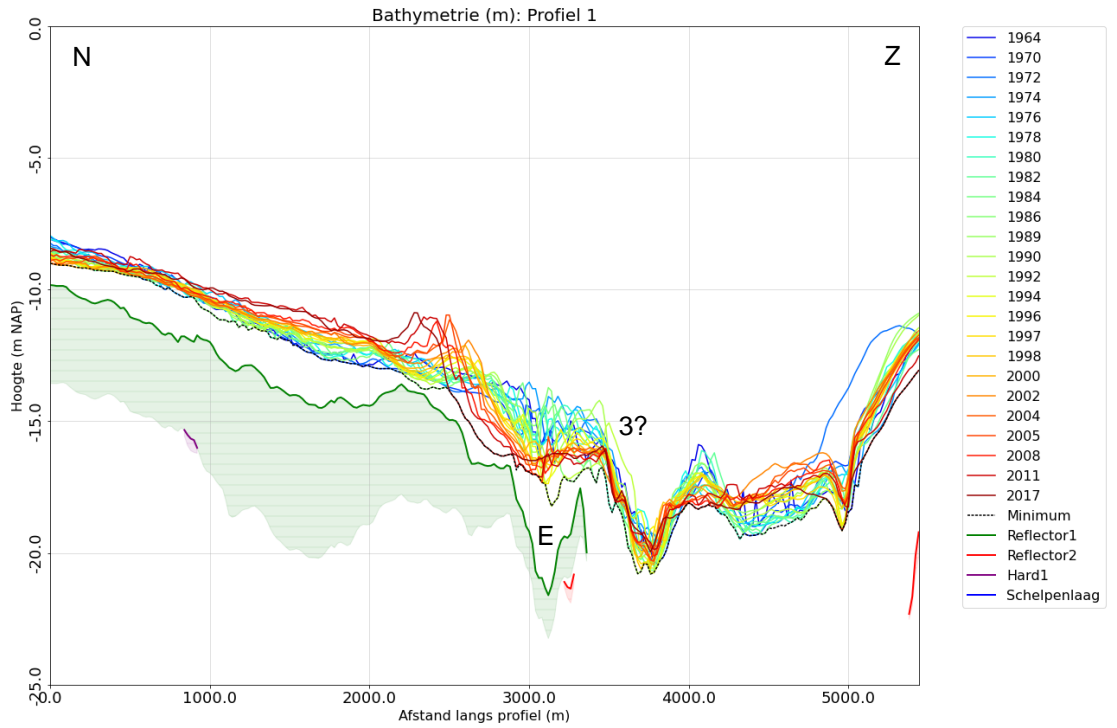
Afhankelijk van de locatie kunnen één of meerdere van de hierboven beschreven effecten gezien worden in de dwarsprofielen (Appendix A.3). Voor de twee scharen ten zuiden van de Vlakte van de Raan manifesteert het effect van de kleilaag zich door het vertragen van de geulmigratie (Profielen 1-6) het vormen van een U-vormige geul (Profielen 3, 4 en 5), het vormen van een 'knik' in de geulwand (Profielen 1-6). In Profiel 1-6 is ook een knik te zien bij de verdieping naar de Wielingen, wat overeenkomt met de diepte van reflector 1. Op het langsprofiel is een kleiplateau te zien welke vanaf het oosten steeds verder erodeert (Profiel 7). Ten noorden en ten oosten van de Vlakte van de Raan (Deurloo-oost, Deurloo-west, de Rassengeul en de Geul van de Walvischstaart) hebben de geulen een U-vormig dwarsprofiel en zijn ze sinds 1964 zeer langzaam ingesneden (Profielen 8 - 14). Deze observaties zijn samengevat in Tabel B-1. De toevoeging 'H' betekent dat dit effect in het verleden is waargenomen maar momenteel niet van toepassing is. De toevoeging '?' betekent dat het effect onzeker is. Een 'E' betekent dat hier vermoedelijk een oud erosievlak ligt door toedoen van een verlaten en opgevulde geul.

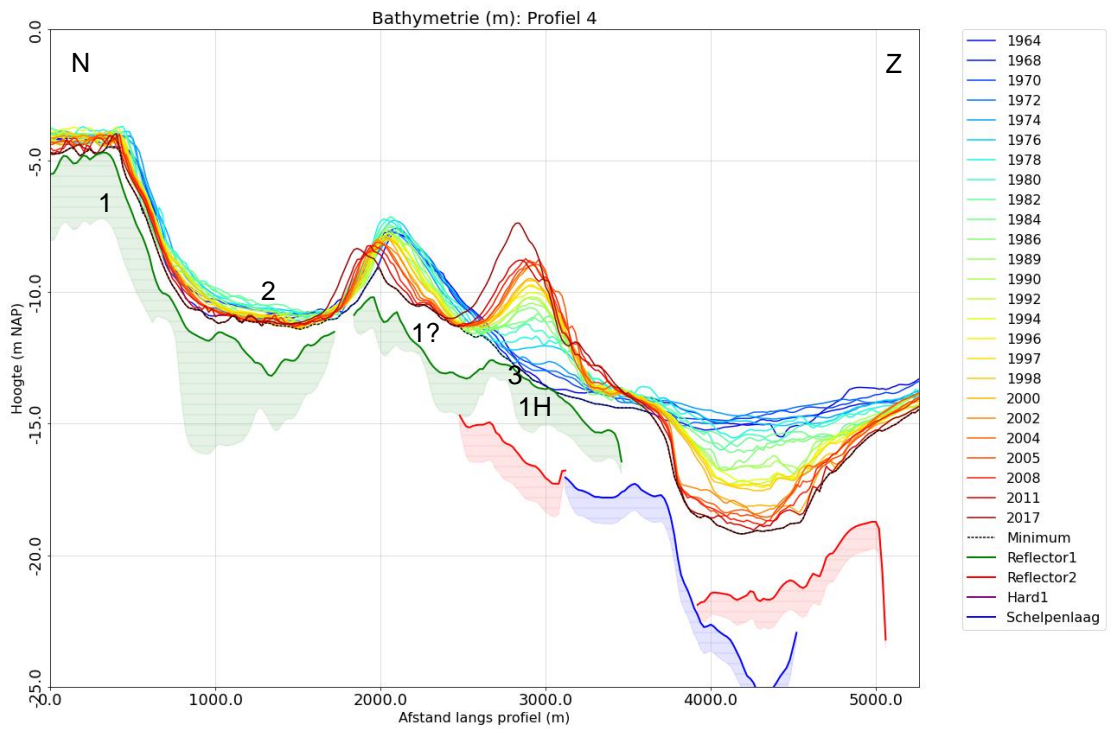
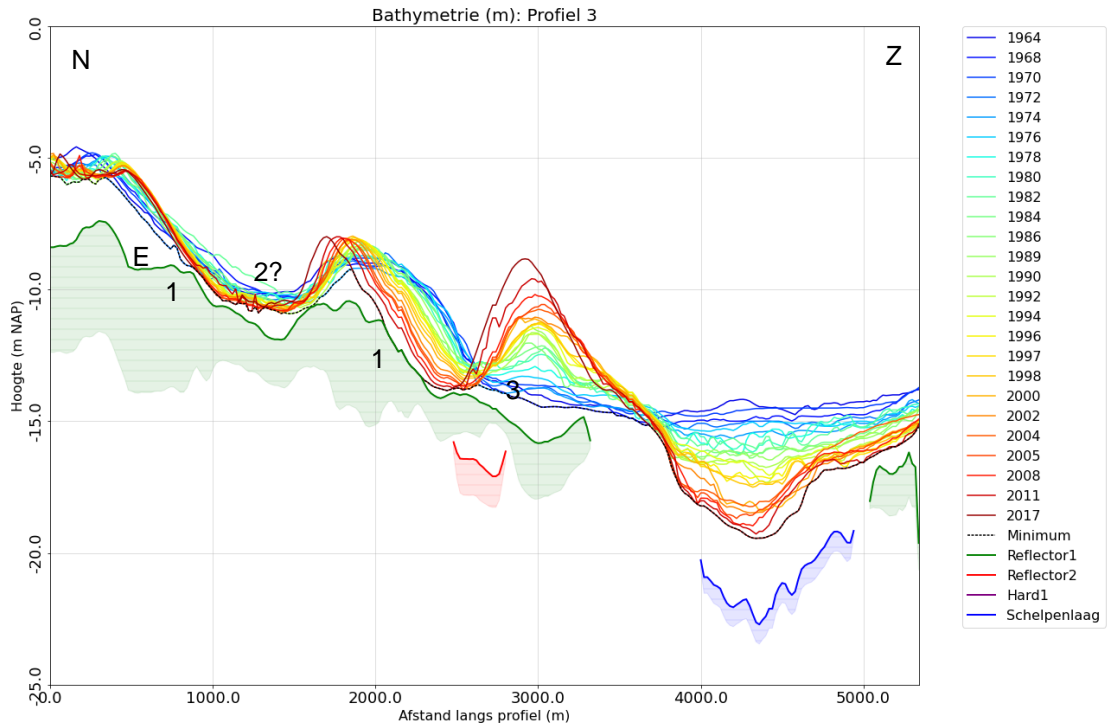
Tabel B-1: Morfologische effecten erosie-resistente lagen in profielen

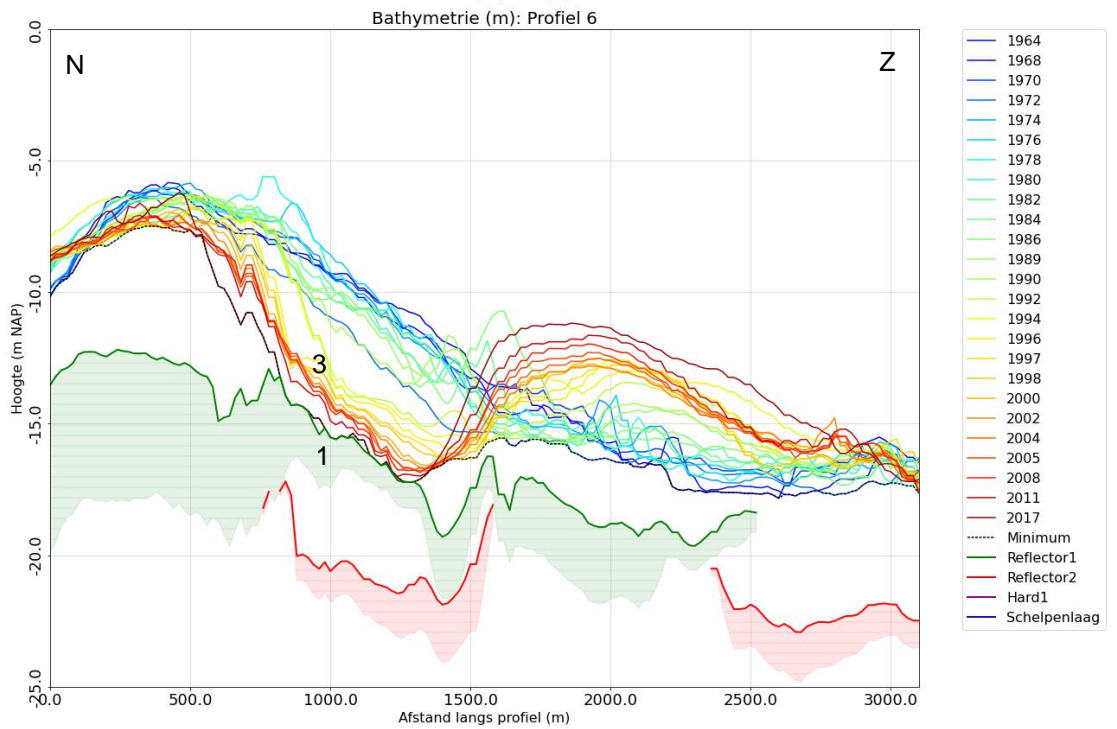
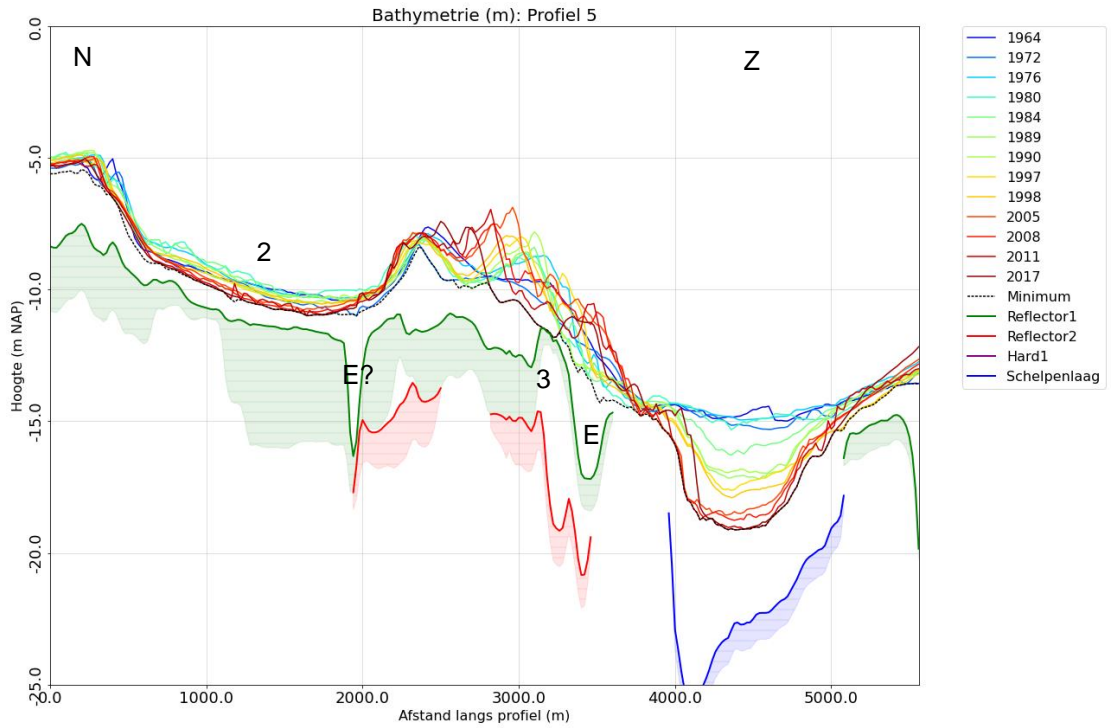
Profiel	1.vertraging	2. U-profiel	3. knik	4. plateau	E	
1			?		✓	Dwarsprofielen zuid van vlakte van de Raan
2	✓		?		?	
3	✓	?	✓		✓	
4	✓; H	✓	✓			
5		✓	✓		✓	
6	✓		✓			
7				✓		Langprofiel Zuid van vlakte van de Raan
8	✓	H?	H		?	Dwarsprofiel monding
9	✓	H?			✓	
10	✓	✓			✓	Dwarsprofiel noord van vlakte van de Raan
11	✓	✓			✓	
12	✓	✓			✓	
13	✓	✓	x		✓	
14	✓	✓			✓	

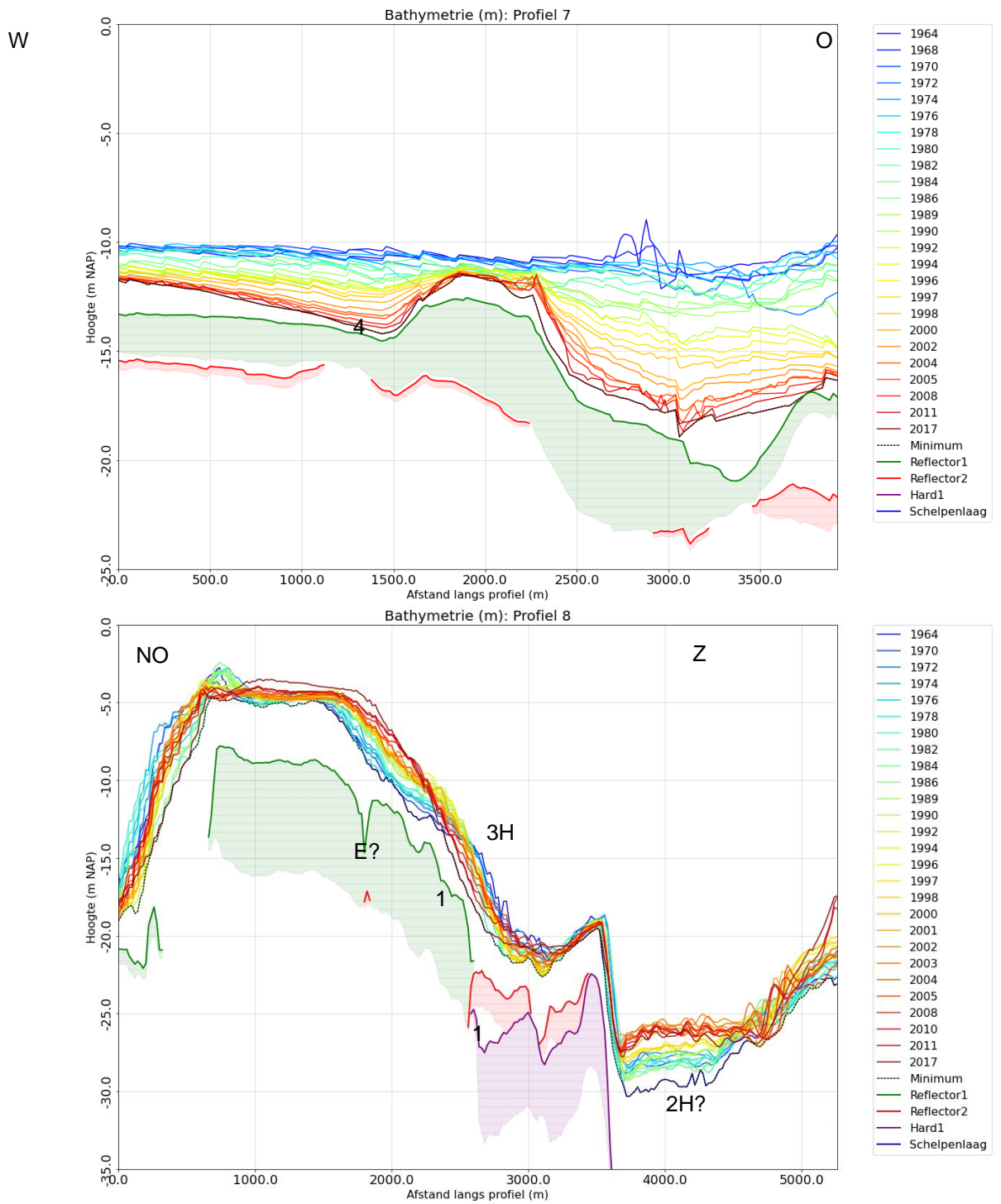


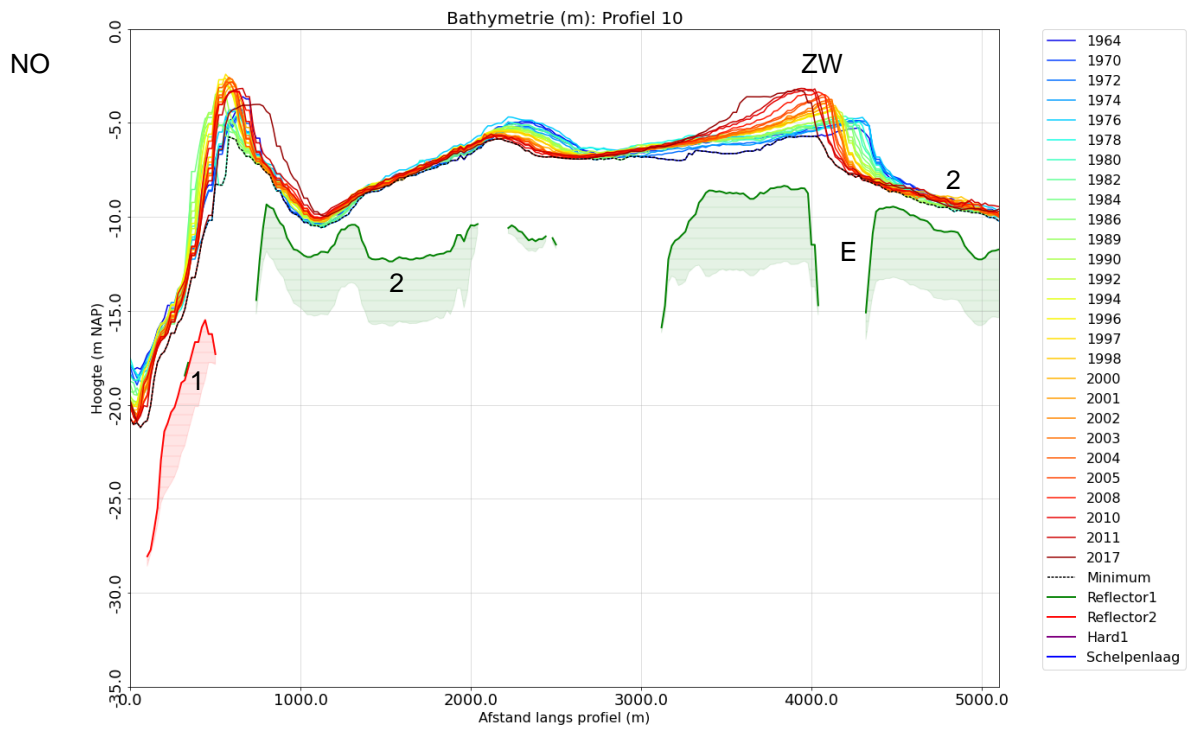
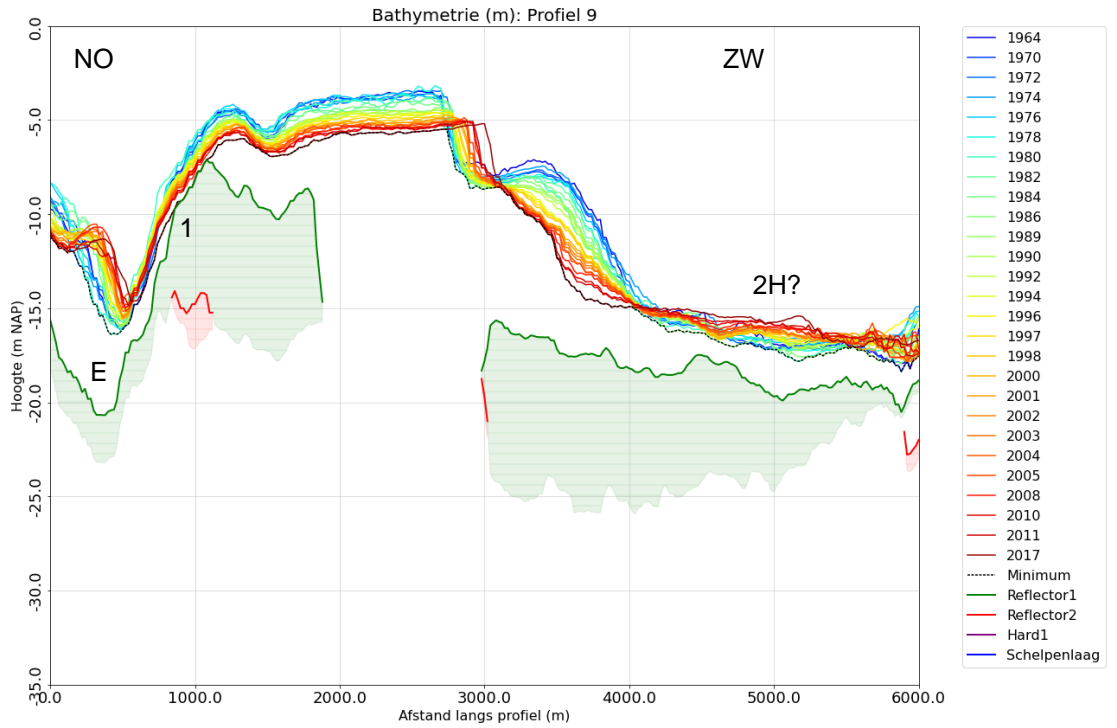
Figuur **Fout! Gebruik het tabblad Start om Heading 6 toe te passen op de tekst die u hier wilt weergeven.**-1. Overzicht profiellocaties. Alle profielen behalve 7 volgen de vaarlijnen van de seismische meetcampagne.

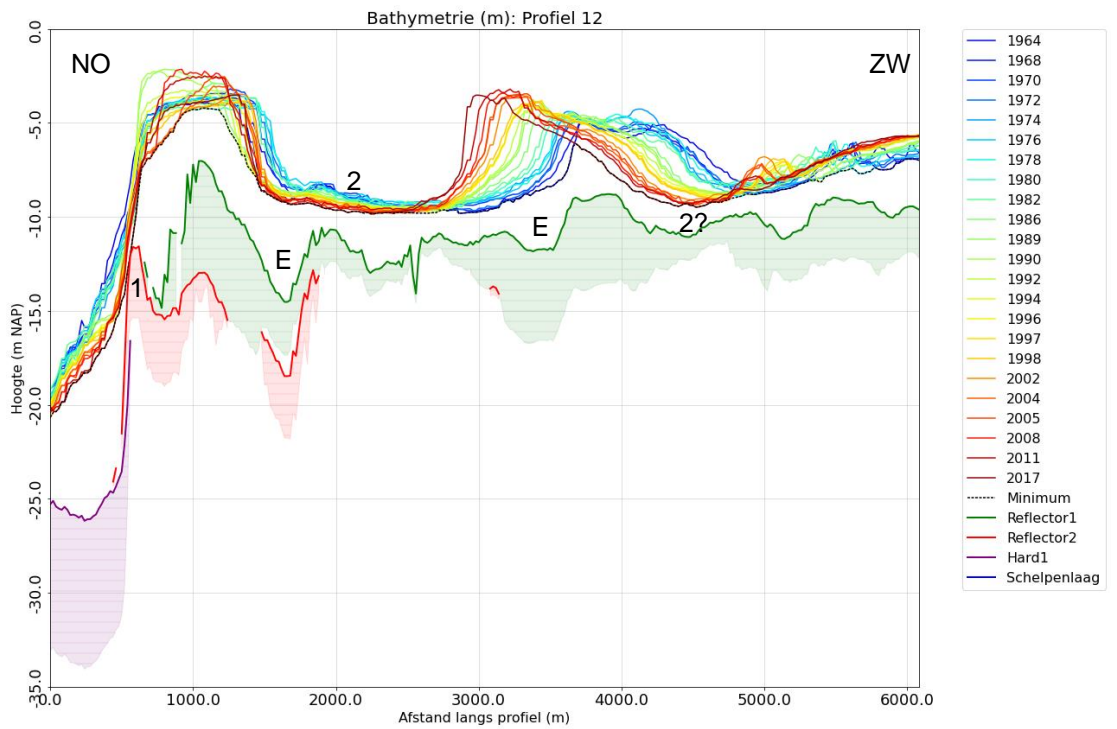
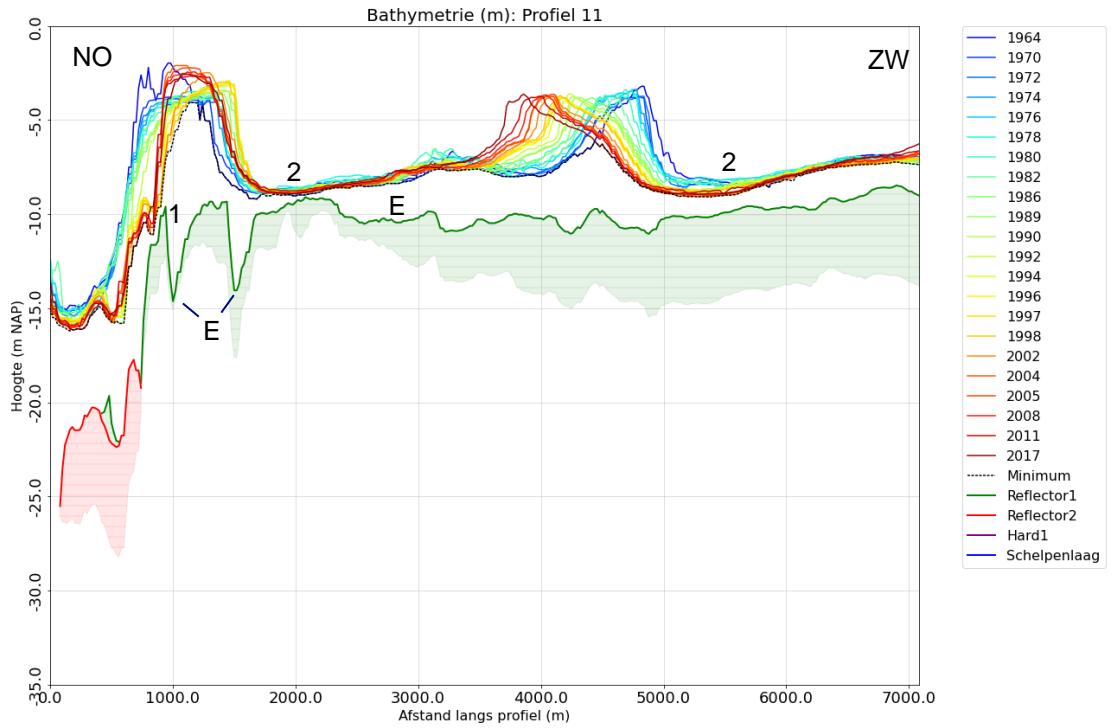


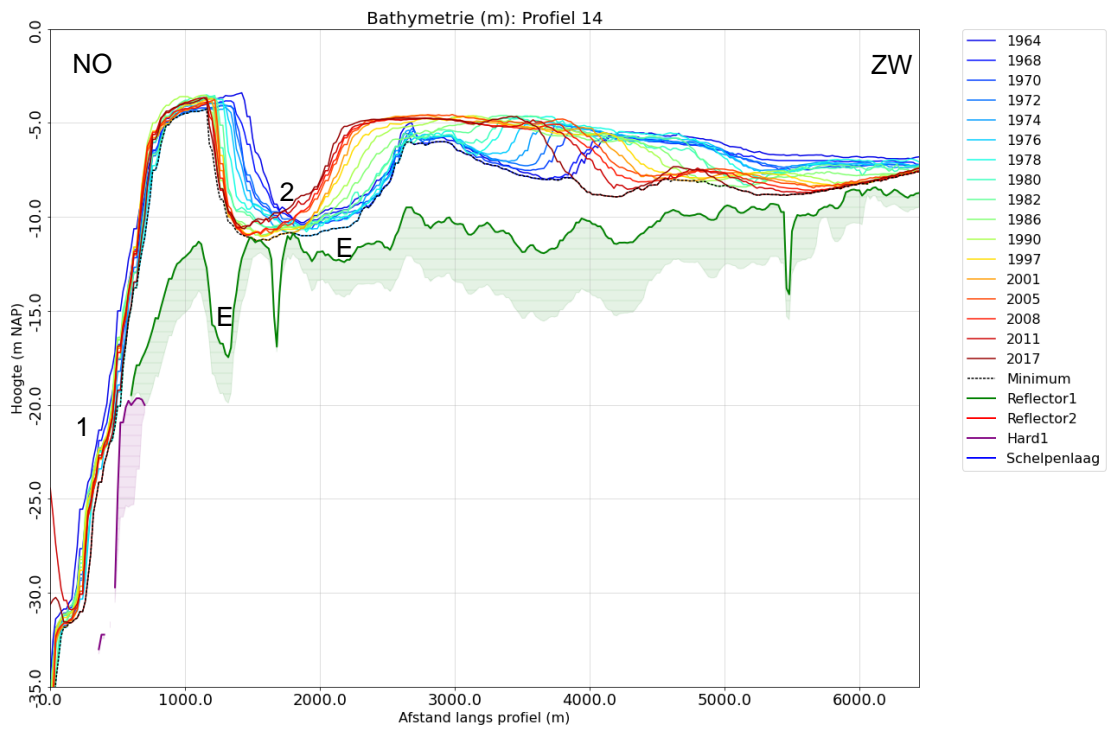
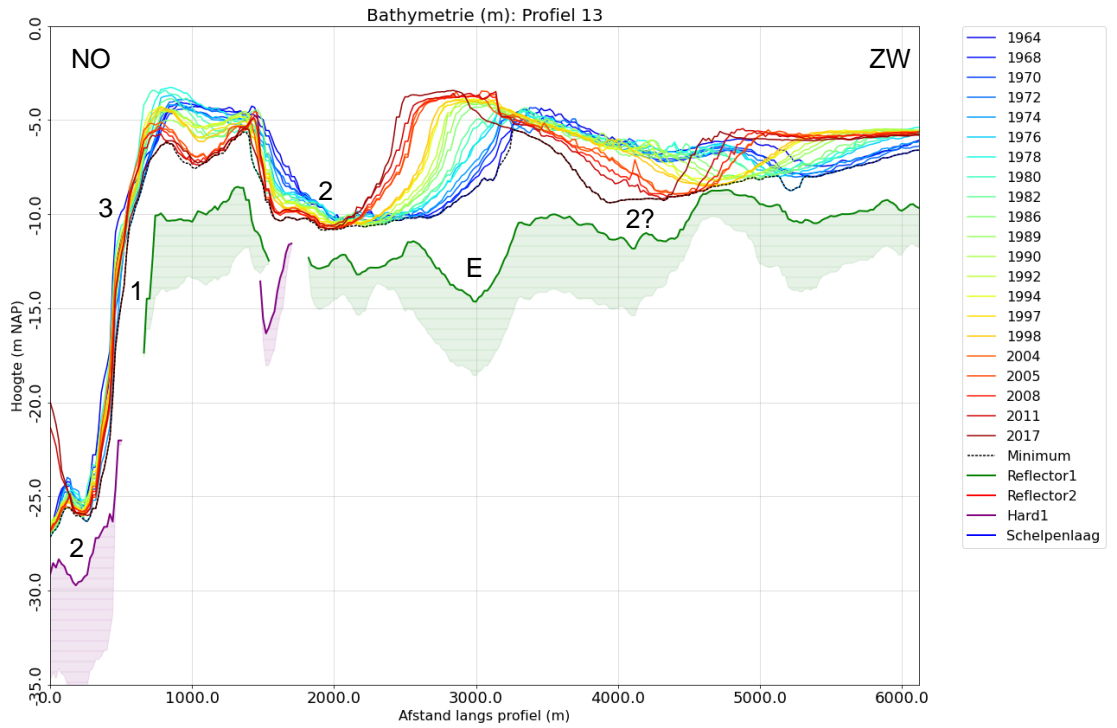






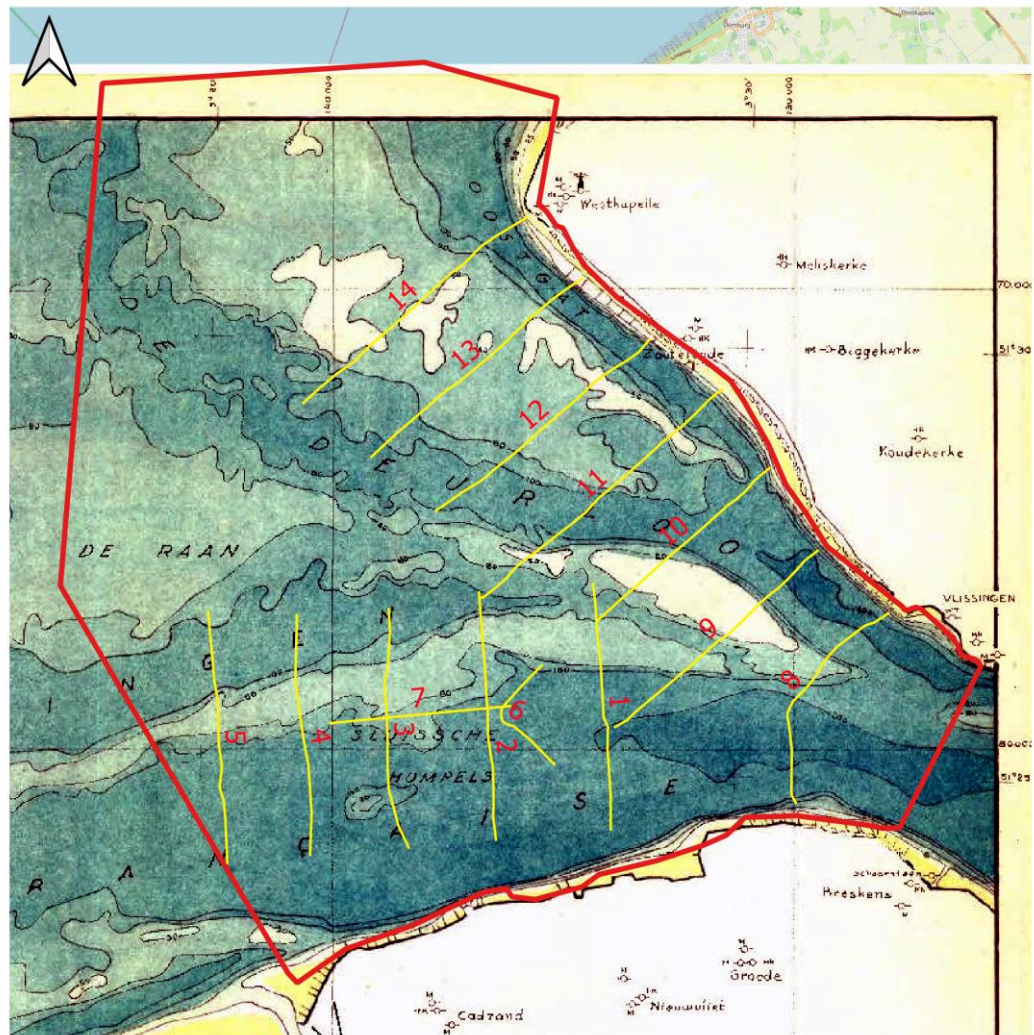




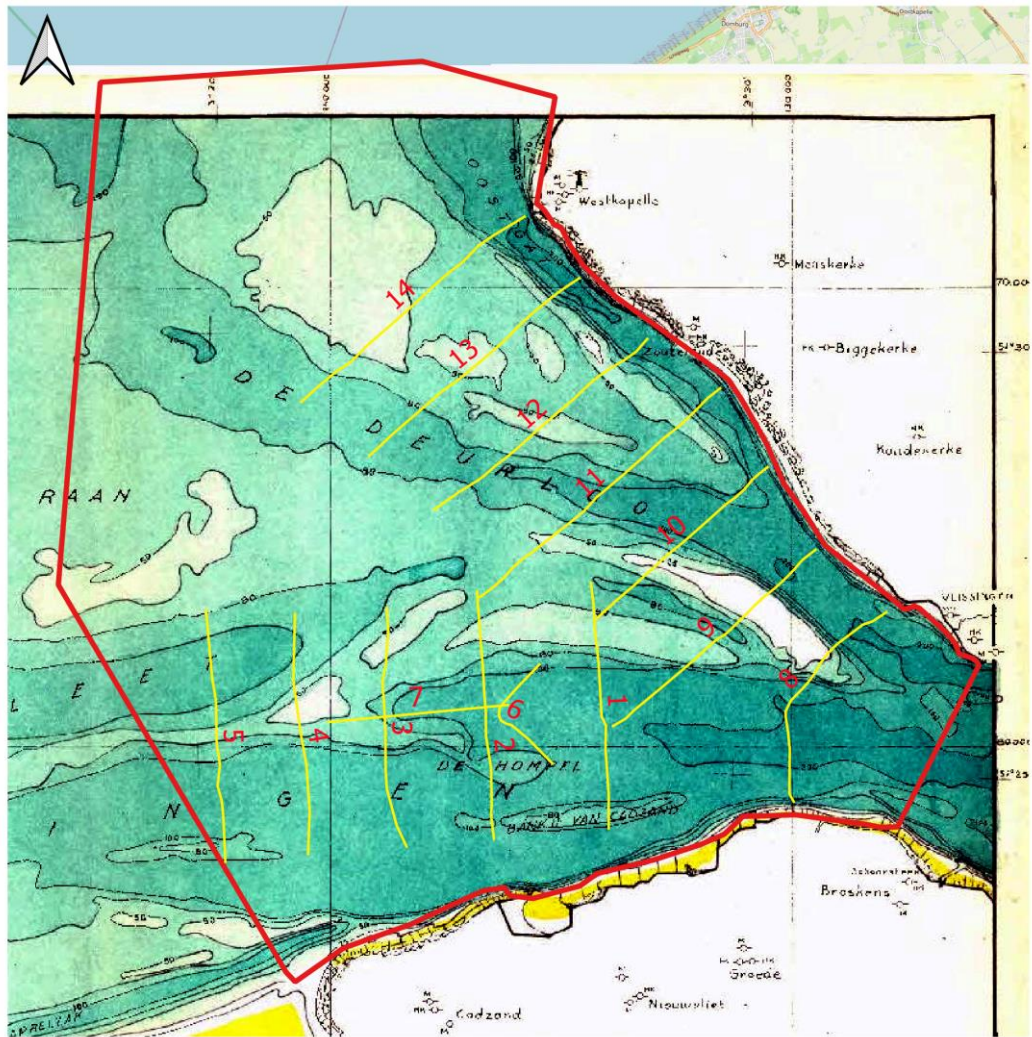


B.3 Geogerefererde kaarten van ontwikkeling 19^e en begin 20^e eeuw

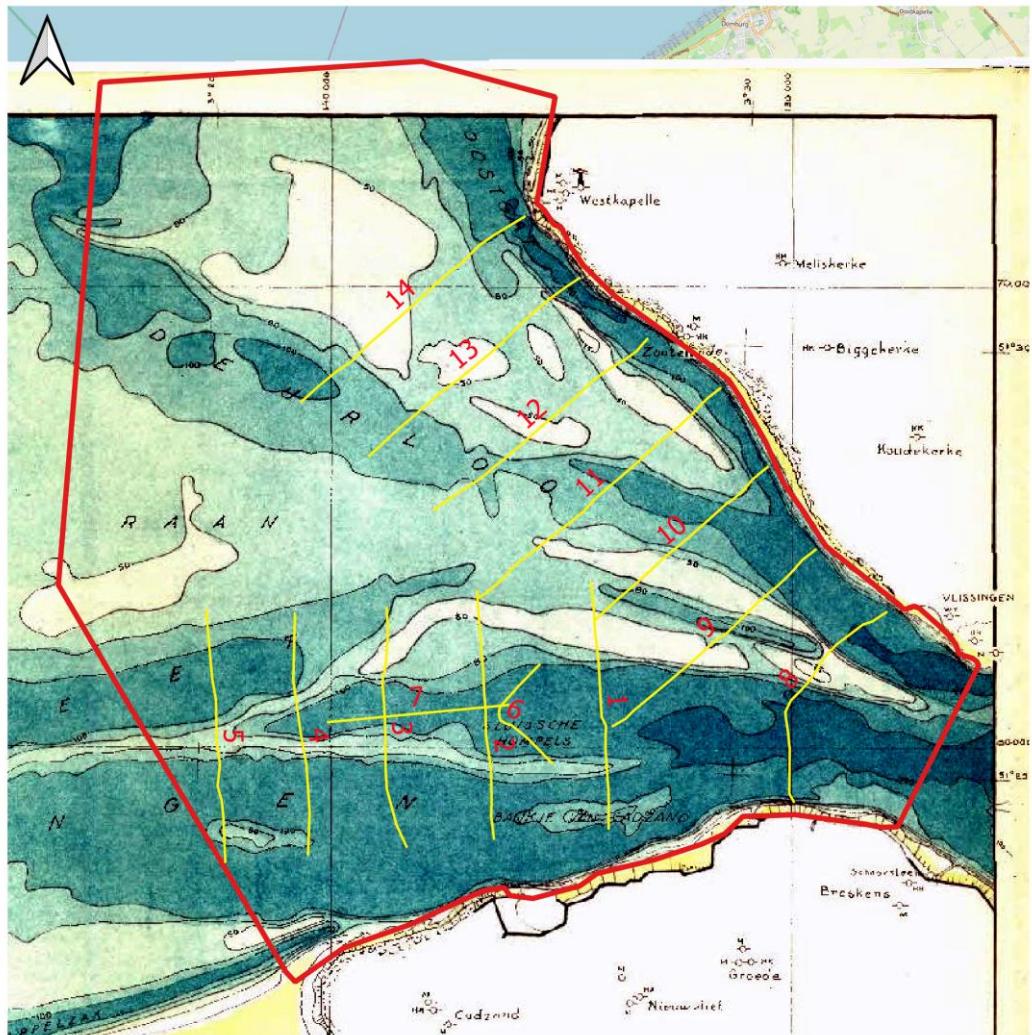
Digitaal geogerefererde kaarten zoals beschrijven in van Cauwenberghe (1966).



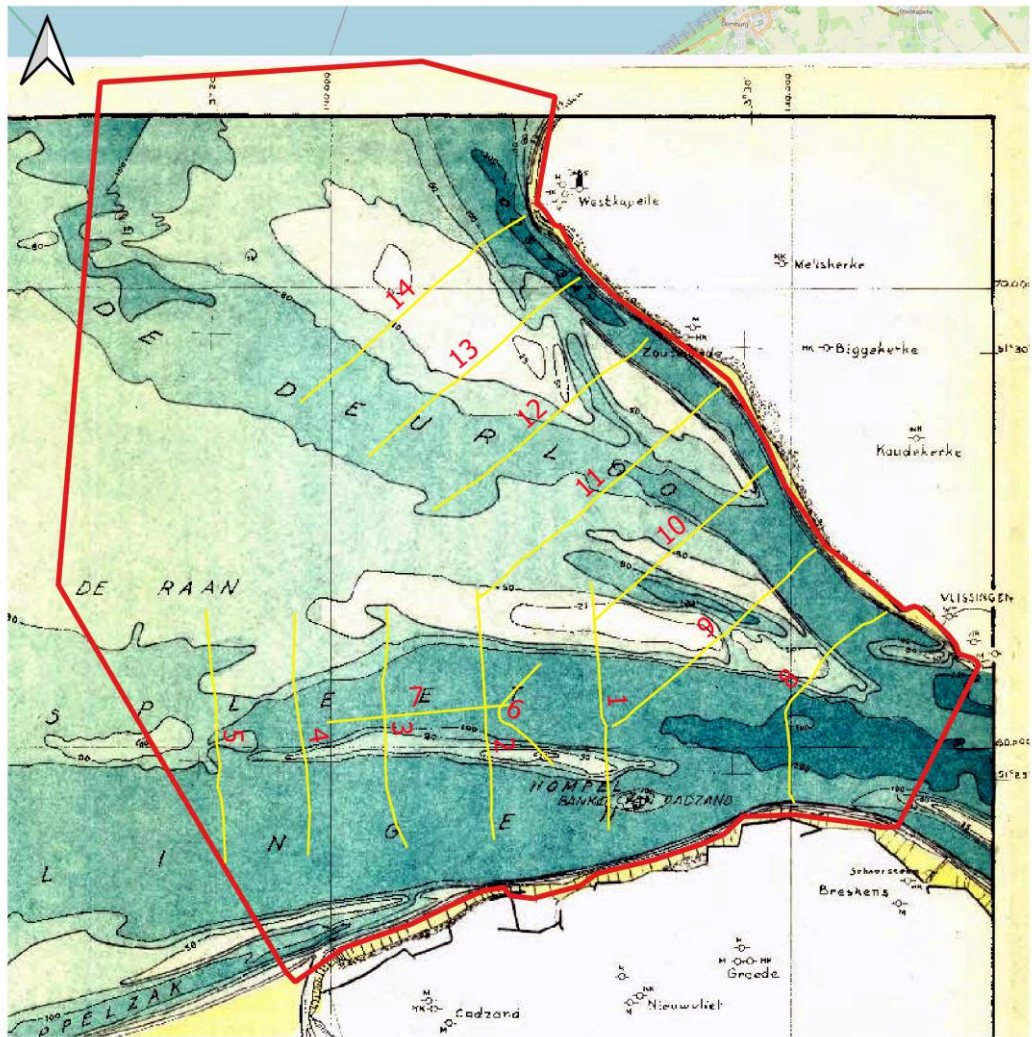
1804



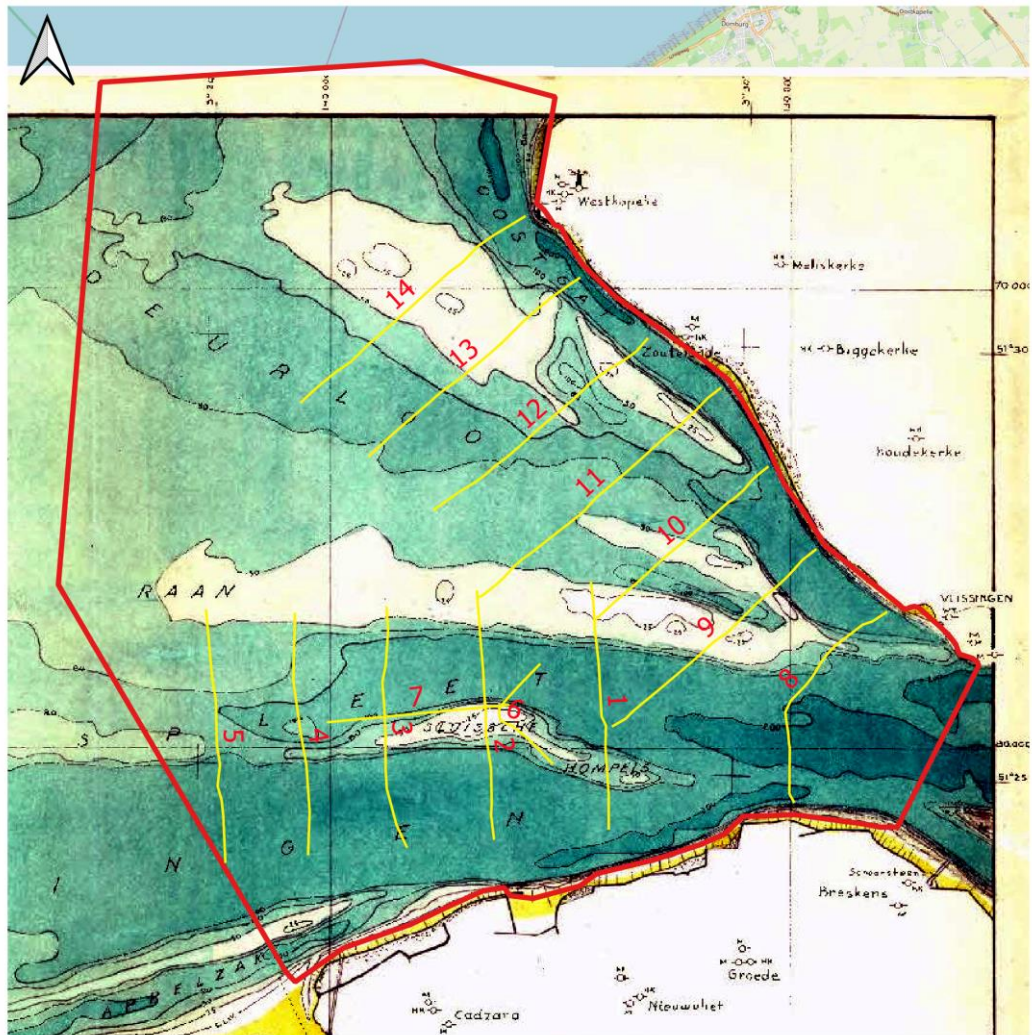
1825



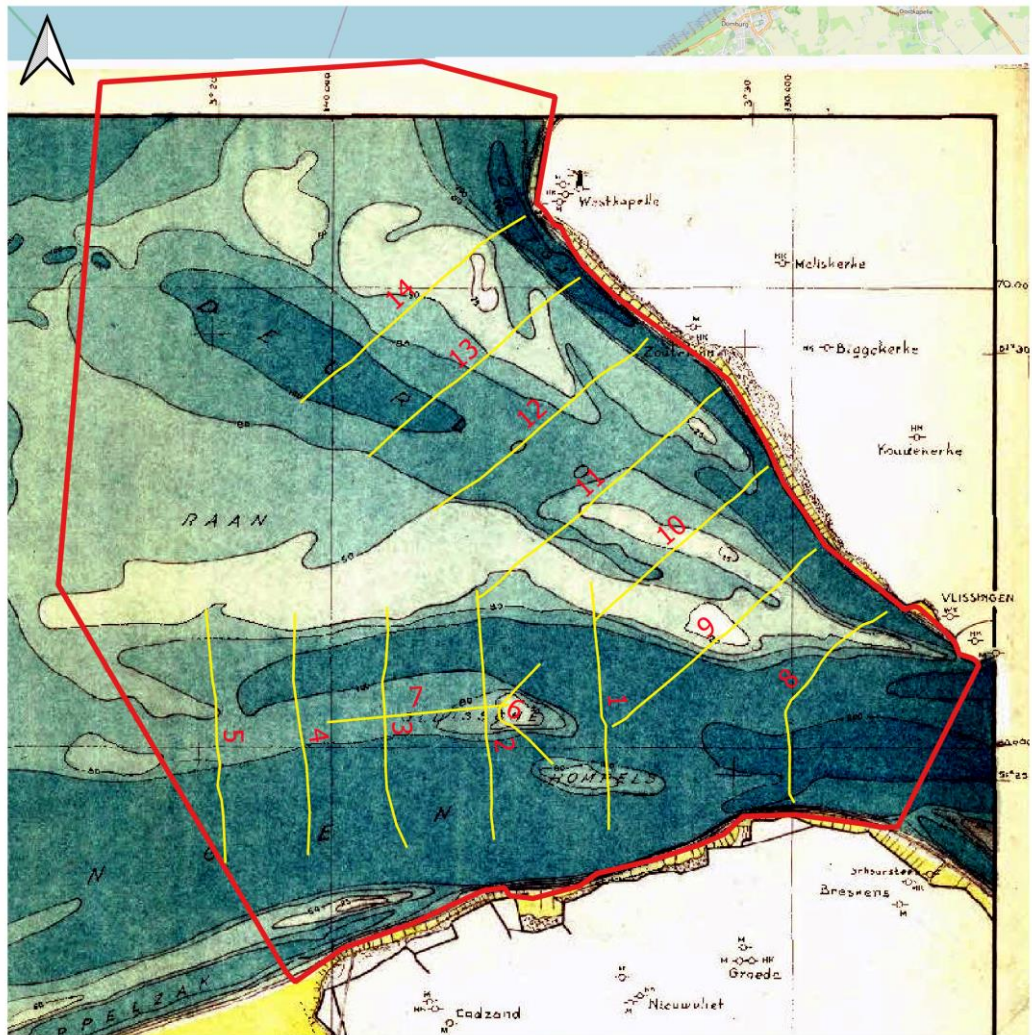
1842



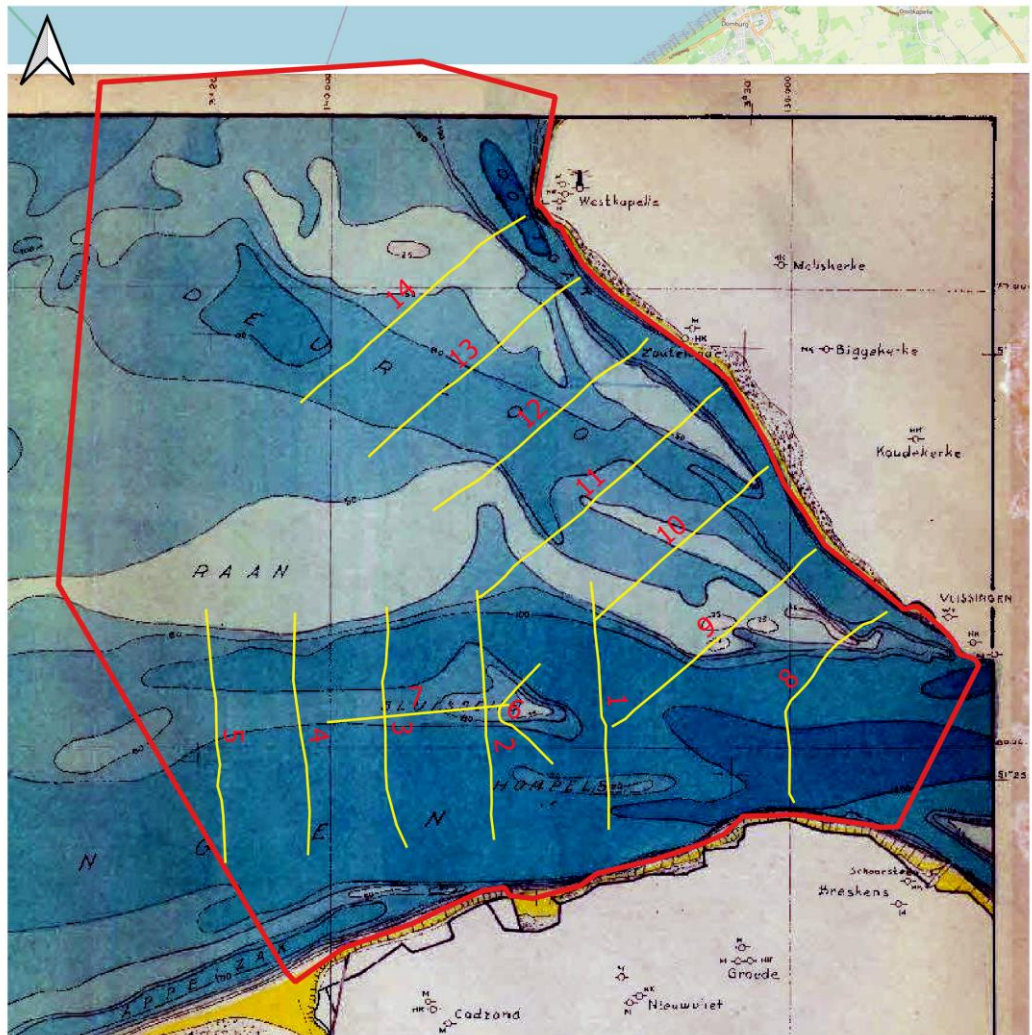
1865



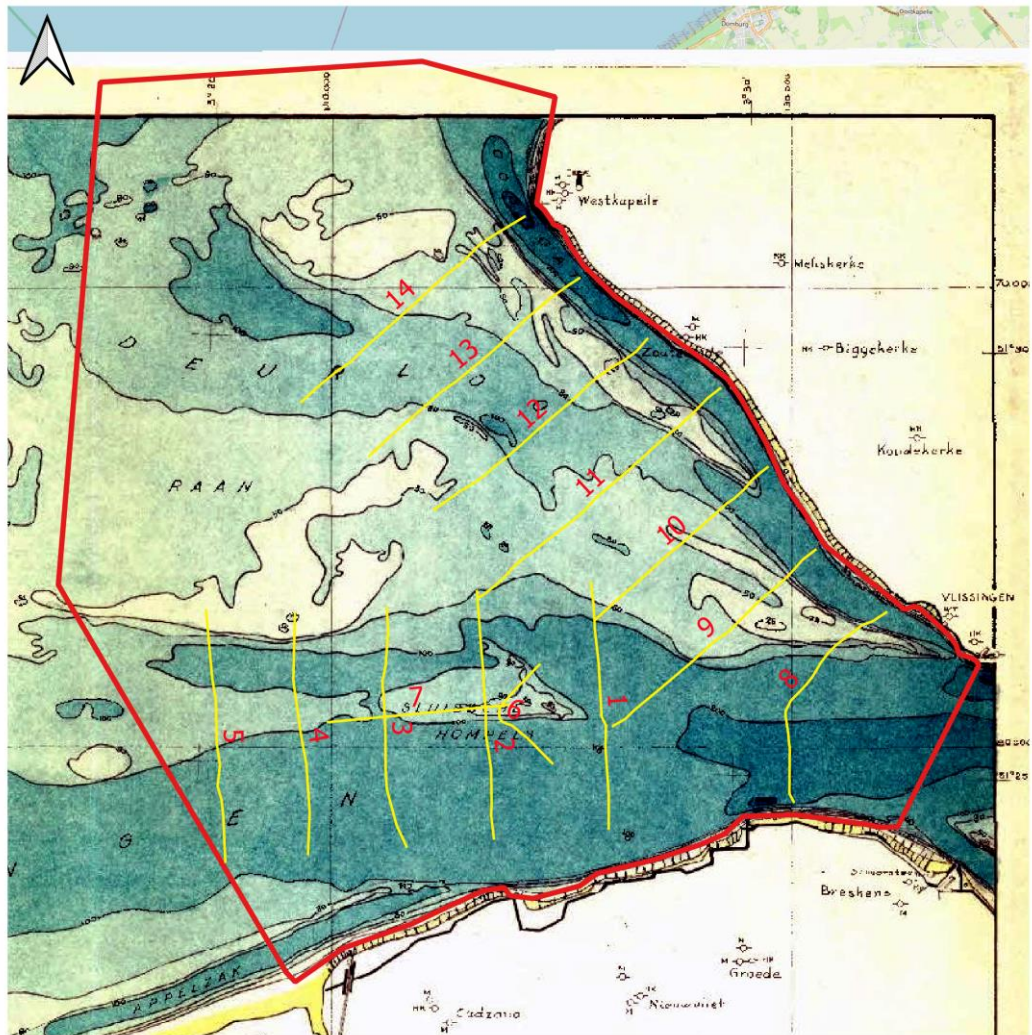
1875-1876



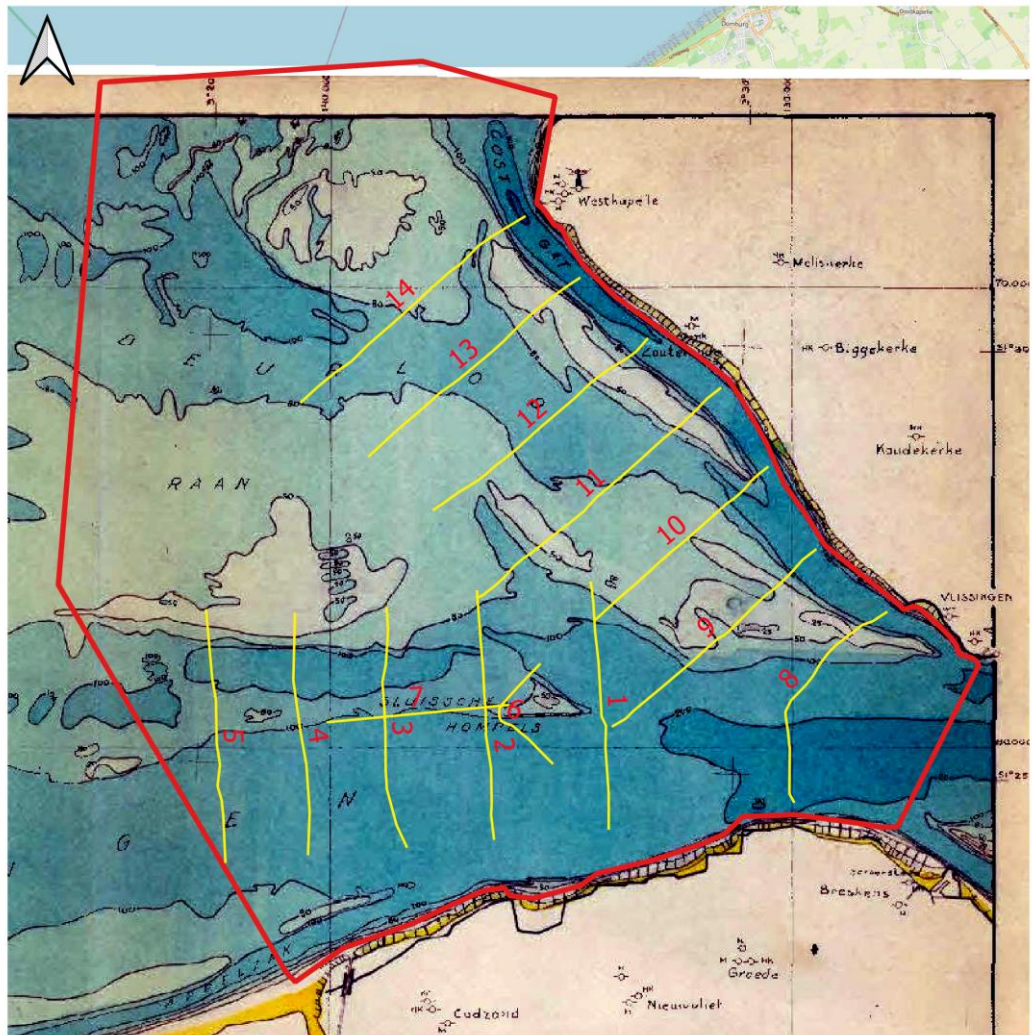
1894-1895



1907-1908



1921-1922



1931-1932

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