

Moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde

Onzekerheden en gevolgen voor morfodynamiek



Moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde

Onzekerheden en gevolgen voor morfodynamiek

Auteur(s)

Helena van der Vegt

Dick Mastbergen

Jebbe van der Werf

Moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde

Onzekerheden en gevolgen voor morfodynamiek

Opdrachtgever	Vlaams-Nederlandse Scheldec commissie
Contactpersoon	Frederik Roose
Referenties	
Trefwoorden	Westerschelde, harde lagen, erodeerbaarheid, geologie, verdedigingswerken

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	01-09-2020
Projectnummer	1210301-015
Document ID	1210301-015-ZKS-0014
Pagina's	57
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Helena van der Vegt	
	Dick Mastbergen	
	Jebbe van der Werf	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	Helena van der Vegt	Ad van der Spek	Toon Segeren	
	Dick Mastbergen			
	Jebbe van der Werf			

Samenvatting

In het kader van het vaargeulonderhoud in de Westerschelde verkent de Vlaamse Overheid de mogelijkheden voor het storten van baggerspecie in diepe delen. Hierbij is het van belang dat de bodem van de Westerschelde niet alleen uit erodeerbaar zand bestaat, maar ook moeilijk-erodeerbare sedimentlagen en verdedigingswerken bevat, met name bij diepe putten en in de buitenbochten. De harde c.q. moeilijk-erodeerbare lagen hebben invloed op de morfologische ontwikkeling. Ook in morfologische modelstudies zijn de zandaanbod gebaseerd op een inschatting van de ligging van geologische lagen. Sinds de laatste schematisering van de harde lagen zijn er nieuwe geologische data en modellen en bathymetrie data beschikbaar gekomen, die een update van het digitale harde-lagenmodel noodzakelijk maken. In deze studie inventariseren en combineren we beschikbare databronnen betreffende moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde tot een aantal bruikbare digitale kaarten. Daarnaast beschrijven we de ook de relatie tussen morfologische ontwikkeling en de aanwezigheid van moeilijk-erodeerbare lagen, en identificeren we potentiële risicogebieden waar beschermende lagen verdwijnen.

Moeilijk-erodeerbare lagen van verschillende geologische formaties hebben verschillende eigenschappen die nog niet in de kartering waren opgenomen, b.v. resistentie tot erosie. In dit rapport actualiseren we de moeilijk-erodeerbare lagenkaart van de Westerschelde. In dit rapport zijn zowel de eigenschappen (geologische eenheid, dikte, diepte onder bodemoppervlakte) als de plaats van de bovenste moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde geactualiseerd. Hierbij zijn de harde verdedigingen (oeverwerken en geulwandverdedigingen) toegevoegd aan de dataset op basis van de aanleggegevens en een toekenning van de diepteligging op basis van jaar van aanleg en bathymetriemetingen. De classificatie laat een gebruiker toe om een inschatting te maken of een specifieke laag daadwerkelijk moeilijk-erodeerbaar is over de tijdschaal die geanalyseerd wordt.

Ten slotte identificeert dit rapport de onzekerheden verbonden aan de aannames in de kartering van moeilijk-erodeerbare lagen alsook de kennisleemtes. De aanbevelingen om deze onzekerheden in te perken en kennisleemtes te vullen. Hierdoor zouden in te toekomst morfologische ontwikkelingen, oeverstabiliteit, en sediment concentraties beter worden begrijpen en voorspellen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	7
1.1	Achtergrond en aanleiding voor het onderzoek	7
1.2	Doel- en vraagstelling	7
1.3	Aanpak	8
1.4	Leeswijzer	8
2	Erosiebestendige lagen in de Westerschelde	9
2.1	Overzicht geologie van de Westerschelde	9
2.1.1	Paleogeen (23.03 tot 66 miljoen geleden)	10
2.1.2	Neogeen (2.6 tot 23.03 miljoen jaar geleden)	11
2.1.3	Kwartair: Pleistoceen (11.500 tot 2.6 miljoen jaar geleden)	11
2.1.4	Kwartair: Holoceen (11.500 jaar geleden tot heden)	12
2.2	Harde Verdedigingswerken	13
2.2.1	Overzicht ontwikkelingen Westerschelde	13
2.2.2	Oeverwerken	14
2.2.3	Geulwandverdediging	17
3	Data en Methodiek	18
3.1	Tijdlijn van kartering moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde	18
3.1.1	TNO rapport 2004 (Gruijters et al. 2004)	18
3.1.2	RIKZ rapport 2004 (van der Male 2004)	19
3.1.3	Svasek rapport 2013 (Dam 2013)	19
3.2	Actualiseren database moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde	20
3.2.1	Geologische data	20
3.2.2	Bathymetrische data	20
3.2.3	Geulwandverdedigingen en oeverwerken	22
3.3	Selectie dwarsprofielen voor detailanalyse	22
4	Geactualiseerde dataset moeilijk- erodeerbare lagen in de Westerschelde	25
4.1	Kartering van diepteligging bovenste moeilijk-erodeerbare laag	25
4.2	Eigenschappen van de eerste moeilijk-erodeerbare laag	27
4.3	Dikte zandlaag boven eerste moeilijk-erodeerbare laag	28
4.4	Morfodynamiek in de Westerschelde op een tijdschaal van 10 jaar	29
4.5	Overzicht van onzekerheden in dataset	30
5	Interactie tussen morfologische ontwikkelingen en moeilijk-erodeerbare lagen voor geselecteerde gebieden	32
5.1	Rondom de Put van Hansweert en de Plaat van Ossenis (profielen 12, 13, 14 en 15)	32
5.2	Verschillen tussen moeilijk-erodeerbare lagen en gerelateerde risico's	35

6	Conclusies	38
7	Aanbevelingen	39
8	Referenties	40
A	Detailbeschrijvingen en discussie moeilijk-erodeerbare lagen voor specifieke gebieden	42
A.1	Ritthem, Rede van Vlissingen tot aan Borssele, Lange Zuidweg, Honte (profielen 1, 3)	42
A.2	Nummer Eén, Vaarwater langs Hoofdplaat (profiel 2)	44
A.3	Everingen en Schaar van Baarland (profielen 4 en 5)	45
A.4	Put van Terneuzen (profiel 6)	47
A.5	Gat van Ossenisse (profielen 7, 8, 9)	47
A.6	Middelgat (profiel 10 en 11)	50
A.7	Zuidergat van Haven van Walsoorden tot Baalhoek (profielen 16, 17, 18 en 19)	51
A.8	Schaar van Waarde (profielen 20 en 21)	54
A.9	Nauw van Bath en Land van Saeftinghe oost, Pas van Rilland (profiel 22, 23)	55

1 Introductie

1.1 Achtergrond en aanleiding voor het onderzoek

In het kader van het aanvragen van een nieuwe vergunning voor het vaargeulonderhoud in de Westerschelde verkent de Vlaamse Overheid (Departement Mobiliteit en Openbare Werken, afdeling Maritieme Toegang) de mogelijkheden voor het storten van baggerspecie in diepe delen zoals de Inloop van Ossenisse en de Put van Hansweert. Er wordt b.v. onderzocht hoe lang het sediment blijft liggen, waar het naar toe gaat en hoe dergelijke storten de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde beïnvloeden (zie e.g. Huisman et al. 2018). Dit gebeurt op basis van data-analyses, morfologische modelberekeningen en inschattingen door deskundigen.

Hierbij is het van belang mee te nemen dat de bodem van de Westerschelde niet enkel uit erodeerbaar zand bestaat. Op een flink aantal locaties liggen moeilijk-erodeerbare klei- en veenlagen aan de oppervlakte, met name bij diepe putten en in de buitenbochten (Gruijters et al. 2004; Dam 2013). Daarnaast zijn er in het verleden harde vooroever- en geulwandverdedigingen (bestorpingen) aangelegd voor de bescherming van de dijken en de slikken en schorren en om de vaarweg vast te leggen.

De harde c.q. moeilijk-erodeerbare lagen hebben invloed op de morfologische ontwikkeling. Dit is onderkend in morfologische modelstudies (Dam et al. 2016; Vroom et al. 2015; van der Wegen et al. 2012). Deze numerieke modellen rekenen met een ruimtelijk niet-uniform zandpakket met een minimale dikte van 0 m waar de klei- en veenlagen aan het oppervlakte liggen. Dit zandaanbod is gebaseerd op een inschatting van de ligging van geologische lagen (Gruijters et al. 2004), gecorrigeerd op basis van de gemeten morfologische ontwikkeling. Op plaatsen waar de gemeten bodem lager lag dan de geologische laag, is deze aangepast tot een laagste gemeten bodemniveau (Dam 2013). Deze aanpassing is nodig omdat door de tijd heen oudere lagen zijn verdwenen door erosie, en op verschillende locaties in de Westerschelde moeilijk-erodeerbaar materiaal van onderliggende lagen is blootgelegd. Moeilijk-erodeerbare lagen van verschillende geologische formaties hebben verschillende eigenschappen bv. resistentie tot erosie. Het is dus belangrijk om ook aan te geven tot welke geologische formatie een moeilijk-erodeerbare laag behoort, zodat een gebruiker een inschatting kan maken of de desbetreffende lagen ook daadwerkelijk moeilijk erodeerbaar zijn over de tijdschaal welke geanalyseerd wordt.

Sinds de laatste schematisering van harde lagen zijn er nieuwe geologische data en modellen, en bodempeilingen beschikbaar gekomen, die een update van het harde-lagenmodel rechtvaardigen. Ook zijn gegevens over de geologische formatie niet in de vorige karteringen meegenomen. Daarnaast houden bestaande modellen geen rekening met de harde vooroever- en geulwandverdedigingen en overschatten daardoor mogelijk de morfologische ontwikkeling, zoals b.v. de erosie van buitenbochten en de ontwikkeling van de slikken en schorren.

1.2 Doel- en vraagstelling

De twee hoofddoelen van dit rapport zijn:

- 1) Inventariseren en combineren van beschikbare databronnen betreffende moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde.

- Producteren van geactualiseerde kaarten van moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde incl. geologische data, vooroever- en geulwand verdedigingen en morfologische metingen.
 - Berekening van laagdikte van beschikbare moeilijk-erodeerbare lagen en classificatie van verschillende geologische lagen.
 - Duidelijk maken welke onzekerheden gerelateerd zijn aan deze data-bronnen.
- 2) Bepaling van de relatie tussen morfologische ontwikkeling en de aanwezigheid van moeilijk-erodeerbare lagen en het identificeren van potentiële risicogebieden waar beschermende lagen verdwijnen.

1.3 Aanpak

- 1) Creëren van een geactualiseerde dataset van moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde door middel van de volgende stappen:
- Het originele moeilijk-erodeerbare lagenmodel (Gruijters et al. 2004) is aangepast voor consistentie binnen het nieuwste geologische lagenmodel van GeoTOP v1.3 (Strafleu et al. 2016).
 - Insnijding van de lagen zijn aangepast aan de hand van een compilatiekaart van het maximale diepte gebaseerd op (1) vaklodingen 1951 – 2015, en (2) oudere bathymetrie-metingen afgeleid uit (Dam 2013).
 - Ligging van vooroever- en geulwandverdediging (bestortingen) digitaal ingebracht m.b.v. shapefiles van Scheldestromen en Rijkswaterstaat. Diepteligging bepaald gebaseerd op (1) jaar van aanleg en (2) dwarsprofielen vaklodingen en zijn toegevoegd aan de dataset.
 - De resulterende dataset bevat:
 - diepteligging van bovenste moeilijk-erodeerbare laag,
 - dikte van de moeilijk-erodeerbare laag,
 - dikte zandlaag op bovenste moeilijk-erodeerbare laag, gebaseerd op 2015 bathymetrie,
 - bepalen geologische formatie waartoe de bovenste moeilijk-erodeerbare laag behoort,
 - diepteligging bestortingen.
- 2) Detailanalyses zijn uitgevoerd voor geselecteerde gebieden in de Westerschelde ter bepaling van het effect van moeilijk-erodeerbare lagen op morfologische ontwikkeling aan de hand van:
- de geactualiseerde dataset moeilijk-erodeerbare lagen, en
 - dwarsprofielen met zowel de moeilijk-erodeerbare lagen, ligging bestortingen en representatieve vaklodingendata.

Alle gegeven dieptewaarden zijn in m t.o.v. NAP.

1.4 Leeswijzer

Achtergronden van de studie worden besproken in Hoofdstuk 2, gevolgd door een inventarisatie van voorafgaande studies en beschrijving van de methodologie van de huidige studie in Hoofdstuk 3. In Hoofdstuk 4 worden kaarten gepresenteerd van de geactualiseerde datasets en de onzekerheden gerelateerd aan de nieuwe dataset bediscussieerd. Hoofdstuk 5 omvat detailbeschrijvingen van de interactie tussen geïdentificeerde moeilijk-erodeerbare lagen en morfodynamiek van geselecteerde gebieden in de Westerschelde en een overzicht van potentiële risico's gerelateerd aan de moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde. In het laatste hoofdstuk (Hoofdstuk 6) worden de conclusies en aanbevelingen gepresenteerd.

2 Erosiebestendige lagen in de Westerschelde

In dit hoofdstuk worden verschillende moeilijk-erodeerbare lagen geïntroduceerd. Ten eerste introduceren we de verschillende geologische moeilijk-erodeerbare lagen en daarna verschillende harde verdedigingswerken die door de tijd heen zijn aangelegd om morfologisch-gevoelige gebieden te beschermen. Hierbij worden afkortingen gebruikt die terug te vinden zijn in Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Gebruikte afkortingen moeilijk-erodeerbare lagen.

Geologie	
NAWA	Formatie van Naaldwijk, Laagpakket van Walcheren
NIHO	Formatie van Nieuwkoop, Hollandveen Laagpakket
NAWO	Formatie van Naaldwijk, Laagpakket van Wormer
BXKR	Formatie van Boxtel en Formatie van Kreftenheye
MSPZWA	Formaties van Maassluis, Peize en Waalre
OO	Formatie van Oosterhout
BR	Formatie van Breda
RUTODO	Formaties van Rupel, Tongeren en Dongen
HL	Harde laag
TOP	Top van een laag
BOT	Onderkant van een laag
Verdedigingswerken	
OW	Oeverwerken
GW	Geulwandverdediging

2.1 Overzicht geologie van de Westerschelde

De Westerschelde bevindt zich op de overgang van het omhoogkomende Massief van Brabant in het zuiden naar het dalende Noordzeebekken in het noorden met een geringe (<1%), noordoost-hellende scheefstelling van de sedimentpakketten. Op de geologische tijdschaal hebben relatieve zeespiegelfluctuaties geresulteerd in een afwisseling van transgressieve (verdrinkende) en regressieve (verlandende) opeenvolgingen van afzettingen en ook een aantal onderbrekingen (hiaten) waarin geen sediment is afgezet of reeds afgezet sediment is geërodeerd. Door de scheefstelling van de lagen zijn niet overal dezelfde geologische formaties aan het bodemoppervlak van de Westerschelde zichtbaar door erosie. Oudere formaties (bv. Rupel) liggen in het zuidwesten van de Westerschelde aan het oppervlak, terwijl jongere formaties (bv. Oosterhout) in de noordoosten voorkomen. Niet alleen de locatie, maar ook de diepte van putten en geulen in het estuarium bepalen welke formaties aan het oppervlak liggen op een locatie.

In het gebied rond de Westerschelde wordt de ondergrond tot op een diepte van meer dan 100 m beneden NAP gekenmerkt door afzettingen uit de Paleogeen (Eoceen, Oligoceen), Neogeen (Mioceen, Pliocene) en Kwartair (Pleistoceen, Holoceen) (Tabel 2.2). Afzettingen uit het Pleistoceen en ouder hebben een geleidelijke textuurverandering ondergaan waardoor ze moeilijker erodeerbaar zijn dan pas afgezet zand en klei (van der Spek 1997). Oudere kleilagen zijn als gevolg van ontwatering en belasting door bovenliggende lagen sterk

geconsolideerd, waardoor deze zeer stug zijn geworden (hoge dichtheid en hoge cohesieve sterkte). Zandkorrels zijn onder druk van de bovenliggende lagen beter gepakt geraakt. Tevens kunnen zandlagen verkit (of gecementeerd) zijn door neerslag van bijvoorbeeld kalk uit het grondwater. Deze processen die na afzetting plaatsvinden worden *diagenese* genoemd.

Het is tot nog toe niet kwantitatief bepaald in welke mate de klei en zand lagen inderdaad moeilijk erodeerbaar zijn. Met name het verschil in erodeerbaarheid tussen oude kleilagen (b.v. Boomse Klei in de Rupel Formatie) en oude zandlagen (b.v. zandige eenheden van de Oosterhout of Tongeren Formaties) zijn niet goed bekend. Dit geldt ook voor de Holocene zandrijke afzettingen van de NAWO en NAWA laagpakketten van de Naaldwijk Formatie. Wel zijn in het verleden experimenten gedaan om de mate van erodeerbaarheid van jonge, gelaagde klei-zand intervallen te bepalen (Terwind et al. 1968). Welke lagen als moeilijk erodeerbaar beschouwd moeten worden is verder ook afhankelijk van de tijdschaal waarop morfologische veranderingen bestudeerd worden. Lagen die over 1 jaar tijd nauwelijks eroderen, kunnen b.v. op een tijdschaal van 20 jaar wel erosie vertonen. Deze onzekerheden zijn met de beschikbare data nog niet voldoende te verkleinen.

Tabel 2.2 Geologische formaties in de moeilijk-erodeerbare lagen dataset (Gruijters et al. 2004). Tijdvakken en perioden die beschreven worden in dit hoofdstuk zijn voorzien van de paragraafnummer.

Tijd Gelede (Ma)	Periode	Tijdvak		Marien	Fluviatiel		Overig	
					Rijn	Oostelijke rivieren		
Heden tot 0.0117	Kwartair	2.2.4. Holoceen		Formatie van Naaldwijk	Kreftenheye		Formatie van Nieuwkoop	Formatie van Boxtel
0.0117 tot 2.6		2.2.3. Pleistoceen	Laat					
			Middel					
		Vroeg	Formatie van Maasluis	Formatie van Waalre	Formatie van Peize			
2,6 tot 23.03	2.2.2. Neogeen	Plioceen		Fm v. Oosterhout	Afzettingen jonger dan Paleogeen bevatten moeilijk-erodeerbare lagen binnen de formaties			
		Mioceen		Fm. v. Breda				
23.03 tot 66	2.2.1 Paleogeen	Oligoceen		Rupel Fm.	Alle afzettingen Paleogeen of ouder beschouwd als geheel moeilijk-erodeerbaar			
		Eoceen		Fm. v. Tongeren				
				Fm. v. Dongen				

Dit hoofdstuk geeft een korte beschrijving van de verschillende formaties welke bijdragen aan de harde lagen dataset van de Westerschelde, gebaseerd op (Gruijters et al. 2004)

2.1.1 Paleogeen (23.03 tot 66 miljoen geleden)

Tijdens het Eoceen en het Vroeg- en Midden-Oligoceen (ca. 50 tot 30 miljoen jaar geleden) zijn verschillende kleiige en fijn-zandige sedimentpakketten van mariene oorsprong gevormd.

Als gevolg van diagenese worden alle Paleogeen afzettingen beschouwd als moeilijk erodeerbaar en zijn de afzettingen van de drie formaties samengenomen onder de term RUTODO (RUpel-TOngeren-DOngen).

Formatie van Dongen

De oudste afzetting wordt gevormd door Eocene mariene kleien (Formatie van Dongen, Laagpakket van Asse). Deze Formatie komt in het gehele onderzoeksgebied voor, doch ligt veelal te diep om aangesneden te worden.

Formatie van Tongeren

Aan de top van de Formatie van Tongeren liggen Laat-Eocene en Vroeg-Oligocene glauconiethoudende zanden, gevormd in een ondiep tot kustnabij marien milieu. De Formatie van Tongeren komt in het gehele onderzoeksgebied voor, maar door erosie kunnen delen van de formatie ontbreken.

Formatie van Rupel

De Paleogene sedimentserie wordt afgesloten met de Formatie van Rupel. Binnen deze formatie bevindt zich de Laagpakket van Boom. Deze stugge klei is van Midden-Oligocene ouderdom. Plaatselijk is de top van de Formatie van Rupel door zowel Miocene als Holocene erosie aangetast.

2.1.2 Neogeen (2.6 tot 23.03 miljoen jaar geleden)

Formatie van Breda (BR)

Na een langdurige periode waarvan geen afzettingen bewaard zijn gebleven, vond vanaf het Midden-Mioceen (circa 15 miljoen jaar geleden) hernieuwde mariene afzetting plaats in het gebied, die de Formatie van Breda vormt. In deze formatie komen op wisselende dieptes moeilijk erodeerbare klei- en leemlagen voor met een maximale dikte van 20m. Plaatselijk wordt de formatie aangesneden door de huidige Westerschelde.

Formatie van Oosterhout (OO)

Op de Breda Formatie bevinden zich Pliocene, schelprijke, zandige mariene afzettingen van de Formatie van Oosterhout. Lithologie: groengrijs, glauconiethoudend, uiterst fijn tot matig grof zand met schelpen, plaatselijk met (zandige) kleilagen tot enkele meters dik. Aan de bovenzijde afgesloten door een moeilijk-erodeerbare kalkhoudende kleilaag (circa 3m dik). In het onderzoeksgebied komen ook enkele meters dikke, verkitte schelpenbanken in de afzettingen voor (zgn. "crag deposits").

2.1.3 Kwartair: Pleistoceen (11.500 tot 2.6 miljoen jaar geleden)

Na een periode van fluviatiele tot ondiepe mariene afzettingen in het vroeg-Pleistoceen trok de zee zich voorlopig uit het onderzoeksgebied terug en bevond het Westerscheldegebied zich grotendeels buiten de invloed van mariene processen. In de sedimentaire record van deze periode zit een gat aangezien er geen of nauwelijks afzettingen zijn bewaard en zelfs onderliggende afzettingen zijn gerodeerd. Hierna bereikte de kustlijn weer het onderzoeksgebied en werden de Formaties van Maassluis, Waalre, Peize, Eem, Boxtel en Kreftenheye afgezet.

Formatie van Maassluis/Formatie van Waalre/ Formatie van Peize (MSWAPZ)

Vanaf het einde van het Pliocen tot in het Vroeg-Kwartair vond afzetting plaats van fluviatiele (Formatie van Peize), estuariene (Formatie van Waalre) en mariene (Maassluis Formatie) pakketten zand en klei. Erosie en afvlakking van het aanwezige reliëf trad op grote schaal op waardoor van deze formaties nog slechts erosierestanten aanwezig zijn. Aanwezigheid van moeilijk-erodeerbare kleilagen in deze formaties blijft beperkt tot de omgeving van Hansweert. De maximale dikte van de klei bedraagt enkele meters.

Eemformatie

Pas aan het einde van het Kwartair bereikte de zeespiegel tijdens warme perioden (interglacialen) weer een zodanig hoog niveau dat er mariene sedimenten werden afgezet in het onderzoeksgebied. Schelphoudende, zandige afzettingen uit de voorlaatste warme periode (Eem Interglaciaal, ca. 130 000 tot 115 000 jaar geleden) worden gerekend tot de Eemformatie. De Eemformatie komt voornamelijk voor langs de oevers van de huidige Westerschelde en onder een groot deel van het Continentaal Plat. In het centrale deel van de Westerschelde is de Eemformatie volledig geërodeerd en is daarom niet opgenomen in de moeilijk-erodeerbare lagen dataset.

Formatie van Boxtel/Formatie van Kreftenheye (BXKR)

Uit de laatste ijstijd (Weichselien, ca. 115 000 tot 11 500 jaar geleden) zijn zowel zandige rivierafzettingen van de voorlopers van de Schelde (gerekend tot de Formatie van Kreftenheye in GeoTOP v 1.3, maar ook beschrijf als onderdeel van de Formatie van Koewach on DINOLoket), als zandige windafzettingen en lokale leem- en veenafzettingen (Formatie van Boxtel) bekend. De moeilijk-erodeerbare klei-, leem- en veenlagen van de Boxtel Formatie komen vooral voor in het oostelijk Westerscheldegebied en hebben een gemiddelde dikte van ca. 1 m.

2.1.4 Kwartair: Holoceen (11.500 jaar geleden tot heden)

De Holocene geologische ontwikkeling wordt in hoge mate bepaald door relatieve zeespiegelstijging, veroorzaakt door het terugtrekken en afsmelten van de grote landijskappen vanaf het eind van de laatste ijstijd en door daaraan gerelateerde bewegingen van de ondergrond met als gevolg bodemdaling in Nederland. Ter plaatse van de huidige Westerschelde ontstonden hierdoor getijdegebieden met geulen en platen. Pas in de Vroege Middeleeuwen ontstond de Westerschelde toen de Schelderivier contact maakte met deze getijgeulen. Vanaf de 12de eeuw werd de Westerschelde steeds belangrijker.

Formatie van Nieuwkoop, Basisveen Laagpakket (NIBA)

Aan het begin van het Holoceen, door de stijgende zeespiegel en een daaraan gerelateerde stijging van de grondwaterspiegel, werd landinwaarts de Basisveen Laag van de Formatie van Nieuwkoop gevormd. Alle veenafzettingen die behoren tot de Formatie van Nieuwkoop worden beschouwd als moeilijk erodeerbaar.

Formatie van Naaldwijk, Laagpakket van Wormer (NAWO)

Door de stijgende zeespiegel worden vanaf ca. 9000 jaar geleden zandige kustnabije mariene afzettingen en estuariene en lagunaire zand- en kleiafzettingen gevormd. Het sediment van het Laagpakket van Wormer is afgezet in getijdebekkens achter een open kust (geul- en plaatafzettingen). Het Laagpakket van Wormer omvat discontinue, moeilijk-erodeerbare, fijnkorrelige afzettingen.

Formatie van Nieuwkoop, Hollandveen Laagpakket (NIHO)

Vanaf ca. 5000 jaar geleden raakte de strandwallenrij langs de kust aaneengesloten. Hierdoor kon zich achter de strandwallen een dik veenpakket ontwikkelen. Alle kleiige

veenafzettingen die behoren tot de Formatie van Nieuwkoop worden beschouwd als moeilijk-erodeerbaar.

Formatie van Naaldwijk, Laagpakket van Walcheren (NAWA)

Vanaf ca. 2500 jaar geleden ontstonden de eerste inbraken in de strandwallen nabij Walcheren wat leidde tot een versnelde ontwatering van het achterliggende veengebied samen met erosie door de getijdengeulen. De Formatie van Naaldwijk, Laagpakket van Walcheren bestaat uit de estuariene- en wad afzettingen die ontstonden na de inbraken in de strandwallen. De top van het Laagpakket van Walcheren (klei met zandlaagjes) is moeilijk erodeerbaar.

2.2 Harde Verdedigingswerken

2.2.1 Overzicht ontwikkelingen Westerschelde

Langs de oevers van de Westerschelde is zoals in de gehele Hollandse en Zeeuwse delta al eeuwenlang sprake van een sterke wederzijdse invloed van mens en zee. Waar mogelijk hebben de bewoners de kans gegrepen om schorregebieden te bedijken en als leefgebied in te nemen (vanaf 13^e eeuw) maar ook al te vaak heeft de zee het land weer teruggenomen door erosie en overstromingen (bijv. het Land van Saeftinghe in 1584).

Belangrijke waterstaatkundige werken werden pas mogelijk vanaf de 18^e eeuw en hadden aanvankelijk vooral militaire betekenis, zoals Fort Bath en Fort Ellewoutsdijk met zware oeververdedigingswerken meestal bedoeld om de doorgang naar Antwerpen te beheersen. Zo zijn ook door Napoleon stellingen en forten aangelegd (bijv. het Keizershoofd bij Vlissingen) om de doorgang te beschermen tegen de Engelsen.

Door de toegenomen invloed van het getij in de Westerschelde zijn de geulen steeds dieper geworden en hebben de buitenbochten de neiging voortdurend uit te schuren. Dit heeft geleid tot veel landverlies door erosie van de vooroever en dijk- en oevervallen. Alleen waar natuurlijke harde lagen aanwezig zijn in de geulwand of waar voldoende bescherming geboden kon worden in de vorm van diep aangelegde oeverwerken kon de erosie tot staan gebracht worden. Ook op andere locaties zijn door natuurlijke geulverlegging of -verdieping of stormvloedend polders verloren gegaan.

Door verdediging van de steile buitenbochten vindt er weliswaar geen landverlies meer plaats maar wel verdere verdieping van de geulen. De binnenbocht kan dan ook niet meer opschuiven (meanderen) waardoor deze door sedimentatie ook versteilt, met plaatvallen tot gevolg (Spijkerplaat, Plaat van Ossensisse en Walsoorden).

Sinds de voltooiing van de Deltawerken in 1987 zijn de zeeweringen langs de Westerschelde op hoogte gebracht en voldoende versterkt. Monitoring en onderhoud blijft wel voortdurend noodzakelijk. Tegenwoordig valt het beheer van de primaire waterkering langs de Westerschelde onder het Waterschap Scheldestromen. In tegenstelling tot de Oosterschelde is het getij in de Westerschelde niet afgenomen en is er nog sprake van een zeer dynamisch morfologisch systeem met zandplaten, hoofd- en nevengeulen.

Daarnaast is het op diepte houden van de vaarweg naar Antwerpen en het behoud van natuurwaarden in de Westerschelde belangrijk. Dit is sinds 2005 geregeld in een verdrag dat wordt beheerd door de Vlaams-Nederlandse Scheldec commissie waarin Rijkswaterstaat Zee en Delta en het Vlaamse Departement Mobiliteit en Openbare Werken participeren. De voortdurende baggerwerkzaamheden op de ondiepere drempels hebben een belangrijke invloed op de ontwikkelingen maar er is overeengekomen om al het gebaggerde materiaal binnen het systeem terug te storten (bijv. in de diepere delen).

Om de natuurlijke waarden in de Westerschelde te behouden, met name de vogelrijke slikken- en schorregebieden, heeft Rijkswaterstaat (RWS) bij de 2^e verdieping van de Westerschelde (1995-2000) op een aantal locaties ter aanvulling van de bestaande oeverwerken een geulwandverdediging aangelegd. Ook vindt op sommige plaatsen gecontroleerde ontpoldering plaats (Perkpolder, Hedwigepolder) en worden plaatranden onderhouden door gericht storten van onderhoudsbaggerspecie.

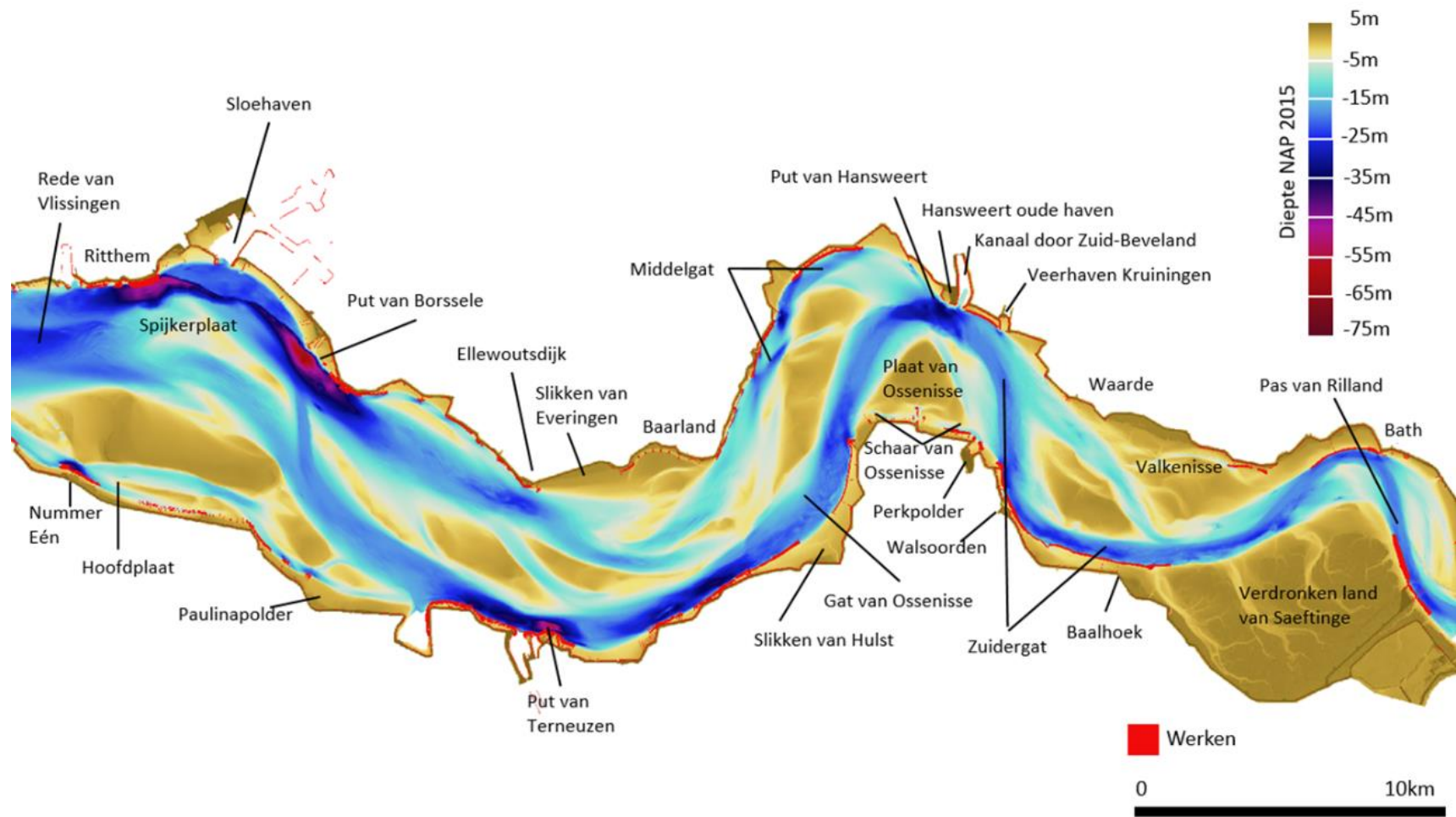
Samenvattend kan gesteld worden dat de Westerschelde tegenwoordig een actief tijdebekken is waarin de geulen en zandplaten zich min of meer vrij kunnen bewegen maar alleen binnen de vastgelegde randen die bestaan uit:

1. Oeverwerken (OW) in beheer bij het Waterschap Scheldestromen in de invloedzone van de zeedijken (primaire waterkering) (OW) en hun vooroevers;
2. Geulwandverdediging (GW) aangelegd bij de 2e verdieping (1997-1998) door RWS ter bescherming van de slikken- en schorregebieden;
3. Historische vooroeververdediging en dijken op plaatsen waar polders verloren zijn gegaan;
4. Natuurlijke geulwanden en bodems bestaande uit slecht-erodeerbare klei-, veen of schelpen lagen (geologie harde lagen, zie paragraaf **Error! Reference source not found.**). Deze eroderen wel maar veel langzamer dan meer recent afgezette zandlagen.

2.2.2 Oeverwerken

Onder oeverwerken (OW) wordt verstaan de vooroever- of geulwandverdedigingswerken in beheer bij het Waterschap Scheldestromen die in de invloedzone liggen van de zeedijken (primaire waterkering) en daarom noodzakelijk zijn voor het behoud van de veiligheid. Deze oeverwerken moeten dus voldoen aan WBI 2017 normen voor stabiliteit / standzekerheid van de vooroever. Ze worden daarom beoordeeld op de faalmechanismen (1) zettingsvloeiing en / of (2) afschuiving (oever- of dijkval).

Behalve oeverwerken bestaan de zeedijken ook uit gras- of asfaltbekleding en steenzettingen, die golfaanval moeten doorstaan, maar deze hebben vooral betrekking op de dijk zelf en liggen veelal op of boven de GHW lijn. Deze zijn daarom minder van belang voor de hydrodynamica en de morfologie. De buitenteen (onderrand aan het rivierzijde) van de waterkering op NAP of GHW kan gezien worden als de buitengrens van het waterbekken van de Westerschelde (*Figuur 2.1*).



Figuur 2.1 Naamgeving Westerschelde zoals toegepast in deze rapport inclusief 2015 bathymetrie en oeverwerken en geulwandverdedigingen aangegeven in rood

De oeverwerken daarentegen liggen dieper, vaak vanaf -0,5 tot -2 m NAP en daarmee verder weg van de dijk. Ze liggen dus in het waterbekken en beïnvloeden daarmee de hydrodynamica en de morfologie van het estuarium. Hoewel in kaarten het oppervlak van de oeverwerken gering lijkt betreft het veelal steile oevers met hellingen tot 1:3, dus de uitstreking in de diepte is vaak wel aanzienlijk (meestal tot -15 m NAP en vaak nog dieper).

Het gebied tussen de insteek van het oeverwerk en de teen van de dijk (de vooroever) is vaak niet beschermd. Gezien de geringe diepte zijn de stroomsnelheden hier klein waardoor er vaak slib kan bezinken. Hierdoor kunnen de slikkengebieden die bij laagwater droogvallen verder ophogen (Slikken van Hulst, Baalhoek, Bath etc.).

De vooroever moet voldoende breed zijn om te voorkomen dat bij een oeverinstabiliteit de standzekerheid van de dijk in gevaar komt. Dit wordt beoordeeld op basis van de criteria van WBI 2017. Dus als de vooroever van nature voldoende ver van de dijk ligt, is deze niet direct noodzakelijk voor de veiligheid en hoeft deze dus niet beoordeeld en versterkt of onderhouden te worden. Door erosie kan deze afstand wel steeds kleiner worden zodat op termijn toch een veiligheidsrisico ontstaat en maatregelen nodig zijn.

Op sommige trajecten zijn er geen doorgaande oeverwerken, maar wel strekdammen aangelegd waarvan de koppen met oeverwerken zijn versterkt (Breskens, Ossensisse) met hetzelfde doel, erosie door de geul te voorkomen. Hierdoor blijft er wel risico bestaan voor oevervallen in de tussengelegen gebieden (Hoofdplaatpolder).

De meeste oeverwerken zijn al meer dan 100 jaar oud maar worden nog voortdurend gemonitord en waar nodig onderhouden. Boven water zijn meestal alleen de steenzettingen en bastions zichtbaar. Onder water bestaan de oeverwerken meestal uit een doorgaande verdediging van zinkstukken met steen bestort (zie Figuur 2.2) onder een helling van 1 op 3 tot 4. De zandige binnenbochten waar voortdurend aanzanding van de plaatranden plaatsvindt, liggen meestal onder een helling van 1 op 10 tot 15.



Figuur 2.2 Aanleg oeverwerk; links positioneren zinkstuk, rechts bestorten van een zinkstuk (foto's RWS Beeldbank).

Zinkstukken werden afgezonken tot de op het moment van aanleg aanwezige diepte die daarmee werd gefixeerd. Daarna kan geen erosie meer optreden maar nog wel sedimentatie als de stromingscondities veranderen. Bij de teen kan nog wel verdere erosie optreden met risico van ondermijning en beschadiging van de verdediging en gevaar op instabiliteit van de oever. Langs sommige oevers is het gevaar geweken omdat de hoofdgeul zich heeft verlegd

en er sedimentatie optreedt (bijv. Middelgat sinds 1980), de oeverwerken liggen dan deels onder het zand. Soms zijn onder water nog restanten terug te vinden van oude oeverbescherming van verloren polders (Borssele, Margarethapolder), soms niet meer zichtbaar maar mogelijk nog wel van invloed (polders van Baarland, Schor van Waarde).

2.2.3 Geulwandverdediging

Onder geulwandverdediging (GW) verstaan we de oeverwerken die door Rijkswaterstaat zijn aangelegd om bepaalde ecologisch waardevolle slikken- en schorregebieden te beschermen en tevens om de vaargeul vast te leggen, als maatregel na de 2^e verdieping in de jaren 1995-2000, zie Tabel 2.3. Documentatie van RWS bestaat uit aanlegtekeningen, rapportage en monitoring.

Echter al voor de verdieping van de Westerschelde vond er gestage erosie plaats van schorren- en slikkengebieden, bijv. het Land van Saeftinghe bij Baalhoek waar in de periode 1951-2001 (voor de geulwandverdediging werd aangelegd) meer dan 400 m verloren ging door migratie van het Zuidergat en de Overloop van Valkenisse. De afstand tot de waterkering was echter voldoende groot (meer dan 200 m) zodat er geen veiligheidsprobleem speelde. De slikken en schorren geven op hun beurt een reductie van de golfwerking op de waterkering, maar deze werking is alleen verzekerd als de vooroever van het gebied stabiel is en dus beschermd wordt met een harde constructie, de geulwandverdediging.

De geulwandverdediging heeft dus meestal geen directe functie voor bescherming van de waterkering, deze liggen meestal voldoende ver weg. WBI 2017 criteria kunnen wel toegepast worden om de stabiliteit van de geulwand te beoordelen. Rijkswaterstaat beoordeelt de stabiliteit door regelmatige monitoring en rapportage (Sinke 2017). In WBI 2017 is echter nog geen criterium om instabiliteit na ondermijning door erosie te beoordelen (Mastbergen et al. 2018). Bij wijze van proef worden suppleties met onderhoudsbaggerspecie toegepast (GVO1 en 2, IVO) maar de levensduur van deze proefstortingen is beperkt; erosie wordt niet tegengegaan. Een alternatief is de aanleg van strekdammen (Schor van Waarde, Hoofdplaat, Breskens).

Tabel 2.3 Geulwandverdediging aangelegd en onderhouden door Rijkswaterstaat na 2^e verdieping.

Geulwand	Bestek-nummer	aanvang	Oplevering	Lengte	helling bestek-tekening	Aanlegdiepte bestek-tekening	
						van m + NAP	tot m + NAP
				m	1:		
Ossenisse 1	ZL-4453	10-8-1998	27-11-1998	600	2,5	-2	-15
Ossenisse 2	ZL-4645	17-5-1999	14-1-2000	1520	3	-2	-11
Zuidergat	ZL-4055	2-2-1998	5-11-1998	2670	2,5	-2	-18
nabij Baalhoek	ZL-3830	13-6-1994	16-12-1994	400	3	-0,5	-19
Overloop van Valkenisse	ZL-5063	15-3-2001	23-11-2001	1500	3	-2	-17
Bath	ZL-4033	26-8-1996	22-8-1997	2100	3	-2	-17
Saeftinghe	ZL-4702	17-1-2000	15-11-2000	2000	3	-2	-22

3 Data en Methodiek

3.1 Tijlijn van kartering moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde

De kartering van de moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde is een iteratief proces waaraan tot op heden al veel partijen hebben bijgedragen. De eerste studie in het kader van de invloed van erosieresistente lagen op de morfologische ontwikkelingen van de Westerschelde is uitgevoerd in 1997 (van der Spek 1997) om te bepalen in welke mate geologische lagen aan het bodemoppervlak met lage erosiegevoeligheid geulverplaatsing kunnen belemmeren. De 1997 studie richtte zich vooral op de monding en de resultaten van dit project zijn gevisualiseerd in niet-gedigitaliseerde kaarten.

Vanaf 2003 is een reeks studies uitgevoerd met als uitkomst steeds meer gedetailleerde digitale datasets van moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde. Figuur 3.1 toont de verschillende input en output data voor deze studies en daarna volgt een korte beschrijving van deze studies. De oeverwerken ter bescherming van de polderdijken waarvan de aanleg al in de 18^e en 19^e eeuw is begonnen en de meer recente geulwandverdedigingswerken die rond de eeuwwisseling zijn uitgevoerd ter bescherming van de natuurgebieden na de 2^e verdieping van de vaargeul naar Antwerpen, zijn in de voorgaande studies niet in de digitale modellen opgenomen.

	2004 - TNO	2004 - RIKZ	2011 - Svasek	2019 - Deltares
Input				
Geologische eenheden	✓	✓(2003 rapport)	✓(2004 rapport)	✓ (Geotop v1.3)
Lithologisch beschrijving boringen	✓ (4468 boringen)			
Vaklodingen	✓(2001)	✓ (1955, 1960, 1970, 1980, 1990, 2001)	1951 - 2011	1951 - 2015
Andere bathymetrie		✓ (1800, 1860, 1905, 1931)	✓ (2004 rapport)	✓ (afgeleid uit 2011 rapport)
Data locatie oeverwerken en geulwandverdediging				✓
Output				
Bovenligging moeilijk-erodeerbare lagen	✓	✓		✓
Dikte erosiebestengige lagen	✓	✓		✓
Bovenligging eerste moeilijk-erodeerbare laag			✓	✓
Dikte zandpakket op bovenste moeilijk-erodeerbare laag			✓	✓
Dikte bovenste moeilijk-erodeerbare laag				✓
Classificatie bovenste moeilijk-erodeerbare laag				✓

Figuur 3.1 Overzicht van de tijlijn van de kartering van erosiebestending lagen in de Westerschelde.

3.1.1 TNO rapport 2004 (Gruijters et al. 2004)

Het rapport “Karteren moeilijk erodeerbare lagen in het Schelde estuarium”, is opgesteld in opdracht van het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ). Hierin werden moeilijk-erodeerbare lagen gedefinieerd als klei, veen of verkitte schelplagen. Ook lagen welke opgebouwd zijn uit relatief dunne lagen van afwisselend klei en zand werden in het geheel als moeilijk-erodeerbaar gedefinieerd. Uit 4468 boringen zijn de bijbehorende lithologische beschrijvingen geclassificeerd als “moeilijk-erodeerbaar” en “erodeerbaar”. Per boring zijn verticaal opeenvolgende lagen, binnen een geologische formatie (of een laagpakket in het geval van

de Holocene afzettingen), samengevoegd tot één erodeerbare/moeilijk-erodeerbare laag. Moeilijk-erodeerbare lagen met een ingeschatte verbreiding meer dan 1km² zijn geïdentificeerd en per geologische formatie gekarteerd. In het rapport werd ook aangegeven dat voor de Formatie van Naaldwijk de harde lagen ruimtelijk zeer variabel zijn en daarom besloten is om alle moeilijk-erodeerbare lagen in deze formaties samen te voegen tot één moeilijk erodeerbare laag.

Datapunten tussen de beschikbare boringen zijn verkregen door een tweedegraads trendvlak door de meetpunten te trekken en de residuen hiervan uit te rekenen (verschil tussen meetpunten en trendvlak). Hierna zijn door middel van "inverse distance weighting" de residuen voor het hele grid uitgerekend en toegevoegd aan de waarden afkomstig uit het trendvlak. Op deze manier werden op een 150mx150m grid digitale kaarten van de diepteligging en dikte van de bovenste moeilijk-erodeerbare laag per geologische formatie, tot op een diepte van NAP-65 meter geproduceerd, gebaseerd op vaklodingen uit 2001. Voor elke geologische eenheid is ook een grenswaarde bepaald voor de betrouwbaarheid van de geïnterpoleerde grids, gebaseerd op kennis van het afzettingsmilieu van desbetreffende eenheid (Tabel 3.1).

Tabel 3.1 Grenswaarde voor de berekening van de betrouwbaarheid van de geïnterpoleerde grids voor moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde (Gruijters et al. 2004).

Formatiecode	Grenswaarde voor betrouwbaarheid geïnterpoleerde gids (m)
NAWA	250
NIHO	500
NAWO	250
NIBA	500
BXKR	500
MAWAPZ	500
OO	2500
BR	1000
RUTUDO	5000

3.1.2 RIKZ rapport 2004 (van der Male 2004)

In het Svasek rapport uit 2013 (Dam 2013) wordt gerefereerd naar een RIKZ rapport waarin data uit het TNO rapport 2003 (Gruijters et al. 2004) aangepast is voor de bodemliggingen uit 1800, 1860, 1905, 1931, 1955, 1960, 1970, 1980, 1990 en 2001.

3.1.3 Svasek rapport 2013 (Dam 2013)

Dit rapport bouwt voort op de RIKZ kartering (Dam 2013), dus niet op de oorspronkelijke TNO kartering door Gruijters et al. (2003) (van der Male 2004). De beschikbare bodemligging van elk jaar (vaklodingen van 1960 - 2011) zijn over het bestaande grid gelegd, waarna is vastgesteld welke bodempunten lager liggen dan de bestaande definitie van de bovenste niet-erodeerbare laag. Die punten waar de gemeten bodem lager lag dan de top van de harde laag werden aangepast tot op het nieuwe bodemniveau. De diepte van de bovenste moeilijk-erodeerbare laag werd dus niet tot op het bodemniveau van de volgende onderliggende moeilijk-erodeerbare laag aangepast in het geval een bestaande moeilijk-erodeerbare laag volledig verdwenen was door erosie (Zie Figuur 3.4).

3.2 Actualiseren database moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde

Verskillende datasets zijn geïntegreerd om een geactualiseerd beeld van de bovenste moeilijk-erodeerbare laag te creëren. In de volgende paragrafen volgt een uitleg hoe deze datasets samengevoegd zijn.

3.2.1 Geologische data

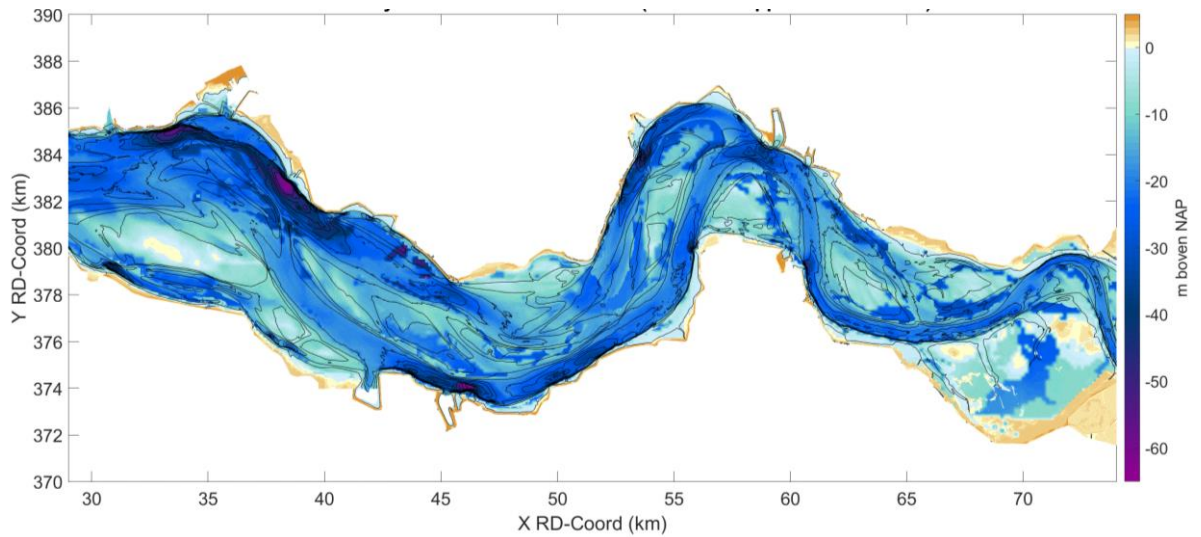
De kaart van de diepteligging van de bovenste moeilijk-erodeerbare laag is in eerste instantie afgeleid uit het geologische hardelagenmodel (Gruijters et al. 2004). Dit model is bijgewerkt met het nieuwste, meest nauwkeurige bestaande model van TNO (GeoTOP v 1.3). Met dit geologische model zijn alle hardelagenmodellen bijgesteld daar waar ze buiten de desbetreffende geologische definitie van GeoTOP v1.3 vallen. Als bijvoorbeeld de top van de moeilijk-erodeerbare laag binnen de Oosterhout Formatie iets hoger ligt dan de nieuwste definitie van de volledige Oosterhout Formatie, is de top van de moeilijk-erodeerbare laag naar beneden bijgesteld. De definities van de geologische eenheden uit GeoTOP v1.3 zijn dus enkel als “clipping surfaces” voor de bestaande hardelagenkartering gebruikt. GeoTOP v1.3 is geschematiseerd op een 100mx100m grid, terwijl het TNO 2004 harde-lagen model een grid-grootte van 150mx150m kent (Gruijters et al. 2004). Beide datasets zijn geïnterpoleerd naar het 20mx20m grid van de vergridde vaklodingen.

3.2.2 Bathymetrische data

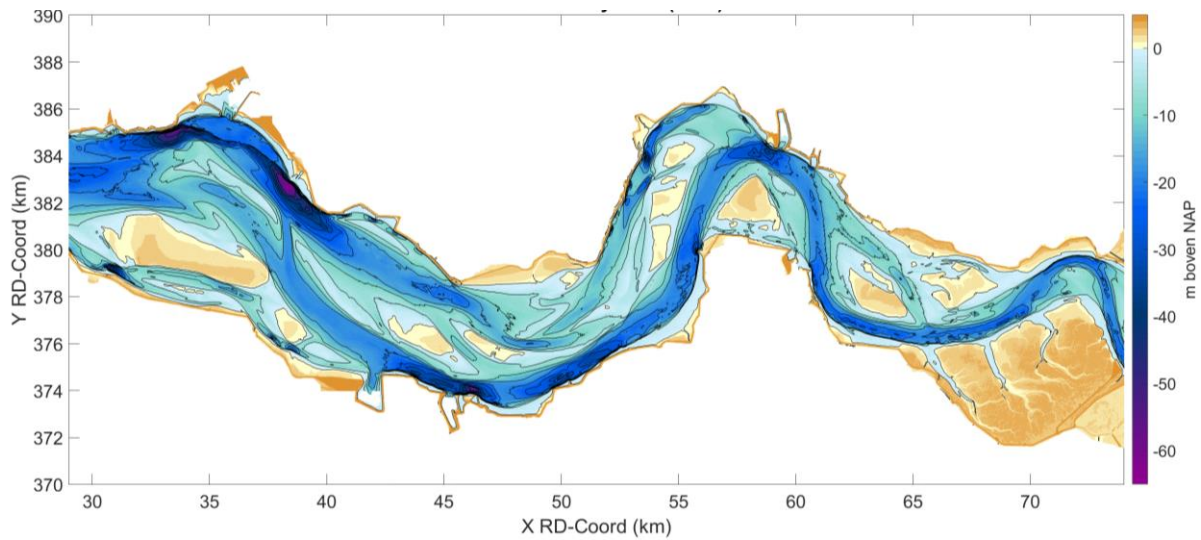
Alle beschikbare vaklodingen vanaf 1951 tot 2015 (20mx20m grid) zijn gebruikt om 2 kaarten te produceren:

- 1) Maximale-dieptekaart (Figuur 3.2): de diepste ligging in iedere gridpunt tussen 1951 en 2015 is bepaald. Hierna zijn ook bathymetrische metingen uit 1800, 1860, 1905, 1931, zoals meegenomen in het RIKZ 2004 rapport (van der Male 2004), toegevoegd waar deze dieper ligt dan de nieuwere metingen. De metingen ouder dan 1955 waren niet direct verkrijgbaar, maar zijn afgeleid uit de dataset van (Dam 2013).
- 2) Recente-bathymetrie kaart (Figuur 3.3): de bathymetrie meting in iedere gridcel tot en met 2015.

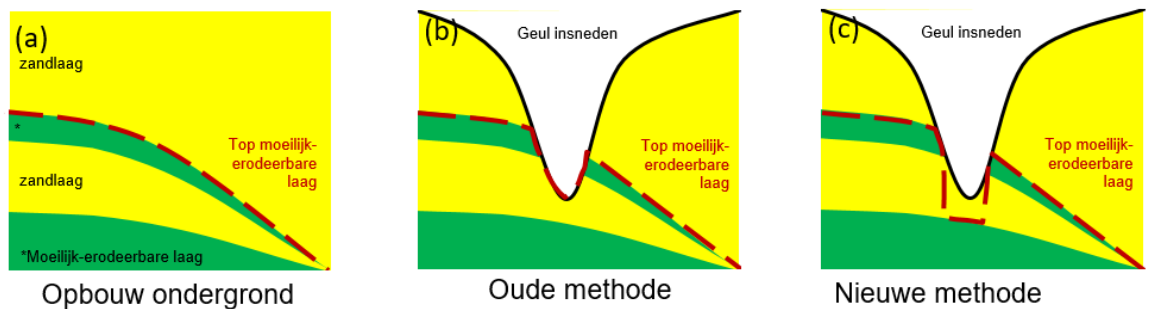
De Maximale-dieptekaart is gebruikt om insnijding in het geologische model te bepalen. Wanneer een moeilijk-erodeerbare laag ingesneden wordt door de maximale diepteligging, wordt de diepteligging van de moeilijk-erodeerbare laag naar beneden bijgesteld. Wanneer de maximale diepte meting insnijding toont dat de gehele dikte van de bovenste moeilijk-erodeerbare laag verwijderd is, wordt de top van de daaropvolgende moeilijk-erodeerbare laag geselecteerd, zie Figuur 3.4.



Figuur 3.2 Maximale diepte per gridpunt uit vaklodingen data (1951 tot 2015). Effecten van bathymetrie metingen uit 1800, 1860, 1905, 1931 zijn afgeleid en geïnterpoleerd uit de Svasek 2011 (Dam 2013) dataset.



Figuur 3.3 Recente bathymetrie meting t 2015 uit vaklodingen. Contourlijnen op elke 5m tussen 0m en -50m.



Figuur 3.4 Methodiek voor bepaling maximale insnijding moeilijk-erodeerbare lagenmodel. Methodiek toegepast in vorige datasets (oude methode) en nieuwe methodiek zoals in dit rapport toegepast (nieuwe methode).

3.2.3 Geulwandverdedigingen en oeverwerken

Om de locatie van de harde verdedigingswerken in het digitale Westerscheldemodel in te voegen zijn gegevens (shapefiles) verkregen van Rijkswaterstaat (GW) en van Waterschap Scheldestromen (OW). Deze zijn in ARCGIS ingelezen tezamen met de 2015 bathymetrie voor analyse, selecteren van profielen en aanmaken van kaartjes (zie *Figuur 2.1*). De shapefiles geven weliswaar zeer gedetailleerde informatie over de horizontale positionering (X, Y coördinaten) van de oeverwerken bestaande uit zinkstukken, strekdammen en bekledingen, maar in deze bestanden is geen diepte-informatie (Z-coördinaat) aanwezig.

Zinkstukken werden afgezonken door het bestorten vanuit drijvende bakken tot de op het moment van aanleg aanwezige diepte die daarmee werd gefixeerd. Meestal werd bij de uitvoering de diepteligging wel opgemeten maar deze gegevens zijn niet beschikbaar of zijn vaak onnauwkeurig (meer dan 1 m in diepte) (Mastbergen et al. 2018, 2019). Bovendien kunnen de zinkstukken of de daarop aangebrachte bestorting bij aanleg of daarna nog verplaatst zijn. Vooral over de oudere oeverwerken is weinig informatie beschikbaar over ontwerp, aanlegmethode en periode. Van de geulwandverdedigingswerken zijn wel ontwerptekeningen beschikbaar (ook digitaal in AUTOCAD), maar ook daarop staat geen nauwkeurig diepte-informatie, deze werd meestal in het werk vastgesteld afhankelijk van de lokale bodemgesteldheid. Dat betekent dat het ook niet goed mogelijk is om de huidige ligging te beoordelen, immers de dieptemetingen (MBES multibeam) geven zonder extra bewerking geen informatie over de samenstelling van de bodem: zand, klei of bestorting.

Om de data toch in het digitale bodemmodel van de Westerschelde in te kunnen voegen zijn een aantal representatieve dwarsprofielen beschouwd, (*Figuur 3.5* en *Tabel 3.2*). De shapefiles geven een horizontaal lijnstuk weer, waarover het oeverwerk of de geulwandverdediging zich uitstrekt. Door deze verticaal te projecteren op de bodemmeting (vaklodging) van het bijbehorende jaar van aanleg (of laatste onderhoud) wordt de meest waarschijnlijke ligging gevonden. Dit kan vervolgens gecontroleerd worden aan de hand van de morfologische ontwikkeling in de jaren daarvoor en daarna. Houdt de erosie inderdaad op? De ligging van het oeverwerk kan ook afgeleid worden uit de helling ter plaatse. Deze is meestal 1:3 tot 1:4 en veel steiler dan de natuurlijke helling in zand. Alleen in natuurlijke harde klei- of veenlagen kunnen ook vergelijkbare steile hellingen voorkomen.

Op deze manier zijn alle oever- en geulwandverdedigingswerken in de Westerschelde in kaart gebracht. De overige elementen van de waterkering geven duidelijk aan wat de grenzen zijn. Waar de hoofdgeul van de Westerschelde een lengte van 64 km heeft, is er in totaal ruim 80 km oeverlijn waar diepgelegen beschermingswerken aanwezig zijn die de grenzen van de stroming en de sedimentbeweging bepalen.

3.3 Selectie dwarsprofielen voor detailanalyse

Om de situatie van de geulwandverdediging en de oeverwerken te beoordelen zijn in totaal 23 dwarsprofielen op kritische locaties geselecteerd, veelal in de buitenbocht van de hoofdgeulen, waar hoge stroomsnelheden heersen en erosie optreedt of waar dat in het recente verleden het geval was. *Figuur 3.5* geeft een kaart met locatie van de dwarsprofielen, in volgorde van west naar oost, en *Tabel 3.2* de naam, context (belangrijkste morfologische elementen in de omgeving zoals naam geul, plaat of slik), type (oeverwerk, geulwandverdediging of natuurlijke harde lagen) en (vermoedelijke) jaar van aanleg of laatste onderhoud.

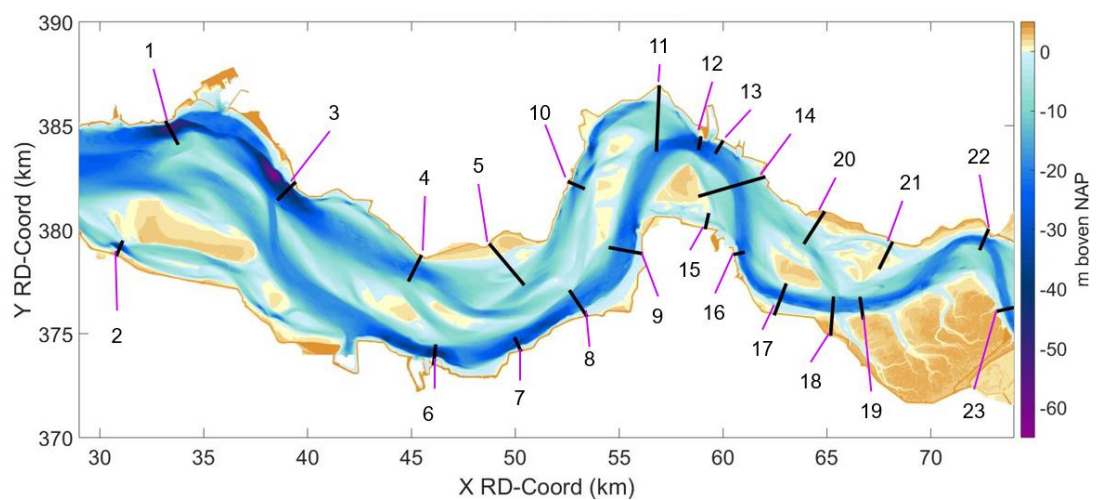
In de profielen zijn de een aantal dieptemetingen uit de periode 1951-2015 geselecteerd welke de algehele evolutie van de bathymetrie in deze periode kenmerken, om zo het morfologisch gedrag op deze termijn te analyseren. De dwarsprofielen laten ook de ligging van de oeverwerken en geologische formaties zien, zoals deze zijn vastgelegd in de

database van de huidige rapport. Per gebied wordt een beschrijving en discussie gepresenteerd van de belangrijkste morfologische interacties met de geïdentificeerde moeilijk-erodeerbare lagen. In Hoofdstuk 5 wordt een gebied in detail behandeld:

- Rondom de Put van Hansweert en Plaat van Ossenisse (profielen 12, 13, 14, 15)

Andere gebieden worden eveneens beschreven in Hoofdstuk 5 en bediscussieerd in Bijlage A;

- Ritthem tot Borssele (profielen 1 en 3)
- Nummer Eén, Vaarwater langs Hoofdplaat (profiel 2)
- Everingen en Schaar van Baarland (profielen 4 en 5)
- Put van Terneuzen (profiel 6)
- Gat van Ossenisse (profielen 7, 8, 9)
- Middelgat (profiel 10 en 11)
- Zuidergat van haven van Walsoorden tot Baalhoek (profielen 16, 17, 18, 19)
- Schaar van Waarde (profielen 20 en 21)
- Nauw van Bath en Land van Saeftinghe oost, Pas van Rilland (profiel 22, 23)



Figuur 3.5 Locatie van dwarsprofielen in detail beschrijving. Namen van dwarsprofielen aangegeven in Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Namen van dwarsprofielen waarvan locaties zijn weergegeven in Figuur 3.5. Hierin type OW = oeverwerk GW = geulwandverdediging N = natuurlijke harde lagen. Jaar van aanleg of laatste onderhoud (vermoedelijk).

No	Naam	Morfologische elementen mesoschaal	Type	Jaar
1	Ritthem	Rede van Vlissingen	OW	1976
2	Nummer Eén	Vaarwater langs Hoofdplaat	OW	1990
3	Lange Zuidweg	Honte, Slikken van Borssele	OW	1978
4	Fort Ellewoutsdijk	Everingen	OW	1966
5	Zuidgors	Everingen, Schaar van Baarland, Zuidgors	OW	1962
6	Put van Terneuzen havens	Pas van Terneuzen, Put van Terneuzen	OW	1978
7	Griete	Inloop van Ossenisse, Slikken van Hulst	OW	1970
8	Kampersche Hoek	Gat van Ossenisse	GW	2000
9	Knuitershoek Zeedorp	Gat van Ossenisse, Overloop van Hansweert	GW	1998
10	Middelgat	Middelgat, Biezelingse Ham	OW	1967
11	Kapellebank Biezelinge	Middelgat	OW	1969
12	Hansweert oude havendammen	Put van Hansweert	N	
13	Hansweert richting veerhaven Kruiningen	Put van Hansweert	OW	1995
14	Plaat van Ossenisse oost	Zuidergat, Plaat van Ossenisse	N	
15	Perkpolder noorden	Schaar van Ossenisse	OW	1974
16	Walsoorden noorden	Zuidergat	OW	1998
17	Kruisdorp Fluitershoek - Plaat van Walsoorden	Zuidergat	GW	1998
18	Schor van Baalhoek Kruispolderhaven	Zuidergat, Schor van Baalhoek	GW	1994
19	Verdronken Land van Saeftinghe West	Overloop van Valkenisse, Saeftinghe	GW	2001
20	Oud Valckenisse	Schaar van Waarde	N	
21	Schalkshoeve	Schaar van Waarde	GW	1965
22	Bath	Nauw van Bath	GW	1997
23	Land van Saeftinghe Oost	Pas van Rilland, Saeftinghe	GW	2000

4 Geactualiseerde dataset moeilijk- erodeerbare lagen in de Westerschelde

In dit hoofdstuk worden geactualiseerde datasets gepresenteerd welke verschillende aspecten van de moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde weergeven. De datasets bevatten een aantal onzekerheden die aan het eind van het Hoofdstuk besproken worden.

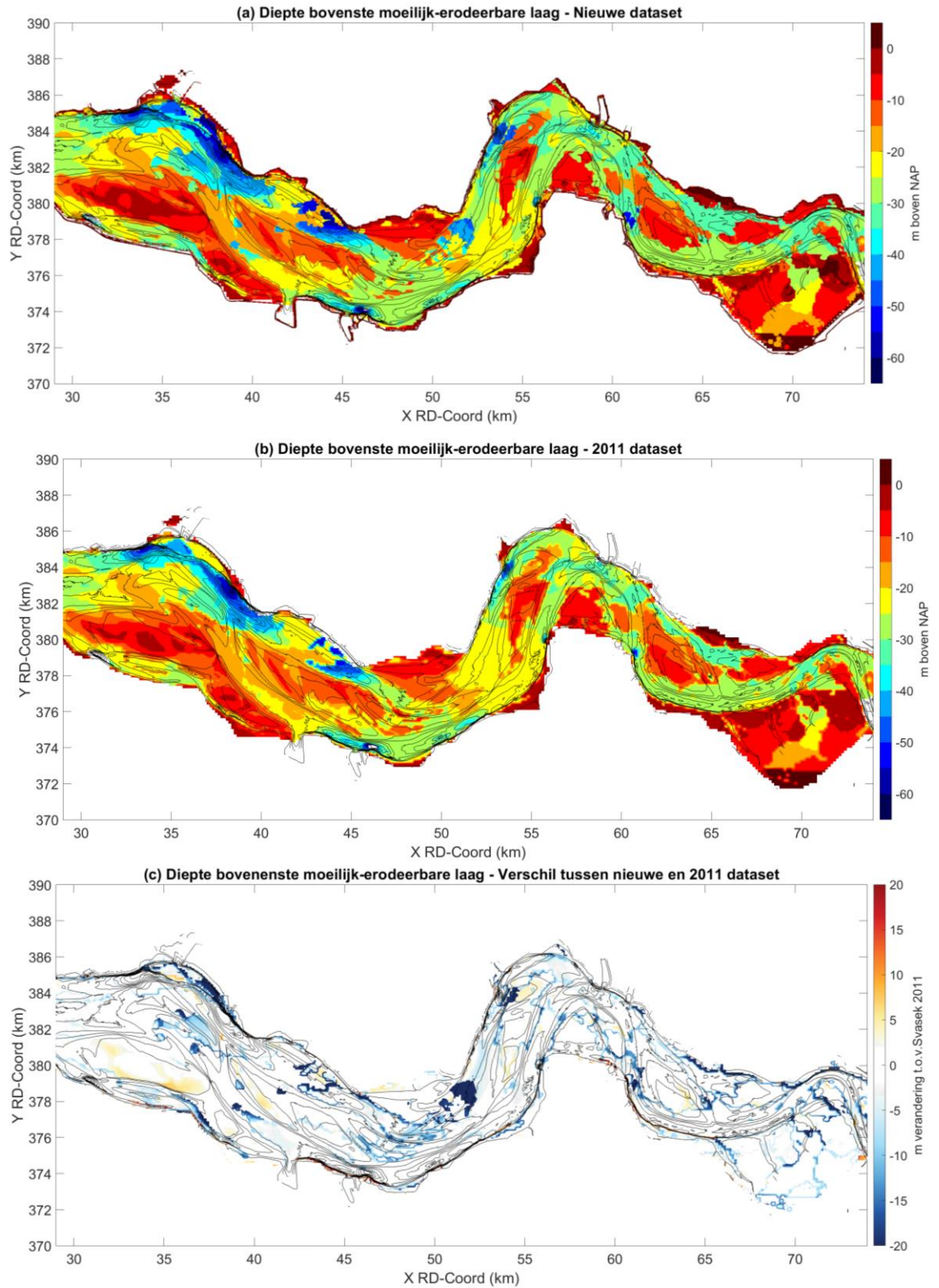
4.1 Kartering van diepteligging bovenste moeilijk-erodeerbare laag

De geactualiseerde kaart van de diepteligging van de bovenste moeilijk-erodeerbare laag in de Westerschelde wordt getoond in Figuur 4.1 (a). Ook wordt de nieuwe kaart vergeleken met de dataset uit de studie van Dam (2013), zie Figuur 4.1 (b, c).

Verschillen tussen de twee datasets zijn horizontaal beperkt, zoals te zien uit de grote hoeveelheid witte oppervlakten in Figuur 4.1 (c). Verschillen tussen de datasets komen vooral voor daar waar de lagen al relatief dun zijn, bijvoorbeeld op de grenzen tussen verschillende geologische formaties. Ook kunnen op de randen tussen verschillende geologische formaties interpolatieverschillen ontstaan vanwege resolutieverschillen tussen de oude (Figuur 4.1 (b)) en de nieuwe (Figuur 4.1 (a)) datasets.

De verticale verschillen daarentegen zijn vaak wel groot. Zo is te zien dat daar waar er wel verschillen zijn tussen de datasets, een harde laag in de nieuwe dataset vaak 10 of zelfs meer dan 20m dieper ligt dan in de oudere dataset. Dat is het gevolg van erosie in een gebied waardoor een moeilijk-erodeerbare laag verdwijnt en de daaropvolgende moeilijk-erodeerbare laag vaak pas enkele meters dieper aangetroffen wordt. Hierdoor kan op locaties waar een kleine verdieping van de bathymetrie optreedt, een veel groter verschil tussen moeilijk-erodeerbare lagen in de datasets optreden. Deze verschillen kunnen ook optreden door veranderingen in de harde-lagen dataset waar dunne harde lagen in de oudere dataset in de geactualiseerde dataset niet meer aanwezig zijn.

De precieze oorzaak van verschillen tussen deze datasets kan dus per gebied verschillen en kan het beste worden besproken tijdens de detailbeschrijving in het volgende hoofdstuk.



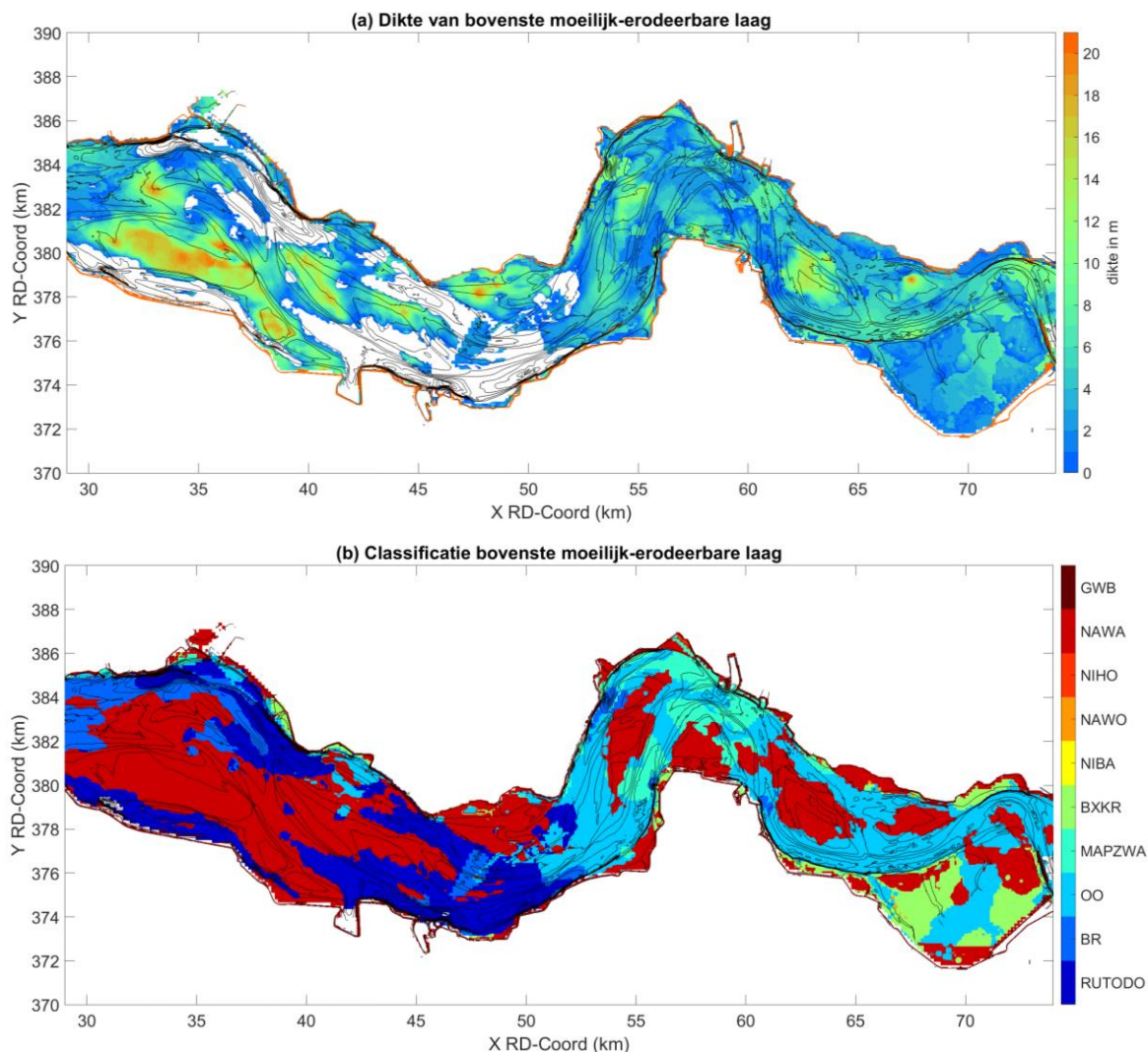
Figuur 4.1 (a) Nieuwe diepteligging kaart van moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde. (b) Kaart moeilijk erodeerbare lagen in Westerschelde - 2011 dataset, (c) Verschil tussen nieuw model en 2011 model met blauw waar het nieuwe model dieper ligt en rood waar het ondieper ligt. Contourlijnen elke 5m vanaf 0m to -50m t.o.v.NAP.

4.2 Eigenschappen van de eerste moeilijk-erodeerbare laag

Een toevoeging van dit rapport ten opzichte van vorige studies is de beschrijving van de dikte alsook het type moeilijk-erodeerbare laag zoals aanwezig in de bovenste moeilijk-erodeerbare laag. Figuur 4.2 (a) illustreert de dikte van de bovenste moeilijk-erodeerbare laag, waaruit een eerste inschatting kan worden gemaakt over waar de bovenste moeilijk-erodeerbare laag risico loopt om doorbroken te worden. In het geologische model van moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde van (Gruijters et al. 2004) is voor sediment behorende tot de Rupel Formatie of ouder alleen de bovenligging gerapporteerd, en dus zijn geen laagdiktes op deze locaties beschikbaar (witte gebieden in Figuur 4.2 (a)). De basis-dataset moeilijk-erodeerbare lagen (Gruijters et al. 2004) gaat ervan uit dat door diagenetische processen lagen van deze ouderdom (~23 tot 66 miljoen jaar) per definitie moeilijk erodeerbaar zijn, ongeacht de lithologie. Zeker op langere tijdschalen is dit zeker niet het geval (Bijlagen A.2)

Figuur 4.2 (b) toont de geologische eenheid waartoe de bovenste moeilijk-erodeerbare laag behoort. Hier kunnen we zien dat gebieden waar grote veranderingen voorkomen tussen de oude en nieuwe datasets (Figuur 4.1), overeen komen met de grenzen tussen verschillende geologische eenheden. Ook opmerkelijk is hoe een grote oppervlakte van de bovenste moeilijk-erodeerbare laag bestaat uit het NAWA laagpakket. Het is niet bekend hoeveel weerstand deze jonge, zandrijke sedimentlagen daadwerkelijk bieden op middellange termijn. De gevarieerde gelaagdheid van dit pakket alsook de laterale variabiliteit (Gruijters et al. 2004) zorgen er waarschijnlijk voor de invloed van deze laag op de morfologische ontwikkeling in de Westerscheld per locatie verschilt. Ook kan de laterale en verticale erosiegevoeligheid verschillen. Het is belangrijk om deze onzekerheden mee te nemen in enige analyse op basis van de “harde lagen” dataset. Ook de moeilijk-erodeerbare laag van de Oosterhout Formatie, die grote delen van de oostelijke vaargeul beschermt, is juist op veel locaties in de vaargeul reeds heel dun. Meer hierover in de detailanalyse. Ook de Waalre Klei (een moeilijk-erodeerbare laag in MSWAPZ) welke de bodem rond de Put van Hansweert beschermt is vooral aan de randen van de put zelf heel dun. In de westelijke vaargeul, ten zuiden van de Put van Borssele, is het NAWA laagpakket dun en bevindt zich de volgende moeilijk-erodeerbare laag (die van de Rupel Formatie) zich veel dieper.

Hoeveel risico deze dunne moeilijk-erodeerbare laag inhoudt voor verdere verdieping en putvorming is ook afhankelijk van de dikte van de erboven liggende zandlaag alsook van de voorspelde morfologische ontwikkeling van het desbetreffende gebied. Deze risico's worden in de volgende hoofdstuk in meer detail besproken voor een aantal geselecteerde gebieden.



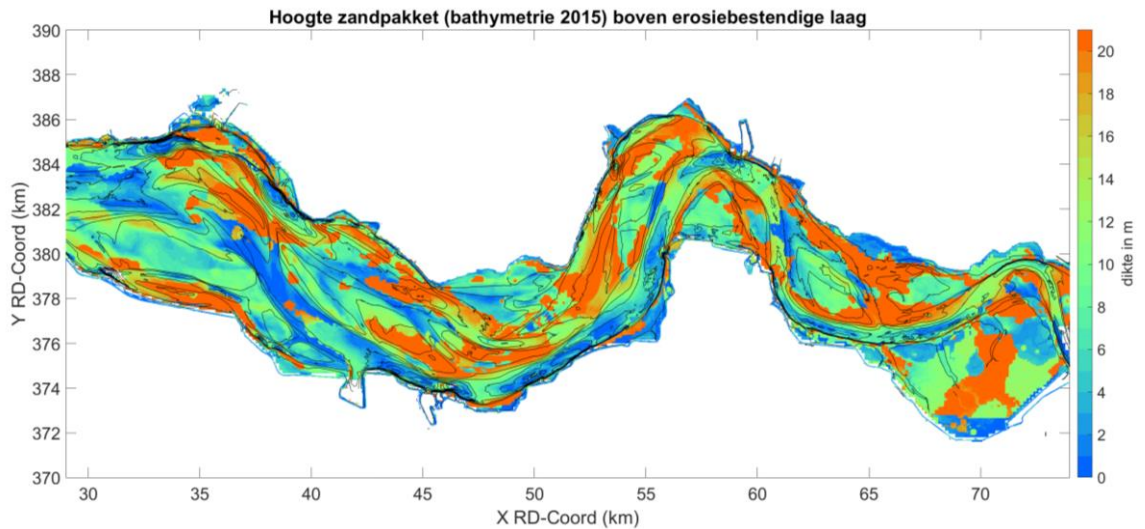
Figuur 4.2 Eigenschappen van de bovenste moeilijk-erodeerbare laag gebaseerd op bestaande dataset (Gruijters et al. 2004) en vaklodingen data met (a) de dikte van bovenste moeilijk-erodeerbare laag en (b) de geologische eenheid waartoe die laag behoort. NAWA tot RUTODO vertegenwoordigt de geologische eenheid, terwijl GWB de Geulwand beschermingen aantonen. Contourlijnen elke 5m vanaf 0m to -50m t.o.v.NAP. In witte gebieden in (a) zijn de dikte van de bovenste moeilijk-erodeerbare lagen niet opgenomen in de dataset.

4.3 Dikte zandlaag boven eerste moeilijk-erodeerbare laag

Bovenop de bovenste moeilijk-erodeerbare laag bevindt zich een zandlaag van variabele dikte. In dit rapport is de zandlaag berekend als de dikte tussen de geactualiseerde diepteligging van de eerste moeilijk-erodeerbare laag, en de bathymetrie uit vaklodingen van 2015. De zanddikte dataset wordt getoond in de kaart in Figuur 4.3. Omdat zowel de bovenste moeilijk-erodeerbare laag en de bathymetrie van de nieuwe en oude datasets verschillen, zijn deze datasets hier niet vergeleken.

De zanddiktekaart laten zien dat de dunste zandlagen zich bevinden in de vaargeul, en dan vooral in de diepe putten. De dikste zandlagen zijn aanwezig aan de randen van de huidige platen alsook in opgevulde geulen, b.v. bij Baarland, Middelgat, en in een oude geul in het centrale deel van het Verdronken Land van Saeftinghe. Het is onzeker hoe stabiel de locatie van de platen was sinds afzetting van de Holocene sedimentpakketten (en dus de harde laag van in de NAWA laagpakket). Als oude geulen door de huidige plaatlocaties heen gemigreerd

zijn in het verleden, zou dit betekenen dat deze platen uit veel jongere zand bestaan en dat de gekarteerde moeilijk-erodeerbare lagen hier niet aanwezig zijn. Deze onzekerheid in dikte van de zandlaag beïnvloedt de onzekerheid in de beschikbaarheid van zand in de Westerschelde, wat op zijn beurt weer invloed uit kan oefenen op het voorspellen van morfologische ontwikkelingen op bepaalde locaties.



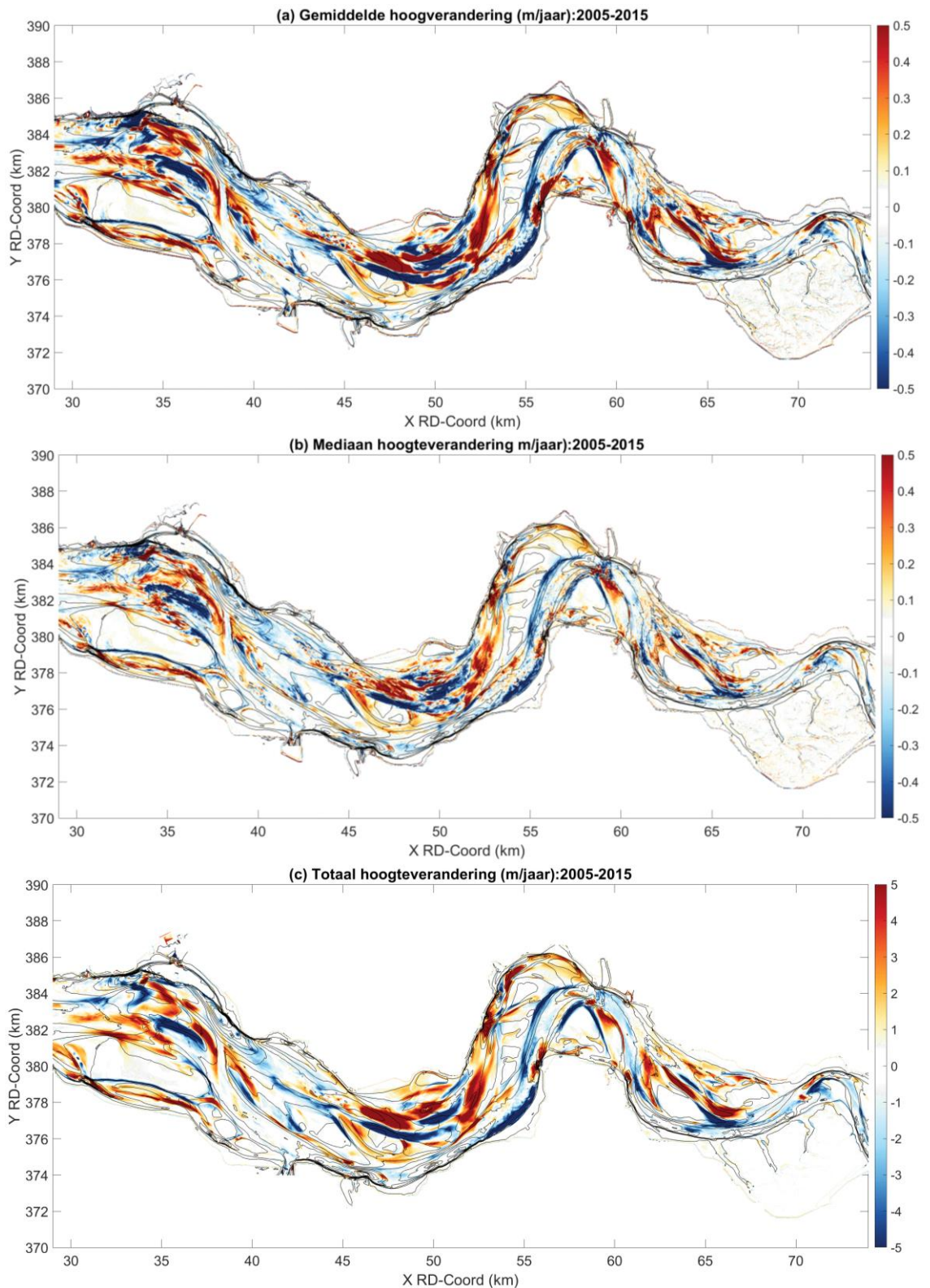
Figuur 4.3 Dikte van de zandlaag op de bovenste moeilijk-erodeerbare laag ten opzichte van de 2015 vakloding. Contourlijnen elke 5m vanaf 0m to -50m t.o.v.NAP.

4.4 Morfodynamiek in de Westerschelde op een tijdschaal van 10 jaar

De Westerschelde is niet alleen op de tijdschaal van een getijdencyclus een morfologisch hoog-dynamisch gebied, maar ook op een tijdschaal van 10 jaar. Om de effecten van moeilijk-erodeerbare lagen in dit gebied te onderzoeken, moet als eerst de recente morfodynamiek van het gebied gekwantificeerd worden. Dit gebeurt door middel van de verschillen tussen alle vaklodingen tussen 2005 en 2015 uit te rekenen (Figuur 4.4). Deze periode werd gekozen omdat de geul bij het Middelgat sinds 2005 minder actief is geworden en daardoor een kleinere rol speelde in de morfologische ontwikkeling.

We nemen het verschil tussen de diepteligging op elk vaklodingmeetpunt tussen opeenvolgende metingen en delen deze door het aantal jaar tussen de metingen. Zo verkrijgen we voor elke gridpunt een aantal diepteverandering-per-jaar waarden. Het gemiddelde en de mediaan van deze waarden zijn berekend (Figuur 4.4 (a) en (b)) alsook de totale diepteverandering van 2005 tot 2015 (Figuur 4.4(c)). De totale diepteverandering laat toe om onderscheid te maken tussen gebieden die veel of weinig morfologische veranderingen hebben ondergaan in deze periode. Het gemiddelde en de mediaan van de veranderingen per jaar over de 10 jaar maakt het mogelijk om gebieden met snelle veranderingen te onderscheiden van gebieden die geleidelijk veranderen op een tijdschaal van 10 jaar. De sterke overeenkomsten tussen de afzettings- en erosiepatronen van de gemiddelde en de mediane waarden duiden erop dat deze morfologische veranderingen geleidelijk hebben plaatsgevonden over de periode van 10 jaar.

De interactie tussen erosie, aanwezigheid van moeilijk-erodeerbare lagen, erosie-revend gedrag en de dikte van deze lagen is sterk wisselend per locatie en wordt verder bediscussieerd in de detailbeschrijvingen in het volgende hoofdstuk. Grofweg wordt erosie in diepe putten ten westen van het Gat van Ossensisse geremd door de Rupel Formatie (Klei van Boom) en ten oosten van het Gat van Ossensisse door de Oosterhout Formatie (Figuur 4.2 b).



Figuur 4.4 Verandering in de bathymetrie in de Westerschelde gebaseerd op alle vakkelingen tussen 2005 en 2015 (a) Gemiddelde verandering (m/jaar), (b) mediaan verandering (m/jaar) en (c) totale verandering (m).

4.5 Overzicht van onzekerheden in dataset

Het verband tussen lithologie en mate van erosiebestendigheid is niet-lineair door de verschillende chemische en mechanische processen waaraan de geologische lagen in het

verleden zijn onderworpen na afzetting. Kleilagen uit verschillende geologische formaties kunnen daarom verschillende eigenschappen vertonen. Zoals vermeld in van der Spek (1997), zijn er hierbij twee factoren van belang:

- 1) drempelwaarden voor erosie van de bodemsedimenten,
- 2) schuifspanning uitgeoefend door het stromende water.

Er is geen dataset bekend waarin de mate van erosiebestendigheid van de verschillende geologische lagen in de Westerschelde wordt weergegeven (van der Spek 1997; Hijma 2015). Van der Spek concludeerde reeds in 1997 dat voor de Holocene geulafzettingen in het mondingsgebied van de Westerschelde, waarnemingen van Terwindt et al. (1968) in de Haringvlietmonding mogelijk kunnen worden gebruikt. Maar voor oudere moeilijk erodeerbare lagen zijn deze gegevens niet bekend. Globaal kan wel gezegd worden dat de Formatie van Naaldwijk (Walcheren) vrij gemakkelijk erodeert (bijv. in de geulwanden) terwijl de Formatie Oosterhout zeer erosiebestendig is.

Behalve deze verschillen tussen geologische formaties onderling, zijn er binnen een geologische formatie ook lithologische verschillen door sortering van het sediment tijdens het proces van afzetten. In de originele harde-lagenkartering (Gruijters et al. 2004) wordt vermeld wat de grenswaarden zijn voor de betrouwbaarheid van de geïnterpoleerde grids binnen de verschillende geologische formaties (Tabel 3.1). Hier is te zien dat binnen de Holocene, estuariene afzettingen van NAWA al op een korte afstand een grote variatie in lithologie kan optreden. Voor dit laagpakket neemt de lithologische voorspellingswaarde van een boring snel af naarmate het beschouwde punt verder van een boring ligt, en kan op een afstand van 250m al weer een compleet andere lithologie aanwezig zijn. Dit geldt niet alleen voor de lithologische voorspelling, maar ook voor de dikte van de erosiebestendige laag. Oudere mariene afzettingen zoals de Oosterhout- en Rupel Formaties hebben veel hogere voorspellings-grenswaarden (Tabel 3.1). De betrouwbaarheid in de interpolatie van de lithologie wordt vergroot doordat er veel meer datapunten (boringen) in de ondiepere Holocene lagen beschikbaar zijn. Veel minder boringen bereiken de diepere lagen, maar vanwege het afzettingsmilieu van de diepere lagen (mariene afzettingen), zijn deze ook beter voorspelbaar (b.v. oudere kleilagen van OO en RU). Het is echter bij lange na niet voor alle lagen zo dat de metingen binnen de grenswaarden vallen. De statistische invulling tussen meetpunten leidt dus tot flinke onzekerheden in de originele dataset (Gruijters et al. 2004).

Aan de hand van bathymetrische opnamen zijn insnijdingen in het geologische model bepaald en daarmee de gebieden waar recente afzettingen oudere geologische lagen hebben vervangen. Maar bathymetriemetingen zijn momentopnames en het is niet bekend welke gebieden eventueel eroderen en weer opvullen in de perioden tussen de metingen. Voor de nieuwe dataset is de invloed van oude bathymetrieën (1800, 1860, 1905, 1931) afgeleid uit de vorige hardelagenkartering (Dam 2013), waarin geen melding wordt gemaakt van de mate van onzekerheid in deze metingen. Omdat we niet beschikken over het originele RIKZ rapport uit 2004 (van der Male 2004), valt er over onzekerheden afkomstig uit deze data niet veel te zeggen.

Er zijn ook oude oeverwerken en andere structuren aanwezig in de Westerschelde welke niet centraal gekarteerd zijn en daarom ook niet opgenomen zijn in de dataset (b.v. Margarethapolder in dwarsprofiel 7, Figuur A.5.2). In welke mate deze structuur het erosiegedrag bepaalt is niet bekend.

Een andere onzekerheid welke volgt uit deze studie is het volume slib dat aan de Westerschelde wordt toegevoegd door doorgaande erosie van kleirijke geologische lagen. De invloed van erosie van harde lagen op de slibbeschikbaarheid en de effecten hiervan op de langere termijn zijn niet bekend.

5 Interactie tussen morfologische ontwikkelingen en moeilijk-erodeerbare lagen voor geselecteerde gebieden

In dit hoofdstuk wordt de interactie tussen morfologische ontwikkeling en moeilijk-erodeerbare lagen in detail bediscussieerd voor de gebied rond de Put van Hansweert. Voor andere gebieden wordt in dit hoofdstuk alleen een overzicht van potentiële risico's samengevat, maar in Bijlage A worden ook deze gebieden in detail behandeld.

5.1 Rondom de Put van Hansweert en de Plaat van Ossenis (profielen 12, 13, 14 en 15)

Rondom de Put van Hansweert (

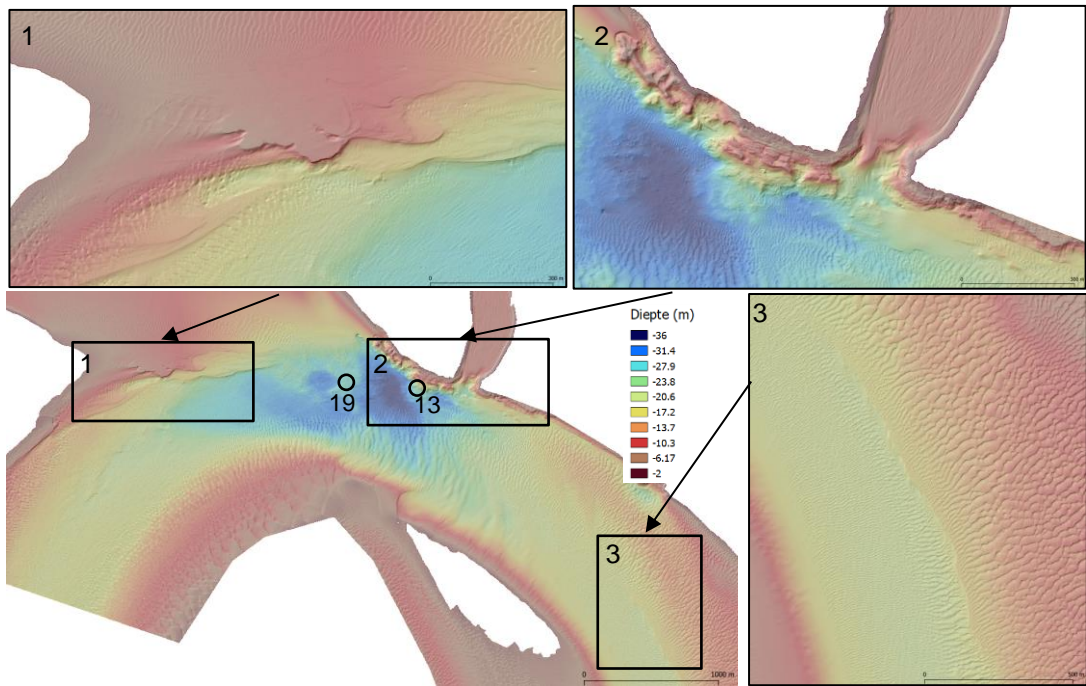
Figuur 5.1) is de morfologische ontwikkeling over de laatste decennia een gevolg van een complexe interactie tussen meerdere factoren. De hydrodynamische situatie in dit gebied is veranderd door de aanzanding van het Middellgat sinds 2005, waardoor uit deze richting minder stroming komt. Hiernaast wordt de bathymetrie in het gebied rond de Put van Hansweert bepaald door een aantal moeilijk-erodeerbare lagen die in de geulbodem dagzomen, maar waarvan het erosiegedrag onderling verschilt. De aan- of afwezigheid van moeilijk-erodeerbare lagen in dit gebied beïnvloedt de sediment-beschikbaarheid, maar kan ook de stroomrichting in de bocht bij de Put van Hansweert beïnvloeden. Ook de lithologie (klei en zand ratio) van de (langzaam) eroderende oude lagen beïnvloedt welke sedimenten hier toegevoegd worden aan het systeem.

Ten westen van de Put van Hansweert is in Profiel 11 (Figuur 5.2 en Figuur A.6.3) een eroderende Holocene laag te zien tussen -5m en -15m. Op detailmetingen van de bathymetrie (1mx1m resolutie) is in deze omgeving een glad oppervlak zonder bodemvormen als duinen en ribbels en met scherpe plateauranden te zien (

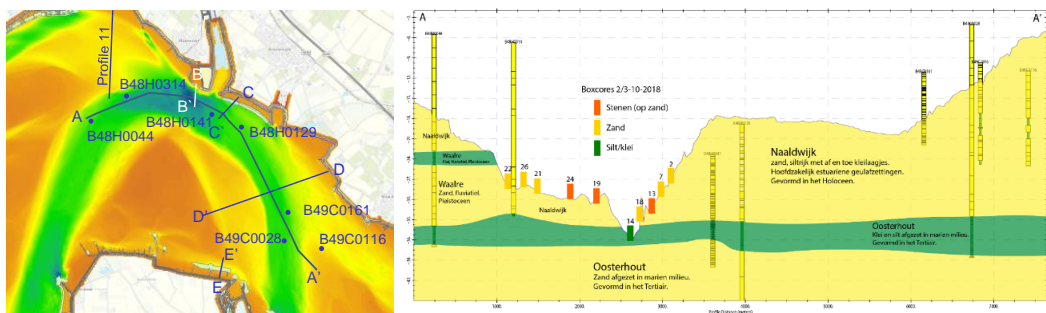
Figuur 5.1, inzet 1), wat kan duiden op een moeilijk-erodeerbare laag (Huismans et al. 2016). In de originele harde-lagen dataset (Gruijters et al. 2004) wordt op deze locatie geen moeilijk-erodeerbare laag vermeld, maar op DINOLoket is te zien dat er weinig boringen zijn in dit gebied om lithologie en daardoor de exacte positie van moeilijk-erodeerbare lagen uit af te leiden. Een analyse van de morfologische veranderingen tussen 2005 en 2015 in dit gebied toont hier echter wel voortdurende erosie (Figuur 4.4), dus als hier zich een Holocene, moeilijk-erodeerbare laag bevindt, houdt deze de erosie niet volledig tegen op een jaarlijkse tijdschaal. Het is bekend dat afwisselende klei-zand lagen, zoals beschreven voor de moeilijk-erodeerbare laag binnen het NAWA laagpakket (Gruijters et al. 2004), een mate van erosieresistentie bieden. Zandlagen spoelen geleidelijk tussen de minder-erodeerbare kleilagen uit totdat een stuk van de overhangende kleilaag afbrokkelt (Terwind et al. 1968). In het gebied ten oosten van de Put van Hansweert zijn op de bodem kleiplakken aangetroffen (

Figuur 5.1, monster 19 (Bijleveld et al. 2018)). De geulwand in de buitenbocht ten zuidwesten van de Put van Hansweert toont dezelfde kenmerken (

Figuur 5.1, inzet 3). Het is niet bekend in welke mate de lagen in dit gebied de uitbreiding van de bocht tegenhouden en in welke mate de hydrodynamica hier de morfologische ontwikkeling stuurt.



Figuur 5.1 Detailmeting bodem rond de Put van Hansweert (1mx1m) in QGIS met locaties van boxcore samples 13 en 19 (Bijleveld et al. 2018)



Figuur 5.2 Detail ARCGIS Put van Hansweert met oeverwerk, bathymetrie en locatie van doorsnedes 12 (B-B'), 13 (C-C'), 14 (D-D') en 15 (E-E'). De locatie van een langsgedeelte met geologische informatie uit DINOLoket en RWS Boxcore rapportage (2018) wordt ook getoond (A-A'). Rechts: Geologisch langsgedeelte met informatie uit DINOLoket en RWS Boxcore rapportage (Bijleveld et al. 2018).

Profiel 12 (Figuur 5.3) ligt op de locatie tussen de havendammen van de oude haven, ongeveer ter hoogte van het diepste punt van de Put van Hansweert op -35m. De bodem van de diepste deel van de Put bestaat uit een oude geconsolideerde kleilaag van de Oosterhout Formatie met een sterk erosie-remmende werking. In het diepste deel van de put heeft sinds 2015 ook weinig erosie plaatsgevonden (Figuur 4.4).

Profiel 12 laat ook zien dat op de geulwand in de ingang van de oude haven geen oeverwerken liggen, waardoor er wel sprake moet zijn van natuurlijke erosiebestendige lagen. In 50 jaar tijd is hier op het diepte-interval van -3 m tot -16 m ongeveer 35 m horizontale erosie opgetreden. Dit is gemiddeld 0,7 m/jaar, vanaf 1990 versneld tot 1,4 m/jaar. Onder -16 m is de geulwand stabiel, maar de oude havendammen worden op termijn dus wel ondermijnd. In de data zijn kenmerken te zien die duiden op doorgaande erosie van harde lagen, waarvan brokstukken naar beneden kunnen vallen ("bulten" in vaklodgingen b.v. 2015 en 1965 in Profiel 12, Figuur 5.3 alsook

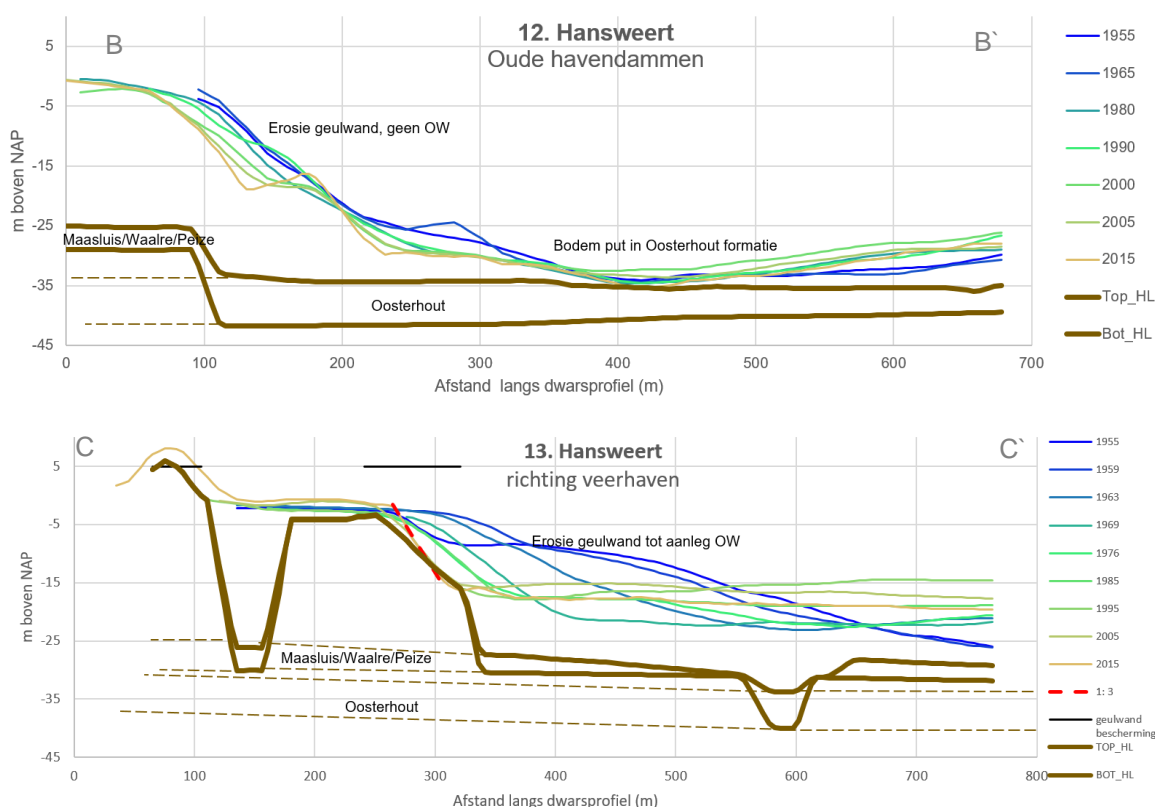
Figuur 5.1, inzet 2). Moeilijk-erodeerbare lagen zijn in dit gebied niet aanwezig volgens de harde-lagen dataset (Gruijters et al. 2004), maar veen- en kleilagen van de Naaldwijk en Nieuwkoop formaties behoren hier in GeoTOP v1.3 wel de tot eerste 10m onder NAP. De aanwezigheid van klei- en veenlagen komt ook overeen met het reliëf dat in de bodemdata van het gebied te zien is (

Figuur 5.1, inzet 2). In de bathymetrie is te zien dat grote brokken eroderen vanaf ongeveer de verwachte diepte van het Hollandveen Laagpakket (NIHO). Bij een recente meetcampagne kon in dit gebied (

Figuur 5.1, monster locatie 13) niet met succes een Boxcore monster genomen worden, vanwege de aanwezigheid van stenen en veenbrokken (Bijleveld et al. 2018). Tegenwoordig ligt de haveningang niet langer op deze plaats. In 1866 is het Kanaal door Zuid-Beveland aangelegd, in 1959 is de nieuwe voorhaven aangelegd en is de buitenhaven vergroot, waarbij het begin van het kanaal is verlegd en het oude kanaal deels is gedempt.

Profiel 13 (Figuur 5.3) ligt tussen Hansweert en de voormalige veerhaven Kruijningen en hier zijn wel oeverwerken van -2 tot aan -15 m NAP onder een helling van 1:3 (1995). De geul is hier minder diep en vertoont een grillig dynamisch gedrag met sterke verdieping van 1955 tot 1969, dan weer aanzanding tot 1995 en dan weer verdieping tot heden. Met de vastgelegde oever is de erosie van de geulwand gestopt. Gezien de morfologie in

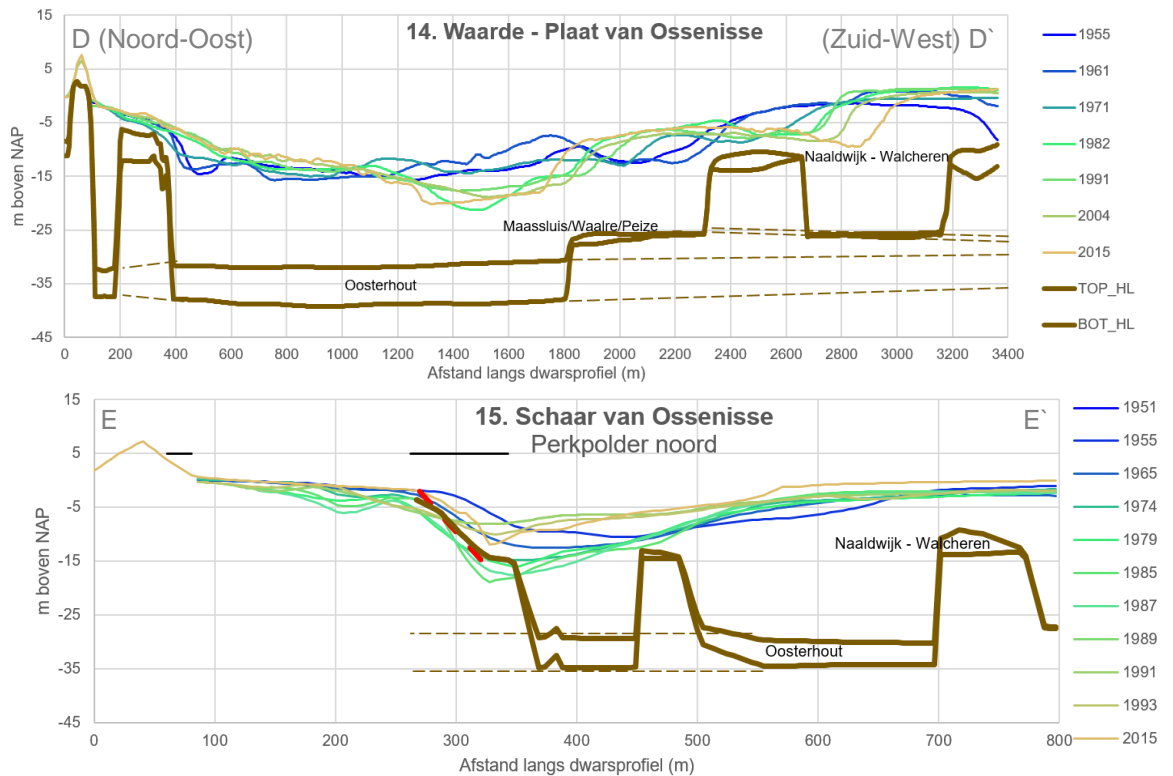
Figuur 5.1, inzet 2, is het aannemelijk dat ook hier erosie van harde lagen heeft plaatsgevonden waardoor veenbrokken naar beneden storten op wisselende intervallen.



Figuur 5.3 Dwarsprofielen 12 (B-B') en 13 (C-C') met vaklodingen representatief voor de morfologische ontwikkeling en in bruin en bovenste moeilijk-erodeerbare laag, opgebouwd uit harde verdedigingswerken en verschillende geologische lagen.

Aan de zuidelijke oever langs de Schaar van Ossensisse (profiel 15, Figuur 5.4), ten noorden van Perkpolder gezien richting Kruijningen was in het verleden sprake van uitschuring en is een oeverwerk aangelegd, maar nu vindt er sedimentatie plaats. Een doorsnede over het oosten van de Plaat van Ossensisse (Profiel 14, Figuur 5.4) laat een zeer dynamisch gedrag

zien met regelmatig plaatvallen (geulwand nergens steiler dan 1:12) en geleidelijke terugloop van de plaat boven -10m NAP. Een natuurlijke harde laag of drempel ligt op -8 a -10 m NAP waar onder deze diepte de plaat juist horizontaal groeit. In DINOloket is te zien dat een klei tot kleiige zandlaag van het NAWA laagpakket op deze diepte aanwezig is.



Figuur 5.4 Dwarsprofielen 14 (D-D') en 15 (E-E') ten zuiden van de Put van Hansweert, met representatieve vaklodingen en moeilijk erodeerbare lagen dataset in bruin (inclusief oeverwerk, GW en geologische lagen)

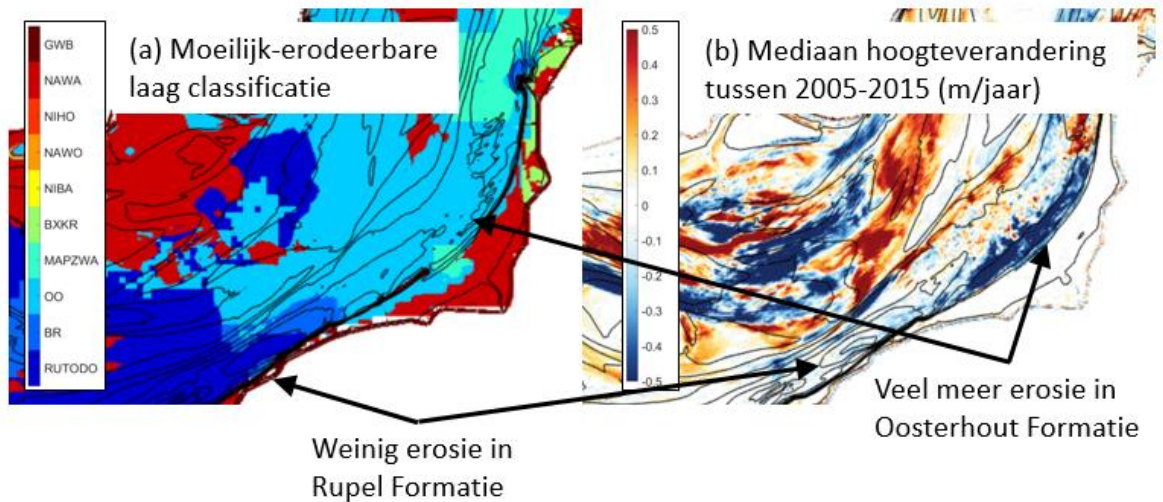
5.2 Verschillen tussen moeilijk-erodeerbare lagen en gerelateerde risico's

De twee grootste risico's gerelateerd aan moeilijk-erodeerbare lagen en bestortingen zijn

- 1 het doorbreken van kleilagen, gevolgd door versnelde erosie, en
- 2 de standzekerheid van (voor-) oeververdedigingswerken.

Voor een aantal locaties worden deze risico's besproken (Bijlagen A).

Door de nieuwe moeilijk-erodeerbare lagen dataset (Figuur 4.2) te combineren met een analyse van de morfologische ontwikkeling (Figuur 4.4) wordt duidelijk dat verschillende geologische lagen tot verschillen in erosie leiden. Zo is b.v. te zien hoe er bij het Gat van Ossensisse in de vaargeul een overgang plaatsvindt in de bodem van een moeilijk-erodeerbare laag uit de Rupel Formatie in het Zuidwesten naar een moeilijk-erodeerbare laag uit de Oosterhout Formatie in het noordoosten (Figuur 4.2 en Figuur 5.5 (a)). In Figuur 4.4 en Figuur 5.5 (b) is te zien dat de aanwezigheid van de Oosterhout Formatie overeenkomt met het gebied waar veel erosie voorkomt, terwijl de aanwezigheid van de Rupel Formatie overeenkomt met veel minder erosie van de bodem. Ook is te zien dat op bepaalde locaties geulwanden met moeilijk-erodeerbare lagen geleidelijk opschuiven, totdat maatregelen worden genomen (Zuidergat, Land van Saeftinghe, Gat van Ossensisse, enz., dwarsprofielen in Bijlage A).



Figuur 5.5 overeenkomst tussen geologische formaties en waargenomen erosie rond de Put van Ossensisse

Het is niet duidelijk hoe het doorzetten van erosie van deze lagen de toekomstige morfologische ontwikkeling zal beïnvloeden. Om deze vraag te beantwoorden is meer onderzoek nodig naar de drempelwaarden voor erosie van de verschillende moeilijk-erodeerbare lagen. De huidige data duidt wel op een aantal potentiële risicogebieden, waar dunne, moeilijk-erodeerbare lagen bedekt zijn met een dunne laag zand en waar in de laatste jaren erosie is opgetreden.

Hierna volgt een korte beschrijving van de ontwikkeling van een aantal specifieke locaties waar interactie tussen morfologische ontwikkeling en moeilijk-erodeerbare lagen geconstateerd is. Deze opsomming geeft inzicht in de mate van erosiebestendigheid van verschillende geologische lagen.

Ritthem, Rede van Vlissingen tot aan Put van Borssele (Bijlage A.1):

Moeilijk-erodeerbare lagen van de Formaties van Rupel, Tongeren, Eem, Waalre en Oosterhout remmen hier zowel de verticale erosie in de put als de horizontale erosie van de slikken aan beide kanten van de Sloehaven. Toch vindt tussen 2005 en 2015 significante erosie in deze gebieden plaats. Op welke tijdschaal deze lagen de erosie nog voldoende kunnen tegenhouden is niet te voorspellen uit de gegevensdichtheid en de beschikbare data over de erosiegevoeligheid van de verschillende lagen.

Nummer Eén, Vaarwater langs Hoofdplaat (Bijlage A.2):

Bij de doorgaande erosie (zowel horizontaal als verticaal) van het diepste deel van de geul bij Nummer Eén zijn de verschillen in erosiebestendigheid van de Boomse Klei (Rupel Formatie) en het Laagpakket van Zelzate (Tongeren Formatie) alsook de zandige eenheden daartussen, terug te zien in de gradiëntverschillen in het dwarsprofiel. In tegenstelling tot deze waarnemingen, zijn alle Laagpakketten van de Rupel en Tongeren Formaties samengevoegd tot een enkele moeilijk-erodeerbare laag in de basis dataset (Gruijters et al. 2004).

Gat van Ossensisse (Bijlage A.5):

In dit gebied vindt tussen 2005 en 2015 veel erosie plaats, maar uit de data is niet te onderscheiden in welke maten de Oosterhout klei of gesuppleerde zand hier eroderen. De geulwandverdediging wordt ondermijnd, ondanks proefstoringen (Mastbergen et al 2019). In het midden en zuiden wordt de erosie waarschijnlijk nog geremd door de harde kleilaag van de Formatie van Oosterhout, maar deze wordt wel degelijk geërodeerd.

Rondom de Put van Hansweert (paragraaf 5.1):

In de diepste delen van de Put van Hansweert wordt weinig erosie waargenomen. Ten oosten van de put wordt wel erosie waargenomen, waarschijnlijk beïnvloed door de Waalre klei, welke in dit gebied discontinu aanwezig is. De grootste onzekerheid in dit gebied is de mate van erosieresistentie van de kleilagen in de NAWA. Meer informatie hierover is terug te vinden in de detailbeschrijving.

Zuidergat van haven van Walsoorden tot Baalhoek (Bijlage A.7):

In dit gebied is wel sprake van enige ondermijning van de oeverwerken en de geulwandverdediging, maar erosie is voornamelijk zichtbaar in het gebied tussen de geulwandverdedigingen, waar nog geen verdediging is aangelegd. Horizontale erosie wordt tot op heden geremd door de verdedigingswerken, maar erosieve insnijding gaat door. Verdieping wordt wel enigszins tegengehouden door de harde kleilaag van de Oosterhout Formatie.

Pas van Rilland (Bijlage A.9):

Ook bij de Pas van Rilland is insnijding zichtbaar na de aanleg van de geulwandverdediging in 2002, en ook hier wordt de erosie geremd door de aanwezigheid van de erosieresistente Oosterhout kleilaag.

Een aantal geanalyseerde gebieden toont op de korte termijn weinig risico door voortdurende sedimentatie. Daardoor zijn de precieze ligging en eigenschappen van de harde lagen hier ook minder belangrijk. Deze gebieden zijn:

- Everingen en Schaar van Baarland (Bijlage A.3)
- Put van Terneuzen (Bijlage A.4)
- Middelgat (Bijlage A.6)
- Schaar van Waarde (Bijlage A.9)

Het Waterschap Scheldestromen heeft in 2017 nog een aantal locaties in Zeeland aangemerkt als onderdeel van de zg. *Restproblematiek Oeverbestorting Zeeland*, waarvoor een gedetailleerde beoordeling van de onderwateroevers op het faalmechanisme zettingsvloeiing is uitgevoerd door Deltares. Langs de Westerschelde betreft het Hoedekenskerke, Kleine Huissenspolder (bij Griete, Zaamslag), Nieuw-Neuzenpolder en Braakmanhaven (bij Terneuzen). Voor deze locaties moet nog worden vastgesteld of afschuiving of zettingsvloeiing in het voorland de dijkveiligheid in gevaar kan brengen of dat er sprake is van doorgaande erosie (Van den Ham en Taccari, 2017). Bij Breskens, Nummer Eén, Kampersche Hoek, en Kreverhille (Ossenissee-Perkpolder) zijn al maatregelen (bestortingen) uitgevoerd. Probleem bij een goede beoordeling is dat vaak niet goed bekend is tot welke diepte oeverwerken en steenbestortingen liggen en er speciale meettechnieken moeten worden ingezet om dit alsnog vast te stellen (Vermaas et. al., 2018).

6 Conclusies

In dit rapport zijn zowel de eigenschappen (geologische eenheid, dikte, diepte onder bodem-oppervlakte) als de plaats van de bovenste moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde geactualiseerd. Hierbij zijn de harde verdedigingen (oeverwerken en geulwandverdedigingen) toegevoegd aan de dataset op basis van de aanleggegevens en een toekenning van de diepteligging op basis van jaar van aanleg en bathymetriemetingen. Het rapport is gebaseerd op bestaande metingen en geologische modellen.

Niet alleen de aanwezigheid, maar ook de levensduur van moeilijk-erodeerbare lagen beïnvloedt de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde. De levensduur is afhankelijk van de erosiebestendigheid en dikte van de lagen, alsook de hydrodynamische krachten welke op deze laag inwerken. Moeilijk-erodeerbare lagen hebben de grootste invloed op de morfodynamiek daar waar ze geërodeerd worden. Hier wordt de snelheid van erosie bepaald door de erosiebestendigheid van deze lagen: hoe weerstandkrachtiger de laag, hoe langzamer de erosie. Dit komt voornamelijk voor bij:

- 1) de randen, en in sommige gevallen de diepste delen, van diepe putten,
- 2) de teen van harde verdedigingswerken, en
- 3) geulwanden, waar geen verdedigingswerken zijn aangebracht en erosie enkel tegengehouden wordt door de aanwezige moeilijk-erodeerbare lagen.

In de huidige kartering van de bovenste moeilijk-erodeerbare laag is de gehele laag gedefinieerd als niet-erodeerbaar. Hierdoor wordt er geen rekening gehouden met bestaande kennis van de combinatie van verschillende geologische lagen waaruit de bovenste laag is opgebouwd. Ook wordt geen rekening gehouden met waarnemingen van doorgaande erosie op een aantal locaties welke deel uitmaken van deze "niet-erodeerbaar" definitie. Analyse van morfologische veranderingen laat zien dat deze lagen in verschillende mate erosiebestendigheid vertonen. Sommige lagen eroderen zelfs enkele meters in een jaar tijd. De waargenomen morfologische ontwikkelingen komen dus niet helemaal overeen met de verwachtingen op basis van de gekarteerde moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde.

7 Aanbevelingen

Onderzoek hoe sturend de moeilijk-erodeerbare lagen zijn voor de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde: Om deze vraag te beantwoorden zou een aantal modellen met verschillende beschrijvingen van de ondergrond (i.e. ligging en dikte van het zandpakket) kunnen worden gemaakt; b.v. op basis van de kartering door Dam (2013) en de kartering zoals gepresenteerd in de huidige studie. De berekende bodemontwikkeling na b.v. 10 jaar kan dan onderling vergeleken worden. In tweede instantie zou rekening kunnen worden gehouden met onzekerheden in de erodeerbaarheid aan de moeilijk-erodeerbare lagen.

Kennis verzamelen over erosiegevoeligheid van moeilijk-erodeerbare lagen en stabiliteit oeverwerken: Op een aantal locaties waar geulwandverdedigingen of oeverwerken zijn aangebracht gaat de insnijding/ontgraving in de moeilijk-erodeerbare lagen vooralsnog door, wat kan leiden tot ondergraving en instabiliteit van deze verdedigingen. Plaatselijk is de erosie tegengegaan door het aanbrengen van zandsuppleties, maar de erosie lijkt toch door te gaan. Om een inschatting te maken van de omvang en tijdschaal van deze ondergraving dient de erosie in meer detail bekeken te worden in relatie tot de ligging van de natuurlijke harde lagen en de oeverwerken. Ook is meer kennis nodig omtrent de mate van erosiebestendigheid van de verschillende moeilijk-erodeerbare lagen en op kritische gebieden, hoeveel dieper de volgende moeilijk-erodeerbare laag zich bevindt.

Kennisverbetering horizontale erosiesnelheid van verschillende lagen: Ook zijn gebieden geïdentificeerd waar harde lagen in de onbeschermd geulwand of aan de randen van putten slechts ten dele weerstand bieden tegen horizontale erosie zodat gestage achteruitgang van de geulwand en verplaatsing van geulen optreedt. Ook hier is het belangrijk om te begrijpen op welke tijdschaal de erosiebestendigheid van de moeilijk-erodeerbare lagen bescherming biedt.

Beter in kaart brengen van heterogeniteit van Holocene sedimentpakketten: Sedimentbeschikbaarheid wordt beïnvloed door de mate van erosiebestendigheid van vooral de Holocene moeilijk-erodeerbare lagen. Deze lagen leveren niet alleen zand, maar voegen ook klei toe aan het systeem. Meer kennis over de verspreiding, heterogeniteit en erosiegevoeligheid van de Holocene sedimentpakketten kan opgenomen worden in morfologische modellen om tot betere middellange- (~10-50 jaar) tot lange-termijn (>50 jaar) voorspellingen van de morfologische ontwikkeling te komen. Kartering van de Holocene getijdengeulen kan informatie geven over de aanwezigheid van klei/veen lagen in de huidige platen (b.v. data uit Vos en van Heeringen 1997). Voor meer gedetailleerde informatie over de gelaagdheid van platen zou data uit seismisch onderzoek gebruikt kunnen worden.

Monitoring van overige risicogebieden: Er zijn een aantal risicogebieden geïdentificeerd waar erosie van moeilijk-erodeerbare lagen aantoonbare verdieping veroorzaakt op de tijdschaal van één jaar. Deze gebieden moeten onder verscherpte monitoring geplaatst worden.

Effect van eroderende geologische kleilagen op slib concentratie Westerschelde: Voortdurende erosie van moeilijk-erodeerbare, kleirijke lagen produceert slib dat aan het systeem toegevoegd wordt. De effecten hiervan op de langere termijn zijn nog niet bekend.

8 Referenties

- Bijleveld, M., G. den Hartog, and M. Schrijver. 2018. "Bodembemonstering Proefstortlocaties Inloop Ossenisse En Put van Hansweert." Rapport nr MONEOS-T- 2018-001, Rijkswaterstaat, Middelburg
- Cleveringa, J. 2013. "Ontwikkeling Mesoschaal Westerschelde (Factsheets), Basisrapport Kleinschalige Ontwikkeling." LTV rapport K16, Vlaams-Nederlandse Scheldec commissie VNSC
- Dam, Gerard. 2013. "Harde Lagen Westerschelde." LTV-rapport A-28, Vlaams-Nederlandse Scheldec commissie VNSC
- Dam, Gerard, Mick van der Wegen, R. J. Labeur, en D. Roelvink. 2016. "Modeling Centuries of Estuarine Morphodynamics in the Western Scheldt Estuary." *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1002/2015GL066725>.
- Gruijters, 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.
- Van den Ham, G en Taccari, M.L., 2017 "Gedetailleerde beoordeling zettingsvloeiing ten behoeve van de restproblematiek oeverbestorting Zeeland." Rapport nr 11201411, Deltares in opdracht van Waterschap Scheldestromen
- Hijma, Marc. 2015. "Geology of the Dutch Coast," 41. Rapport nr 1220040-007-ZKS-0003, Deltares, Utrecht.
- Huismans, Y., G. van Velzen, T. S.D. O'Mahoney, G. Hoffmans, en A. P. Wiersma. 2016. "Scour Hole Development in River Beds with Mixed Sand-Clay-Peat Stratigraphy." *Scour and Erosion - Proceedings of the 8th International Conference on Scour and Erosion, ICSE 2016*, 801–7. <https://doi.org/10.1201/9781315375045-100>.
- Male, K van der. 2004. "Moeilijk Erodeerbare Lagen in de Westerschelde: Koppeling Met Bodemligging Vanaf 1800." RIKZ
- Mastbergen, Dick, Maria Luisa Taccari, en Geeralt van den Ham. 2018. "Beoordeling Drie Onderwateroevers Den Helder En Texel." Rapport nr 11201569, Deltares, in opdracht van HHNK.
- Mastbergen, D.R.; Beinssen, K.; Nédélec, Y. Watching the Beach Steadily Disappearing: The Evolution of Understanding of Retrogressive Breach Failures. *J. Mar. Sci. Eng.* **2019**, *7*, 368. <https://doi.org/10.3390/jmse7100368>
- Mastbergen, D.R., van der Vegt, H., van den Ham, G., 2019, "Onderzoek stabiliteit geulwandverdediging Westerschelde, Analyse metingen" Rapport nr 11203725 (in voorbereiding), Deltares .
- Sinke, O. 2017. "Monitoring Geulwanden Westerschelde; Locaties Ossenisse, Zuidergat, Baalhoek, Valkenisse, Bath En Saeftinghe." Rijkswaterstaat Centrale informatievoorziening.
- 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.
- Strafleu, J., en C.W. Dubelaar. 2016. "Product Specification Subsurface Model GeoTOP." Rapport nr R10133|1.3, TNO, Utrecht.
- Terwind, J. H J, H. N C Breusers, en J. N. Svasek. 1968. "Experimental Investigation on the Erosion-Sensitivity of a Sand-Clay Lamination." *Sedimentology* *11* (1–2): 105–14. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1968.tb00844.x>.
- Vermaas, Tommer, Marco de Kleine, en Chris Mesdag. 2018. "Kartering Bestortingen Vlietepolder En Margarethapolder." Rapport nr 11200538-001-ZKS-0006, Deltares, Utrecht.
- Vos, P.C. en Van Heeringen, R.M. 1997. "Holocene geology and occupation history of the Province of Zeeland". *Mededelingen Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO*, *59*(5), 109.
- Vroom, J., P.L.M. de Vet, en J. van der Werf. 2015. "Validatie Waterbeweging Delft3DNeVla Model Westerscheldemonding." Rapport nr 1210301-001-ZKS-0001, Deltares, Delft.

- Wegen, Mick van der, en Dano J A Roelvink. 2012. "Reproduction of Estuarine Bathymetry by Means of a Process-Based Model: Western Scheldt Case Study, the Netherlands." *Geomorphology* 179: 152–67. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.007>.
- Wilderom, M.H. 1968. *Tussen Afsluitdammen En Deltadijken, Deel 3, Midden Zeeland (Walcheren En Zuid-Beveland)*.

A Detailbeschrijvingen en discussie moeilijk-erodeerbare lagen voor specifieke gebieden

In de volgende paragrafen wordt een korte beschrijving gegeven met verwijzing naar de profielen 1- 11 en 16-23. De beschrijvingen zijn geclusterd per hoofdgeul of mesoschaal element (geul of plaat) en per macrocel van west naar oost.

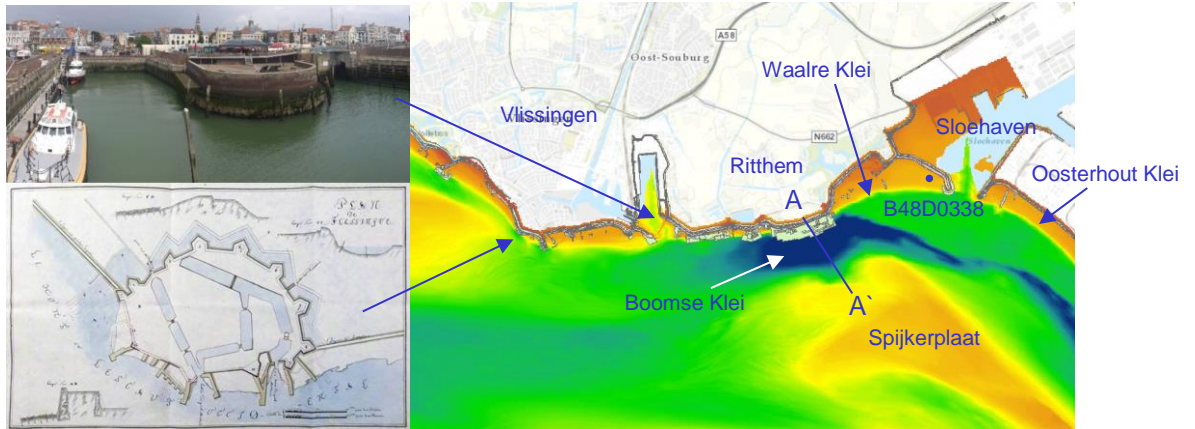
A.1 Ritthem, Rede van Vlissingen tot aan Borssele, Lange Zuidweg, Honte (profielen 1, 3)

De hoofdgeul van de Westerschelde bij de uitmonding in de Voordelta wordt gevormd door de Rede van Vlissingen die overgaat in de Honte en bij Vlissingen en Ritthem dicht onder de kust komt en een grote diepte bereikt (Figuur A.1.1). Als militair bolwerk in de Franse tijd werd Vlissingen al zwaar verdedigd. De Boulevard van Vlissingen met het Keizershoofd zijn hiervan een onderdeel maar ook bij Ritthem zijn belangrijke oeverwerken aangebracht. De oeverwerken lopen onder een steile helling van 1:3,5 tot een diepte van meer dan – 45 m. Er is hier nauwelijks een voorland aanwezig.

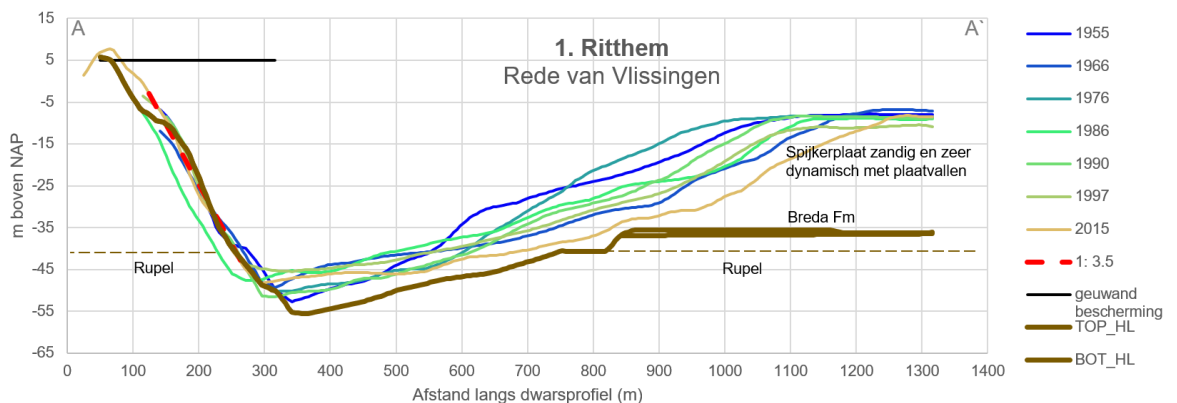
Figuur A.1.2 laat zien dat de geulbodem ingesneden is in de Rupel Formatie tot op –55 m. Hoewel niet zichtbaar op de precieze locatie van het dwarsprofiel, is het diepste deel van deze put tussen 2005 en 2015 meer dan 0.5 m per jaar geroodeerd (Figuur 4.4) in de Boomse Klei, welke deel uitmaakt van de Rupel Formatie. Het is waarschijnlijk dat de sterk geconsolideerde Boomse Klei de erosie van deze put remt, maar op sommige locaties in de geul is deze kleilaag inmiddels wel heel dun of geheel geërodeerd. Deze informatie is gebaseerd op data uit DINOLoket, aangezien voor de Rupel Formatie en oudere afzettingen geen laagdiktes gegeven worden in de originele harde-lagen dataset (Gruijters et al. 2004). Onder de Boomse Klei bevindt zich een zandige eenheid van de Tongeren Formatie. Hoewel deze zandige formatie diagenese heeft ondergaan over de laatste miljoenen jaren, waardoor het zand moeilijk erodeerbaar is geworden, is niet bekend in welke mate dit de sediment van de Tongeren Formatie de erosie in dit gebied zal remmen in vergelijking met de huidige Boomse-Kleibodem.

Tussen Ritthem en de Sloehaven erodeert de geulwand steeds verder in de inmiddels minder dan 2m dikke Waalre klei (Figuur 4.2 gecombineerd met data uit DINOLoket). Cleveringa (2013) maakt melding van natuurlijke harde lagen in de vorm van verkitte schelpenbanken in de Oosterhout formatie ("crag") bij de ingang van de Sloehaven, maar in de beschrijvingen van de meer dan 20 boringen in dit gebied werden crag-afzettingen enkel aangetroffen in boring B48D0338. Waarnemingen door onderwaterarcheologen vermelden het voorkomen van uit de wand stekende, verkitte schelpenbanken waarop delen van een scheepswrak lagen (Pers. mededeling, Arent Vos, RCE). Ten oosten van de ingang van Sloehaven vindt erosie plaats van het kleirijke sediment van de Formatie van Oosterhout (Figuur 4.2).

Aan de andere zijde van de geul ligt de zandige Spijkerplaat. Dit gebied is zeer dynamisch en er treden voortdurend plaatvallen op, maar het ligt gemiddeld onder een flauwe helling (1:20) en vertoont over langere termijn gezien wel erosie.



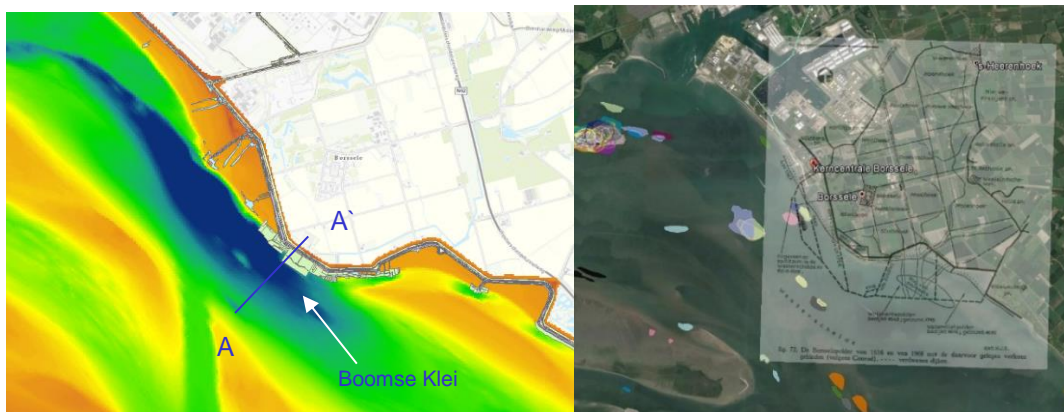
Figuur A.1.1 Links boven: Havenfront Vlissingen gezien vanaf Keizershoofd. Links onder: Ontwerp bolwerk Vlissingen in Franse tijd. Rechts: Detail ARCGIS Vlissingen met oeverwerk, bathymetrie en locatie van doorsnede.



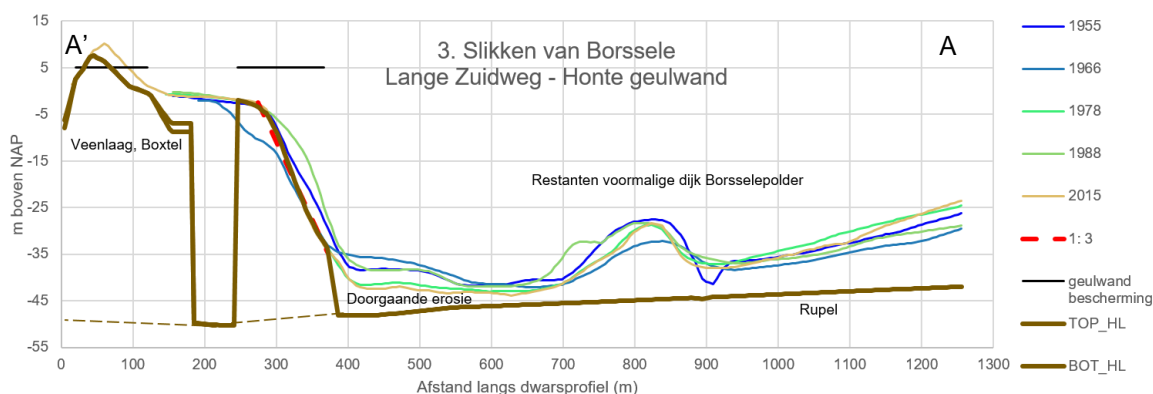
Figuur A.1.2 Dwarsprofiel1 met representatieve vakklodingen tussen 1955 en 2015 en diepteligging van de bovenste moeilijk-erodeerbare laag in bruin (opgebouwd uit verschillende geologische lagen, verdedigingswerken)

Het dwarsprofiel bij Borssele (Figuren A.3,4) is genomen ter hoogte van de Lange Zuidweg en snijdt de geulwand van de Honte die ook hier zeer diep en steil is. De geulwand bestaat deels uit natuurlijk harde lagen en loopt door tot in de Formatie van Rupel en waarschijnlijk nog dieper, tot in de Tongeren Formatie. De natuurlijke harde lagen in de geulwand zijn in de dataset aangegeven als behorend tot de Formatie van Boxtel op ~ -6 m. De boorgegevens van dit gebied zoals opgenomen in DINOLoket laten echter geen veenafzettingen in de Formatie van Boxtel zien, maar wel veen- en kleilagen in de Holocene afzettingen (NAWA, NIHO en NIBA) tot op een diepte van -5 m NAP. Ook zijn kleilagen uit de Eemformatie in DINOLoket op een diepte van ~ -19 m tot -20 m NAP te zien (bv. B48D0073); deze formatie is niet opgenomen in de harde-lagen dataset, waarschijnlijk vanwege het beperkt voorkomen in de Westerschelde.

De oeverwerken zijn aangelegd onder 1:3 tot -35 m. Aan de teen is nog sprake van doorgaande erosie. Delen van de polder gelegen tussen de Noord- en Zuidhol en tot Ellewoutsdijkpolder zijn verloren gegaan in de 17^e en 18^e eeuw, zie Figuur A.1.3 en Figuur A.1.4. Restanten van de afgeschoven dijk zijn nog terug te zien in het dwarsprofiel. Het diepste punt van de WS ooit gemeten lag hier op -65 m NAP, tegenover de koelwaterinlaat van de kerncentrale. Hier zijn ook verschillende grote oever- en dijkvallen opgetreden evenals aan de overzijde in de Spijkerplaat. Tegenwoordig resteert er nog een slikkengebied van ongeveer 100 m.



Figuur A.1.3 Links: Locatie van dwarsprofiel 3. Slikken van Borssele. Rechts: Overlay van kaart van oude polders (Wilderom 1968) en Google Earth.



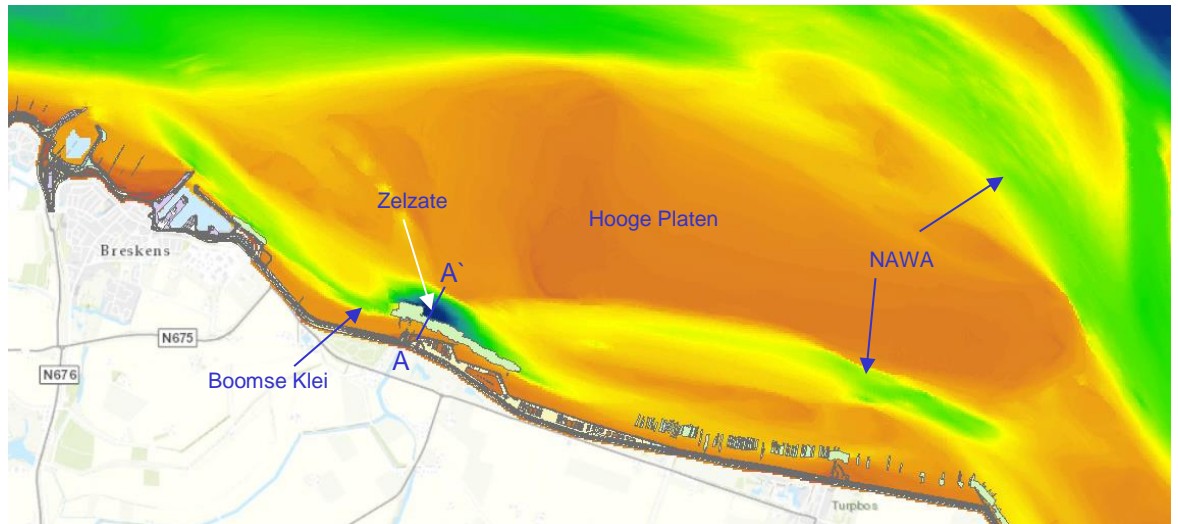
Figuur A.1.4 Dwarsprofiel 3 met representatieve vaklodingen tussen 2015 en in bruin de bovenste moeilijk-erodeerbare laag welke obgebouwd zijn uit harde verdedigingsweken en verschillende geologische lagen

A.2 Nummer Eén, Vaarwater langs Hoofdplaat (profiel 2)

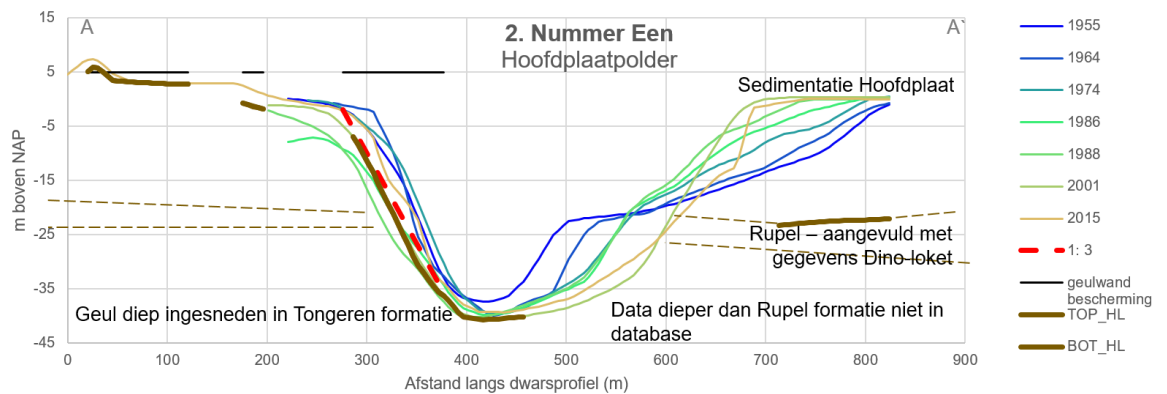
Het profiel bij Nummer Eén is diep ingesneden tot -40 m, door de Formatie van Rupel heen en tot in de Tongeren Formatie. Tot 1970 sneed de geul in, door een zandige eenheid van de Tongeren Formatie, welke makkelijker erodeert dan de sterk gecompacteerd Boomse Klei van de bovenliggende Rupel Formatie. Vanaf 1970 bereikt de erosie waarschijnlijk het kleiige Laagpakket van Zelzate (ook onderdeel van de Tongeren Formatie) waardoor de insnijding erosie geremd wordt (verticale erosie stopt) en waardoor de geul op deze locatie juist verbreedt (zie Figuur A.2.1 en Figuur A.2.2). Van de Formatie van Tongeren zijn geen data in de originele harde-lagen kartering opgenomen (Gruijters et al. 2004), en analyse is daarom gebaseerd op lithologische data uit DINOLoket.

Langs de gehele kust, van Breskens tot Paulinapolder zijn oeverwerken en strekdammen aangelegd om erosie tegen te gaan. Bij Nummer Eén ligt bovendien een uitwateringslus die beschermd wordt door oeverwerk onder een helling 1:3 tot -35 m NAP. Waarschijnlijk is daarom juist hier sprake van een diepe ontgrondingskuil. Ten westen van deze oeverwerken vindt ook doorgaande erosie plaats in de Boomse Klei, maar hier is de Rupel Formatie nog niet doorbroken (GeoTOP v1.3, DINOLoket). Het is niet bekend wat het verschil in erosiebestendigheid is tussen de Rupel en Tongeren Formaties. De geul ten oosten van Nummer Eén is uitgeruimd, maar langs de zuidzijde van de Hooge Plaat is sprake van

sedimentatie, hoewel er de laatste jaren weer van enige sedimentverlies sprake is uit de NAWA (Figuur 4.4). Dit is ook het geval ten noordoosten van de Hooge Platen.



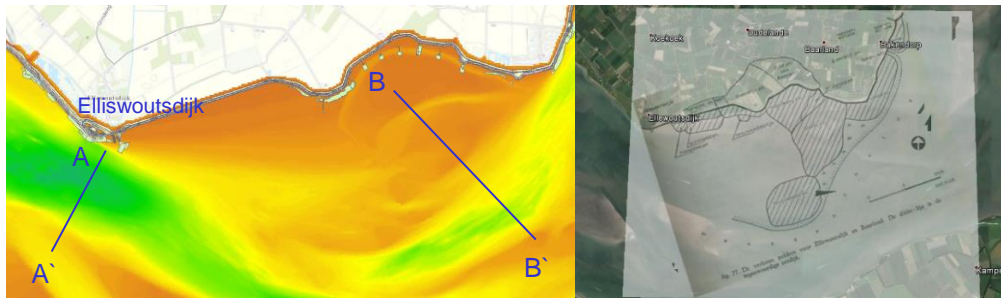
Figuur A.2.1 Detail ARCGIS Vaarwater langs Hoofdplaat met oeverwerk, bathymetrie en locatie van doorsnede.



Figuur A.2.2 Dwarsprofiel 2 met representatieve vaklodingen en in bruin de bovenste moeilijk-erodeerbare laag opgebouwd uit harde verdedigingswerken en verschillende geologische lagen.

A.3 Everingen en Schaar van Baarland (profielen 4 en 5)

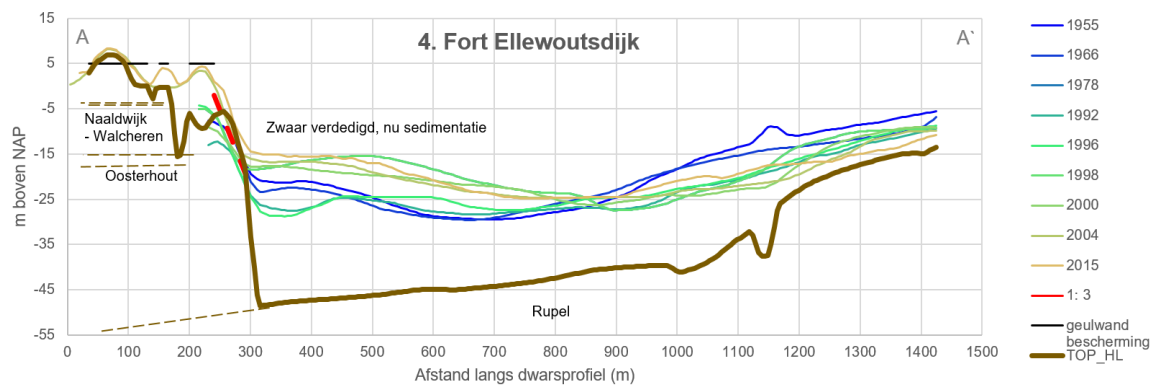
Het gebied en de locatie van de dwarsprofielen zijn te zien in Figuur A.3.1. Fort Ellewoutsdijk (profiel 4, Figuur A.3.3) is weer een voorbeeld van een zwaar verdedigd militair bolwerk (Figuur A.3.2, links), dat een vast 'ophangpunt' voor de kustlijn vormt. Van Ellewoutsdijk tot Bakendorp ligt nu een uitgestrekt slikkengebied, het Zuidgors en de Slikken van Everingen, ter hoogte van Zweemersdam (profiel 5, Figuur A.3.4, Figuur A.3.2 rechts). In dit gebied zijn verschillende polders verdwenen (Figuur A.3.2, rechts). Delen van eerder aangelegde oeverwerken zijn door sedimentatie van de Schaar van Baarland verzand en van de oude dijken zijn geen restanten meer te zien. Het gebied met platen, slikken, geulen en schorren is morfologisch zeer dynamisch (Figuur A.3.4).



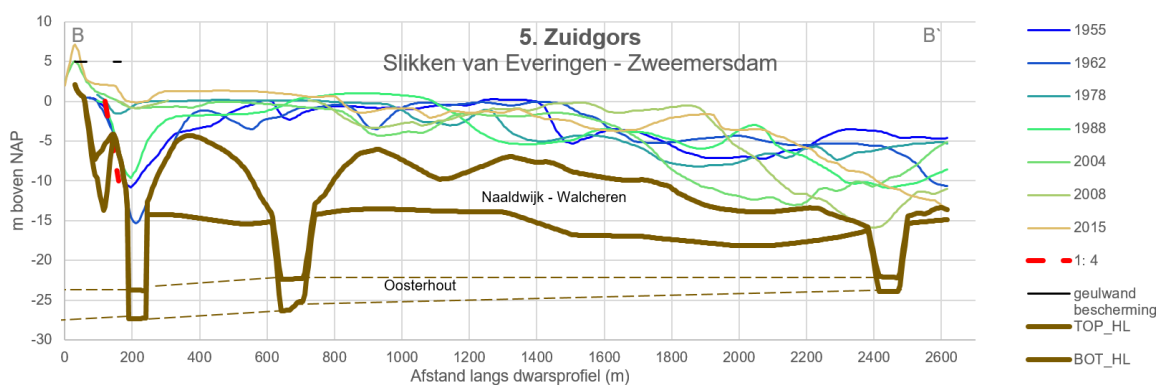
Figuur A.3.1 Links: Detail ARCGIS Everingen en Schaar van Baarland met oeverwerk, bathymetrie en locatie van doorsnede 4 en 5. Rechts: Overlay verloren polders bij Ellewoutsdijk en Baarland (Wilderom, 1968, met Google Earth).



Figuur A.3.2 Fort Ellewoutsdijk. Rechts: Zuidgors (Excursie NIOZ, 2014)



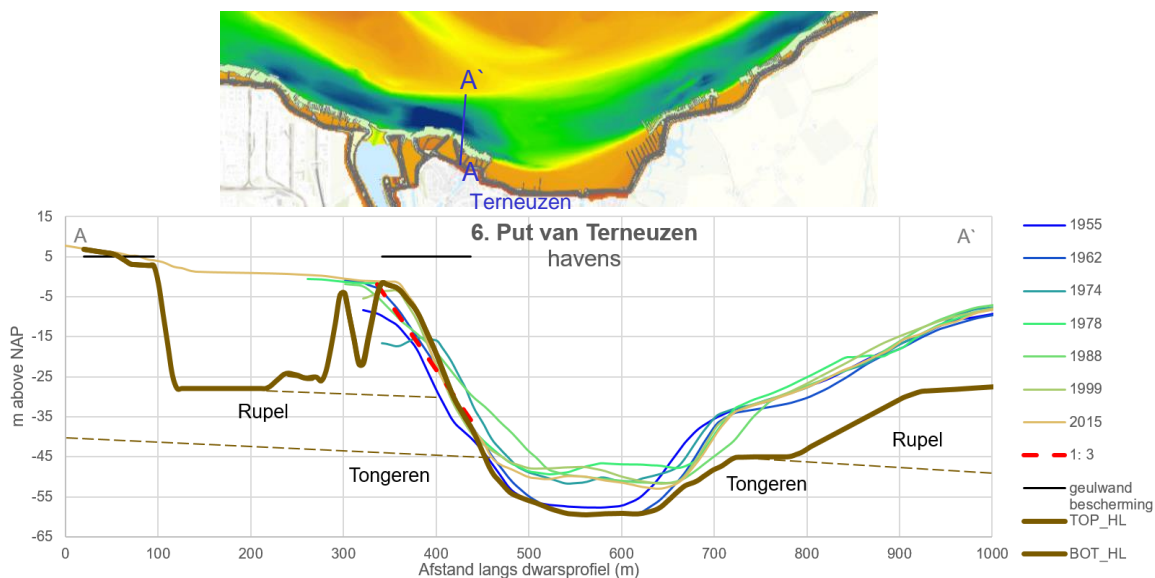
Figuur A.3.3 Dwarsprofiel 4 met representatieve vaklodingen en in bruin de bovenste moeilijk-erodeerbare laag opgebouwd uit harde verdedigingswerken en verschillende geologische lagen



Figuur A.3.4 Dwarsprofiel 5 met representatieve vaklodingen en in bruin de bovenste moeilijk-erodeerbare laag opgebouwd uit harde verdedigingswerken en verschillende geologische lagen.

A.4 Put van Terneuzen (profiel 6)

De Pas van Terneuzen heeft zich diep ingesneden in de gelijknamige Put, door de Rupel Formatie (tot ~ -45m NAP) tot op -60 m NAP, in de tweede zandige eenheid van de Tongeren Formatie. Hoewel zandig, wordt de Tongeren Formatie gezien als een moeilijk-erodeerbare laag tezamen met de Rupel Formatie. Het erosiegedrag is wel anders dan de sterk gecompacteerd Boomse Klei van de Rupel. Dat is te zien aan de erosieprofiel in Figuur A.4.1 waar tijdens de insnijding in de Rupel formatie de geulwand gradiënt toeneemt, waarschijnlijk wanneer de insnijding een Zandiger eenheid bereikt. Inmiddels wordt in dit gebied weinig tot geen erosie meer waargenomen in de vaklodingen, en is de diepte stabiel rond -50 m. Oeverwerken strekken zich uit tot -40 m, onder een helling van 1:3. Het gehele havengebied van Terneuzen en de Braakmanhaven zijn verdedigd met oeverwerken, naar het oosten bestaande uit strekdammen tot Griete.



Figuur A.4.1 Boven: Detail ARCGIS gebied bij Terneuzen met oeverwerken, bathymetrie en locatie van doorsnede. Onder: Dwarsprofiel 6 met representatieve vaklodingen en in bruin de bovenste moeilijk-erodeerbare laag opgebouwd uit harde verdedigingswerken en verschillende geologische lagen.

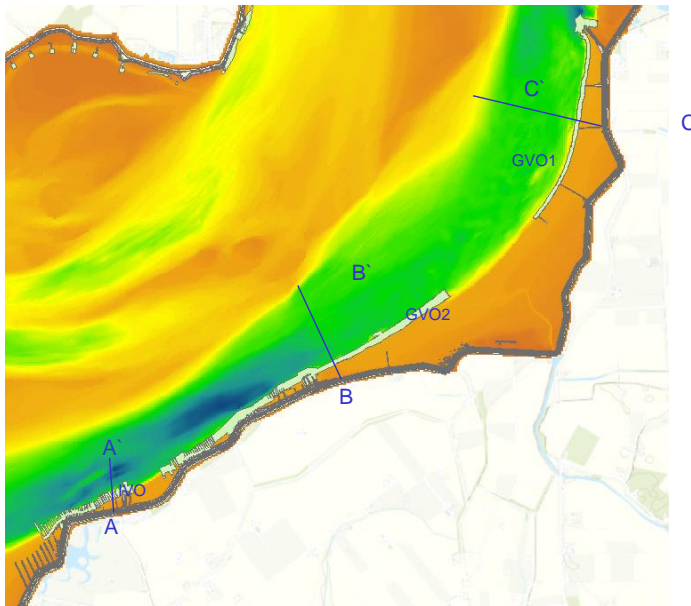
A.5 Gat van Ossensisse (profielen 7, 8, 9)

Op deze locatie zijn geulwandverdedigingen aangelegd, genaamd GVO 1 (1998) tot -15 m NAP bij Knuitershoek en Zeedorp en GVO2 (2000) bij Kampersche Hoek tot -11 m NAP (Figuur A.5.1). Deze moeten het achterliggende gebied, de Slikken van Hulst, beschermen en sluiten aan op eerder aangelegde oeverwerken. Bij GVO1 (profiel 9, Figuur A.5.2) ter hoogte van Knuitershoek, Zeedorp is te zien dat vanaf 1955 tot de aanleg van de GW (1998) wel 100 m erosie is opgetreden. Sindsdien is de erosie vooral in de diepte doorgegaan, De afstand tot de dijk is bijna 300 m dus voldoende, maar ondermijning van de GW dreigt hier wel.

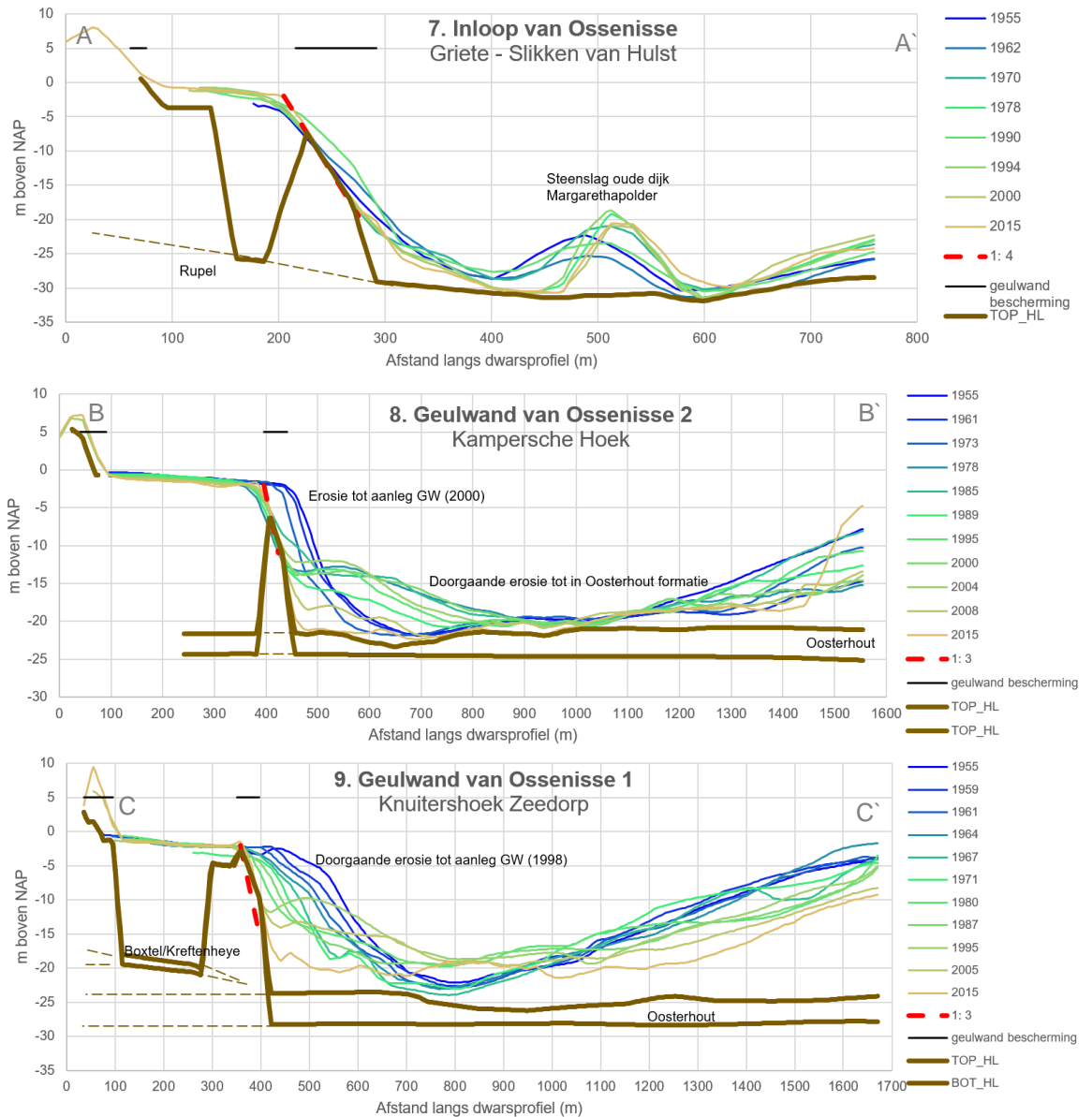
Tussen GVO1 en 2 ligt nog een onbeschermd stuk slikgebied waar de geul tussen 2005 en 2015 veel erosie toont (Figuur 4.4). De moeilijk erodeerbare kleilaag in dit slikgebied wordt in boring B48H0056 aangetroffen en beschreven in GeoTOP v 1.3 als Waalreklei. Deze kleilaag is aanwezig tot -26,4 m, met eronder een makkelijker erodeerbare zandlaag uit de Oosterhout Formatie. Bij GVO2, Kampersche Hoek, (profiel 8, Figuur A.5.2), is ook sprake van doorgaande erosie in de diepte, nu al tot -21 m NAP. De tot nog toe uitgevoerde

proefstoringen hebben een geringe levensduur en geven dus geen soulaas. Hier wordt nu de Oosterhout klei geërodeerd, welke tot op heden nog erosie-remmend werkte in dit gebied. Onder de kleilaag van Oosterhout zijn de zandige lagen van de Formaties van Oosterhout en Breda te vinden. In gebieden waar de Oosterhout Formatie volledig geërodeerd is (Figuur 4.2, Figuur 4.4) gaat de erosie juist sneller door tot op de volgende harde laag, de Boomse Klei van de Rupel Formatie. Bij Kampersche Hoek ligt de Boomse Klei op ~ -33m, dus is de bescherming van deze GW wel gebaat bij het tegenhouden van het doorbreken van de Oosterhout kleilaag.

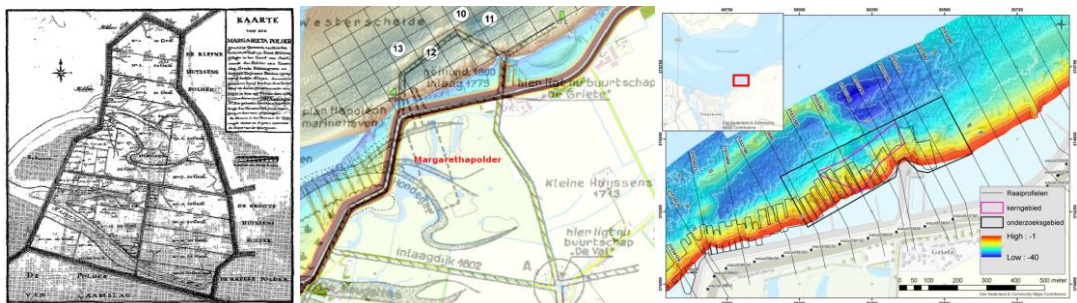
Bij de Inloop van Ossensisse (IVO, profiel 7, Figuur A.5.2) is de geul vrij diep, tot meer dan -30 m NAP. In dit profiel is het restant van de voormalige noordelijke dijk van de Margarethapolder te zien die in 1744 is aangelegd (Figuur A.5.3, links), in 1800 verloren is gegaan en nu nog te zien is als restant van de oude dijk. De contouren zijn ook zichtbaar in de kaart en in boxcores is steenmateriaal gevonden (Bijleveld et al. 2018) (Figuur A.5.3, midden). Hier is ook geofysische onderzoek uitgevoerd door Deltares om de ligging van de bestorting vast te stellen (Vermaas et al. 2018), (Figuur A.5.3, rechts).



Figuur A.5.1 : Detail ARCGIS Gat van Ossensisse met oeverwerken, bathymetrie en locatie van doorsnede 7 (A-A'), 8 (B-B'), 9 (C-C').



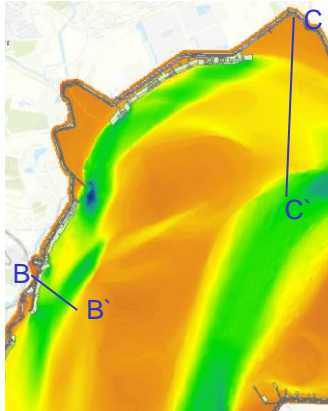
Figuur A.5.2 Dwarsprofiel 7, 8 en 9 met representatieve vakclodingen en in bruin de bovenste moeilijk-erodeerbare laag opgebouwd uit harde verdedigingswerken en verschillende geologische lagen.



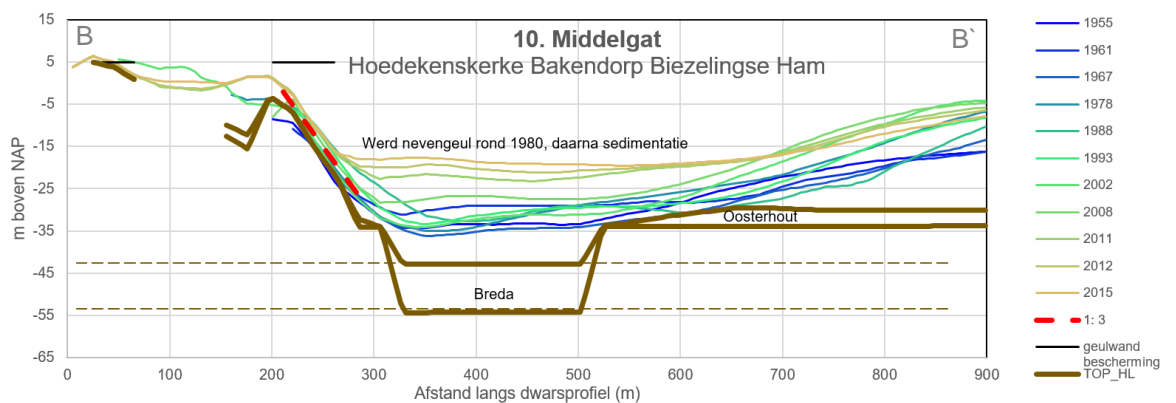
Figuur A.5.3 Links kaart 1742 Margarethapolder bij indijking. Midden: Locatie boxcores in overlay met contouren oude dijk, RWS 2018. Rechts: Kartering oeverwerken bij Margarethapolder (Vermaas et al, 2018).

A.6 Middelgat (profiel 10 en 11)

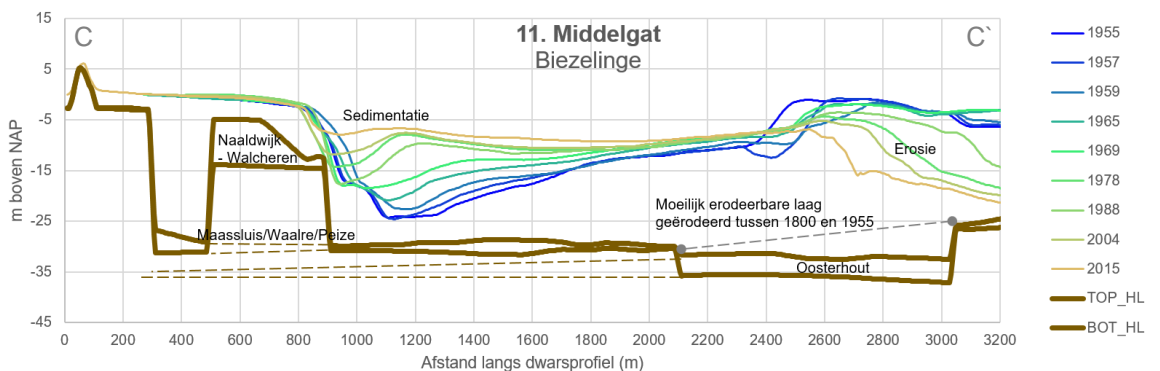
De geul Middelgat bij Hoedekenskerke en Bakendorp (profiel 10, Figuur A.6.2) laat de steile oever zie met oeverwerken tot -30 m NAP onder een helling van 1:3. Rond 1980 veranderde het stromingsregime en het Middelgat werd nevengeul en sedimenteren sindsdien. De risico's voor de waterkering maar ook voor de slikkengebieden Biezelingse Ham en Kapellebank (profiel 11, Figuur A.6.3) (voormalige polders) zijn afgenomen.



Figuur A.6.1 Detail ARCGIS Middelgat met oeverwerk, bathymetrie en locatie van doorsnede 10 (B-B'), 11 (C-C').



Figuur A.6.2 Dwarsprofiel 10 met representatieve vaklodgingen en in bruin de bovenste moeilijk-erodeerbare laag opgebouwd uit harde verdedigingswerken en verschillende geologische lagen.



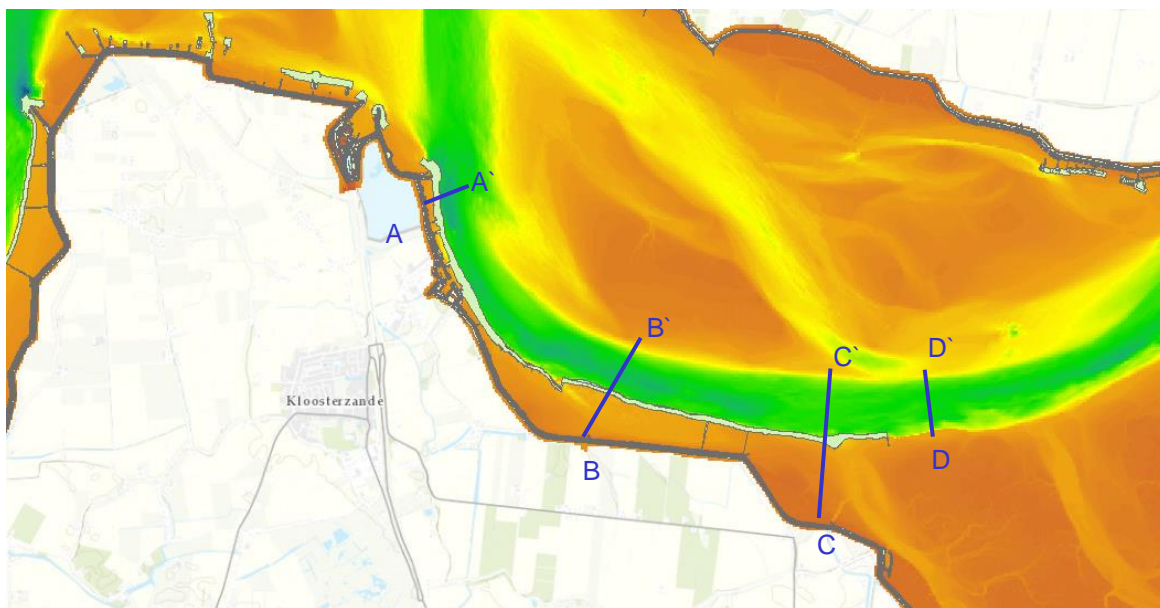
Figuur A.6.3 Dwarsprofiel 11 met representatieve vaklodgingen en in bruin de bovenste moeilijk-erodeerbare laag opgebouwd uit harde verdedigingswerken en verschillende geologische lagen.

A.7 Zuidergat van Haven van Walsoorden tot Baalhoek (profielen 16, 17, 18 en 19)

Het Zuidergat inclusief de Bocht van Walsoorden strekt zich uit van de Drempel van Hansweert tot de Overloop van Valkenisse, dus globaal van de haven van Walsoorden tot het Land van Saeftinghe voorbij het Schor van Baalhoek en de Plaat van Walsoorden (Figuur A.7.1 en Figuur A.7.2).



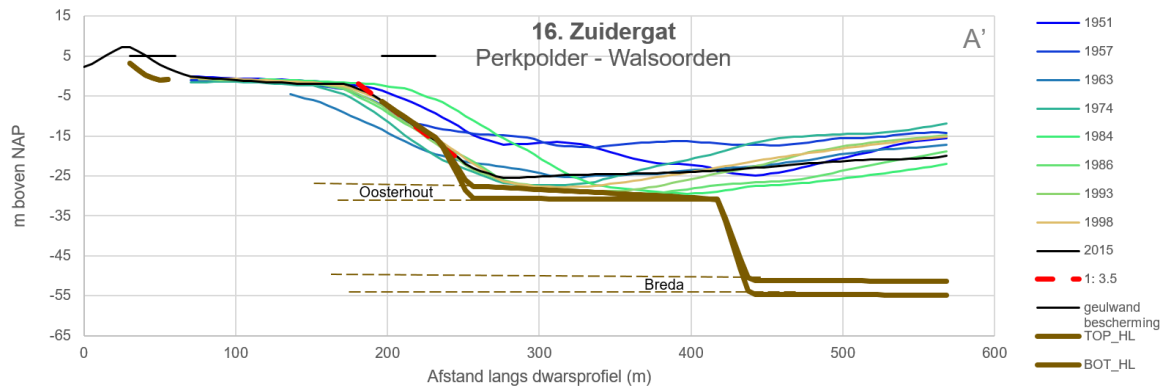
Figuur A.7.1 Schorren ten Z van Walsoorden richting Baalhoek



Figuur A.7.2 Detail ARCGIS Zuidergat van haven van Walsoorden tot Baalhoek met oeverwerk, bathymetrie en locatie van doorsnede 16 (A-A'), 17 (B-B'), 18 (C-C') en 19 (D-D').

Profiel 16 (Figuur A.7.3), ten noorden van Walsoorden, geeft een vrij stabiel beeld na aanleg van de oeverwerken. Ontgraving wordt hier tegengehouden door een laag van de Formatie van Oosterhout. Het is wel opmerkelijk dat in het verleden deze laag in de geul, verder weg van de oeverwerken wel geërodeerd werd en nu niet meer aanwezig is. Echter, de morfologische ontwikkeling tussen 2005 en 2015 duidt meer op afzetting dan erosie in dit gebied (Figuur 4.4).

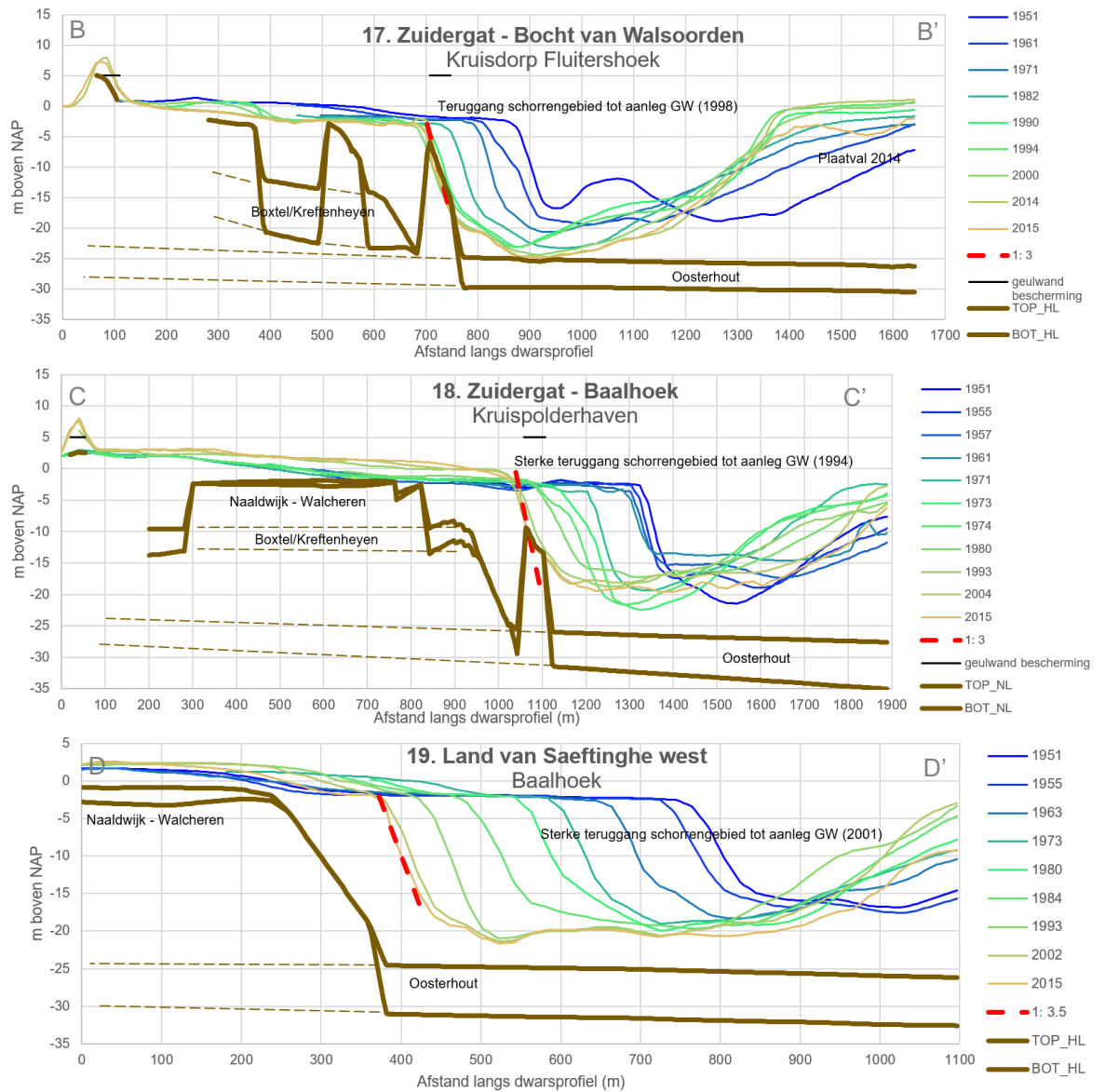
A



Figuur A.7.3 Dwarsprofiel 16 met representatieve vaklodingen en in bruin de bovenste moeilijk-erodeerbare laag opgebouwd uit harde verdedigingswerken en verschillende geologische lagen.

Ten zuiden hiervan sluit de later aangelegde geulwandverdediging aan op de oeverwerk in profielen 17, 18 en 19 (Figuur A.7.4). De geulwandverdediging beschermt het Schor van Baalhoek tot Land van Saeftinghe west, aangelegd in de perioden 1998, 1994 resp. 2001. Ter hoogte van Kruisdorp Fluitershoek (profiel 17) is de opgetreden erosie van het schor tot de aanleg van de bescherming (1998) wel 200 m. Nu resteert nog een breed gebied van meer dan 400 m tot de dijk. De geulwandverdediging is aangelegd in 1998 tot -18 m onder een helling van 1:3. Er is nog wel sprake van verdere verdieping en thans (2015) lijkt de Oosterhout Formatie aangesneden te worden op -25 m NAP. Aan de binnenzijde is de grote plaatval van 2014 in de Plaat van Walsoorden zichtbaar. De taluds zijn hier flauw, ongeveer 1:10 of minder. Bij Kruispolderhaven (profiel 18; C-C') is de geulwandverdediging aangelegd in 1994 van -0,5 tot -19 m NAP onder een helling van 1:3 en lijkt nu stabiel, nadat voorheen ook hier een sterke teruggang van het slikkengebied was opgetreden. Het voorland van de waterkering is nog steeds bijna 1 km breed.

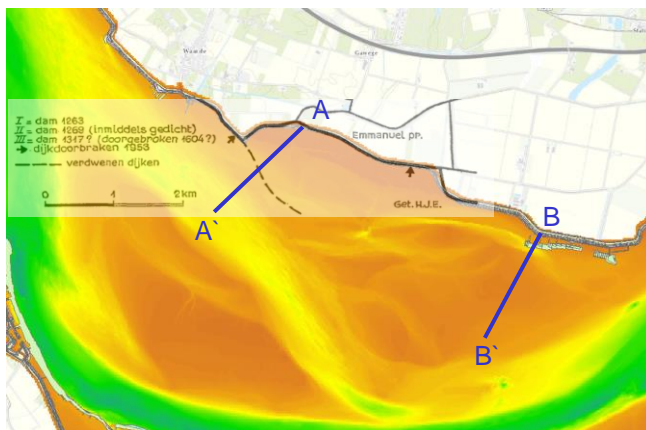
Bij het Land van Saeftinghe west (profielen 19; D-D') was de opgetreden erosie sinds 1951 zelfs 400 m tot de aanleg van de geulwandverdediging in 2001 van -2 tot -17 m. Op deze locatie is een geulwandverdediging aanwezig, maar deze wordt niet weergegeven in de dataset.



Figuur A.7.4 Dwarsprofielen 17, 18 en 19, met representatieve vaklodingen en in bruin de bovenste moeilijk-erodeerbare laag opgebouwd uit harde verdedigingswerken en verschillende geologische lagen.

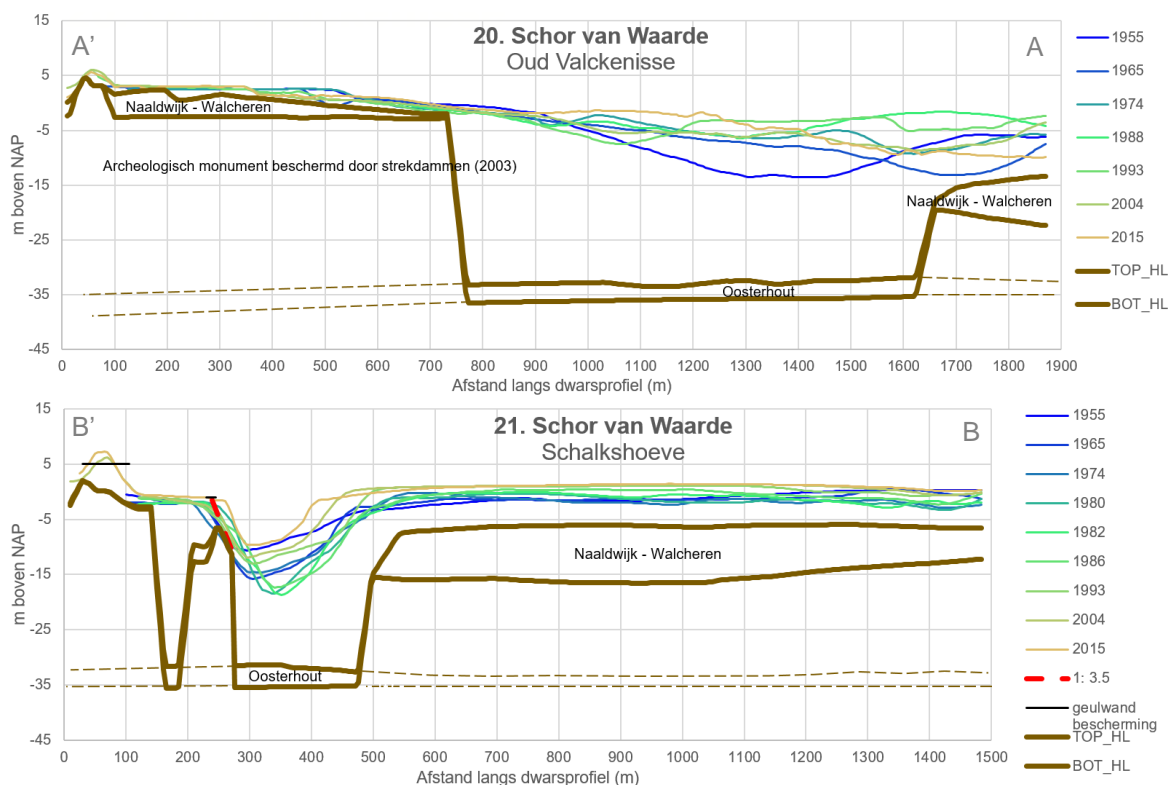
A.8 Schaar van Waarde (profielen 20 en 21)

Het Schor van Waarde ligt ook op een voormalig poldergebied (Figuur A.8.1).



Figuur A.8.1 Detail ARCGIS Schor van Waarde met oeverwerk, bathymetrie en locatie van doorsnede 20 (A-A') en 21(B-B') met in overlay verdwenen dijk en locaties dijkdoorbraken 1953 (Wilderom 1968).

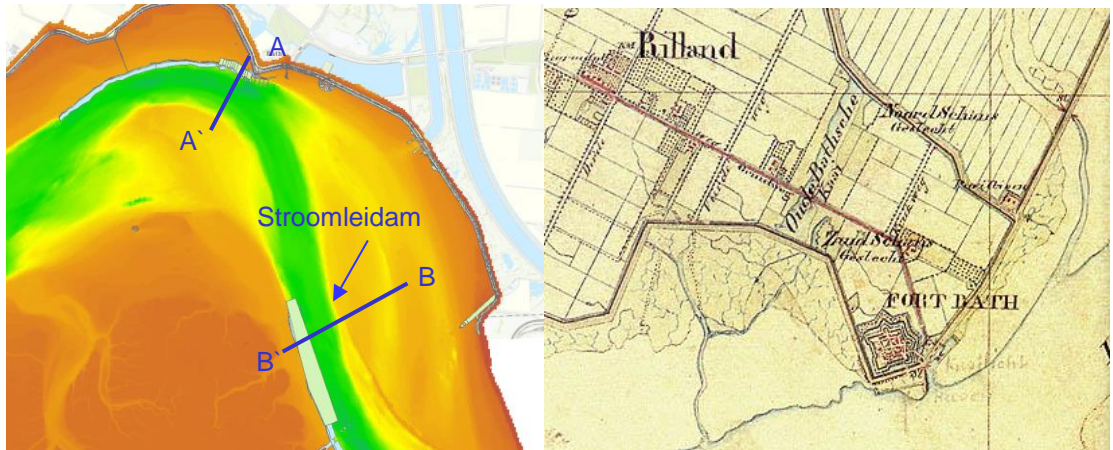
Bij Oud Valckenisse (profiel 20, Figuur A.8.2) zijn in 2003 strekdammen aangelegd ter bescherming van een archeologisch monument, het verdronken dorp Valckenisse. Na de dijkdoorbraken in 1953 is besloten het gebied niet weer in te polderen maar te behouden als natuurgebied. Bij Schalkshoeve bedreigde de opschuivende Schaar van Waarde (profiel 21, Figuur A.8.2) het schorregebied. Hier is omstreeks 1965 een oeverwerk aangelegd tot -12 m, maar de nevengeul sedimenteert tegenwoordig weer.



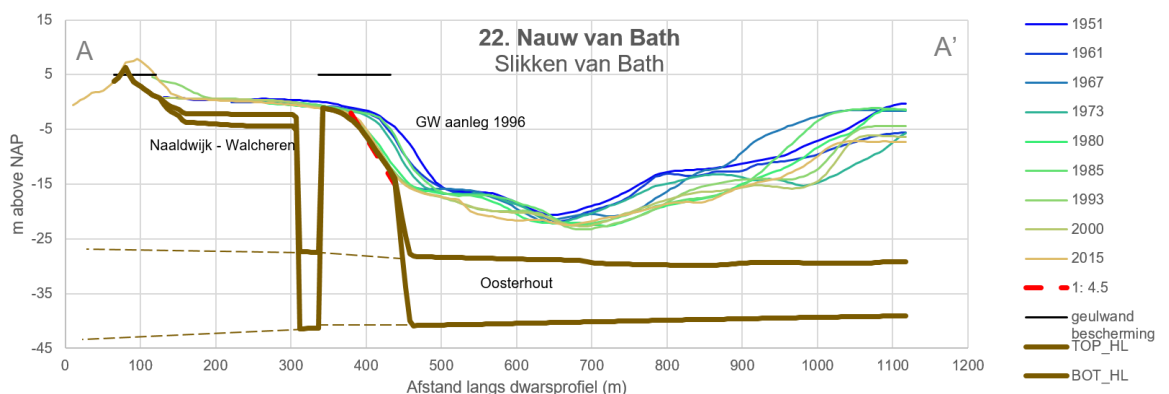
Figuur A.8.2 Dwarsprofielen 20 en 21 met representatieve vaklodingen en in bruin de bovenste moeilijk-erodeerbare laag opgebouwd uit harde verdedigingswerken en verschillende geologische lagen.

A.9 Nauw van Bath en Land van Saeftinghe oost, Pas van Rilland (profiel 22, 23)

Fort Bath vormt weer een sterk verdedigd vooruitgeschoven bolwerk dat functioneert als 'ophangpunt' van de kustlijn (Figuur A.9.1). In 1996 is hier een geulwandverdediging aangelegd tot -17 m NAP, aansluitend op het oeverwerk bij het Fort om de Slikken van Bath te beschermen. Hier is nog sprake van een stabiel voorland van ruim 200 m alsook bescherming tegen verticale erosie door de harde kleilaag van de Oosterhout formatie.

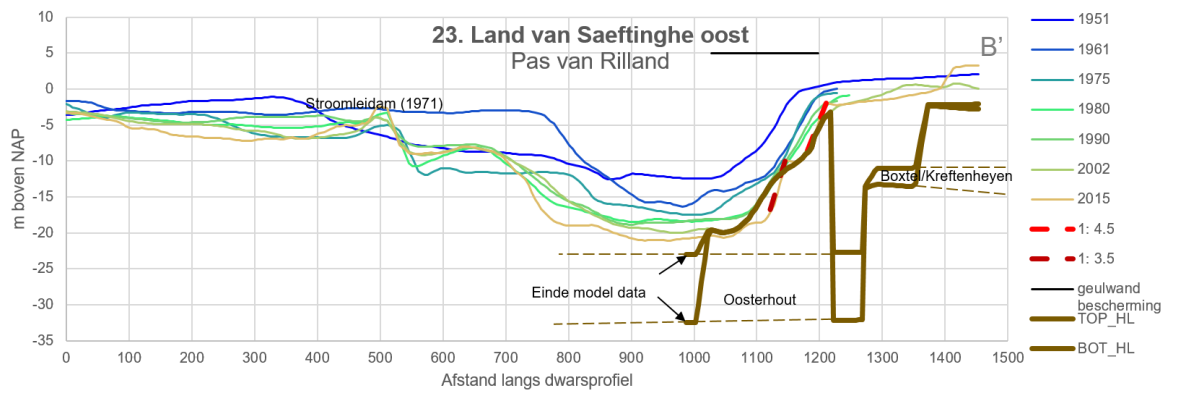


Figuur A.9.1 Links: Geulwandverdediging en oeverwerk Bath (ARCGIS). Rechts historische kaart Fort Bath met Slikken van Bath



Figuur A.9.2 Dwarsprofiel 22 met representatieve vaklodingen en in bruin de bovenste moeilijk-erodeerbare laag opgebouwd uit harde verdedigingswerken en verschillende geologische lagen.

De hoofdgeul Pas van Rilland is hier sterk verdiept tot -22 m tot in de Oosterhout Formatie (profiel 23, Figuur A.9.3). In 1971 is de Stroomleidam aangelegd. De geulwandverdediging is aangelegd in 2002, van -2 tot -22m NAP en beschermt de oostelijke vooroever van het Land van Saeftinghe, maar ook de hier al in 1965 aangelegde gaszinker die verder loopt door de corridor van het Sieperdaschor (Gasdam).



Figuur A.9.3 Dwarsprofiel 23 met representatieve vaklodingen en in bruin de bovenste moeilijk-erodeerbare laag opgebouwd uit harde verdedigingswerken en verschillende geologische lagen.

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