

Onderzoek stabiliteit geulwandverdediging Westerschelde

Analyse metingen



Onderzoek stabiliteit geulwandverdediging Westerschelde

Analyse metingen

Auteur(s)

Dick Mastbergen

Helena van der Vegt

Geeralt van den Ham

Onderzoek stabiliteit geulwandverdediging Westerschelde

Analyse metingen

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat
Contactpersoon	Dick Mastbergen
Referenties	Zie hoofdstuk 6
Trefwoorden	Vooroevers, bestortingen, zettingsvloeiing, slikken en schorren, vaarwegbeheer, oeverstabiliteit, beoordelingsmethodiek
Documentgegevens	
Versie	2.0
Datum	25-03-2020
Projectnummer	11203725-000
Document ID	11203725-000-ZKS-0012
Pagina's	69
Status	definitief
Auteur(s)	
	Dick Mastbergen
	Helena van der Vegt
	Geeralt van den Ham

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Dick Mastbergen	Marcel Taal	Toon Segeren	
	Helena van der Vegt			
	Geeralt van den Ham			

Samenvatting

Langs de Westerschelde zijn geulwandverdedigingen aangebracht bij Ossenisse, Zuidergat / Overloop van Valkenisse, Bath en Saeftinghe. De geulwandverdedigingen hebben de gestage achteruitgang van de slikken en schorren door het uitbochten van de geulen gestopt, maar de geulerosie heeft zich daarna verticaal voortgezet. Uit metingen blijkt dat delen van geulwandverdedigingen niet voldoen aan de criteria voor een eenvoudige toets in het WBI 2017. Rijkswaterstaat Zee en Delta heeft Deltares daarop om onderzoek gevraagd, uitgevoerd binnen het KPP Schelde-estuarium 2019 en 2020.

De vier door Rijkswaterstaat gestelde onderzoeksvragen zijn:

- 1) Wat is de huidige staat van de geulwandverdedigingen in de Westerschelde?
- 2) Bij welke staat van de geulwandverdedigingen dienen maatregelen genomen te worden om falen te voorkomen?
- 3) Welke benodigde maatregelen kunnen worden verwacht in de komende 15 jaar?
- 4) Kunnen de geulwandverdedigingen in de Westerschelde worden hersteld conform het ontwerp van de vooroeververdedigingen?

Hieronder staan de belangrijkste bevindingen.

Bij de geulwandverdedigingen 'Ossenisse 1 en 2' is de teen van de geulwandverdediging voor een deel afgestort op een eerdere suppletie. Bij de rand van de teen is er sprake van snelle erosie, ondanks periodieke suppleties. Dit leidt tot een zeer steil en instabiel front van los zand dat gestaag terugschrijdt en waar geregeld oevervallen optreden. Maatregelen zijn hier noodzakelijk. Bij de locaties Zuidergat, Bath en Saeftinghe (oost) is er geen sprake van sterke versteiling en ondermijning. De erosie gaat hier langzaam omdat zich hier natuurlijke erosieresistente harde lagen bevinden. Geconcludeerd wordt dat bij Ossenisse 1 en 2 herstel nodig is om te voorkomen dat in de komende jaren (nog grotere) schade zal optreden. Hiervoor worden suggesties gedaan in dit rapport.

In de onbeschermd zone tussen de geulwandverdedigingen Ossenisse 1 en 2 vindt behalve verdieping ook nog gestage achteruitgang van de vooroever, dus aantasting van het slik plaats, evenals bij de onbeschermd zones bij Bath en Land van Saeftinghe / Overloop van Valkenisse.

Aanbevolen wordt de WBI ontwerp- en beoordelingscriteria voor behoud van stabiliteit van geulwanden als aanvulling op de bestaande richtlijnen te hanteren. Het is noodzakelijk om een norm toe te voegen aan WBI 2017 in het geval van erosie bij de teen.

Data en kennis van de diepteligging van de teen moeten worden verbeterd en aanbevolen wordt een digitaal 3D-datamodel te maken van de geulwandverdedigingen. Omdat van de beschikbare meetmethoden voor de diepteligging van de bestorting geen enkele altijd bruikbaar is gebleken, wordt een onderzoek naar het gebruik van de meetmethoden aanbevolen. Dit kan in samenwerking met het opstellen van een Handboek bestortingen dat in kader van KPP B&O Kust gebeurt.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Doel van dit rapport	7
1.2	Overzicht ontwikkelingen Westerschelde	7
1.3	Oeverwerken	8
1.4	Geulwandverdediging	9
1.5	Geologische formaties in de Westerschelde	11
2	Data en Methodologie	13
2.1	Bathymetrie data	13
2.2	Data geulwandverdedigingen en oeverwerken	14
2.3	Ontwerpgegevens geulwandverdedigingen	14
3	Beoordelingscriteria en ontwerprichtlijnen	16
3.1	Inleiding	16
3.2	Standzekerheid oever-en geulwandverdedigingswerken	16
3.3	Beoordelingscriteria onderwatertalud	17
3.4	Evaluatie ontwerpregels steenbestorting	18
3.5	Conclusies	20
4	Analyse metingen en conclusies per locatie	21
4.1	Ossensisse 1	22
4.1.1	Ligging oeverwerken en raaien detailbathymetriekaartjes	22
4.1.2	Ontwerptekeningen geulwandverdediging	25
4.1.3	Dwarsprofielen vaklodingen met geologische harde lagen	26
4.1.4	Dwarsprofielen detailmetingen	27
4.1.5	Conclusies Ossensisse 1	29
4.2	Ossensisse 2	30
4.2.1	Ligging oeverwerken en raaien	30
4.2.2	Detailbathymetrie en verschilkaarten	30
4.2.3	Ontwerptekeningen geulwandverdediging	35
4.2.4	Dwarsprofielen in vaklodingen met geologische harde lagen	36
4.2.5	Dwarsprofielen detailmetingen	36
4.2.6	Dwarsprofielen in Excelsheets detailmetingen 2000 t/m 2012	38
4.2.7	Conclusies Ossensisse 2	41
4.3	Zuidergat, Baalhoek en Overloop van Valkenisse	42
4.3.1	Ligging oeverwerken	42
4.3.2	Detailkaarten Zuidergat, Baalhoek en Overloop Valkenisse	42
4.3.3	Vaklodingen met geologische ligging harde lagen	49
4.3.4	Dwarsprofielen detail	50
4.3.5	Conclusies Zuidergat, Baalhoek en Overloop van Valkenisse	52
4.4	Bath	53
4.4.1	Ligging oeverwerken	53
4.4.2	Detailkaarten Bath	53
4.4.3	Vaklodingen met geologische liggen harde lagen	56
4.4.4	Dwarsprofielen detail	56
4.4.5	Conclusies Bath	57
4.5	Verdronken Land van Saeftinghe (oost)	58

4.5.1	Ligging oeverwerken	58
4.5.2	Verschilkaarten Saeftinghe (oost)	58
4.5.3	Vaklodingen met geologische ligging harde lagen	60
4.5.4	Dwarsprofielen detail	61
4.5.5	Conclusies Saeftinghe (oost)	61
5	Conclusies en aanbevelingen	62
5.1	Conclusies analyse metingen	62
5.2	Antwoorden op vragen	62
5.3	Aanbevelingen	64
5.4	Mogelijke herstelmaatregelen	66
6	Referenties	67

1 Inleiding

1.1 Doel van dit rapport

Langs de Westerschelde zijn op meerdere locaties geulwandverdedigingen aangebracht tussen 1994 en 2001. Tot nu toe is daaraan geen onderhoud uitgevoerd, met uitzondering van herstel van een schade na een aanvaring. Uit metingen van Rijkswaterstaat CIV bleek echter dat delen van geulwandverdedigingen niet voldoen aan criteria voor een eenvoudige toets in het WBI2017. Rijkswaterstaat Zee en Delta heeft Deltares daarop om onderzoek gevraagd met als doel het inzichtelijk maken van de huidige staat van de geulwandverdedigingen en het verwachte benodigde onderhoud (memo van 8 juli 2019, Van der Sleen, 2019, zie bijlage A). Advies wordt ook gevraagd over richtlijnen om in te schatten wanneer welk onderhoud aan de geulwandverdedigingen nodig is. De door Rijkswaterstaat gestelde onderzoeksvragen zijn overgenomen in hoofdstuk 5.2, steeds gevolgd door de antwoorden die het onderzoek kon geven. De aanpak van het onderzoek was de analyse van de beschikbare metingen over de bodemontwikkeling van de geulwandverdediging in samenhang met de aanlegtekeningen en de geologie. Op basis daarvan zijn uitspraken gedaan over stabiliteit en de eventuele noodzaak van maatregelen. Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van KPP Schelde-estuarium 2019 en 2020.

1.2 Overzicht ontwikkelingen Westerschelde

De geulen in de Westerschelde zijn in de afgelopen eeuwen steeds breder en dieper geworden en de invloed van het getij is toegenomen. Dit heeft geleid tot steeds sterkere uitschuring van de buitenbochten, gepaard gaande met dijk- en oevervallen en voortdurend landverlies. Alleen waar natuurlijke harde lagen aanwezig zijn in de geulwand of waar voldoende bescherming geboden kon worden in de vorm van de sinds de 19^e eeuw aangelegde oeverwerken, kon de erosie tot staan gebracht worden. Zo zijn op veel locaties door natuurlijke geulverlegging of -verdieping en stormvloed en eerder ingedijkte polders weer verloren gegaan (Wilderom, 1968, 1973).

Door verdediging van de steile buitenbochten vindt er tegenwoordig weliswaar geen landverlies meer plaats, maar nog wel verdere verdieping van de geulen. De van nature sedimenterende binnenbochten kunnen door de verdediging niet meer mee opschuiven (meanderen), waardoor de onderwaterhelling versteilt met als gevolg periodieke plaatvallen (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 in de vaarweg hebben een belangrijke invloed op de ontwikkelingen zoals een verdere verruiming en toename van het getij, maar er is overeengekomen om al het gebaggerde sediment binnen het systeem terug te storten (bijv. in de diepere delen, zie bijv. Deltares, 2019).

Om de natuurlijke waarden in de Westerschelde te behouden, met name de vogelrijke slikken- en schorregebieden en om de vaargeul vast te leggen, heeft Rijkswaterstaat bij de 2^e verdieping van de Westerschelde (1995-2000) op een aantal locaties ter aanvulling van de bestaande oeverwerken een geulwandverdediging aangelegd (MOVE 2003, Saathof, 2008). Ook vindt op sommige plaatsen gecontroleerde ontpoldering plaats (Perkpolder) of zijn daarvoor plannen voorbereid (Hedwigepolder) en

worden plaatranden onderhouden door gericht storten van onderhouds-baggerspecie. Dit is onderdeel van de Flexibele Stortstrategie die is gekoppeld aan de vergunning en die volgt uit de MER als mitigerende maatregel.

De Westerschelde kan dus beschouwd worden als een actief getijdebekken, waarin de geulen en zandplaten zich slechts in beperkte mate vrij kunnen bewegen binnen de vastgelegde randen die bestaan uit oeverwerken ter bescherming van de dijken, geulwandverdedigingen en natuurlijke slecht-erodeerbare klei-, veen of schelpenlagen in de geulwanden.

1.3 Oeverwerken

Het voorliggende rapport gaat specifiek over de geulwandverdediging in de Westerschelde, maar deze sluiten aan op bestaande oeverwerken die in deze paragraaf kort beschreven worden. Voor deze oeverwerken gelden dezelfde overwegingen als voor de geulwandverdediging, maar ze zijn in het beheer van Waterschap Scheldestromen.

Onder oeverwerken 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 (Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium) of BOI 2023 (Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium) normen voor stabiliteit / standzekerheid van de vooroever. Ze worden daarom beoordeeld op de faalmechanismen zettingsvloeiing en / of afschuiving (oever- of dijkval). Zie bijv. Deltares, 2017.

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 van de waterkering op NAP of GHW kan gezien worden als de buitengrens van het waterbekken van de Westerschelde. De oeverwerken daarentegen liggen dieper, vaak op -0,5 tot -2 m NAP en verder weg van de dijk en liggen dus duidelijk in het waterbekken en beïnvloeden daarmee duidelijk de hydrodynamica en de morfologie. Hoewel in de kaarten het oppervlak van de oeverwerken gering lijkt betreft het veelal wel steile oevers (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, maar gezien de ondiepte zijn de stroomsnelheden hier gering en kan er slib bezinken. Daardoor kunnen zich slikkengebieden vormen die bij laagwater droogvallen (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 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 (bijv. bij 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 1-1) onder een helling van 1:3 tot 4. De zandige binnenbochten waar voortdurend aanzanding van de plaatranden plaats vindt liggen meestal onder een helling van 1:10 tot 15. 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.



Figuur 1-1 Aanleg oeverwerk; links positioneren zinkstuk, rechts bestorten van een zinkstuk (foto's RWS Beeldbank)

Langs sommige oevers is het gevaar geweken omdat de hoofdgeul zich heeft verlegd en er sedimentatie optreedt (bijv. Middeldgat sinds 1980), de oeverwerken liggen dan deels onder het zand. Soms zijn onder water nog restanten van oude oeverbescherming terug te vinden van reeds verloren gegane polders (zoals bij Borssele en Margarethapolder, zie bijv. RWS, 2017, Vermaas et al, 2018), soms ook zijn deze niet meer zichtbaar maar mogelijk nog wel van invloed (polders van Baarland, Schor van Waarde).

1.4 Geulwandverdediging

Onder geulwandverdediging verstaan we de oeverwerken in de Westerschelde die in beheer zijn van Rijkswaterstaat, zie tabel 1. Documentatie van RWS bestaat uit aanlegtekeningen, monitoring (zie bijv. Schrijver, 2017) en rapportage (Sinke, 2017). Zie ook Figuur 1-2, Figuur 1-3.

De functie van de geulwandverdediging is het vastleggen van de vaargeul en het voorkomen van verdergaand verlies van slikken- en schorregebieden (MOVE, 2003, Saathof, 2008). Deze gebieden hebben een belangrijke ecologische waarde, onder meer als foerageergebieden voor vogels, vooral steltlopers. De achteruitgang van deze gebieden is het gevolg van het steeds verder uitbochten van de eb- en vloedgeulen in de Westerschelde. Het verder verdiepen van de vaargeul draagt daar nog extra aan bij. Daarom is bij de 2^e verdieping besloten op een aantal locaties een geulwandverdediging aan te brengen.

Al lang voor de verdieping van de Westerschelde vond er gestage erosie plaats van schorren- en slikkengebieden bijv. het Land van Saefthinghe bij Baalhoek waar in de periode 1951-2001 (toen 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.



Figuur 1-2 Geulwandverdediging met slikken en schorren Walsoorden richting Baalhoek

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 zo nodig beschermd wordt met een harde constructie, de geulwandverdediging.

De geulwandverdediging heeft geen directe functie als bescherming van de waterkering, want deze liggen meestal voldoende ver weg. De breedte van de vooroever is dan zodanig dat bij oeverval geen beschadiging van de waterkering kan optreden. Beoordelingscriteria voor dijken zoals WBI 2017 zijn dus niet wettelijk verplicht, maar kunnen wel toegepast worden om de stabiliteit van de geulwand te beoordelen. Rijkswaterstaat controleert de stabiliteit door regelmatige monitoring en heeft tot en met 2016 de bevindingen jaarlijks gerapporteerd (Sinke, 2017). De beoordeling vond plaats op basis van de vereenvoudigde VTV 2006 normen (de voorloper van WBI of BOI), gebaseerd op de geometrie. Informatie over de grondsoort of de beschermingsconstructie is daarbij niet vereist. Dat blijkt nu een bezwaar om tot een goede beoordeling te komen. Er zijn echter nog geen criteria om een bestort talud te beoordelen in WBI 2017, maar er is wel onderzoek uitgevoerd (Deltares, 2018, Mastbergen et al, 2019). Bij wijze van proef werden door Rijkswaterstaat suppleties met onderhoudsbaggerspecie toegepast (Ossenisse 1 en 2, IVO), maar de levensduur van deze proefstortingen is beperkt en de erosie wordt niet tegengegaan, zie verder hoofdstuk 4. Een alternatief is de aanleg van strekdammen (Schor van Waarde, Hoofdplaat, Breskens).

Tabel 1.1 geeft een overzicht van de geulwandverdediging in de Westerschelde in het beheer bij Rijkswaterstaat. De locatie van de vier aaneengesloten gebieden waar wordt gemonitord is aangegeven in Figuur 1-3. Er bevinden zich ook nog geulwandverdedigingen tussen Hansweert en Kruijningen en bij 't Oude Hoofd bij Walsoorden.

Tabel 1.1 Geulwandverdediging ontwerpgegevens (Rijkswaterstaat, 2016). Zie Figuur 1-3.

No.	Geulwand	Oplevering	Lengte	helling	Aanlegdiepte	
					van m + NAP	tot m + NAP
			m	1:		
1.a	Ossenisse 1	27-11-1998	600	2,5	-2	-15
1 b.	Ossenisse 2	14-1-2000	1520	3	-2	-11
2 a.	Zuidergat	5-11-1998	2670	2,5	-2	-18
2 b.	Baalhoek	16-12-1994	400	3	-0,5	-19
2 c.	Overloop van Valkenisse	23-11-2001	1500	3	-2	-17
3.	Bath	22-8-1997	2100	3	-2	-17
4.	Saeftinghe	15-11-2000	2000	3	-2	-22



Figuur 1-3 Locaties geulwandverdediging en monitoringsvakken Westerschelde. Zie tabel 1 voor nummering. (Rijkswaterstaat, 2016)

Met het digitale model kan het sedimenttransport en de bodemverandering onder invloed van getij en golfklimaat en ingrepen zoals het baggeren in de Westerschelde gesimuleerd worden. Om het model te verbeteren zodat bijv. ook het transport in de diepte putten beter voorspeld kan worden is de ligging van de geulwandverdediging en de oeverwerken in het digitale Westerscheldemodel opgenomen, evenals de geologische harde lagen (Deltares, in voorbereiding).

1.5 Geologische formaties in de Westerschelde

Op verschillende plaatsen in de Westerschelde, in diepe putten op de bodem (zoals Put van Hansweert en Zuidergat), maar ook in de geulwanden worden natuurlijke harde, erosiebestendige lagen aangetroffen die kunnen bestaan uit klei of veenpakketten of verkitten schelpenbanken. Kennis van de ligging van deze natuurlijke harde lagen is mede van belang voor de beoordeling van de geulwandverdediging. Deze natuurlijke harde lagen kunnen onder een veel steilere helling stabiel blijven dan onbeschermde zandige onderwateroevers.

In de geulen wordt voornamelijk grover zand ($d > 250 \mu\text{m}$) en op de plaatranden fijner zand ($d < 140 \mu\text{m}$) aangetroffen, slib alleen in de luwe gebieden, zoals havens of op de slikken en schorren en in afgesloten geulen of kommen.

Op basis van GeoTop zijn ook de natuurlijke geologische formaties en lagen in het digitale Westerscheldemodel opgenomen (Deltares, in voorbereiding). Van de verschillende lagen is niet precies bekend in hoeverre deze meer of minder erosiebestendig zijn en hoe diep deze precies liggen, maar er is wel een 'harde laag' gedefinieerd waarvan de erosie verwaarloosbaar is ten opzichte van die van het losse zand in de Westerschelde.

In Tabel 1.2 worden de onderscheiden geologische formaties en laagpakketten in het digitale Westerschelde model aangegeven. Dit model is gebruikt voor de analyse van de dwarsprofielen in hoofdstuk 4.

Tabel 1.2 Gebruikte afkortingen geologische formaties en laagpakketten in de Westerschelde

Geologische formaties en laagpakketten in de Westerschelde	
NAWA	Formatie van Naaldwijk, Laagpakket van Walcheren
NIHO	Formatie van Nieuwkoop, Hollandveen Laagpakket
NAWO	Formatie van Naaldwijk, Laagpakket van Wormer
NIBA	Formatie van Nieuwkoop, Basisveen
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

Bij doorgaande erosie is het van belang vast te stellen hoe de verwachting wordt van de morfologische ontwikkelingen bij het blootleggen van nieuwe harde lagen. De erosie wordt dan geremd, maar niet volledig gestopt en op termijn kan insnijding optreden of de laag geheel verdwijnen waarbij dieperliggende lagen kunnen worden blootgelegd die weer sneller eroderen.

Erosie van natuurlijke harde lagen in de geulwanden kan een bedreiging zijn van de vooroevers op langere termijn. De erosie van natuurlijke harde lagen genereert ook slib dat zich dan alleen nog als zachte lagen kan afzetten in luwe gebieden zoals in de havens of op de slikken.

2 Data en Methodologie

2.1 Bathymetrie data

Vaklodgingen van de Westerschelde zijn digitaal beschikbaar (twee-)jaarlijks vanaf 1955. Deze omvatten behalve de bodemligging ook de vooroever en slikken- en schorregebieden tot en met de polderdijken tot een hoogte van ca. 5 m + NAP.

Rijkswaterstaat voert jaarlijks gedetailleerde multibeam metingen uit van de geulwand-verdedigingen (en single-beam aan de achterzijde), zoals in Tabel 1 en Figuur 1-3 vermeld. Daarnaast wordt een meting van 't Oude Hoofd uitgevoerd door de aannemer. De geulwandverdedigingen van Ossenissee, Bath en Saeftinghe worden in het najaar ook nog opgemeten. Door Rijkswaterstaat en door de Vlaamse overheid worden verder gedetailleerde tweemaandelijks metingen uitgevoerd in het kader van het beheer van de bagger- en stortwerkzaamheden in de vaarweg, het monitoren van de slikken en schorregebieden en de geulwandverdediging. Al deze metingen geven de morfologische ontwikkelingen in detail weer in aanvulling op de vaklodgingen.

Voor het storten van baggerspecie zijn speciale stortlocaties aangewezen in de diepe delen, zie Tabel 2.1 en ook op de plaatranden (Deltares, 2019). Op deze plaatsen wordt de bodem ook in detail gemonitord. Deze metingen worden uitgevoerd door Vlaanderen in het kader van onderhoud vaargeul.

Tabel 2.1 Stortlocaties diepe delen Westerschelde oostelijk deel (voor details zie Deltares, 2019)

Afkorting	Verspreidingslocatie (macrocel)	Locatie
SH41	Stort hoofdgeul 41	Overloop van Hansweert
SN41	Stort nevengeul 41	Middelgat
GWOS of Ossenissee 1 en 2	Geulwandverdediging	Gat van Ossenissee
INOS of IVO	Proefstorting	Inloop van Ossenissee
SH51	Stort hoofdgeul 51	Zuidergat / Bocht van Walsoorden
SN51	Stort nevengeul 51	Schaar van Waarde
DPHW of PVH	Proefstorting Diepe delen	Put van Hansweert
SH61	Stort hoofdgeul 61	Nauw van Bath
SN61	Stort nevengeul 61	Schaar van de Noord
SH71	Stort hoofdgeul 71	Pas van Rilland

Door Rijkswaterstaat zijn voor deze studie gedetailleerde (jaarlijkse en twee-jaarlijkse) oeverlodingendata beschikbaar gesteld van de deelgebieden die de geulwandverdediging en aanliggende slikken en schorgebieden betreffen, zie Tabel 2.2. De detailmetingen Bocht van Walsoorden, Zuidergat, Baalhoek en Overloop van Valkenisse vormen een aaneengesloten gebied.

Tabel 2.2 Gedetailleerde bathymetriedata bij geulwandverdediging (Rijkswaterstaat)

Locatie	Jaren	Achterliggend gebied
Ossensisse	1997 – 2019	Slikken van Hulst
Zuidergat	1994 – 2019	Bocht van Walsoorden
Baalhoek	1993 – 2019	Schor van Baalhoek
Overloop van Valkenisse	1999 – 2019	Konijnenschor (Saeftinghe west)
Bath	1999 – 2019	Slikken van Bath
Saeftinghe	1997 – 2019	Land van Saeftinghe (oost)

2.2 Data geulwandverdedigingen en oeverwerken

Om de locatie van de harde verdedigingswerken in het digitale Westerscheldemodel (Deltares, 2019) in te voegen zijn digitale gegevens (shapefiles) verkregen van Rijkswaterstaat en van het Waterschap Scheldestromen. Deze bestanden kunnen ingelezen worden in ARCGIS / QGIS tezamen met de bathymetriedata. De shapefiles geven gedetailleerde informatie over de horizontale positionering (X, Y coördinaten) van de oeverwerken en geulwandverdedigingen, maar in deze bestanden is geen diepte-informatie (Z-coördinaat) aanwezig. De gehele kustlijn van de Westerschelde is op deze manier vastgelegd in een digitale atlas.

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 geven geen informatie over de samenstelling van de bodem: zand, klei of bestorting.

De gedetailleerde bathymetrie datasets zijn met de vaklodingen en de GeoTOP harde lagen data ingelezen in QGIS. De shapefiles van de oever- en geulwandbeschermingswerken geven in de dwarsprofielen een horizontaal lijnstuk te zien.

Omdat jaartal van aanleg van de geulwandverdediging op de verschillende locaties bekend is kan in de dwarsprofielen de projectie van de shapefiles op de desbetreffende bodem beschouwd worden als beste inschatting van de ligging van de verdedigingswerken. Op deze manier zijn de oeverwerken en geulwandverdediging in het digitale model opgenomen (Deltares, in voorbereiding). Omdat in dit rapport in meer detail wordt gekeken naar de geulwandverdediging en Rijkswaterstaat mogelijk maatregelen zal uitvoeren is een terugkoppeling in afstemming met Rijkswaterstaat aan te bevelen. Hetzelfde geldt voor de oeverwerken en Waterschap Scheldestromen.

2.3 Ontwerpgegevens geulwandverdedigingen

In de bestektekeningen (zie Tabel 2.3), die als Autocad en (deels) PDF bestanden beschikbaar zijn gesteld door Rijkswaterstaat, is het ontwerp van de verdedigingswerken op een bepaalde locatie (raai) in detail te zien (met Autocad viewer). Aangenomen kan worden dat bij de uitvoering het werk ook volgens het ontwerp is gerealiseerd. Door nu op dezelfde locatie de gemeten dwarsprofielen te bekijken en te vergelijken met de aanlegtekening kan de huidige conditie van het werk beoordeeld worden.

Het ontwerp bestaat meestal uit een taludaanvulling met steenachtig materiaal tot een helling van 1:2 waarvan de bovenste 3 meter is nabestort met zware breuksteen 40—200 kg en de teen over 10 m lengte bij wijze van bodembescherming is afgedekt met steenachtig materiaal. De beoogde zwaarte is 1200 kg/m², dat komt ongeveer overeen met 0,8 m laagdikte.

Tabel 2.3 Bestektekeningen geulwandverdediging

Geulwand	Besteknummer	aanvang	Oplevering
Ossenisse 1	ZL-4453	10-8-1998	27-11-1998
Ossenisse 2	ZL-4645	17-5-1999	14-1-2000
Zuidergat	ZL-4055	2-2-1998	5-11-1998
nabij Baalhoek	ZL-3830	13-6-1994	16-12-1994
Overloop van Valkenisse	ZL-5063	15-3-2001	23-11-2001
Bath	ZL-4033	26-8-1996	22-8-1997
Saeftinghe	ZL-4702	17-1-2000	15-11-2000

De geulwandverdediging sluit meestal aan bij bestaande oeverwerken die al veel eerder zijn aangelegd, soms al in de 18^e of 19^e eeuw en vervolgens regelmatig bijgewerkt en versterkt en waarvan vaak geen gedetailleerde aanlegtekeningen beschikbaar zijn.

Voor alle locaties, dus Ossenisse 1 en 2, Zuidergat-Baalhoek-Valkenisse, Bath en Saeftinghe zijn de detailbathymetriedata ingelezen in QGIS tezamen met de vaklodingen, de shapefiles van de oeverwerken en de geulwandbescherming en de GEOTOP lagen, zodat de dwarsprofielen in detail beoordeeld kunnen worden in de raaien waar ook een bestektekening van de geulwandverdedigingswerken beschikbaar is.

3 Beoordelingscriteria en ontwerprichtlijnen

3.1 Inleiding

Door Rijkswaterstaat worden de detail-bathymetriemetingen van de geulwandverdedigingen jaarlijks uitgewerkt. Van 2009 t/m 2016 is een rapportage bijgehouden waarin de conditie van de geulwandverdediging werd beoordeeld volgens VTV 2006 (Sinke, 2017). In deze paragraaf wordt aangegeven welke criteria volgens WBI 2017 / BOI 2023 dan wel de laatste inzichten op dit gebied gehanteerd zouden moeten worden om de stabiliteit van een (deels) bestorte onderwateroever te beoordelen en welke ontwerprichtlijnen er bestaan voor een geulwand- of vooroeververdediging. Deze problematiek speelt ook elders bijv. bij reeds beschermde onderwateroevers van waterkeringen (zie Deltares, 2018).

3.2 Standzekerheid oever-en geulwandverdedigingswerken

Om de standzekerheid van de constructie te waarborgen mag de stroming en/of golven geen vat krijgen op de bestorting (erosiebestendigheid) en moet ondermijning (uitschuren van de teen waardoor deze instort) voorkomen worden. Daarnaast moet het talud voldoende stabiel zijn voor afschuiving en zettingsvloeiing (bres- of verwekingsvloeiing). In principe kunnen voor de beoordeling dezelfde criteria worden gehanteerd die ook door het Waterschap Scheldestromen voor de primaire waterkering (de polderdijken) in de Westerschelde wordt gehanteerd dus WBI 2017 / BOI 2023. Omdat er bij niet voldoen van de geulwandverdediging geen directe veiligheidsrisico's (dus overstromingsrisico's) aan de orde zijn is dat een behoudende methode.

Door Rijkswaterstaat worden in de beoordelingsrapporten tot nog toe alleen de eenvoudige geometrische criteria (conform VTV 2006) gehanteerd. De criteria t.a.v. de geometrie van de bodem zijn direct te herleiden uit de metingen, zoals steilheid van het onderwatertalud over een zekere diepte. VTV 2006 is de voorloper van WBI 2017. Het WBI geeft ook criteria voor een veilige afstand van de geulwand tot de waterkering in het geval van afschuiving of zettingsvloeiing. Als deze afstand groot genoeg is dan is er geen gevaar voor dijkval, maar bij voortdurende erosie / regressie kan dat op termijn alsnog het geval zijn.

Op locaties met hoge stroomsnelheden (meer dan 1,5 m/s) bestaat er vooral een risico voor erosie / ondermijning van de oeverwerken en de geulwandverdediging, waardoor op termijn instabiliteit door afschuiving of zettingsvloeiing kan optreden.

Door intensieve monitoring wordt vooral beoogd vast te kunnen stellen wanneer ingrijpen nodig is. Door frequent te meten kan een inschatting gemaakt worden hoe snel de ontwikkelingen zich voordoen, zodat anticipatie mogelijk is. Een absolute beoordeling op een bepaald moment is minder goed mogelijk, omdat er geen rekening wordt gehouden met de grondslag of aanwezigheid van bestorting. Een conservatieve benadering is uiteraard de bestorting geheel te negeren. In de rapportage van Rijkswaterstaat is geconstateerd dat de gemeten profielen op een aantal locaties niet aan de (eenvoudige) criteria voldoen maar het is niet duidelijk wat de consequenties zijn (of waren).

Volgens WBI / VTV moet een oever die niet voldoet aan het meestal maatgevende faalmechanisme zettingsvloeiing (dus te steil is) bestort worden, maar er bestaan nog geen criteria voor de beoordeling van de stabiliteit van een bestorte oever. Door recent onderzoek, dat laat zien dat terugschrijdende erosie bij zettingsvloeiing zich onder de bestorting kan voortzetten, maar ook effectief gestopt kan worden, zijn hierover nieuwe inzichten ontwikkeld (Deltares, 2018, Mastbergen et al, 2019). Daarmee kan worden aangegeven wanneer ondermijning van de teen van een bestorting kritiek wordt en ingrijpen nodig is.

Onder ondermijning wordt verstaan: doorgaande erosie bij de teen van een geulwandverdediging of oeverwerk die zich onder de bescherming kan voortzetten. Uiteindelijk kan dat leiden tot instorting of afschuiving van de geulwandverdediging. Een vergelijkbaar criterium wordt gehanteerd bij de monitoring van de ontgrondingskuilen bij de Oosterscheldekering (Rijkswaterstaat, 2013). Dit criterium geeft aan dat het onbeschermde, zandige talud gerekend vanaf de teen niet steiler mag worden dan ca. 1:5 à 6 over een

hoogte van 5 m. Het is nog geen onderdeel van het WBI of BOI 2023 en vraagt nog wel verder onderzoek ter onderbouwing en validatie. Een 'falling apron' constructie kan ondermijning voorkomen mits voldoende steenachtig materiaal beschikbaar is.

Vanwege de hoge stroomsnelheden zijn zandsuppleties op de verdedigde locaties in het algemeen niet effectief. In het kader van het vaarwegbeheer worden proefstortingen uitgevoerd bij de Inloop van Ossensisse. Reguliere stortlocaties zijn SH41 in het Gat van Ossensisse en de Overloop van Hansweert, SH51, Zuidergat en Bocht van Walsoorden, SH61 in Nauw van Bath en SH71 bij Pas van Rilland en verder bij de geulwandverdediging van Ossensisse. De stortingen geven in ieder geval een tijdelijke bescherming tegen doorgaande erosie.

Het Waterschap Scheldestromen heeft in 2017 nog een aantal locaties in Zeeland aangemerkt als zg. restproblematiek oeverbestorting Zeeland, waarvan 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 (Deltares, 2017). Dit zijn nu projecten in VOV 3 (Vooroeververdediging Cluster 3). Bij Breskens, Nummer Eén, Kampersche Hoek en Kreverhille (Ossensisse-Perkpolder) zijn al maatregelen (bestortingen) uitgevoerd.

3.3 Beoordelingscriteria onderwatertalud

De beoordelingscriteria voor de stabiliteit van onderwateroevers zoals VTV 2006, zie Tabel 3.1, zijn tot op heden toegepast op de geulwandverdediging. Hierbij wordt uitsluitend naar de geometrie gekeken. De eenvoudige regels volgens VTV 2006 of WBI 2017 (Eenvoudige, gedetailleerde of geavanceerde methode) kunnen als signaleringscriteria gehanteerd worden. Daarnaast is de morfologische ontwikkeling een belangrijke signalering. Treedt er erosie op?

Tabel 3.1 Gehanteerde criteria door Rijkswaterstaat volgens VTV2006

Faalmechanisme	Helling over 5 m in zand	Helling over 5 m in klei	Over totale hoogte
Afschuiving	>1:2	>1:1	>1:4,5
Zettingsvloeiing	>1:4	-	>1:7

Bij afschuiving wordt verondersteld dat de bestorting niet van invloed is. De sterkte van de grond achter de bescherming is dan bepalend. Een gemiddelde helling van minimaal 1:4,5 lijkt voor afschuiving behoorlijk conservatief. De hoogte doet er niet toe in tegenstelling tot bij verwekingsvloeiing. Anderzijds is 1:1 over 5 m weer erg optimistisch, ook in flauwere hellingen over 5 m kan afschuiving optreden. Het criterium is gebaseerd op ervaring, maar helemaal waterdicht lijkt het niet. Het kan gecontroleerd worden met een afschuifberekening. In het algemeen is een helling van 1:3 of zelfs 1:2 nog stabiel voor afschuiving.

Voor zettingsvloeiing gelden strengere criteria dan voor afschuiving. Het is regelmatig waargenomen dat in hellingen in zandige taluds steiler dan 1:2 over tenminste 5 m instabiliteiten voorkomen (meestal een bresvloeiing). Indien er sprake is van zeer losgepakt zand kan ook verwekingsvloeiing optreden. Daarvoor geldt het 1:7 criterium in het VTV 2006 dat in WBI 2017 is aangepast voor verweking door $1:7 \cdot (HR/24)^{1/3}$. Bij een (fictief) onderwatertalud hoger dan 4 m wordt de toelaatbare helling dus wat flauwer en bij een minder diepe geul wat steiler. Ook voor bresvloeiing is een maatgevend profiel gegeven (iets steiler). Wordt niet aan deze eenvoudige criteria voldaan dan kan volgens WBI 2017 een meer geavanceerde toetsing worden uitgevoerd waarbij rekening wordt gehouden met de grondgesteldheid en de morfologische ontwikkelingen.

Wordt niet voldaan aan de criteria voor zettingsvloeiing dan is een steenbestorting nodig. Bresvloeiing kan dan niet meer optreden en verweking in beperkte mate. Bij verwekingsvloeiing wordt aangenomen dat bij bestorting of niet-verwekingsgevoelige lagen (zoals klei of minder los gepakt zand) alleen hoger gelegen

delen in rekening gebracht behoeven te worden. Informatie over de grondsoort (samenstelling, dichtheid, sterkte, verwekingsgevoeligheid) is echter vaak niet beschikbaar.

Door erosie kan echter de teen van de bestorting weer bloot komen te liggen en kan ondermijning optreden. Om tot een goede beoordeling te komen in het geval van een steenbestorting dient dus eerst te worden vastgesteld of de onderwateroever uit zand of natuurlijk harde lagen bestaat en waar deze liggen. Indien er al een bestorting is moet worden vastgesteld tot welke diepte deze zich uitstrekt. Ondermijning kan optreden bij de teen van de bestorting. Om te kunnen beoordelen of ondermijning kan plaatsvinden is het nodig te weten waar de beschermde teen van de bestorting ligt ofwel tot welke diepte eventuele oeverwerken en steenbestortingen zich uitstrekken. Dit is vaak niet goed bekend en kan ook niet zo gemakkelijk gemeten worden. Deze informatie kan worden gehaald uit constructie- of aanlegtekeningen ('as built'), dan wel zal deze opgemeten moeten worden. Daarvoor zijn soms speciale meettechnieken ingezet om dit vast te stellen (Vermaas et al, 2018), zoals high-resolution multibeam (backscatter), sub-bottom profiler of met boringen of duikinspectie. De uitkomsten zijn niet altijd eenduidig, dus verder onderzoek op dit gebied wordt aangeraden. Deze informatie is beschikbaar in het digitale model van de Westerschelde (Hoofdstuk 2). Voor een nauwkeurige analyse van de oeverstabiliteit is waarschijnlijk een meer gedetailleerd model nodig. Het wordt aanbevolen de ligging van de oeverwerken in een digitaal model vast te leggen tezamen met de gedetailleerde bodemligging, zodat de stabiliteit beoordeeld kan worden. In hoofdstuk 4 zullen deze aspecten voor de verschillende locaties van de geulwandverdediging zo goed mogelijk beschouwd worden.

3.4 Evaluatie ontwerpregels steenbestorting

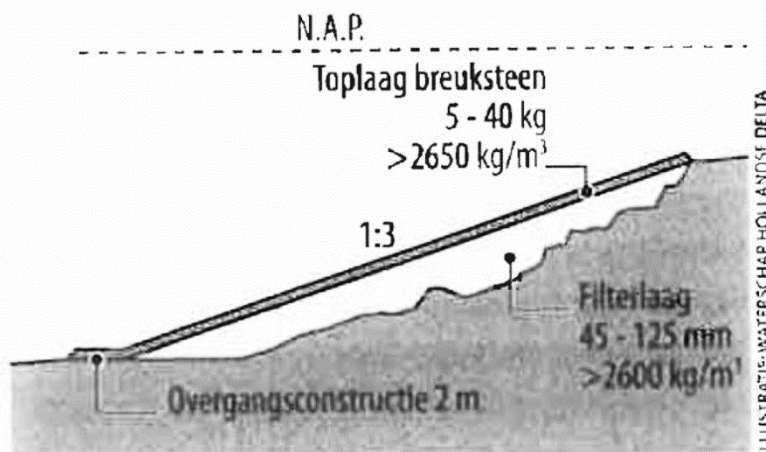
Indien het talud onvoldoende stabiel is voor zettingsvloeiing of afschuiving volgens WBI 2017 wordt in het algemeen aanbevolen een steenbestorting aan te brengen, eventueel met uitvullen (verflauwen) van het talud. Vooral indien er sprake van zeer steile afkalvingen ontstaan door ondermijning en afschuiving van oude bestortingen (bijv. Dordtsche Kil) of na een oeverval. Hier worden enkele veel gebruikte ontwerpregels gegeven.

Bij volledige bestorting is zowel afschuiving als zettingsvloeiing onmogelijk, op grond van bewezen sterkte en het wegnemen van een trigger. Bij ondermijning kan wel afschuiving en zettingsvloeiing optreden. Voor zettingsvloeiing alleen als het onbestorte deel voldoende losgepakt is (verweking, waarbij hoogte en gemiddelde helling van bovenliggende talud een belangrijke rol spelen). Door herhaalde bresvloeiingen, getriggerd door erosie bij de teen kan het bestorte talud gestaag ondermijnd worden.

T.a.v. de ontwerpregels voor steenbestorting, in het handboek BBT (Bodembeschermings-team) voor de OSK (Oosterschelde Stormvloed Kering, zie Rijkswaterstaat, 2013) staat het volgende:

- Een afdeklaag van 1 ton/m².
- Een volumegewicht van staalslakken van 1,9 ton/m³ (dit is het volumegewicht onder water; droog volumegewicht van 2,9 ton/m³)
- Een volumegewicht van Maasgrind (of MijNSTEEN of ander granulair materiaal) van 1,5 ton/m³ (dit is het volumegewicht onder water; droog volumegewicht van 2,5 ton/m³)
- Opvullen m.b.v. Maasgrind (sortering 0-170 mm) of mijNSTEEN (sortering 0-200 mm).
- Afdekken en uitvullen m.b.v. staalslakken (sortering 40-200 mm). (afdeklaag 1000 kg/m², laagdikte 0,55 m)
- 20 meter overlap met gebieden waar criteria voldoen
- Aansluiting op andere stortvakken of constructies
- Bestortingsmateriaal op basis van zanddichtheid en stroombestendigheid.

Dit kan een richtlijn zijn, maar hoeft echter niet de standaarduitvoering in Zeeland of elders te zijn. De maatregelen in Dordtsche Kil (noodmaatregel zettingsvloeiing) waren wel gebaseerd op de Zeeuwse aanpak (Land+Water, 2010), zie Figuur 3-1. Diktes staan daar niet in, ook niet in de tekst. Bij Vierhuistergat in de Waddenzee is ook de Zeeuwse aanpak gevolgd.



ONTWERP

Schets van principe-ontwerp en dwarsprofiel.

Figuur 3-1 Principe ontwerp vooroeverbewering voor zettingsvloeiing (Land+Water, 2010).

Een eis van 1:3 voor een bestort talud lijkt erg streng, 1:2.5 zou ook ruimschoots moeten voldoen, zo nodig te controleren met een afschuivingsberekening. Pas bij 1:1,5 kunnen stenen beginnen te rollen. De erosiebestendigheid is het belangrijkste criterium, maar bij voorkeur moet ook aan filtercriteria voldaan worden, zodat zand onder de stenen niet uitspoelt, waardoor de integriteit van de bestorting verloren gaat. Bij heel fijn zand is het lastig om met één afdek materiaal te voldoen aan zowel de criteria voor uitspoelen als die voor erosiebestendigheid. De filterlaag moet voldoende dik zijn, dat kan ook een reden zijn om uit te vullen tot 1:3.

Een nieuw criterium voor zettingsvloeiing in een bestort talud, nog niet in WBI 2017, gaat uit van bresvloeiing: in bestort talud of klei kan dan geen bres ontstaan. In de onbeschermd teen met een hoogte van maximaal 5 m onder een helling van 1:5 is de kans op een terugschrijdende bres gering. Zo niet dan kan ondermijning door bres ontstaan die niet gestopt wordt door losse bestorting (falling apron principe). Daarbij speelt ook de dikte van de steenlaag een rol t.o.v. de breshoogte.

Een dikte van 60 cm lijkt voldoende, hoewel uit seismische metingen en boringen destijds uitgevoerd door Deltares rondom de OSK (Rijkswaterstaat, 2013) bleek dat er niet altijd sprake is van een uniforme laag. Op sommige plekken waar stenen zouden moeten liggen, ontbraken die. Of dat komt omdat de stenen niet op de goede plek gestort zijn of dat er stenen door wat voor reden dan ook verplaatst zijn is niet bekend.

De genoemde criteria zijn dus nog vrij voorlopig en moeten nog nader onderzocht en onderbouwd worden bijv. door proeven en analyse historische dijk- en oevervallen bij bestortingen (Deltares, 2018).

3.5 Conclusies

- Zettingsvloeiing kan alleen optreden in onbeschermd zandige oevers. In onbeschermd natuurlijke harde lagen kan alleen afschuiving optreden, waarvoor veel steilere hellingen toelaatbaar kunnen zijn.
- Een steenbestorting is een effectieve bescherming tegen zettingsvloeiing. Alleen in het geval van zeer losgepakt zand is er nog schade mogelijk door verweking. Kennis van de ondergrond m.n. de pakking is dus nodig.
- De eenvoudige regels volgens VTV 2006 of WBI 2017 kunnen als signaleringscriteria gehanteerd worden om de stabiliteit van de vooroever te beoordelen.
- Daarnaast is de morfologische ontwikkeling van de vooroever een belangrijke signalering. Als er geen erosie optreedt is er geen toename van het risico.
- Geulwandconstructie 1:3 kan ook 1:2,5 of zelfs 1:2 zijn mits de grond voldoende sterk is om afschuiving te voorkomen.
- De teen moet worden aangestort met een losse bestorting om ondermijning te voorkomen. Afdekking met zware steen is alleen nodig ter bescherming tegen erosie en golfwerking, dus vanaf de laagwaterlijn. Een filterlaag is wel nodig om uitspoeling te voorkomen.
- Bij voortgaande erosie kan ondermijning van de constructie ontstaan. Om te kunnen beoordelen of ondermijning kan plaatsvinden is het nodig te weten waar de beschermde teen van de bestorting ligt. Hiervoor moeten soms nieuwe meetmethoden ingezet worden omdat nauwkeurige aanleggegevens vaak ontbreken.
- Indien er sprake is van erosie dan wordt voorgesteld als beoordelingscriterium dat het onbeschermd talud gerekend vanaf de teen niet steiler mag worden dan ca. 1:6 over een hoogte van 5 m. Dit criterium is nog geen onderdeel van het WBI of BOI 2023 en vraagt nog wel verder onderzoek ter onderbouwing en validatie.

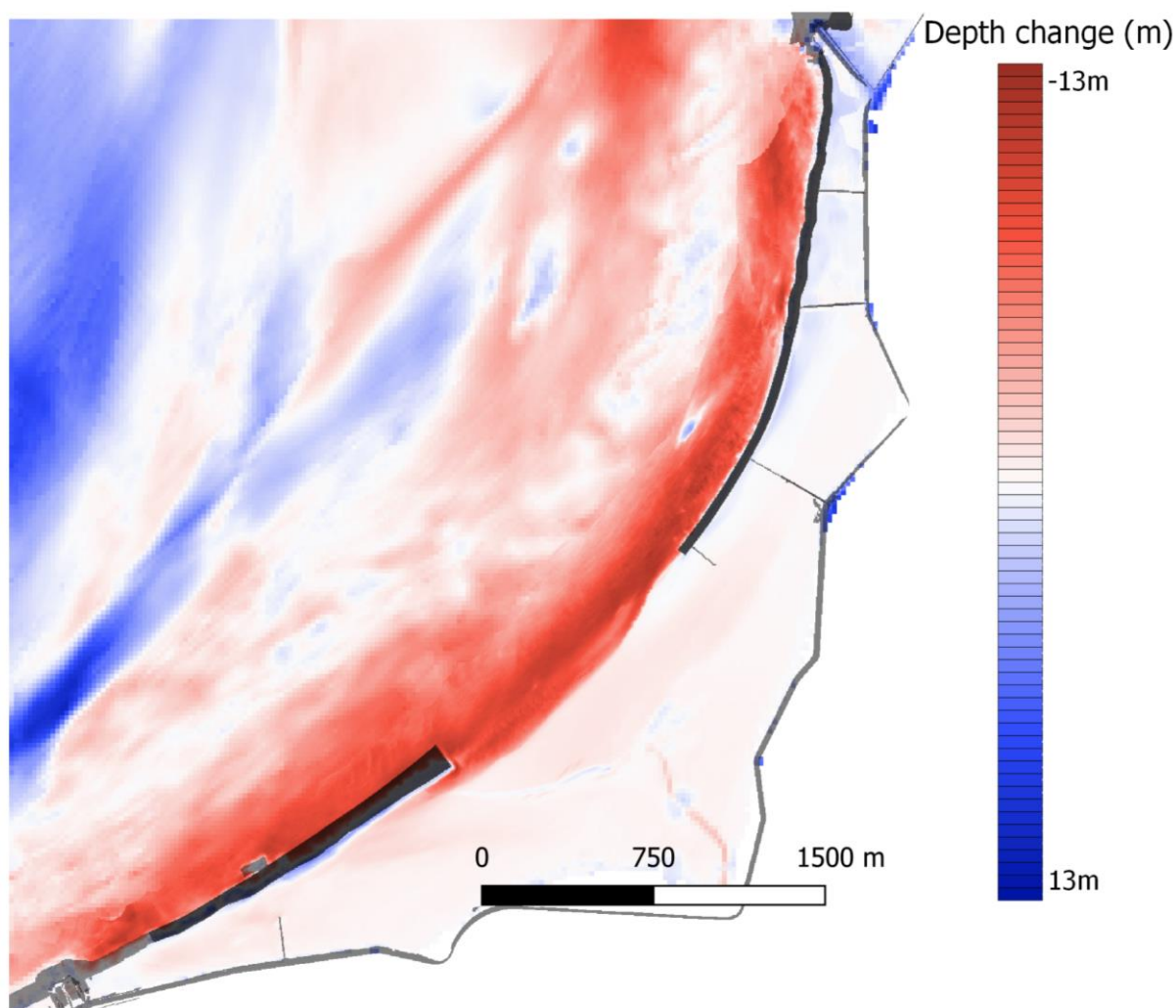
4 Analyse metingen en conclusies per locatie

In dit hoofdstuk worden voor de verschillende locaties in de Westerschelde waar door Rijkswaterstaat geulwandverdediging is aangebracht (zie Figuur 1-3) de metingen bekeken namelijk:

- Ossenisse 1 en 2
- Zuidergat, Baalhoek en Overloop van Valkenisse
- Bath
- Saeftinghe.

Daarbij worden steeds de ligging en het ontwerp van de constructie bekeken in de context van de bathymetriemetingen (vaklodingen 1955 t/m 2015) en de detailmonitoring vooroevers (1993 t/m 2019) en de geologie. Per locatie worden de conclusies gegeven.

Figuur 4-1 geeft als voorbeeld de verschilkaart bij Ossenisse over 20 jaar van aanleg van de geulwandverdediging (1999) tot heden (2019). Er is sterke erosie te zien (tot 13 m) langs de gehele buitenbocht van het Gat van Ossenisse, maar het slik is slechts weinig aangetast dankzij de geulwandverdediging.

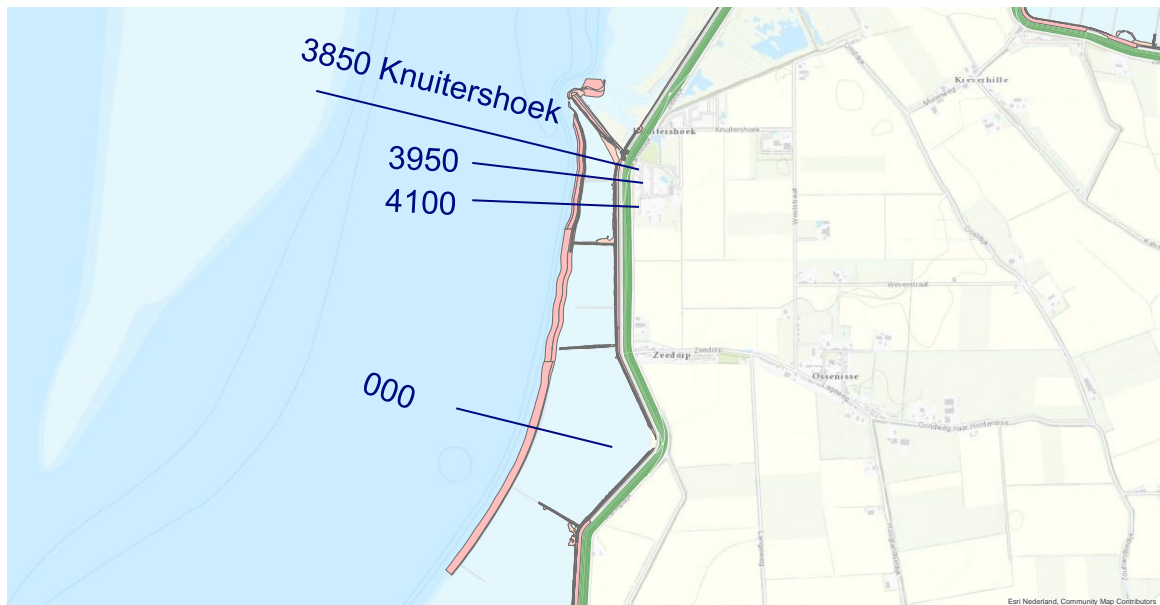


Figuur 4-1 Geulwand van Ossenisse (1 en 2) Verschilbathymetrie 1999-2019 in QGIS. Geulwandverdediging in zwart. oeverwerken in grijs. Aan de noordzijde aansluitend op de Nol van Ossenisse, in het zuiden op bestaande oeverwerken bij Griete / Margarethapolder.

4.1 Ossensisse 1

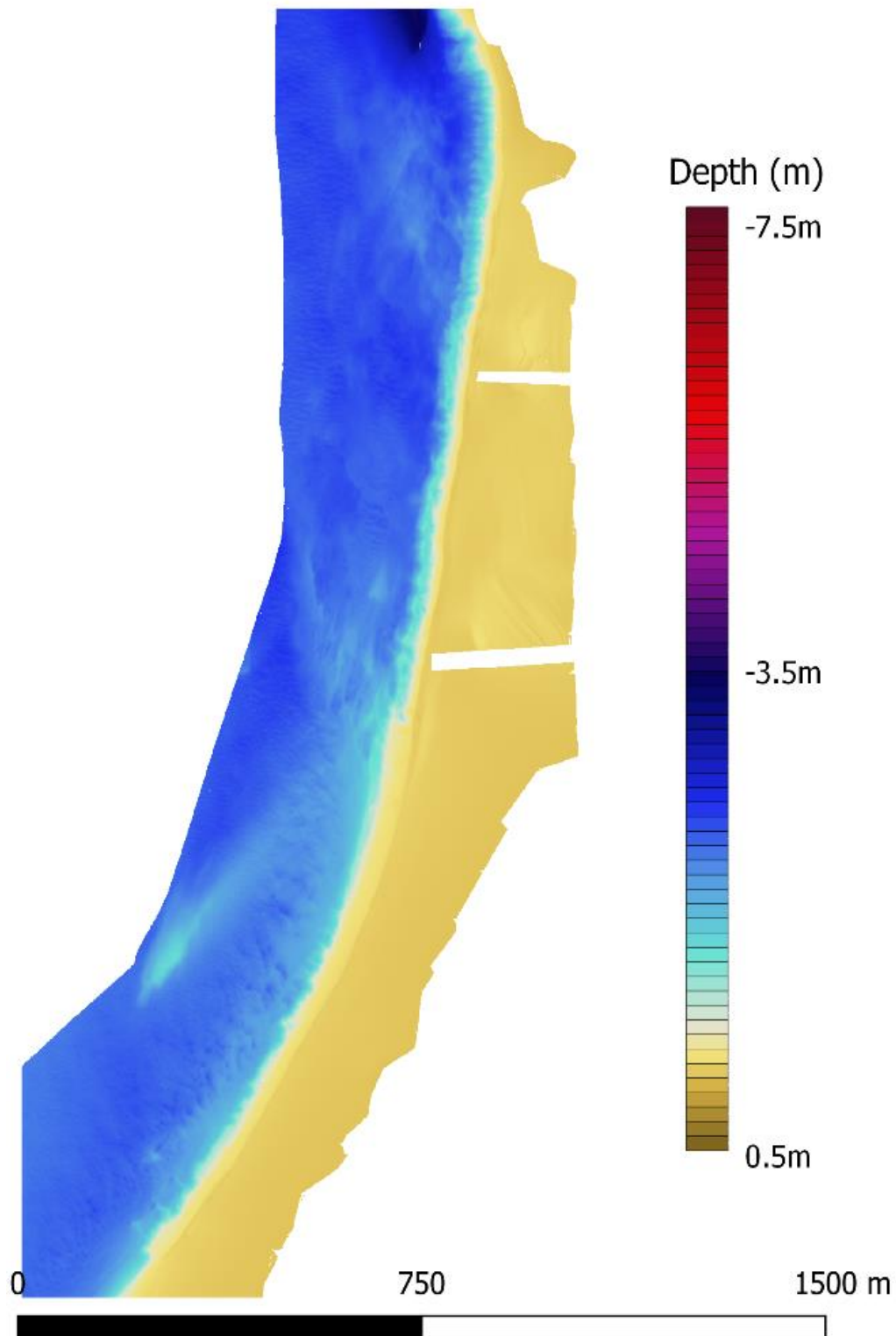
4.1.1 Ligging oeverwerken en raaien detailbathymetriekaartjes

De oeverwerken lopen van de zwaar verdedigde Nol van Ossensisse naar het zuiden van Knuitershoek tot Zeedorp en beschermen de Slikken van Hulst. De geulwandverdediging Ossensisse 1 sluit aan op de oeverwerken, maar loopt niet helemaal door naar het zuidelijk deel (Ossensisse 2), zie Figuur 4-2, met de ligging van enkele raaien. Het tussengelegen deel is dus onbeschermd. De geulwandverdediging is aangelegd in 1998 tot een diepte van 15 m – NAP en omvat de raaien 3750-4250 van noord naar zuid en ten noorden van de Nol van Ossensisse de raaien 16.3 – 19. Ten zuiden sluit de verdediging aan bij het bestaande oeverwerk.

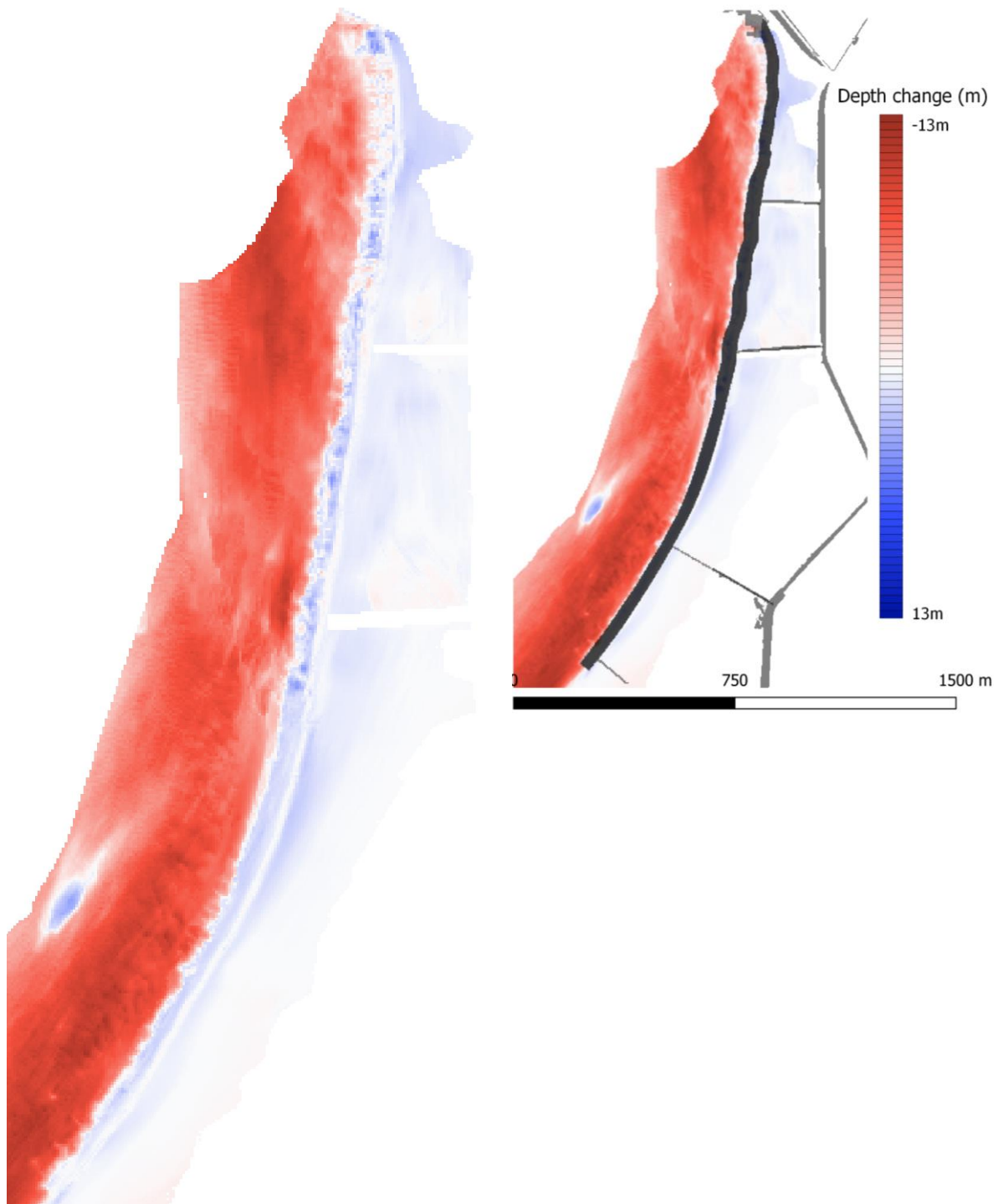


Figuur 4-2 Geulwand van Ossensisse 1 Knuitershoek – Zeedorp (geulwandverdediging in roze en bekleding dijken in groen) met raainummers. Aan de noordzijde aansluitend op de Nol van Ossensisse. Shapefiles in ARCGIS.

Figuur 4-3 geeft de situatie met de dieptemeting en Figuur 4-4 de verschilmeting vanaf de aanleg in 1999 tot 2019 (meest recente data), met en zonder geulwandverdediging. Te zien is dat de geul sterk is verdiept direct vanaf de rand van de geulwandverdediging, maar dat de wat onregelmatig gevormde contouren van de geulwandverdediging en het beschermde achterliggende slikkengebied nog intact zijn gebleven. Door suppleties is de erosie in de geul slechts tijdelijk tegen gegaan. Het slik is licht gesedimenteerd. In de verschilfiguur is de verdediging nog deels te zien als een blauwe zone (verondieping van ongeveer 0,5 m). Het lijkt er op dat de meting van mei 1999 is uitgevoerd vóór voltooiing van de aanleg hoewel de opgegeven opleverdatum 27-11-1998 was.



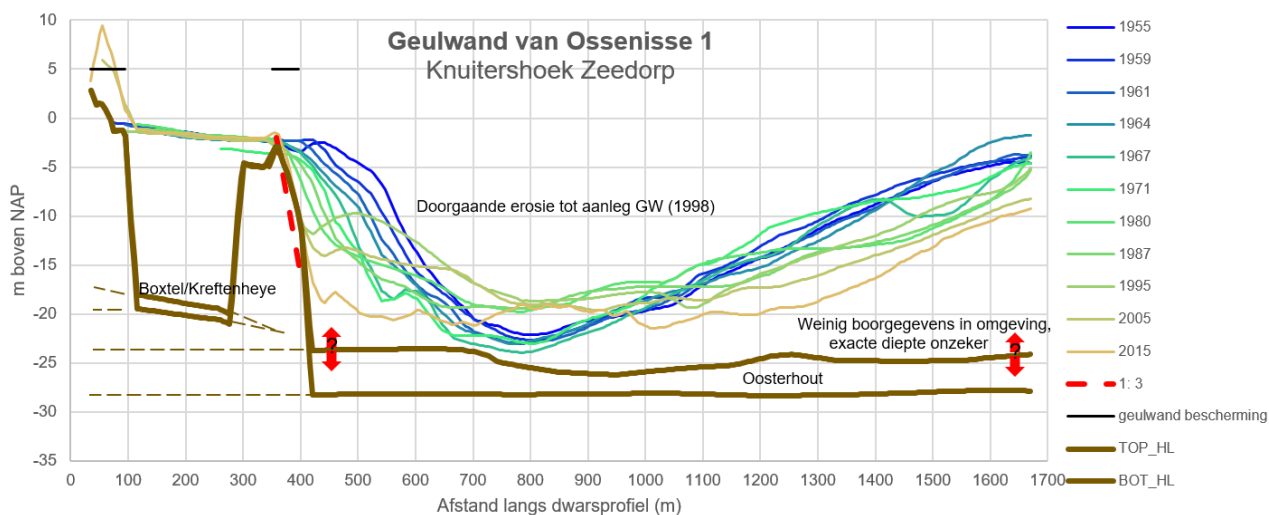
Figuur 4-3 Geulwand van Ossenisse 1. Detailbathymetrie (april 2019).



Figuur 4-4 Geulwand van Ossenisse 1. Verschilmeting na 20 jaar (april 2019 - mei 1999). Links zonder en rechts met ligging geulwandverdediging en oeverwerken.

4.1.3 Dwarsprofielen vaklodingen met geologische harde lagen

In een dwarsprofiel ter hoogte van Knuitershoek - Zeedorp zijn de vaklodingendata weergegeven in Excel, zie Figuur 4-8. De vaklodingen zijn minder gedetailleerd dan de lokale oeverbathymetrie, maar omvatten ook de vooroever en de dijk en zijn beschikbaar over een lagere tijdsperiode (vanaf 1951), zodat de lange-termijn ontwikkelingen inzichtelijk worden. In de dataset zijn ook de geologische formaties, de aangemerkte ligging van de harde lagen en de ligging van de oeverwerken weergegeven. De gearceerde rode lijn geeft de ligging van de geulwandverdediging onder een helling van 1:3 schematisch weer. In de volgende paragraaf wordt ingegaan op de detailmetingen, die gebruikt worden voor de beoordeling van de huidige toestand van de geulwandverdediging.

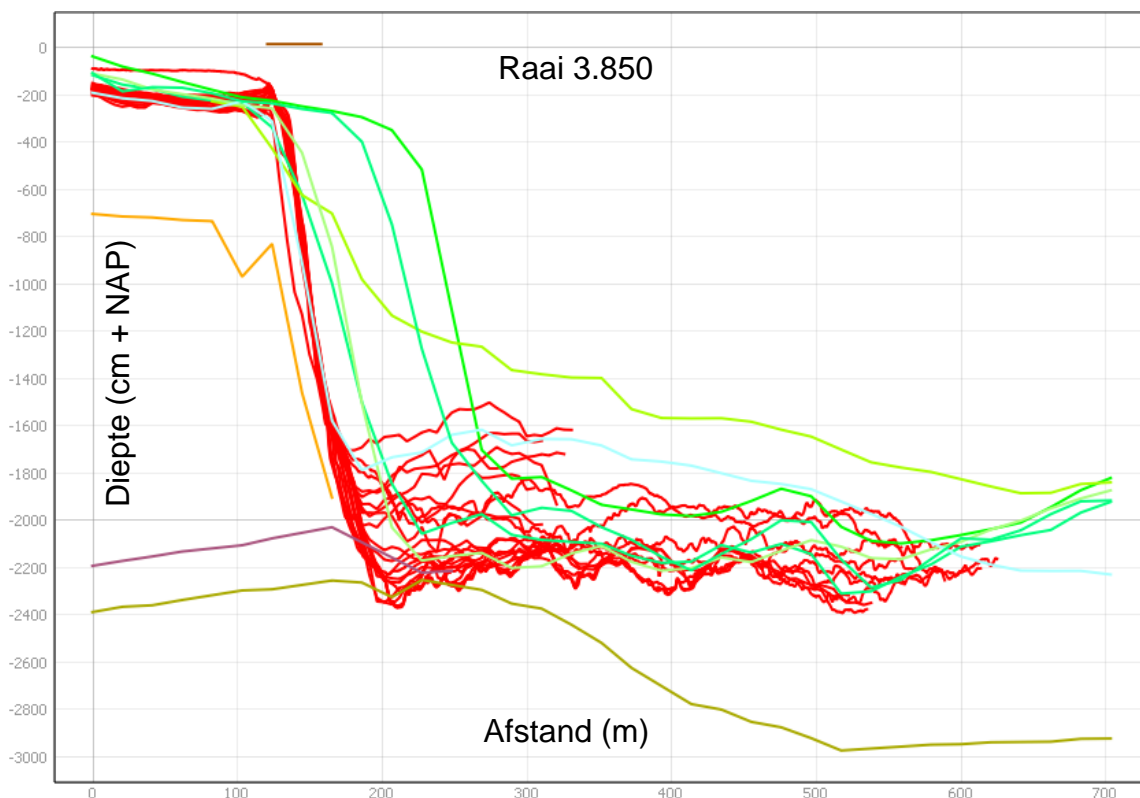


Figuur 4-8 Dwarsprofiel geulwand van Ossenisse 1 ter hoogte van Knuitershoek - Zeedorp met vaklodingdata, locatie oeverwerken en geologische formaties en harde lagen (ongeveer raai 4100). Rood gearceerd = geulwandverdediging met helling van 1:3. Grijs: horizontale uitstrekking geulwandbescherming.

Te zien is dat er tot 1974 gestage (verticale) erosie is opgetreden en de geul is ingesneden tot -23 m tot in de harde kleilaag van de Oosterhoutformatie. Het is niet zeker of deze formatie aangemerkt kunnen worden als harde laag, in he geologisch model ligt deze dieper (zie rode pijl met ?). Uit de metingen zou echter afgeleid kunnen worden dat de harde laag hier al aan het oppervlak ligt. Tevens is er regressie (horizontale erosie) opgetreden over 140 m. In 1978 en 1987 zijn de eerste suppleties uitgevoerd, daarna ook in 1998. Om de regressie te stoppen is de geulwandverdediging aangelegd in 1998. In 2004 is opnieuw gesuppleerd, maar van 2005 tot 2015 gaat de erosie weer door tot de oorspronkelijke diepste insnijding op -24 m, dus diep onder de teen van de geulwandverdediging, ondanks tussentijdse suppleties in 2014, 2015 en 2016 van 4,4 miljoen m³.

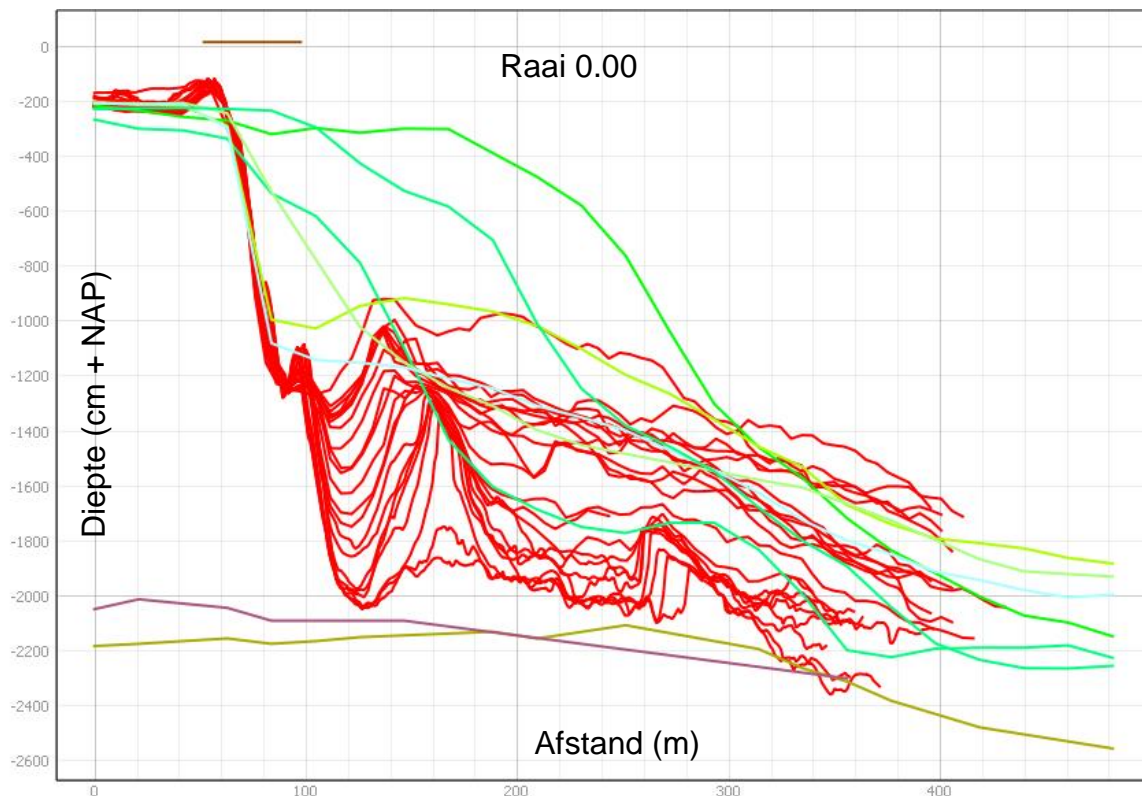
4.1.4 Dwarsprofielen detailmetingen

Om de situatie van de geulwandverdediging te beoordelen zijn de meer gedetailleerde metingen nodig. In QGIS zijn dwarsprofielen gemaakt waarin alle datasets zijn opgenomen. De dwarsprofielen zijn genomen in dezelfde raaien als waarvoor de ontwerptekeningen beschikbaar zijn, voor ligging raaien zie Figuur 4-2).



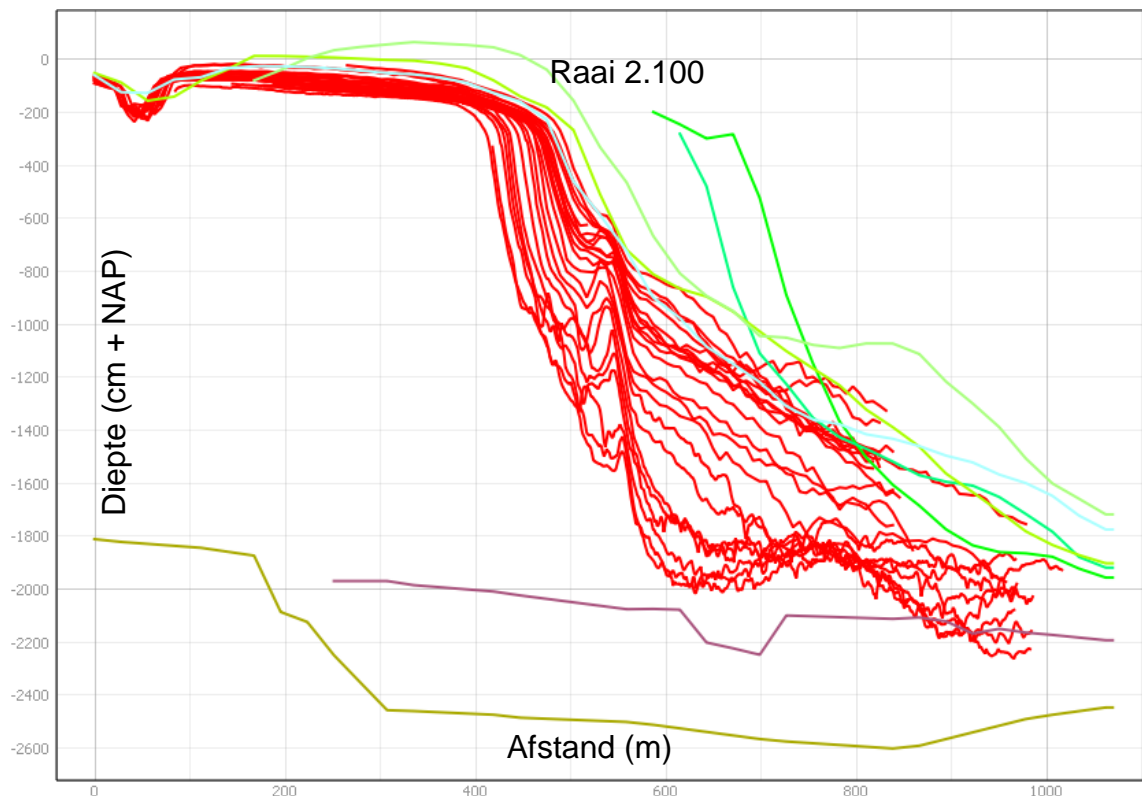
Figuur 4-9 Dwarsprofiel geulwand van Ossenisse 1 Raai 3850. Rood: detailoevermetingen (jaarlijks) 1997-2019 Groen: vaklodingen 1955, 1961, 1971, 1980, 1990, 2000. Bruin: horizontale uitstrekking geulwandbescherming. Oranje: top Formatie van Bostel-Kreftenheye. Donkerpaars: top Formatie van Maassluis-Peize-Waalre. Olijf: top Formatie Oosterhout. Aangemaakt in QGIS.

Net als de vaklodingen laten ook de detailmetingen (rode lijnen in Figuur 4-9, Figuur 4-10 en Figuur 4-11) sterke erosie zien vanaf 1997 (de hoogste rode lijn) op -14 m bij aanleg tot 2019 op -22 m in de Oosterhout laag (onderste rode lijn). Verder is te zien dat er op -12 m een knik in het talud is en daarboven de rode lijnen vrijwel samenvallen, juist in het traject van de verdedigingswerken, aangeduid met een horizontale bruine lijn op 0 m. Dat betekent dat hier geen instabiliteiten zijn opgetreden in de geulwand en ook niet in de over 10 m bestorte teen. Het is ook niet te verwachten dat de erosie snel nog dieper zal worden omdat waarschijnlijk de harde laag is bereikt, die ook al voor de maatregelen was bereikt. Wel is er een zeer steil en onbeschermd talud ontstaan waarvan de stabiliteit niet kan worden gegarandeerd, want het voldoet niet aan de VTV2006, zoals Rijkswaterstaat ook al had geconcludeerd, noch aan de WBI 2017 criteria.



Figuur 4-10 Dwarsprofiel geulwand van Ossenisse 1 / oeverwerk Raai 0.00. Rood: detailoevermetingen (jaarlijks) 1997-2019
 Groen: vaklodingen 1955, 1961, 1971, 1980, 1990, 2000. Bruin: horizontale uitstrekking geulwandbescherming.
 Donkerpaars: top Formatie van Maassluis-Peize-Waalre. Olijf: top Formatie Oosterhout. Aangemaakt in QGIS.

In het onbeschermd gebied tussen Ossenisse 1 en 2 (Figuur 4-11), raaien 1550 – 2600, is sprake van doorgaande erosie en regressie. Hier liggen matige erosiebestendige klei- of veenlagen waardoor er geen sprake is van snelle ontgronding of instabiliteiten, maar niettemin wel gestage achteruitgang, zoals eerder bij niet-beschermd gebied van matig-erodeerbare lagen is waargenomen.



Figuur 4-11 Dwarsprofiel Raai 2100 tussen Geulwand van Ossenisse 1 en 2. Zie Figuur 4-12 voor ligging raai. Rood: detailoevermetingen (jaarlijks) 1997-2019. Groen: vaklodingen 1961, 1971, 1980, 1990, 2000. Donkerpaars: top Formatie van Maassluis-Peize-Waalre. Olijf: top Formatie Oosterhout. Aangemaakt in QGIS.

4.1.5 Conclusies Ossenisse 1

De achteruitgang is bij aanleg van Ossenisse 1 gestopt maar de metingen laten nog wel sterke erosie zien vanaf 1997 tot heden bij de teen van de bestorting tot in de al eerder ingesneden harde Oosterhout laag waar deze lijkt te stabiliseren. Daarbij is er een zeer steil onbeschermd talud ontstaan, waarvan de stabiliteit niet kan worden gegarandeerd, hoewel er nog geen instabiliteiten zijn opgetreden. Suppleties hebben slechts een zeer tijdelijk effect. Dit betekent dat overwogen moet worden de teen van de geulwandverdediging te versterken bijv. door een aanvulling en afdekking vanaf de bestaande teen tot op de natuurlijke harde laag. In het onbeschermd gebied tussen Ossenisse 1 en 2 is nog steeds sprake van gestage achteruitgang. Om dit proces te stoppen moet overwogen worden ook het gebied tussen Ossenisse 1 en Ossenisse 2 van een geulwandverdediging te voorzien.

4.2 Ossensisse 2

4.2.1 Ligging oeverwerken en raaien

De geulwandverdediging Ossensisse 2 (Figuur 4-12 met ligging van de raaien) loopt van Kampersche Hoek naar het zuiden aansluitend op de bestaande oeverwerken bij Griete (voormalige Magarethapolder) en beschermen de Slikken van Hulst. Op dit gebied watert ook een spuisluis uit (gemaal Campen). Er liggen ook hoogspanningskabels in een afgeschermd constructie. Het ontwerp van de geulwandverdediging is van 1997, na een revisie is deze aangelegd in 2000 tot een diepte van 11 m – NAP en omvat de raaien 2650-4550 van noord naar zuid.

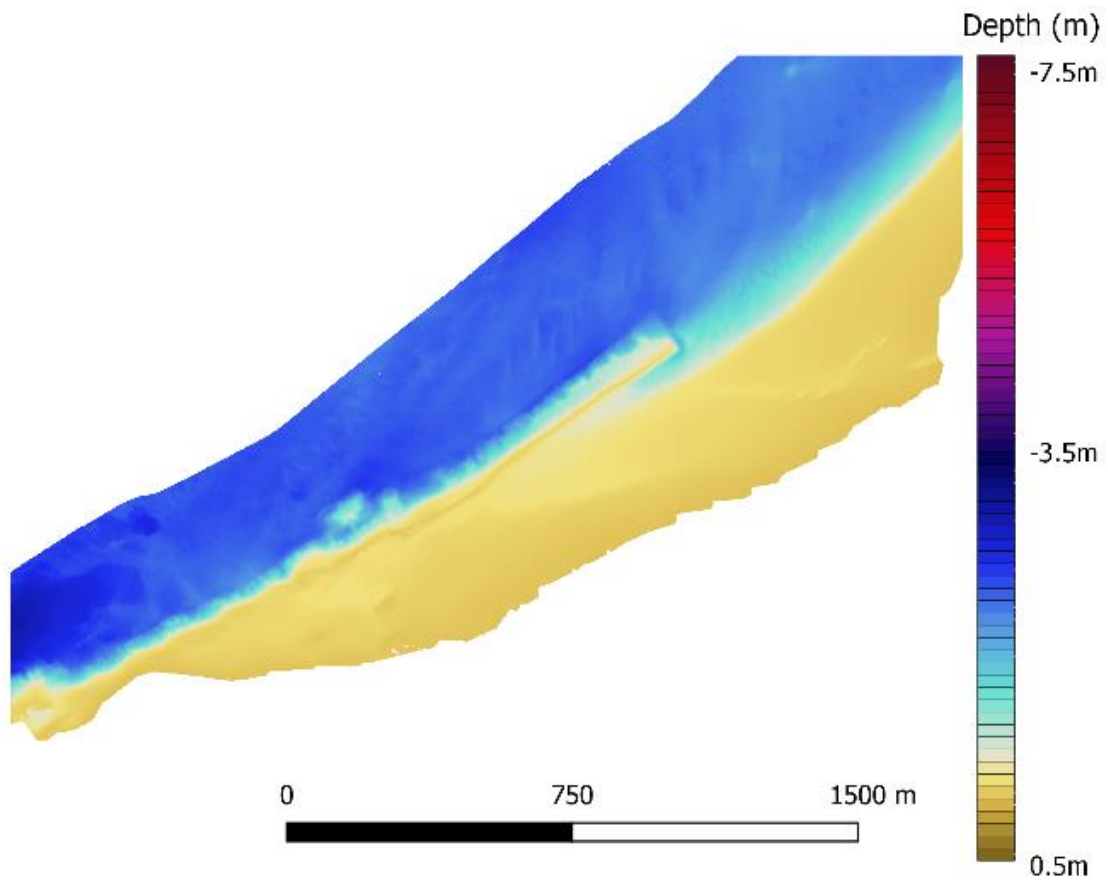


Figuur 4-12 Situatie geulwandverdediging Ossensisse 2 (in lichtgroen) bij Kampersche Hoek, in het zuiden aansluitend op bestaande oeverwerken bij Griete, met raainummers. Aangemaakt in ARCGIS.

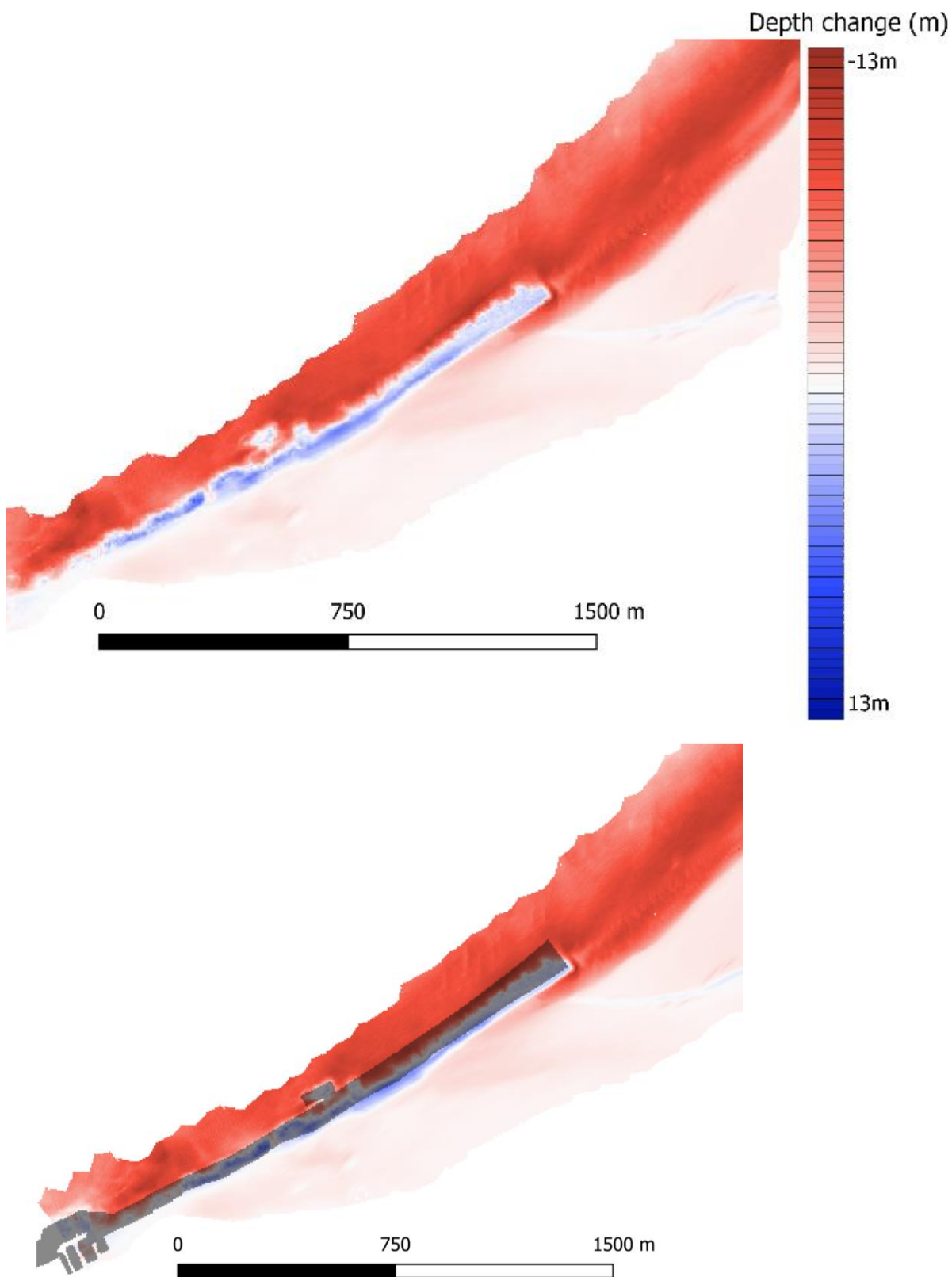
4.2.2 Detailbathymetrie en verschilkaarten

Figuur 4-13 geeft de meest recente gedetailleerde bathymetrie (2019) en Figuur 4-14 de opgetreden verschillen in de 20 jaar sinds de aanleg (1999). Te zien is dat er behalve sterke erosie bij de teen ook delen van de bestorting zijn verdwenen (de rode inhammen in het blauwe gebied). Dit wordt in de volgende paragrafen nader beschreven. Ook in het onbeschermd slik en direct achter de geulwandverdediging is erosie zichtbaar.

In de rapportage van Rijkswaterstaat wordt al vanaf 2012 vermeld dat de geulwand bij Ossensisse 2 niet stabiel is. Maatregelen bestaan tot nog toe uit het uitvoeren van suppleties (proefstortingen) en verder monitoren.



Figuur 4-13 Geulwandverdediging Ossenisse 2. Detailbathymetrie (april 2019).



Figuur 4-14 Geulwand van Ossenisse 2. Verschilmeting na 20 jaar (april 2019 - mei 1999). Boven zonder en onder met ligging geulwandverdediging en oeverwerken.

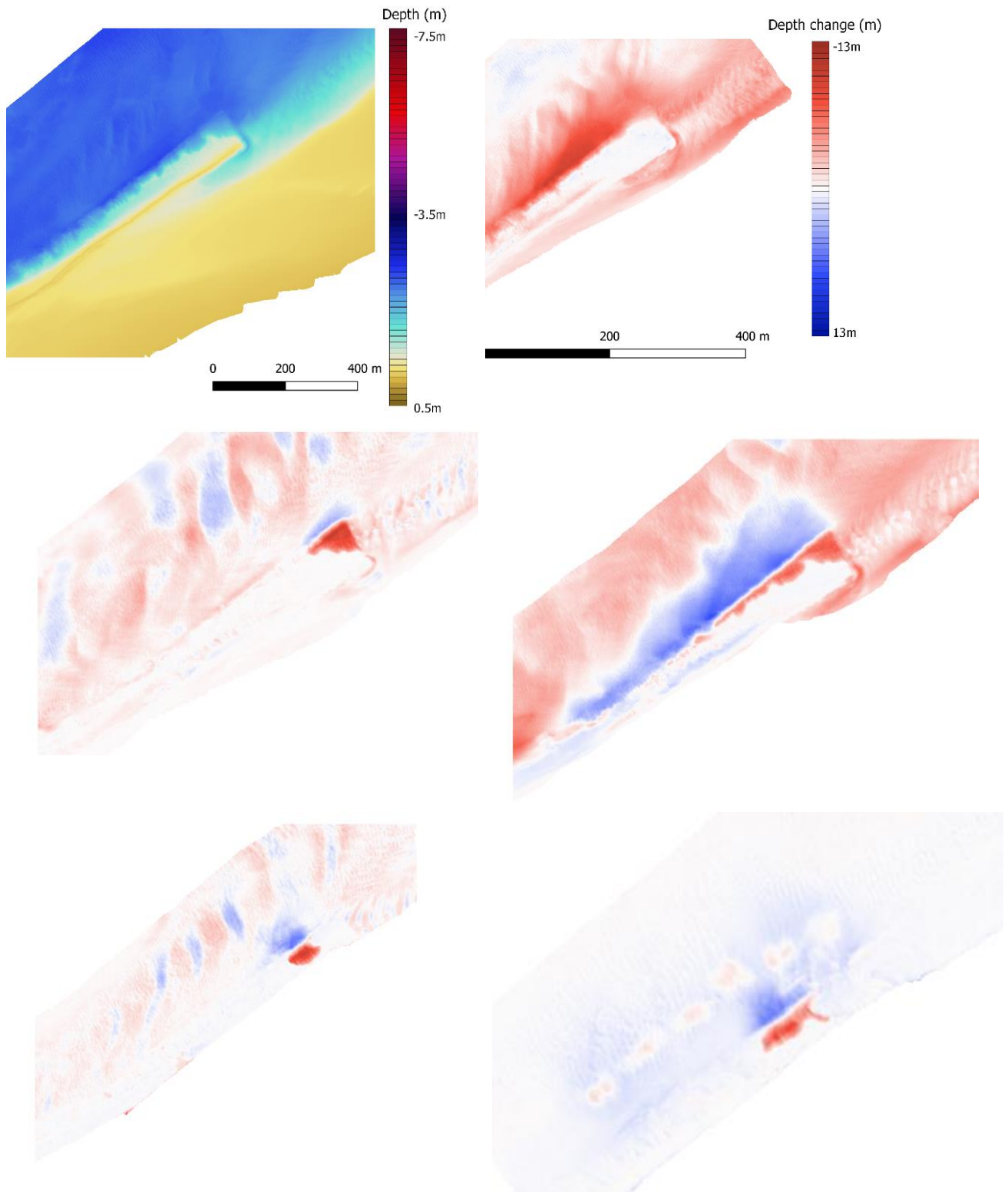
In Figuur 4-15 is verder ingezoomd op de constructie en zijn de ontwikkelingen in verschillende tijdvakken weergegeven. De dwarsprofielen worden beschreven in de volgende paragrafen.

Tot 2010 vond er vooral veel erosie en versteiling plaats bij de teen van de geulwandverdediging die bestond uit een losse bestorting en zich uitstreckte over een afstand tot 100 m van de eigenlijke beschermingsconstructie die bestaat uit een verzwaarde wand onder een helling van 1:3 (zie volgende paragraaf).

In de periode 2010 – 2014 zijn als gevolg van de verdieping en versteiling in de voorafgaande jaren een aantal oevervallen met een schelpvormige inscharing opgetreden waarbij in een aantal uren de bestorting van de teen, kennelijk niet voldoende om de terugschrijdende bresvloeiing te stoppen, is verdwenen, zie bijv. de onderste twee figuren van Figuur 4-15, waarbij de laatste is opgetreden tussen twee meetmomenten tussen 25 en 26 februari 2014. Deze figuren laten het kenmerkende profiel van erosie en sedimentatie van een oever- of dijkval zien (vaak toegeschreven aan zettingsvloeiing, zie ook Mastbergen et al, 2019). De afmetingen zijn beperkt (ongeveer 25 tot 50 m inscharing) in vergelijking met de grotere plaatvallen die in de Westerschelde worden waargenomen (Van Dijk et al, 2018). De figuren laten ook de verplaatsing zien van grootschalige duinvormen op de bodem van de geul.

De figuur midden links laat zien dat in 2011 de gehele noordelijke zijde van de geulwand-verdediging is aangetast, waarschijnlijk door meerdere vallen. De figuur midden rechts laat in rood de schade zien die in de periode 2010-2014 is opgetreden. Te zien is ook dat in de geul de bodem in deze periode tijdelijk is opgehoogd door suppleties terwijl op de achtergrond nog steeds sprake is van erosie.

De figuur rechtsboven laat zien dat na 2014 geen verdere schade is ontstaan, terwijl de erosie wel gestaag doorgaat. De suppleties hebben het proces mogelijk tijdelijk vertraagd, maar de metingen laten zien dat de erosie doorgaat en de harde kleilagen opnieuw worden bereikt en instabiliteiten weer zijn te verwachten.

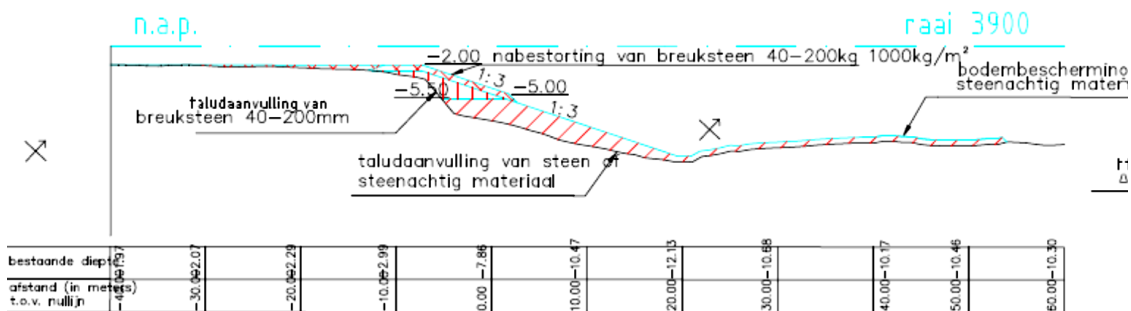


Figuur 4-15 Situatie geulwandverdediging Ossenisse 2. Links boven meest recente detailbathymetrie (2019). Rechts boven verschilbathymetrie 2019 – 2014. Midden links 2012 – 2011. Midden rechts 2014 – 2010. Onder links detail oeverval februari 2014 - januari 2014. Onder rechts detail oeverval 26 februari 2014 – 25 februari 2014. Aangemaakt in QGIS.

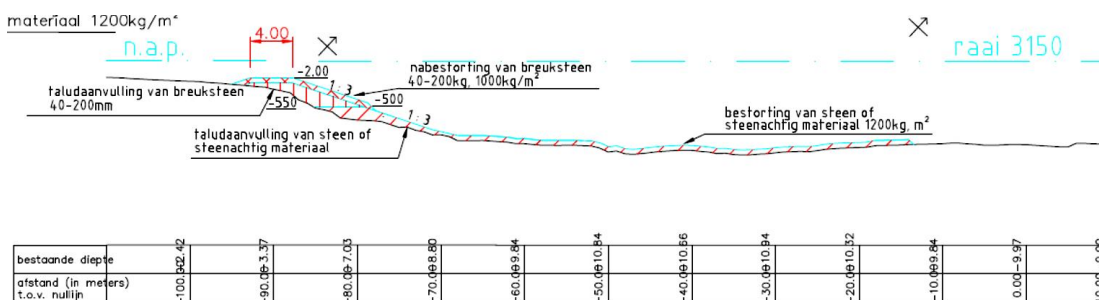
4.2.3 Ontwerptekeningen geulwandverdediging

De geulwandverdediging is in de periode 1998-2000 aangelegd, na een suppletie in 1998. Ten zuiden sluit het werk aan op de bestaande oeverwerken voor de bescherming van de polderdijken. De geulwandverdediging bestaat uit een steile taludaanvulling van breuksteen afgedekt met zware stenen 40-200 kg (op een zinkstuk?) onder een helling van circa 1:2,5 tot 4 van -2 tot een diepte toenemend van ongeveer -5 m tot -10 à -12 m. De zwak hellende teen van dit talud is vervolgens over een lengte van 30 tot 100 m afgestort met los steenachtig materiaal. De bestorting ligt dus op het in 1998 gesuppleerde zand en beschermt het gebied tegen erosie.

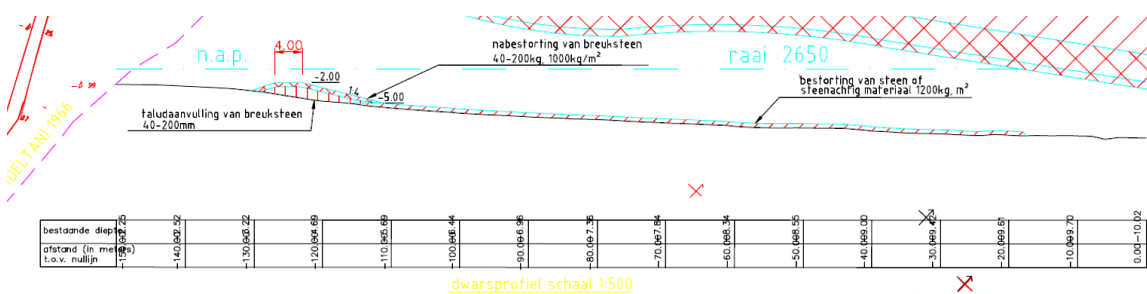
Het ontwerp van de geulwandverdediging is gegeven in de bestektekeningen ZLNW-1998-01063 en ZLRW-2002-01094, zie Figuur 4-16, Figuur 4-17 en Figuur 4-18. Voor ligging van de raaien zie Figuur 4-12. De geulwandverdediging is aangelegd in 2000 van -2 tot -11 m onder een helling van 1:3. Ook hier is het ontwerp aangepast aan de bodemligging ter plaatse na uitvoering van de suppleties.



Figuur 4-16 Ontwerp geulwand van Ossensisse 2 raai 3900. Ontwerp 1997. Teen over 35 m bestort op -10 m. Talud uitgevuld 1:3 tot -12 m. Kruin tot -2 m.



Figuur 4-17 Ontwerp geulwand van Ossensisse 2 raai 3150. Ontwerp 1997. Teen over 60 m bestort op -10 m. Talud uitgevuld 1:3 tot -8 m. Kruin tot -2 m.

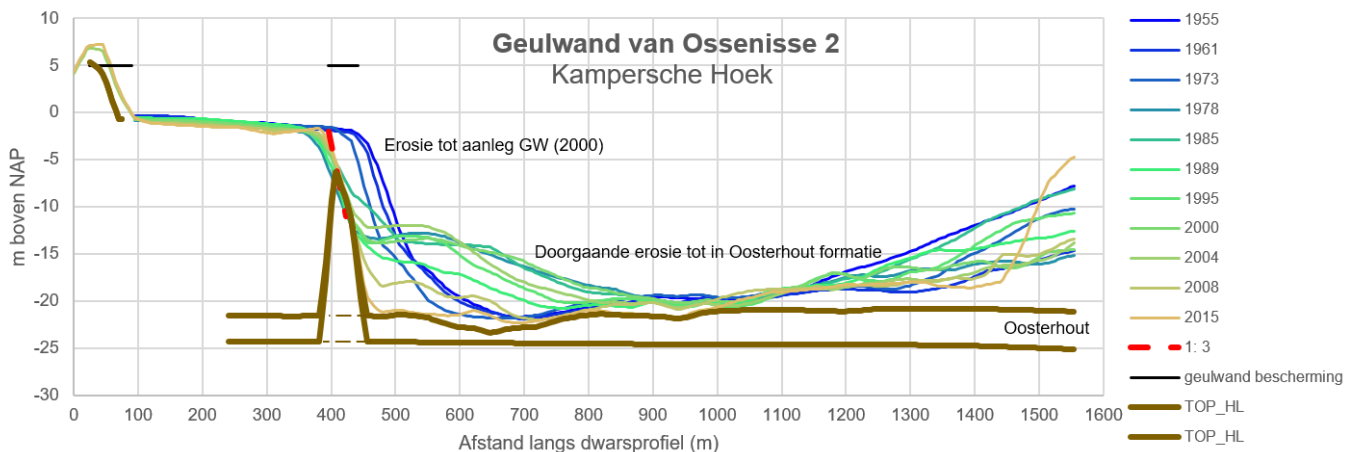


Figuur 4-18 Ontwerp geulwand van Ossensisse 2 raai 2650 (Noordzijde). Ontwerp 1997. Revisie 2000. Teen over 100 m bestort op -10 m. Talud 1:4 bestort tot -5 m. Kruin tot -2 m.

4.2.4 Dwarsprofielen in vaklodingen met geologische harde lagen

De vaklodingendata zijn voor een raai bij Kampersche Hoek (ongeveer raai 3800) in Excel opgenomen en laat de lange-termijn ontwikkelingen zien (Figuur 4-19).

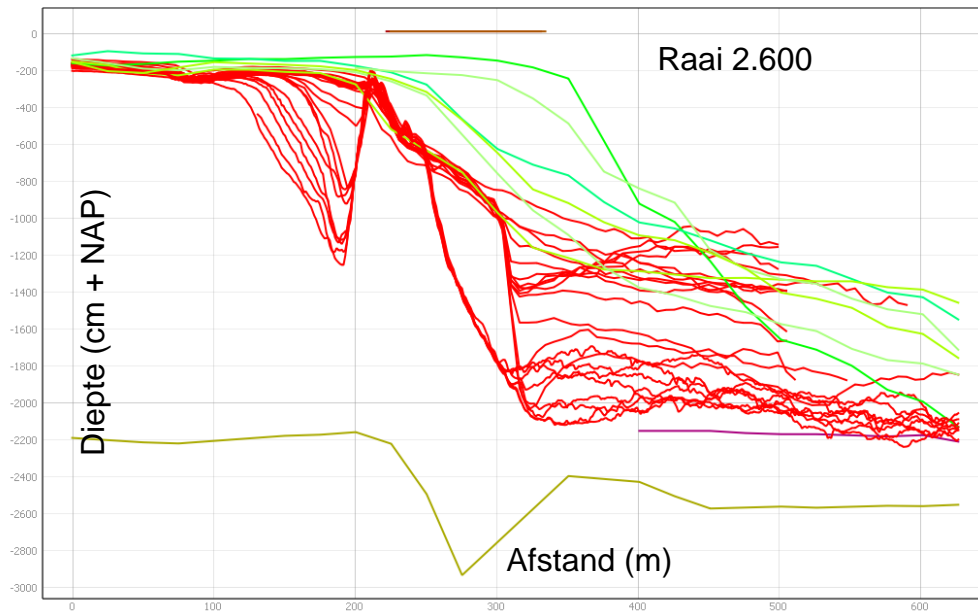
Tot in de jaren '70 trad hier gestage regressie op in de formatie Naaldwijk Walcheren. Vanaf 1955 is hier ruim 50 m slikkengebied verloren gegaan. In de periode tot 1998 is er erosie opgetreden tot -22 m in de Formatie van Oosterhout. In 1998 bij de aanleg van de geulwandverdediging is er eerst een suppletie uitgevoerd. De achteruitgang is sindsdien gestopt. In 2015 is ondanks herhaalde suppleties (1,5 Mm³ in 2014 en in 2015, 3,5 Mm³ in 2016), de erosie weer in de diepte doorgezet tot thans de eerder rond 1973 bereikte diepte, maar wel op grotere afstand van de geulwand ver onder de teen van de geulwandverdediging.



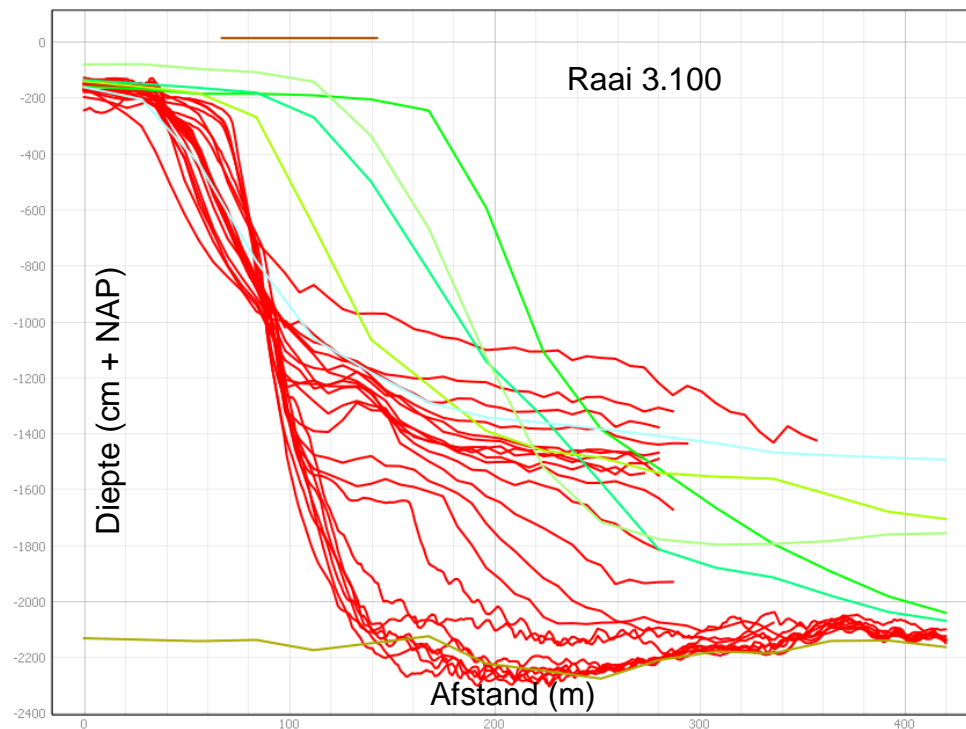
Figuur 4-19 Dwarsprofiel geulwand van Ossenis 2 ter hoogte van Kampersche Hoek (ongeveer raai 3100) met vaklodingdata, locatie oeverwerken en geologische formaties en harde lagen. Rood gearceerd = geulwandverdediging met helling van 1:3. Grijs: horizontale uitstrekking geulwandbescherming

4.2.5 Dwarsprofielen detailmetingen

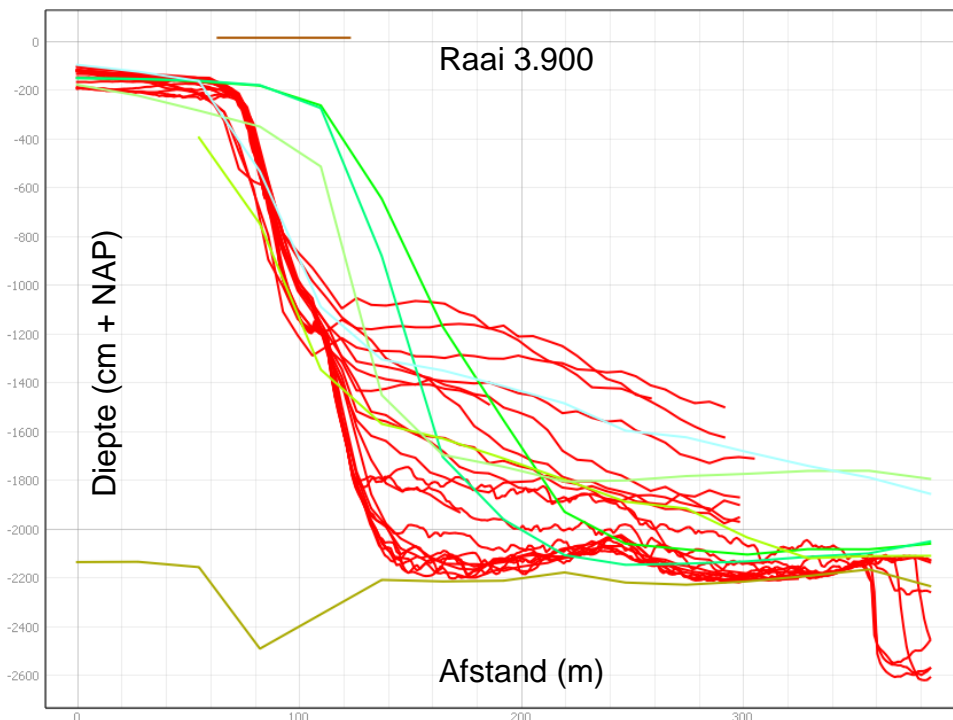
De dwarsprofielen (Figuur 4-20, Figuur 4-21, Figuur 4-22, voor ligging van de raaien zie Figuur 4-12) laten ook duidelijk zien dat er sprake is van sterke erosie en versteiling bij de teen van de geulwandverdediging. Ook zijn er oevervallen te zien (zettingvloeiingen), bijvoorbeeld in raai 2600 tussen november 2011 en mei 2012. Hierbij gaat steeds meer bestorting verloren die op de teen is aangebracht. De versterkte steile geulwand zelf is nog niet aangetast. Achter de geulwandverdediging ontstaat ook erosie door een uitschurende geul op het slik (afwatering Kampersche spuisluis). De situatie is potentieel gevaarlijk, maar blijft redelijk stabiel van 2014 tot op heden (2019). Het gesuppleerde zand is nu echter wel volledig weg en de diepste lagen van de geul zijn weer bereikt, nog iets dieper dan 2013 (voor de recente suppleties), maar wel weer iets dichterbij de geulwand. De geul achter de verdediging erodeert wel steeds verder en ook in raai 3100 is gestage achteruitgang te zien



Figuur 4-20 Dwarsprofiel Raai 2600 Geulwand van Ossensisse 2. Rood: detailoevermetingen (jaarlijks) 1997-2019 (oeverval in 2014). Groen: vaklodingen 1961, 1971, 1980, 1990, 1995, 2000. Bruin: horizontale uitstrekkingsgeulwandbescherming. Donkerpaars: top Formatie van Maassluis-Peize-Waalre. Olijf: top Formatie Oosterhout. Aangemaakt in QGIS.



Figuur 4-21 Dwarsprofiel Raai 3100 Geulwand van Ossensisse 2. Rood: detailoevermetingen (jaarlijks) 1997-2019. Groen: vaklodingen 1961, 1971, 1980, 1990, 2000. Bruin: horizontale uitstrekkingsgeulwandbescherming. Olijf: top Formatie Oosterhout. Aangemaakt in QGIS.



Figuur 4-22 Dwarsprofiel Raai 3900 Geulwand van Ossensisse 2. Rood: detailoevermetingen (jaarlijks) 1997-2019. Groen: vaklodingen 1961, 1971, 1980, 1990, 2000. Bruin: horizontale uitstrekking geulwandbescherming Donkerpaars: top Formatie van Maassluis-Peize-Waalre. Olijf: top Formatie Oosterhout. Aangemaakt in QGIS.

4.2.6 Dwarsprofielen in Excelsheets detailmetingen 2000 t/m 2012

Van de locatie Ossensisse 2 heeft Rijkswaterstaat de detail oeverbathymetriedata ook in Excel sheets beschikbaar gesteld voor de jaren 2012, 2013 en 2014. Deze sheets zijn gebruikt om in detail ook het ontwerp van de verdedigingswerken in de verschillende raaien in te plotten. Daartoe zijn de lijnen van de verdedigde geulwand (aangelegd onder een helling van 1:2,5 of 3) en de op het bestaande licht hellende talud aangebrachte teenbestorting volgens het ontwerp ingeplot in de verschillende raaien. Dit geeft een nog duidelijker beeld van het opgetreden degradatie proces dat grotendeels in deze jaren plaatsvond. Sindsdien zoals in de vorige paragraaf getoond is de achteruitgang niet gestopt, maar zijn geen grote oevervallen meer opgetreden.

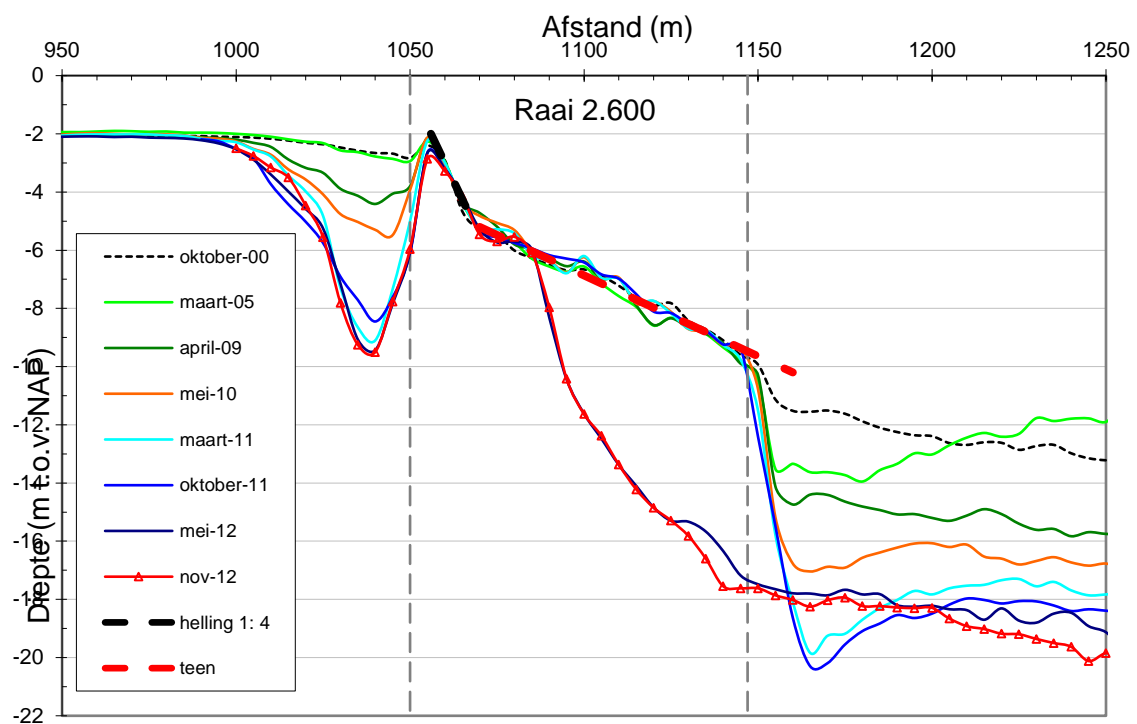
In 1998 is eerst een suppletie uitgevoerd tot ongeveer -10 m NAP en vervolgens is de geulwandverdediging aangelegd. In de raaien 2600 (noordzijde) en 2650, zie Figuur 4-23 en Figuur 4-24, bestaat de geulwandverdediging uit een afgestort steil talud 1:4 (zwarte gearceerd tot -5 m) en een lichtere flauw hellende steenbestorting aan de teen (rood gearceerd, tot -10 m). Het talud is uitgevuld met breuksteen onder een helling van 1:4 van -2 tot -5 m en nabestort met zware stenen. De flauw hellende bestaande teen is afgestort over een lengte van ruim 60 m met steen of steenachtig materiaal van -5 tot -10 m NAP.

In Figuur 4-23 en Figuur 4-24 zijn de ontwikkelingen in deze raaien in detail te zien vanaf de aanleg in 2000 tot november 2012. Het suppletiezand begint direct snel te eroderen tot een diepte van meer dan -20 m NAP en bij de rand van de bestorting ontstaat een zeer steile helling (ongeveer natuurlijk talud 1:1,6) over meer dan 10 m hoogte. In 2005 is nog een suppletie uitgevoerd maar deze stopt het proces niet. Tussen oktober 2011 en mei 2012 vindt een grote afschuiving (of zettingsvloeiing) plaats waarbij de bestorting over ruim 50 m in de diepte verdwijnt. Dit is ook al vermeld in het Rijkswaterstaat rapport van 2013. Maar ook zichtbaar is dat al direct in de eerste jaren behalve verdieping ook terugschrijding optreedt waarbij de bestorting op de teen wordt ondermijnd.

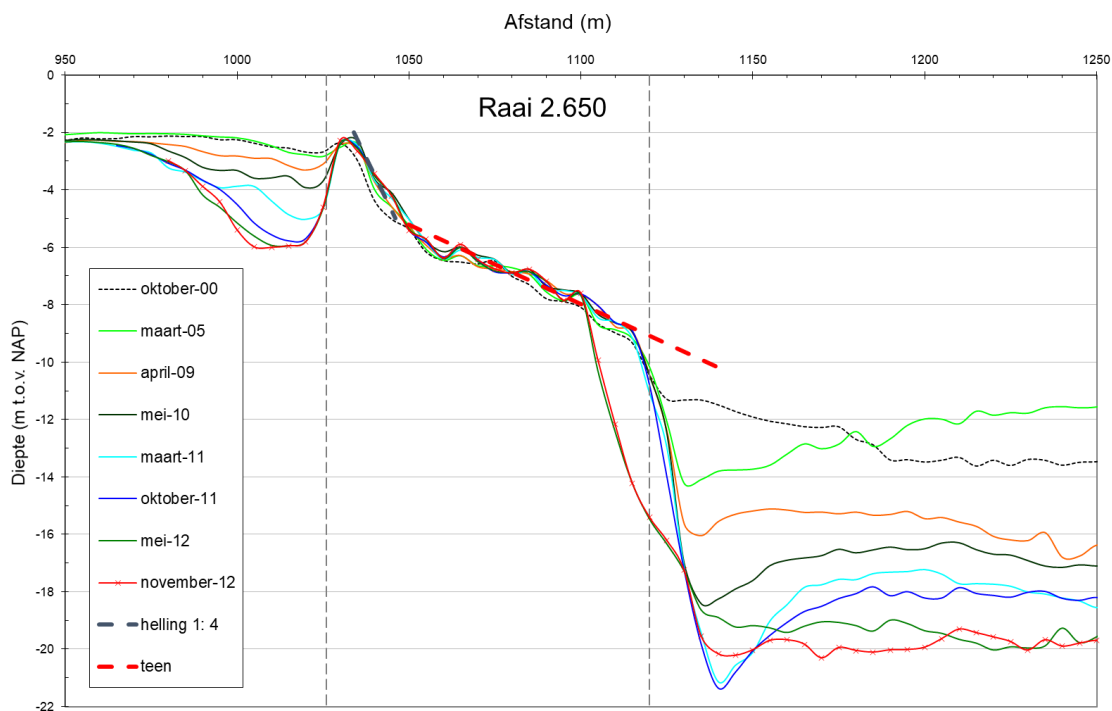
Hoewel er geen erosie optreedt in de bestorting op de teen en op de geulwand, is de bestorting kennelijk niet in staat deze terugschrijding te voorkomen. Het talud is ook duidelijk steiler en hoger dan toelaatbaar (volgens de nieuwe bevindingen in hoofdstuk 3). Aan de achterzijde (in het slik) treedt ook erosie op. Hier komt de geul van het afwateringskanaal in het slik uit. De bestorting van de teen wordt gestaag ondermijnd. Dit is ook te zien in raai 2900 (Figuur 4-25), namelijk schade door afschuiving in de flauw hellende bestorting op de teen na sterke versteiling door erosie, die doorgaat tot de oorspronkelijk diepte van voor 1978 op ruim -21 m NAP.

In raai 2700 is in januari 2014 weer een oeverval / afschuiving opgetreden, met doorgaande schade in de teen. Verder naar het zuiden neemt de diepteligging van de geulwand en de bestorting op de teen toe maar neemt de afstand waarover deze is aangebracht af.

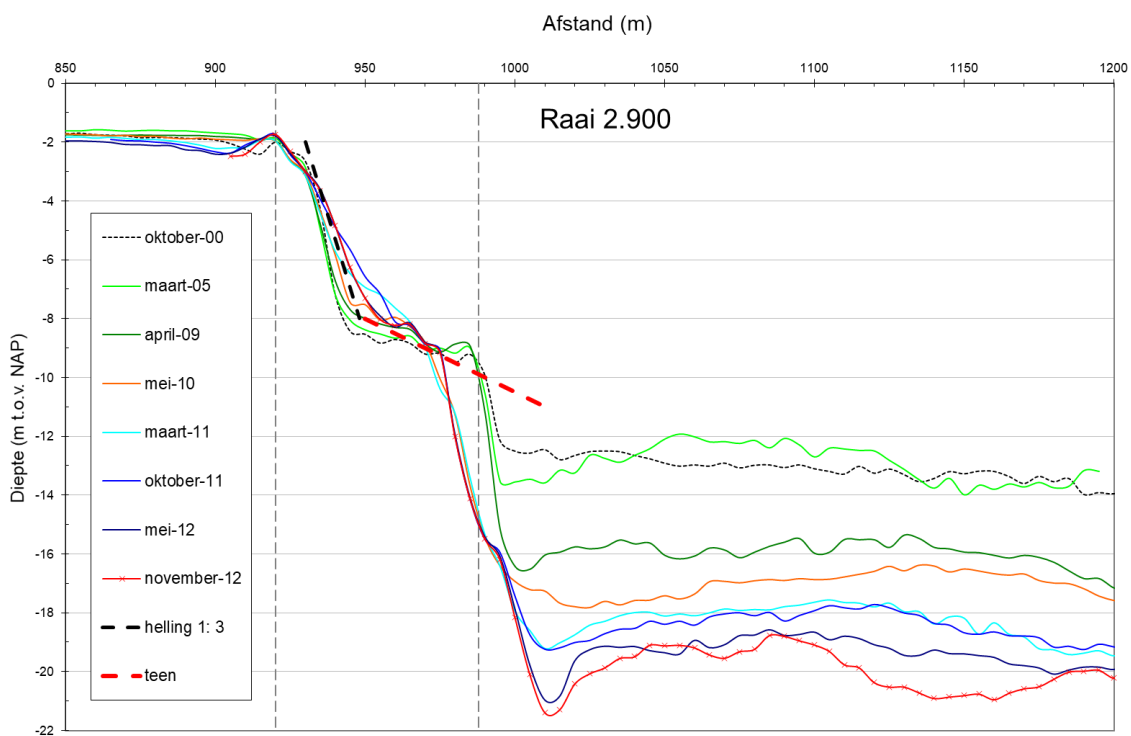
In Raai 3800 verder naar het zuiden (Figuur 4-26) is hetzelfde beeld te zien, maar de steile wand loopt hier dieper door (tot -12 à -14 m onder 1:3). De steenbestorting van de teen die bij aanleg ongeveer 35 m bestreek, is ook hier grotendeels 'opgegeten' door het steile erosiefront. De harde lagen op -22 m zijn hier ook al bereikt, maar de geulwandverdediging zelf is nog geheel intact en er is ook geen erosie aan de achterzijde. Mogelijk blijft wat van het steenmateriaal op de wand liggen maar stabiliteit is niet gegarandeerd bij verdere regressie en ondermijning.



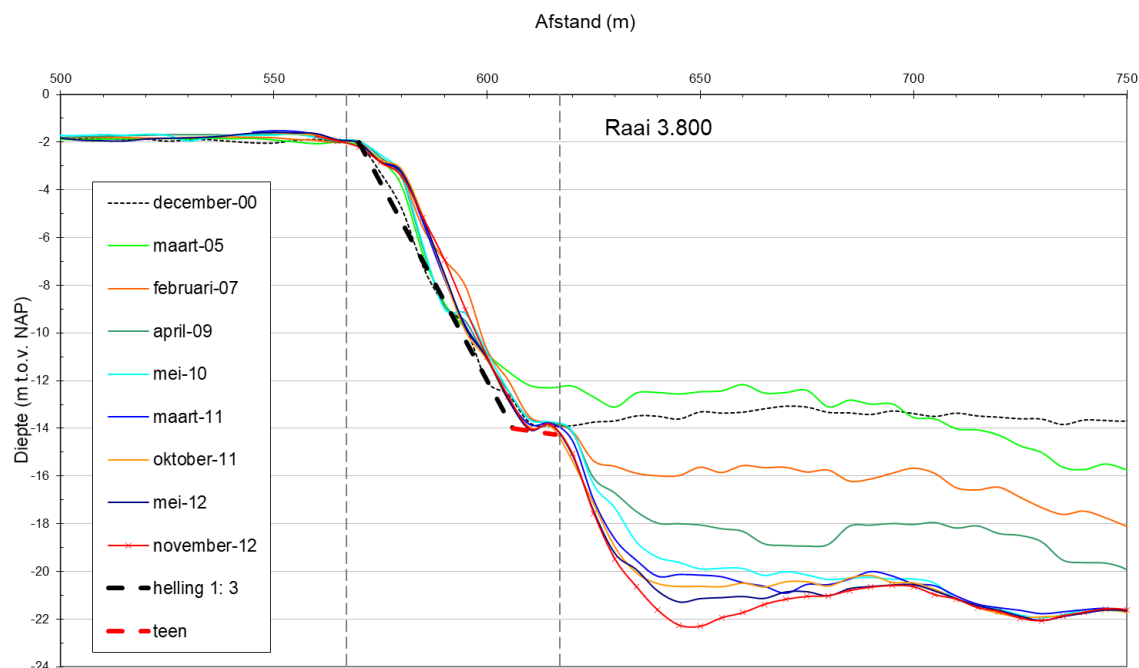
Figuur 4-23 Dwarsprofiel Raai 2600 (detail). Geulwand van Ossensisse 2 (2000-2012). Zwart gearceerd: geulwandverdediging onder helling 1:3. Rood gearceerd: teenbestorting. Deze is dus al over een flinke afstand verdwenen.



Figuur 4-24 Dwarsprofiel Raai 2650 (detail). Geulwand van Ossensisse 2 (2000-2012). Zwart gearceerd: geulwandverdediging onder helling 1:3. Rood gearceerd: teenbestorting (deels verdwenen).



Figuur 4-25 Dwarsprofiel Raai 2900 (detail). Geulwand van Ossensisse 2 (2000-2012). Zwart gearceerd: geulwandverdediging onder helling 1:3. Rood gearceerd: teenbestorting. (deels verdwenen).



Figuur 4-26 Dwarsprofiel Raai 3800 (detail). Geulwand van Ossensisse 2 (2000-2012). Zwart gearceerd: geulwandverdediging onder helling 1:3. Rood gearceerd: teenbestorting.

4.2.7 Conclusies Ossensisse 2

Net als bij Ossensisse 1 is na aanleg de achteruitgang van het gebied gestopt, maar vindt er in de jaren daarna sterke erosie plaats in de onbeschermd zone van het talud onder de teen van de bestorting. In 2005 is er weer een suppletie uitgevoerd maar die erodeert ook weer snel weg en rond 2011 wordt op -22 m zelfs weer de eerder ingesneden harde ondergrond bereikt, lokaal af en toe iets gecompenseerd door proefstortingen.

Op de rand van de steenbestorting van de teen van de geulwandverdediging ontstaat een zeer steil talud (steiler dan 1:2), dat gestaag steeds dieper wordt en uiteindelijk een hoogte van bijna 12 m krijgt. De rand van de bestorting wordt daardoor ondermijnd en brokkelt gestaag af. Er is inmiddels al over enkele tientallen meters regressie opgetreden over de gehele lengte van de geulwandverdediging.

De ontstane steile helling is niet stabiel. Op een aantal locaties is duidelijk zichtbaar dat grote afschuivingen (oevervallen) zijn opgetreden, vooral bij de noordelijke rand van de geulwandverdediging bijv. in raai 2900 in 2010, in raai 2650 in 2012 met een inscharing van ruim 50 m en in raai 2700 in 2014. Het steenmateriaal blijft waarschijnlijk op grotere diepte liggen.

De erosie en de aantasting van de bestorting was in de eerste jaren na aanleg erg sterk, maar lijkt zich de laatste jaren te stabiliseren, waarschijnlijk omdat de eerder ontstane insnijding de harde laag van Oosterhout op -22 m NAP is bereikt net als eerder in 1955, 1976, 1993 en laatst in 2011. Diepere erosie is nog niet waargenomen. De ondermijning van de bestorting van de teen met de afschuivingen is nog niet zo ver doorgedaan dat ook de steile zwaar bestorte taludbekleding is aangetast. Maatregelen zijn hier wel nodig om verdere aantasting te stoppen.

4.3 Zuidergat, Baalhoek en Overloop van Valkenisse

4.3.1 Ligging oeverwerken

De oeverwerken lopen van Perkpolder en de haven Walsoorden verder naar het zuiden tot voorbij Baalhoek langs het Verdronken Land van Saeftinghe (Konijnenschor). De geulwandverdediging sluit aan op de oeverwerken waardoor een aaneengesloten verdediging ligt in de buitenbocht van de geulen Bocht van Walsoorden, Zuidergat en Overloop van Valkenisse (Figuur 4-27).

De geulwandverdediging is aangelegd in 1998 tot een diepte van 18 m – NAP en beschermt het Schor van Baalhoek en het Verdronken Land van Saeftinghe.



Figuur 4-27 Geulwandverdediging Zuidergat, Baalhoek en Overloop van Valkenisse (met raaien) aansluitend op oeverwerken (in lichtgroen) bij Walsoorden. Dijkbekleding in donkergroen. Shapefiles in ARCGIS.

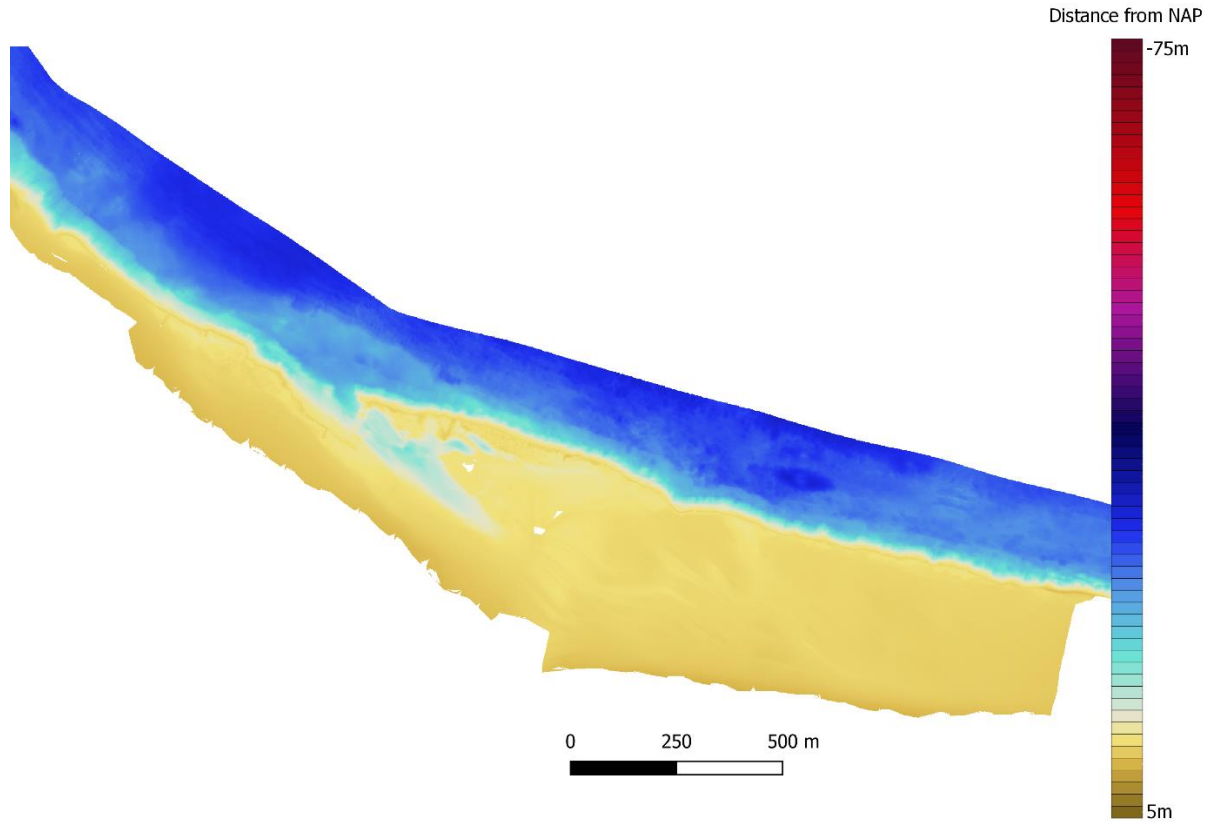
4.3.2 Detailkaarten Zuidergat, Baalhoek en Overloop Valkenisse

De detailmetingen in dit gebied betreffen de volgende drie deelgebieden (Figuur 1-3):

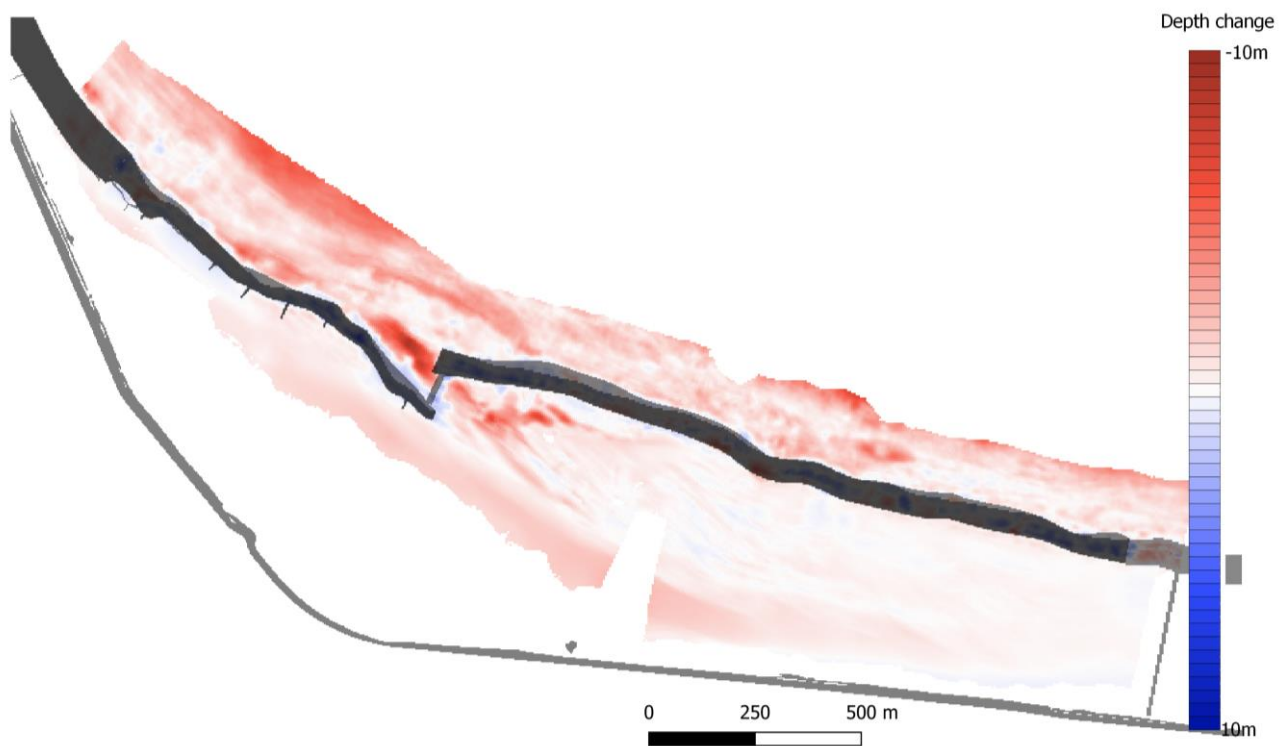
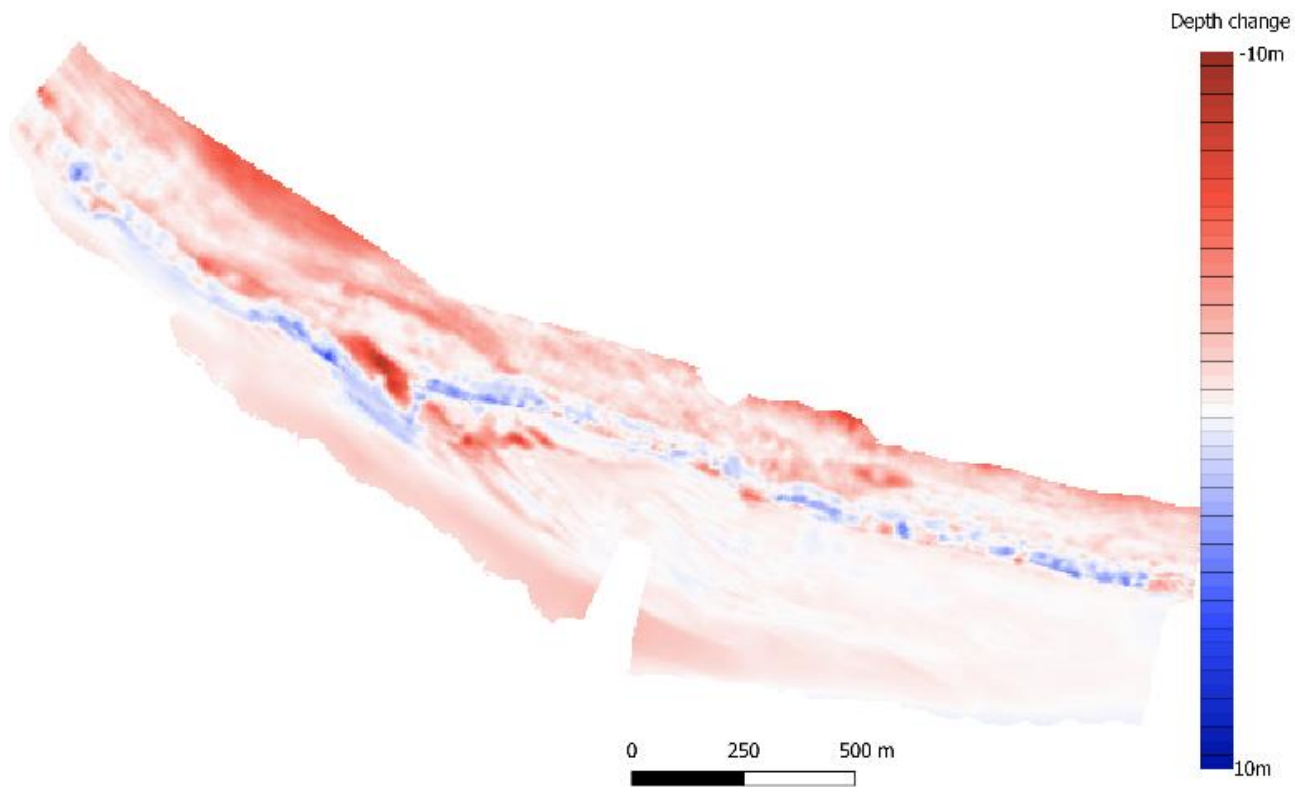
- Zuidergat,
- Baalhoek en
- Overloop van Valkenisse.

Zuidergat

De meest recente opname (2018) van het meetgebied Zuidergat is weergegeven in Figuur 4-28. De verschilkaartjes ter plaatse van de geulwandverdediging van de meest recente opname (2018) en de opname na aanleg (1997) zijn gegeven in Figuur 4-29. Er is sprake van erosie in de geul en bij de teen van de geulwandverdediging en bij de overgangsconstructie in het slik achter de geulwand. Er is geen sterke erosie te zien bij de teen van de verdediging.



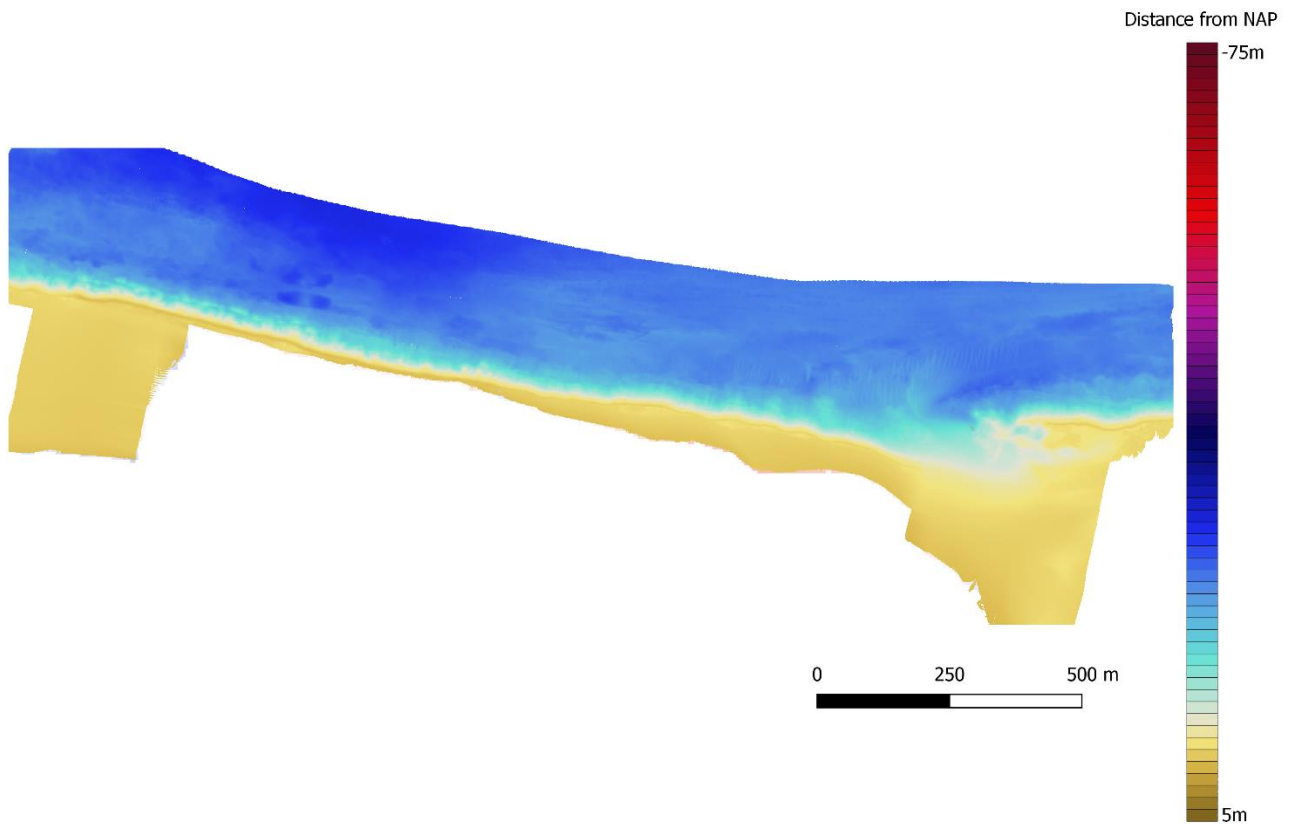
Figuur 4-28 Detailbathymetrie Zuidergat (2018).



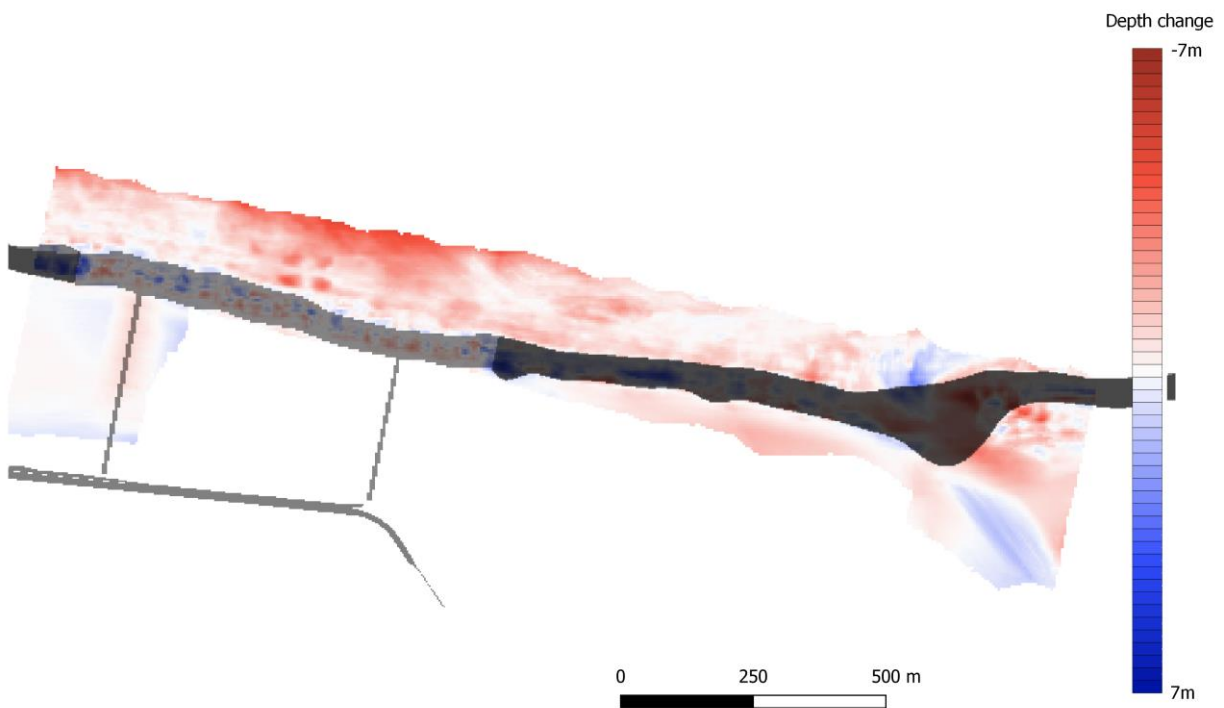
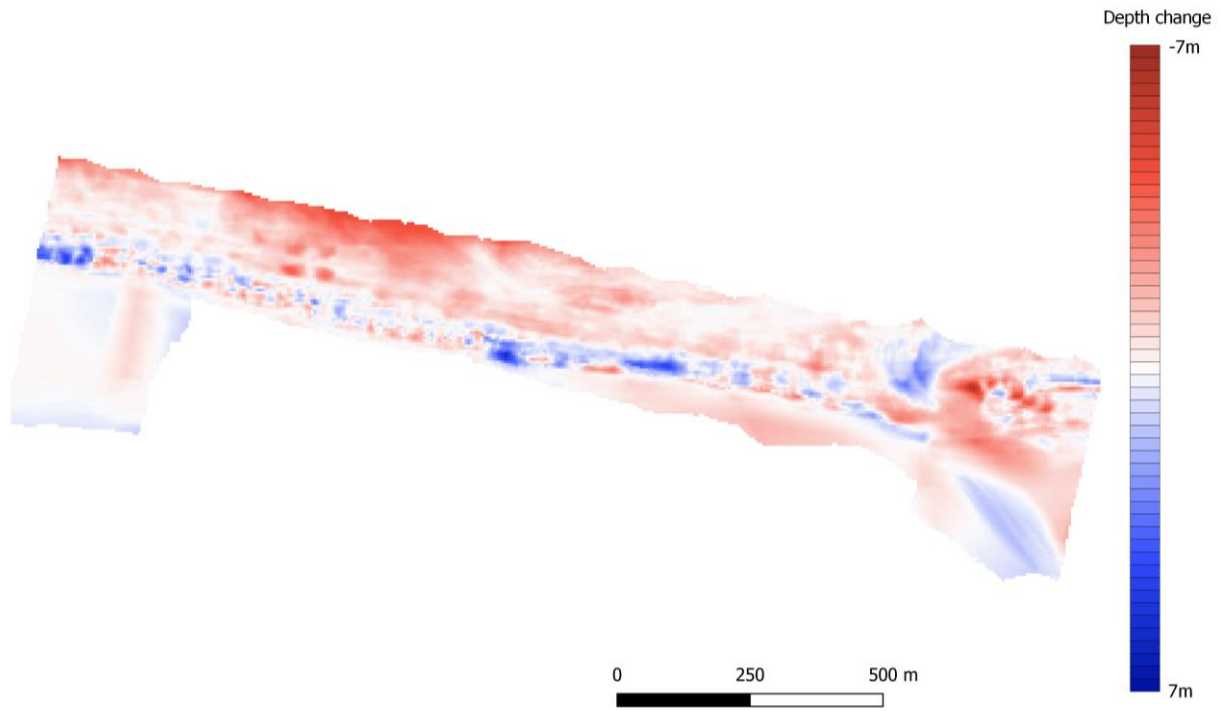
Figuur 4-29 Verschilbathymetrie Zuidergat 2018 – 1997. Boven zonder en onder met locatie geulwandverdediging en oeverwerken.

Baalhoek

De meest recente opname (2018) van het meetgebied Baalhoek is weergegeven in Figuur 4-30. De verschilkaartjes ter plaatse van de geulwandverdediging van de meest recente opname (2018) en de opname na aanleg (1997) in Figuur 4-31. Er is sprake van verdieping van de geul maar niet sterk bij de teen van de geulwandverdediging, er is sprake van afwisselend erosie en sedimentatie bij de overgangsconstructie.



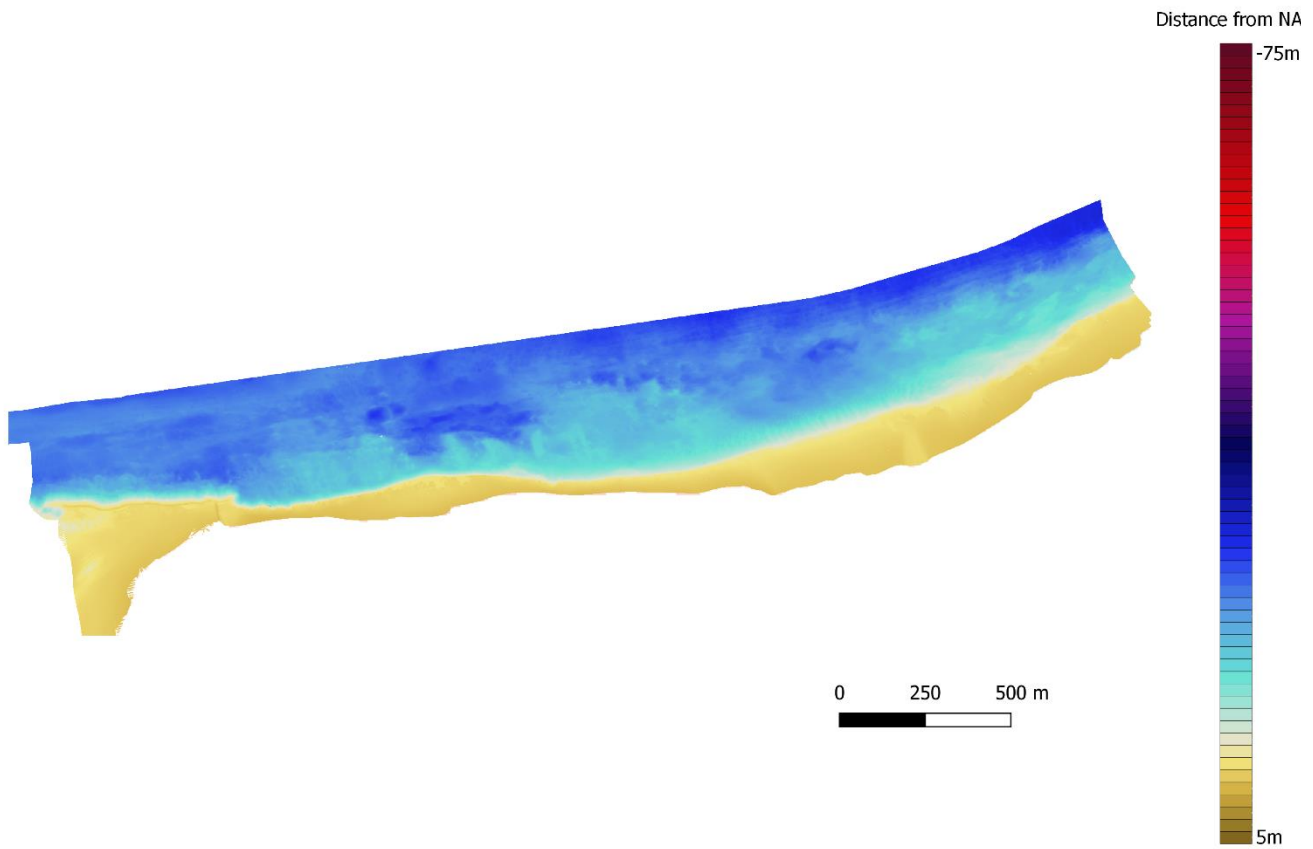
Figuur 4-30 Detailbathymetrie Baalhoek (2018).



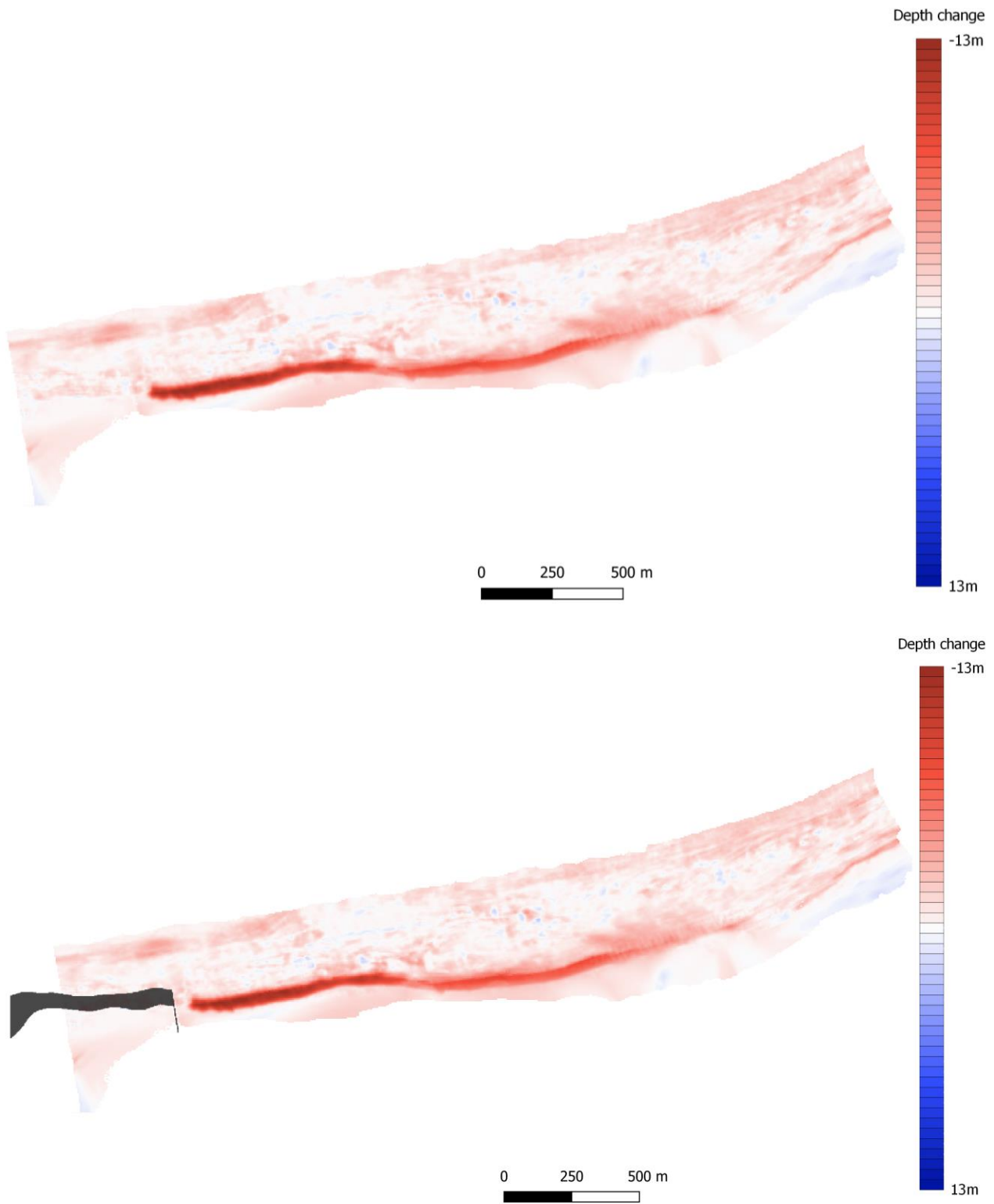
Figuur 4-31 Verschilbathymetrie Baalhoek 2018 – 1997. Boven zonder en onder met locatie geulwandverdediging en oeverwerken.

Overloop van Valkenisse

De meest recente opname (2018) van het meetgebied Overloop van Valkenisse is weergegeven in Figuur 4-32. De verschilkaartjes ter plaatse van de geulwandverdediging van de meest recente opname (2018) en de opname na aanleg (2002) zijn weergegeven in Figuur 4-33. Er is sprake van sterke erosie van de vooroever van het slik vanaf het punt waar de geulwandverdediging eindigt.



Figuur 4-32 Detailbathymetrie Overloop van Valkenisse (2018).



Figuur 4-33 Verschilbathymetrie Overloop van Valkenisse 2018 – 2002. Boven zonder en onder met locatie geulwandverdediging en oeverwerken.

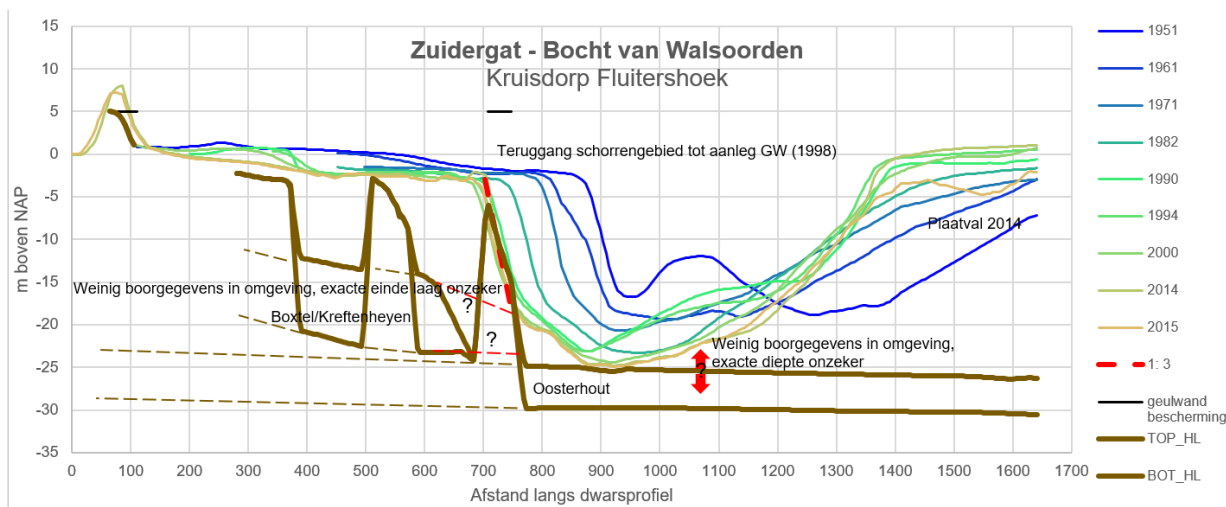
4.3.3 Vaklodingen met geologische ligging harde lagen

De vaklodingdata zijn in een drietal dwarsprofielen weergegeven in Excel, zie Figuur 4-34, Figuur 4-35 en Figuur 4-36. De vaklodingen zijn minder gedetailleerd dan de lokale oeverbathymetrie, maar omvatten ook de vooroever en de dijk en zijn beschikbaar over een lagere tijdsperiode (vanaf 1951) zodat de lange-termijn ontwikkelingen inzichtelijk worden. In de dataset zijn ook de geologische formaties en de ligging van de oeverwerken weergegeven. De gearceerde rode lijn geeft de ligging van de geulwandverdediging onder een helling van 1:3 schematisch weer.

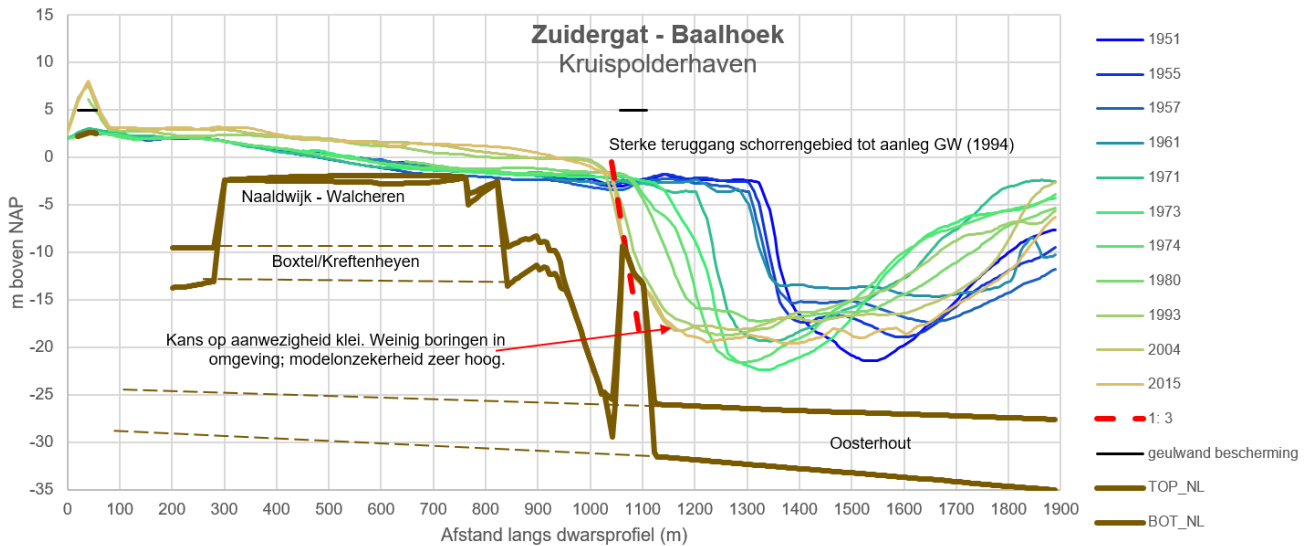
Figuur 4-34 gelegen in het Zuidergat bij Kruisdorp - Fluitershoek laat zien dat van 1951 – 1998 hier sterke erosie is opgetreden met als gevolg een verdieping van -17 tot -25 m NAP in de Formatie van Oosterhout, gepaard gaande met een horizontale regressie van 183 m. Na aanleg van de geulwandverdediging in 1998 tot een diepte van -18 m is de situatie stabiel. Er is geen sprake van verstelling bij de teen van de geulwandverdediging en ondermijning hoewel de geul toch aanzienlijk dieper ligt. Waarschijnlijk omdat de aangesneden laag van Boxtel-Kreftenheye, boven Oosterhout, ook nog behoorlijk erosiebestendig is. Deze laag ligt nu waarschijnlijk aan de oppervlakte hoewel het geologisch model een wat dieper gelegen harde laag aangeeft (rode pijl in figuur).

Figuur 4-35 bij Kruispolderhaven geeft een vergelijkbaar beeld. Van 1951 – 1994 is hier een verdieping opgetreden tot -19 m in de Formatie Maassluis Peize Waalre, de laag die nog boven Oosterhout ligt. De horizontale teruggang was hier 290 m voordat de geulwandverdediging is aangelegd in 1994 tot een diepte van maximaal -19 m. De geul blijft heel langzaam insnijden maar de teen onder de geulwandverdediging is niet steil.

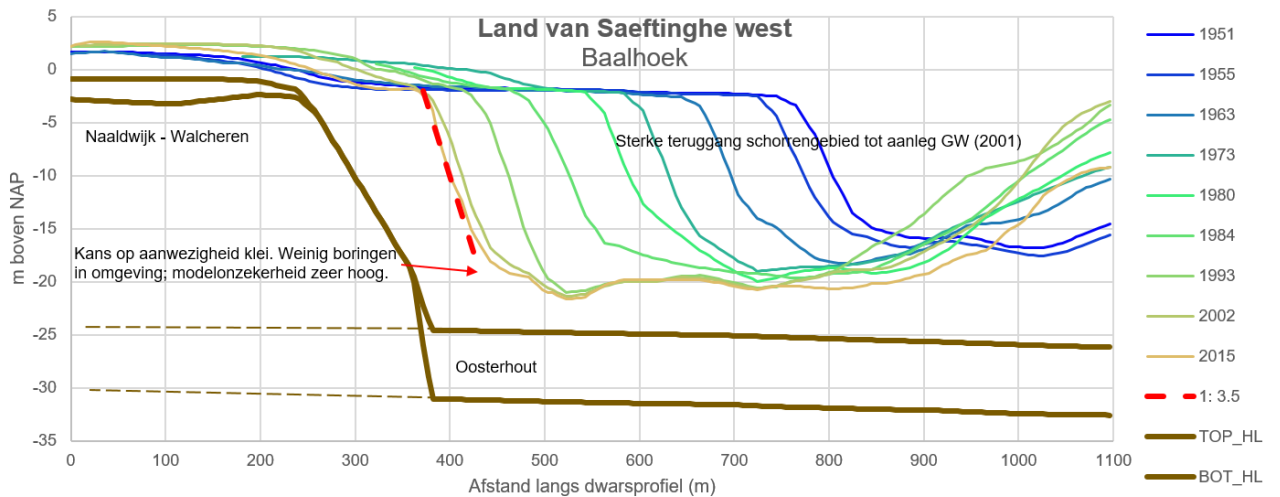
Ook Figuur 4-36 in de Overloop van Valkenisse bij Saeftinghe geeft een vergelijkbaar beeld. Van 1951 – 2000 was hier erosie tot -22 m tot in de harde lagen van de Formatie van Oosterhout met een teruggang van meer dan 300 m tot de aanleg van de geulwandverdediging in 2001. In het onverdedigde deel van het Verdrongen Land van Saeftinghe (Konijnenschor) is nog steeds sprake van doorgaande erosie en regressie. De geul Ijskelder migreert naar het oosten.



Figuur 4-34 Dwarsprofiel geulwand Zuidergat – Bocht van Walsoorden ter hoogte van Kruisdorp - Fluitershoek met vaklodingdata, locatie oeverwerken en geologische formaties en harde lagen. Rood gearceerd = geulwandverdediging met helling van 1:3. Grijs: horizontale uitstrekking geulwandbescherming.



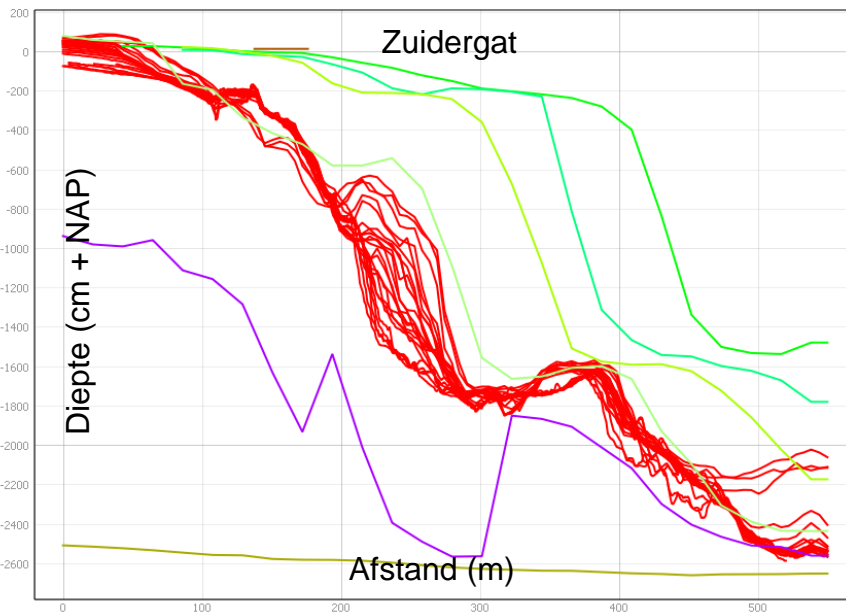
Figuur 4-35 Dwarsprofiel geulwand Zuidergat – Baalhoek ter hoogte van Kruispolderhaven met vaklodingdata, locatie oeverwerken en geologische formaties en harde lagen. Rood gearceerd = geulwandverdediging met helling van 1:3. Grijs: horizontale uitstreking geulwandbescherming.



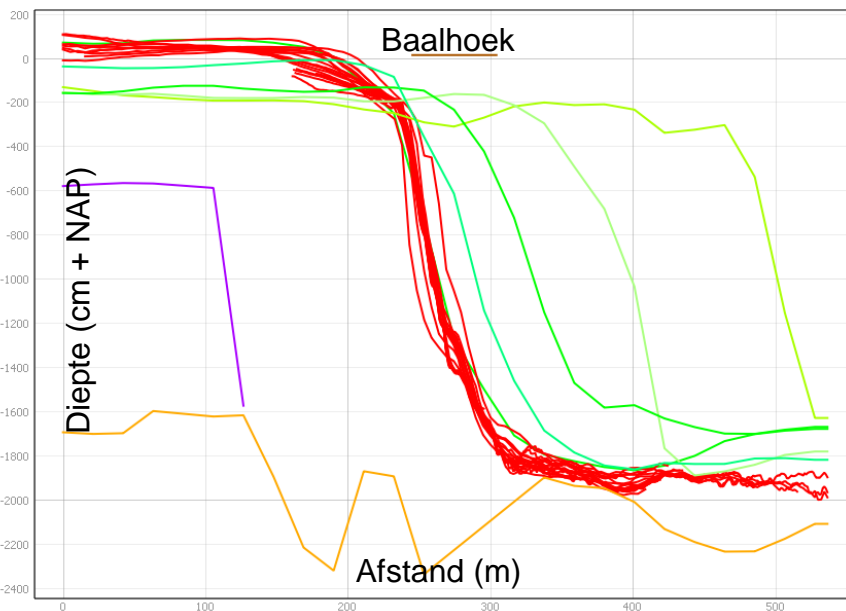
Figuur 4-36 Dwarsprofiel geulwand Overloop van Valkenisse ter hoogte van Baalhoek – Land van Saeftinghe West met vaklodingdata, locatie oeverwerken en geologische formaties. Rood gearceerd = geulwandverdediging met helling van 1:3. Grijs: horizontale uitstreking geulwandbescherming.

4.3.4 Dwarsprofielen detail

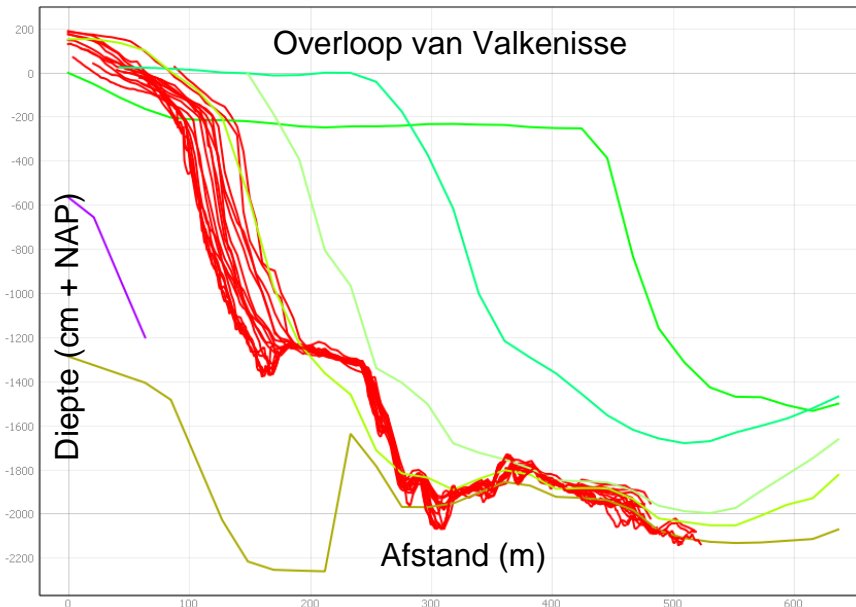
In QGIS zijn dwarsprofielen gemaakt waarin alle datasets inclusief de gedetailleerde oevermetingen zijn weergegeven. Hiervoor zijn dezelfde raaien geselecteerd als in de vorige paragraaf (Zuidergat, Figuur 4-37, Baalhoek, Figuur 4-38). Deze geven hetzelfde beeld te zien. Figuur 4-39, Saeftinghe is genomen net ten oosten van de verdediging. Te zien is dat de achteruitgang hier door blijft gaan.



Figuur 4-37 Dwarsprofiel verdedigde geulwand Zuidergat – Bocht van Walsoorden ter hoogte van Kruisdorp – Fluitershoek. Rood: detailoevermetingen (jaarlijks) 1994-2018. Groen: vaklodingen 1955, 1971, 1980, 1990. Bruin: horizontale uitstrekking geulwandbescherming. Paars: top Boxtel-Kreftenheye. Olijf: top Formatie Oosterhout. Aangemaakt in QGIS.



Figuur 4-38 Dwarsprofiel verdedigde geulwand Baalhoek ter hoogte van Kruispolderhaven. Slikken van Baalhoek. Rood: detailoevermetingen (jaarlijks) 1993-2018. Groen: vaklodingen 1955, 1971, 1980, 1990, 2000. Bruin: horizontale uitstrekking geulwandbescherming. Paars: top Boxtel-Kreftenheye. Oranje: top Formatie Maassluis-Peize-Waalre. Aangemaakt in QGIS.



Figuur 4-39 Dwarsprofiel onverdedigde geulwand Overloop van Valkenisse ter hoogte van Land van Saeftinghe. Rood: detailoevermetingen (jaarlijks) 1999-2018. Groen: vaklodingen 1955, 1971, 1990, 2000. Paars: top Boxtel-Kreftenheye. Olijf: top Formatie Oosterhout. Aangemaakt in QGIS.

4.3.5 Conclusies Zuidergat, Baalhoek en Overloop van Valkenisse

Door de aanleg van de geulwandverdediging is de sterke achteruitgang van het slik gestopt. Er is geen sprake van sterke verstelling en ondermijning bij de teen van de geulwandverdediging. De erosie gaat hier langzaam omdat zich hier natuurlijke harde lagen bevinden en de taluds zijn niet steil. De geulwandverdediging is stabiel.

In het onverdedigde deel van het Verdronken Land van Saeftinghe (Konijnenschor) is nog steeds sprake van doorgaande erosie en regressie.

4.4 Bath

4.4.1 Ligging oeverwerken

Figuur 4-40 geeft de ligging van de oeverwerken en de geulwandverdediging bij Bath weer. Deze beschermen de Slikken van Bath.

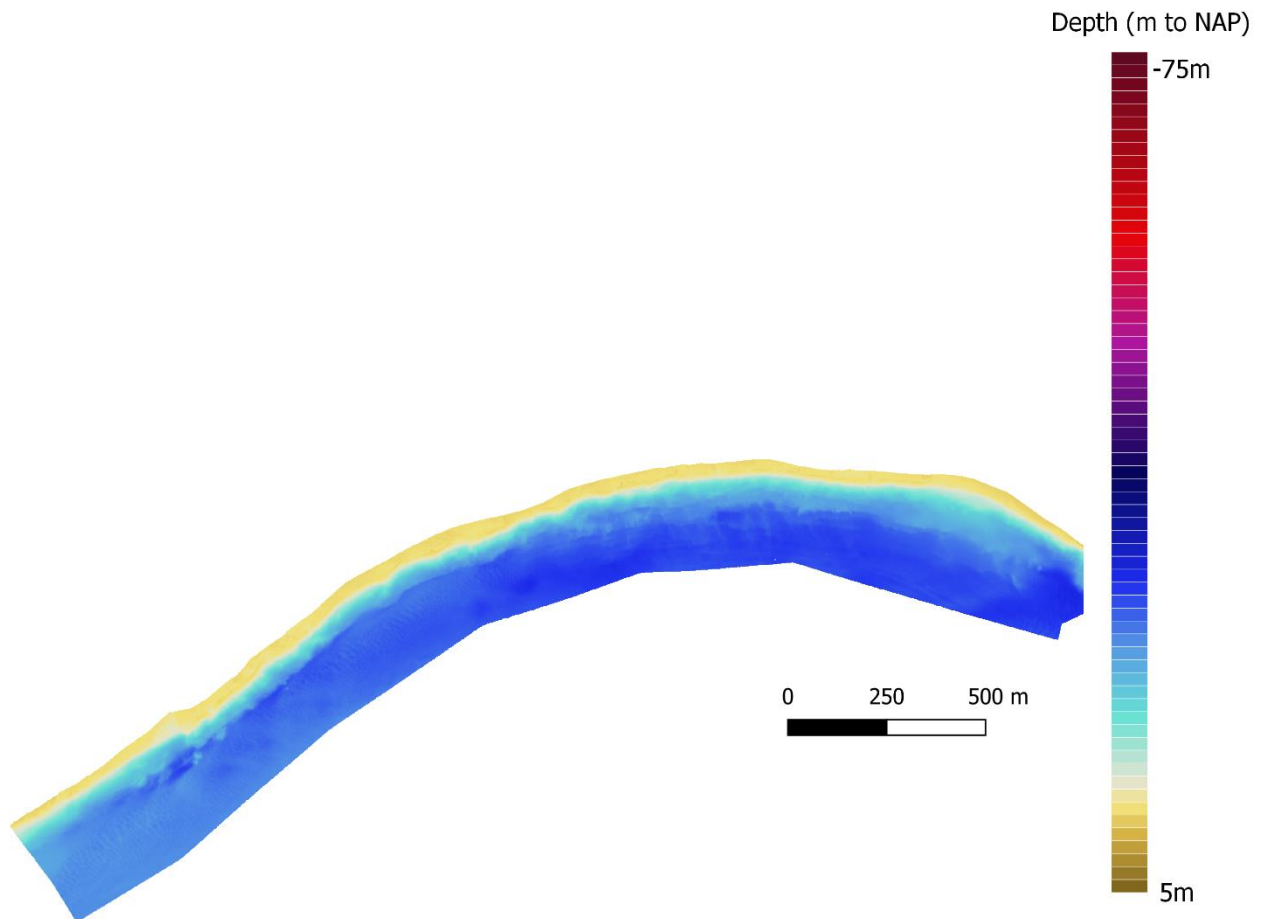
De geulwandverdediging is aangelegd in 1996 en loopt van -2 m tot -17 m NAP.



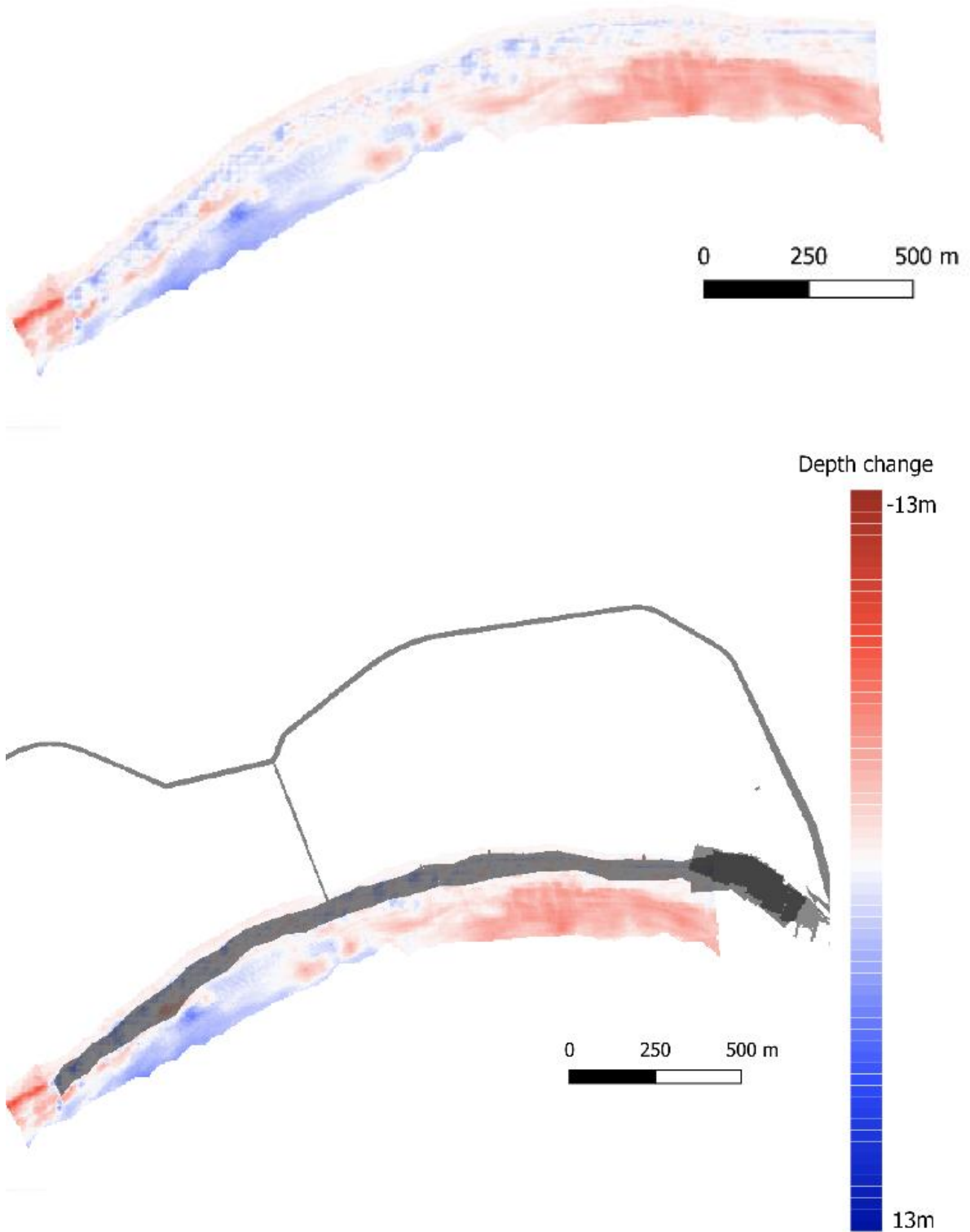
Figuur 4-40 Geulwandverdediging bij Bath met oeverwerken en ligging raai. (ARCGIS).

4.4.2 Detailkaarten Bath

De diepte en verschilkaartjes van de geulwandverdediging van de meest recente opname (2018) en de opname na aanleg (1997) zijn weergegeven in Figuur 4-41 en Figuur 4-42. Er is sprake van lichte erosie bij de teen van de geulwandverdediging aan de oostelijke zijde en lichte aanzanding aan de westelijke zijde. In het onbeschermd deel aan westelijke zijde is sprake van doorgaande erosie van het slik, zelfs tot achter de geulwandverdediging.



Figuur 4-41 Detailbathymetrie Bath (2018).

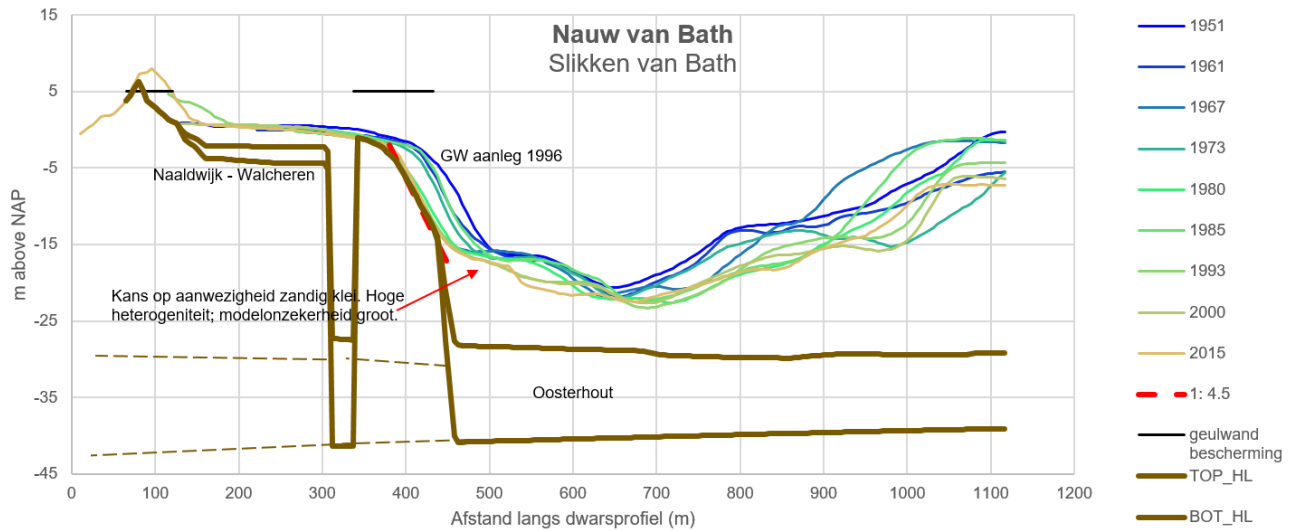


Figuur 4-42 Verschilbathymetrie Bath 2018 – 1997. Boven zonder en onder met locatie geulwandverdediging en oeverwerken.

4.4.3 Vaklodingen met geologische liggen harde lagen

Figuur 4-43 geeft het dwarsprofiel bij Bath in Excel met vaklodingendata, geologische formaties en aanleg geulwandverdediging. Te zien is dat de geulwand stabiel is vanaf 1996. Daarvoor (vanaf 1951) is er sprake van matige erosie tot -21 m NAP in de Formatie van Maassluis Peize Waalre en een achteruitgang van 20 m. De teen van de geulwand is niet steil.

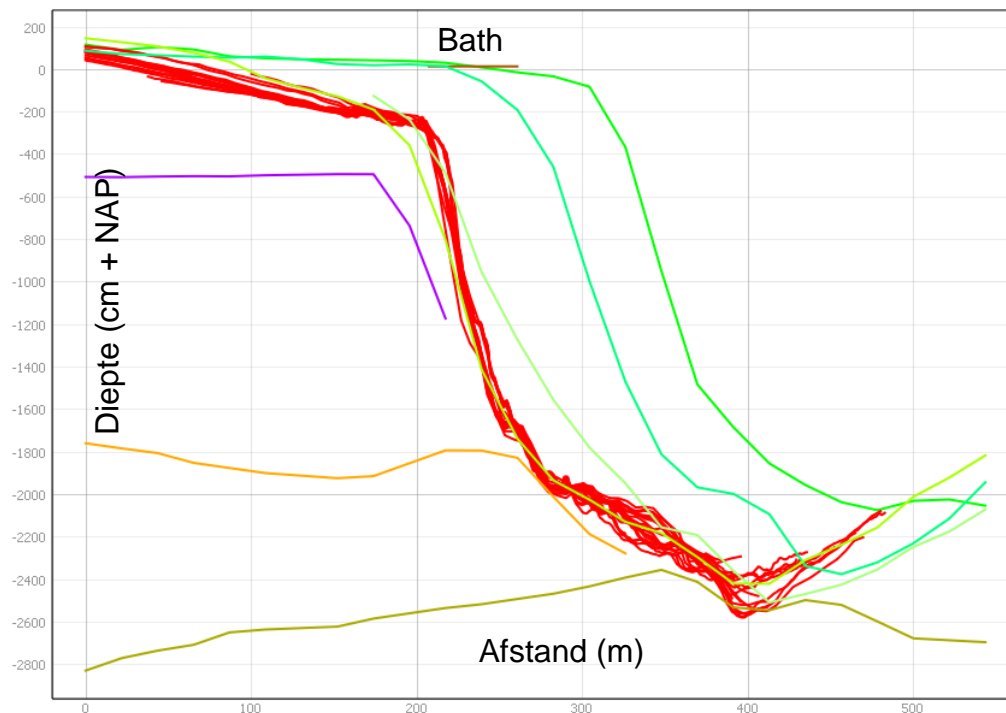
In het onverdedigde deel van de geulwand (raai 500) is in 2010 een oeverval geconstateerd met een inscharing over ca 25 m, maar deze herstelt zich weer in de volgende jaren.



Figuur 4-43 Dwarsprofiel geulwand bij Bath met vaklodingendata, locatie oeverwerken en geologische formaties. Rood gearceerd = geulwandverdediging met helling van 1:4,5. Grijs: horizontale uitstrekking geulwandbescherming.

4.4.4 Dwarsprofielen detail

De detailmetingen bevestigen wat de vaklodingen ook al laten zien (Figuur 4-44). De rode lijnen vertonen nauwelijks verschillen. Dat betekent dus dat de situatie stabiel is.



Figuur 4-44 Dwarsprofiel verdedigde geulwand bij Bath. Rood: detailoevermetingen (jaarlijks) 1994-2018. Groen: vaklodingen 1955, 1961, 1980, 1995. Bruin: horizontale uitstrekking geulwandbescherming. Paars: top Boxtel-Kreftenheye. Oranje: top Formatie Maassluis-Peize-Waalre. Olijf: top Formatie Oosterhout. Aangemaakt in QGIS.

4.4.5 Conclusies Bath

Er is geen sprake van versteiling en ondermijning bij de teen van de geulwandverdediging. De erosie gaat hier langzaam omdat zich hier natuurlijke harde lagen bevinden en de taluds zijn niet steil. De geulwandverdediging is stabiel.

In het gebied ten westen van de geulwandverdediging gaat de erosie van het slik door, zelfs tot achter de geulwandverdediging.

4.5 Verdrongen Land van Saeftinghe (oost)

4.5.1 Ligging oeverwerken

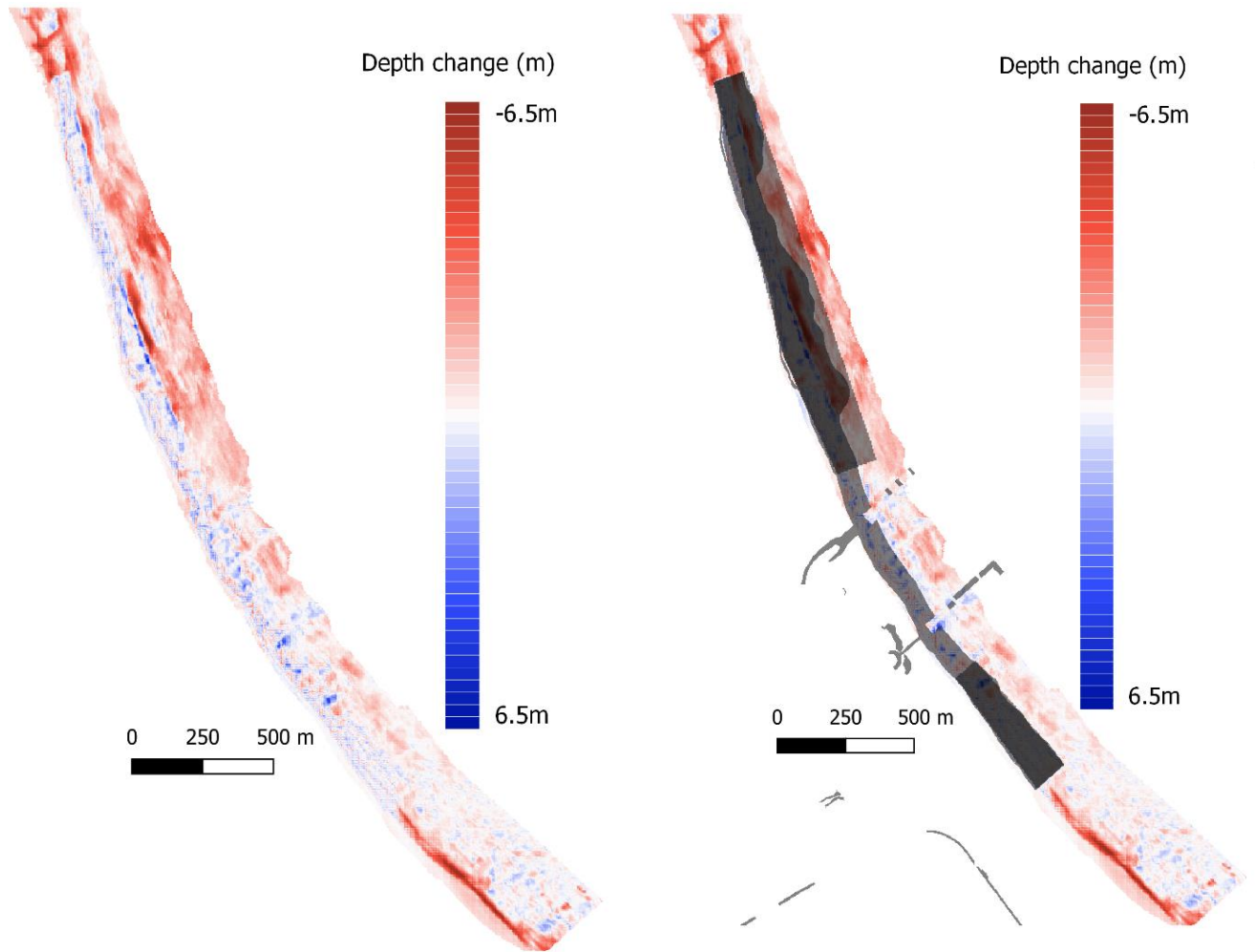
De ligging van de oeverwerken en de geulwandverdediging, aangelegd in 2002 met de ligging van de beschouwde raai is te zien in Figuur 4-45.



Figuur 4-45 Geulwandverdediging bij Land van Saeftinghe (Oost) met oeverwerken (roze). Hier is ook de gaspijpleiding te zien, het Sieperdaschor en de dijken van de Hedwige- en andere polders (donkergroen). (Shapefiles in ARCGIS).

4.5.2 Verschilkaarten Saeftinghe (oost)

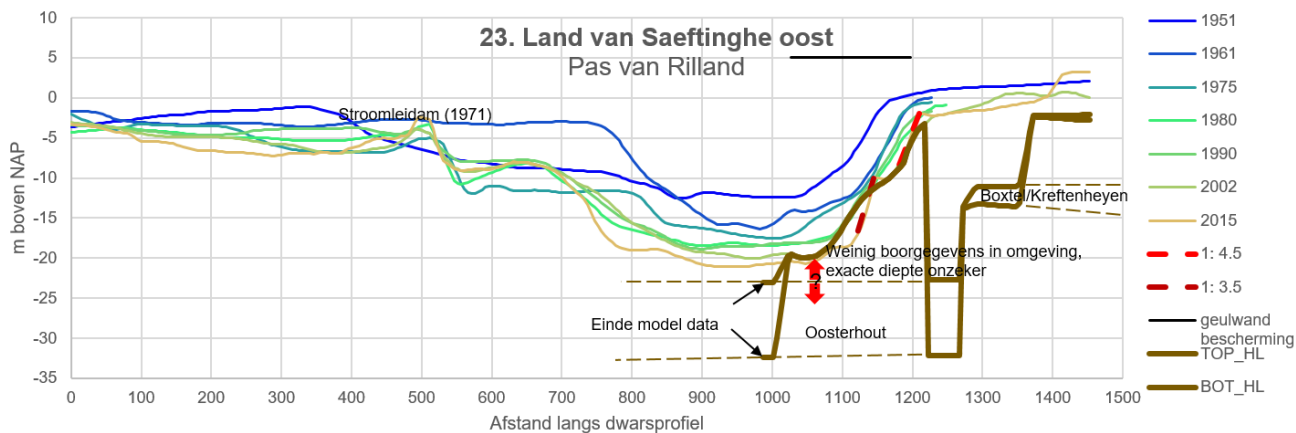
De verschilkaartjes van de geulwandverdediging van de meest recente opname (2018) en de opname na aanpassingen (2002) is weergegeven in Figuur 4-46. Vooral langs het Land van Saeftinghe is nog sprake van erosie bij de teen van de geulwandverdediging en ten noorden en ten zuiden hiervan in het onbeschermde gebied, maar er is geen schade (erosie) zichtbaar in de constructie.



Figuur 4-46 Verschilbathymetrie Saeftinghe (oost) 2018 – 2002 Links zonder en rechts met locatie geulwandverdediging en oeverwerken.

4.5.3 Vaklodingen met geologische ligging harde lagen

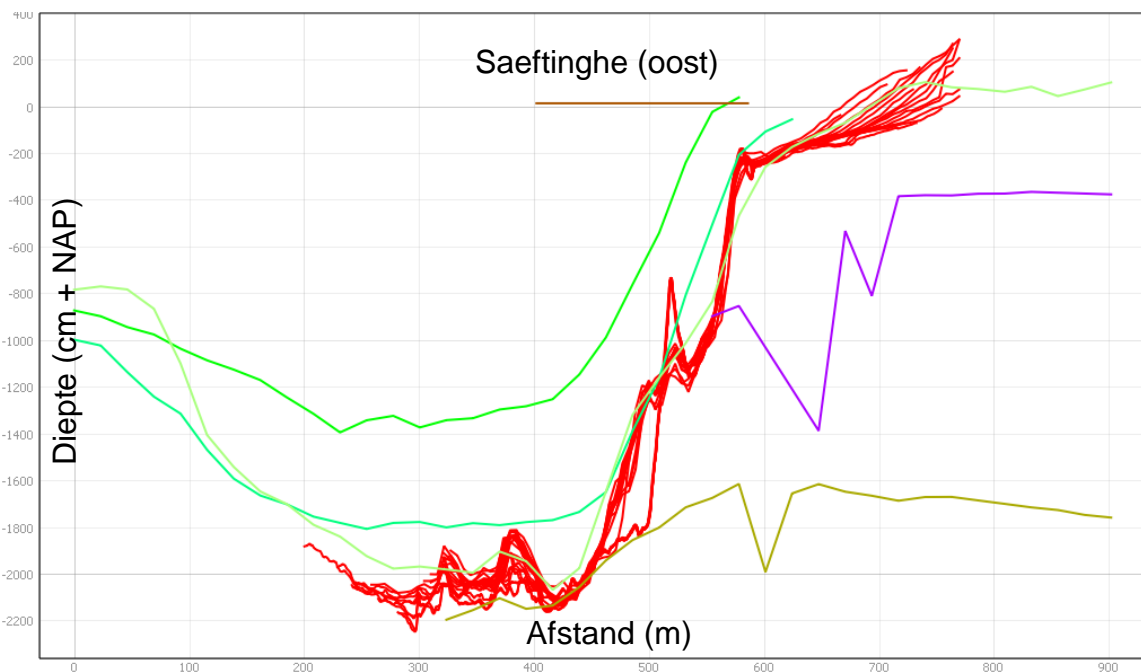
In Figuur 4-47 is het dwarsprofiel te zien met de geulwandverdediging. Van 1951 – 1991 is ook hier een sterke verdieping opgetreden van - 8 m tot -21 m NAP tot in de Formatie van Oosterhout, met een horizontale regressie van 43 m. Stabiel vanaf 1991, vanaf 2010 na een aanpassing zijn er geen veranderingen meer te zien. De teen is flauw hellend in de harde laag.



Figuur 4-47 Dwarsprofiel geulwand bij Land van Saeftinghe (Oost) met vaklodingendata, locatie oeverwerken en geologische formaties. Rood gearceerd = geulwandverdediging met helling van 1:3,5 (na aanpassing in 2002). Grijs: horizontale uitstrekking geulwandbescherming.

4.5.4 Dwarsprofielen detail

Figuur 4-48 laat het dwarsprofiel zien met de gedetailleerde bodemdata. Dit bevestigt de observaties bij de vaklodingen. Behalve geringe cyclische veranderingen bij de teen, waarschijnlijk door het passeren van zandduinen zijn er geen doorgaande veranderingen te zien na 2000. In 2011 is een geringe verandering zichtbaar (piekje op -12 m, terugschrijding in diepere deel).



Figuur 4-48 Dwarsprofiel verdedigde geulwand bij Saeftinghe (oost). Rood: detailoevermetingen (jaarlijks) 1997-2019). Groen: vaklodingen 1955, 1980, 2000. Bruin: horizontale uitstrekking geulwandbescherming. Paars: top Boxtel-Kreftenheye. Olijf: top Formatie Oosterhout. Aangemaakt in QGIS.

4.5.5 Conclusies Saeftinghe (oost)

Er is geen sprake van versteiling en ondermijning bij de teen van de geulwandverdediging. De erosie gaat hier langzaam, omdat zich hier natuurlijke harde lagen bevinden en de taluds zijn niet steil. De geulwandverdediging is stabiel. In het onbeschermd gebied gaat de erosie van de slikken door.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies analyse metingen

De geulwandverdediging die in de periode 1998-2002 is aangelegd bij de tweede verdieping van de Westerschelde heeft de gestage achteruitgang van de slikken en schorregebieden door uitbochten van de geulen gestopt.

Het betreft vier locaties (zie Figuur 1-3):

- Ossenisse 1 en 2,
- Zuidergat, Baalhoek en Overloop van Valkenisse,
- Bath en
- Saeftinghe.

Daarna hebben de geulen zich verder ingesneden en heeft de erosie zich bij de geulwandverdedigingen in de diepte voortgezet. Bij veel locaties zijn de afgelopen jaren de ooit eerder ingesneden erosieresistente harde lagen zoals de Formatie van Oosterhout bereikt, waarna de erosie zich lijkt te stabiliseren.

Bij Ossenisse 1 en 2 is de teen van de geulwandverdediging voor een deel afgestort (vaak met grind en stortsteen) op een eerdere suppletie. Bij de rand is er sprake van snelle erosie, ondanks periodieke suppleties, waardoor een zeer steil ($> 1:2$ over $> 5\text{m}$) en instabiel front van los zand is ontstaan dat vooral bij Ossenisse 2 gestaag terugschrijdt en waarin geregeld oevervallen optreden (brevloeiingen). De flauw hellende afgestorte teen van de geulwandverdediging is hier aangetast, maar de versterkte steile geulwandverdediging zelf nog niet. Maatregelen zijn hier noodzakelijk.

In de onbeschermd zone tussen Ossenisse 1 en 2 vindt behalve verdieping ook nog gestage achteruitgang plaats. Dit is ook het geval in de onbeschermd zones bij Bath en Land van Saeftinghe / Overloop van Valkenisse.

Bij de locaties Zuidergat, Bath en Saeftinghe (oost) is er geen sprake van sterke versteiling en ondermijning. De erosie gaat hier langzaam omdat zich hier natuurlijke harde lagen bevinden.

5.2 Antwoorden op vragen

De vragen zoals gesteld door Rijkswaterstaat (Van der Sleen, 2019, Bijlage A) zijn in deze paragraaf op basis van de analyse in de voorgaande hoofdstukken zo goed mogelijk beantwoord.

1) *Wat is de huidige staat van de geulwandverdedigingen in de Westerschelde?*

a) *Aan welke criteria dienen de geulwandverdedigingen te voldoen om falen te voorkomen?*

Een geulwandconstructie die bij aanleg stabiel is en voldoet aan de ontwerprichtlijnen, kan door erosie aan de teen en ondermijning uiteindelijk toch bezwijken door afschuiving of zettingsvloeiing. De stabiliteit van het onderwatertalud kan beoordeeld worden conform WBI 2017 (eenvoudige, gedetailleerde of geavanceerde methode), zoals ook toegepast door Waterschap Scheldestromen voor de beoordeling van de oeverwerken en vooroevers van de primaire waterkeringen. Voor de beoordeling van de erosie bij de teen die tot ondermijning kan leiden zijn recent criteria afgeleid die nog niet in WBI zijn opgenomen (maximaal $1:6$ over 5 m in zand). Deze dienen nog wel met nader onderzoek onderbouwd en geverifieerd te worden en zouden dan een aanvulling op WBI 2017 kunnen vormen.

b) *Welke informatie is benodigd om de toestand van geulwandverdedigingen te kunnen beoordelen?*

De gedetailleerde bathymetriemetingen zijn een belangrijk middel voor de beoordeling maar niet voldoende als er sprake is van voortgaande erosie. Suppleties geven een tijdelijke bescherming tegen erosie, maar de levensduur is beperkt. Om het effect van de steenbestorting te kunnen beoordelen is het

noodzakelijk te weten waar de teen van de bestorting precies ligt. Eigenlijk zou de gehele beschermingsconstructie, samen met de bathymetriedata van het studiegebied in een digitaal 3D data model beschikbaar moeten zijn. Daarnaast is ook de classificatie van de laagpakketten van belang. Voor de Westerschelde is dit recent uitgevoerd (op basis van de vaklodingen), maar dit model is nog niet voldoende gedetailleerd om voor de beoordeling van geulwandverdedigingen te gebruiken.

c) *Voldoen de geulwandverdedigingen aan de gestelde criteria?*

De geulwandverdediging op de onderzochte locaties is sinds de aanleg nog niet aangetast, maar bij Ossensisse 2 is al wel een deel van de bestorting bij de teen verdwenen door ondermijning. Bij Ossensisse 1 en 2 is door erosie van het bij aanleg gesuppleerde zand een zeer steil en hoog talud ontstaan bij de teen van de bestorting. Dit talud voldoet niet aan de stabiliteitscriteria, ook niet aan de door Rijkswaterstaat tot nog toe gehanteerde VTV 2006. Bij Ossensisse 2 is er al sinds 2012 sprake van schade in de bestorting aan de teen van de geulwandbescherming door terugschrijdende erosie en oevervallen. Bij alle overige locaties is er geen sprake van snelle erosie en versteiling bij de teen van de geulwandbescherming, deze voldoen wel aan de gehanteerde criteria (1:6 over 5 m).

d) *Hoe groot is de kans op falen van de geulwandverdedigingen?*

Op basis van de hierboven gestelde criteria is bij Ossensisse 2 al sprake van falen sinds 2012. Bij Ossensisse 1 is de situatie vergelijkbaar, maar er is nog geen sprake van aantasting. De kans op falen wordt groot geacht als er geen maatregelen worden genomen, omdat de erosie doorgaat, hoewel minder snel omdat inmiddels een harde laag is bereikt. Er resteert bij Ossensisse 1 en 2 nog maar een geringe afstand tussen de bestorte rand van het steile erosiefront en de teen van de eigenlijke geulwandverdediging. De kans is groot dat de geulwandverdediging op korte termijn geheel zal worden ondermijnd en dan kan instorten of afschuiven.

2) *Bij welke staat van de geulwandverdedigingen dienen maatregelen genomen te worden om falen te voorkomen?*

a) *Hoeveel schade / afwezige bestorting is nog acceptabel voordat maatregelen genomen dienen te worden?*

De situatie met een flinke aantasting van de bestorting zoals nu bij Ossensisse 2 is sinds 2012 stabiel gebleven, omdat de erosie sindsdien minder snel verloopt maar is volgens de huidige criteria feitelijk onacceptabel. De erosie bij de teen vindt plaats over een diepte van meer dan 5 m onder de teen en is veel steiler dan 1:6. Suppleties hebben slechts een kortstondig effect.

b) *Hoe moeten de risico's worden ingeschat en bij welke overschrijding van de criteria moet worden ingegrepen?*

De afstand van het steile front waarin zettingsvloeiingen en afschuivingen kunnen optreden moet voldoende ver van de teen van de geulwand liggen (WBI criteria voor kans op schade door inscharing). Deze afstand is afhankelijk van het risico dat aanvaardbaar wordt geacht. Voor primaire waterkeringen is een acceptabel risico veel lager dan voor de geulwandverdediging. Bij falen kunnen natuurgebieden verloren gaan en kan de vaarweg gestremd raken en de herstelkosten zijn mogelijk veel hoger dan bij tijdig ingrijpen, maar er is geen directe toename van overstromingsrisico. De kans op veel grotere herstelschade dan nu al heeft plaatsgevonden door het ondermijnen van de geulwandverdediging is bij Ossensisse 1 en 2 echter groot omdat de afstand nu minimaal. Bij de overige locaties is nog geen sprake van overschrijding van de criteria of schade.

3) *Welke benodigde maatregelen kunnen worden verwacht in de komende 15 jaar?*

a) *Zijn er aanvullende inspectie / onderzoeksmaatregelen benodigd naast de huidige hydrografische metingen?*

De ligging van de teen van de bestorting en in feite de gehele constructie zou digitaal in beeld gebracht moeten worden om de stabiliteit te kunnen beoordelen in samenhang met de bodemmetingen. Hiervoor zijn aanleg- en ontwerpgegevens nodig, maar mogelijk ook nieuwe meetmethoden zoals backscatter, side scan sonar en seismiek. Voor Ossensisse 1 en 2 zijn eerste herstelmaatregelen nodig.

b) *Welke trends zijn er te zien in de mate van erosie?*

Bij Ossenisse 1 en 2 verloopt de erosie veel sneller dan bij de overige locaties (Zuidergat, Baalhoek, Bath en Saeftinghe). Het is duidelijk dat het soort sediment dat wordt blootgesteld aan de stroming bepalend is voor de mate van erosie. Bij Ossenisse 1 en 2 is er sprake van een constructie aangelegd op suppletiezand en bij Zuidergat, Baalhoek, Overloop van Valkenisse, Bath en Saeftinghe van dieper gelegen geologische harde lagen bij de teen van de constructie, waarin de erosie langzaam verloopt. Daarom is het ook van belang de ligging van de geologische lagen te beschouwen. Ook bij Ossenisse 1 en 2 zijn inmiddels deze harde lagen (weer) bereikt, waarmee de erosie niet is gestopt maar wel langzamer verloopt. In de onbeschermden slikken gaat de erosie gestaag door.

c) *Welke herstelmaatregelen zijn naar verwachting de komende 15 jaar benodigd op basis van deze trends?*

De aanbeveling is bij Ossenisse 1 en 2 direct herstelmaatregelen te nemen bijv. in de vorm van suppletie beschermd door een volledige bestorting. Vervolgens kan overwogen worden om enkele nog niet beschermde locaties van bescherming te voorzien (bijv. tussen Ossenisse 1 en 2, Bath, Overloop van Valkenisse en Saeftinghe). Pas indien verdere erosie (volgens eerder genoemd criterium) wordt geconstateerd bij de overige locaties (Zuidergat, Baalhoek, Bath en Saeftinghe) worden hier ook maatregelen voorzien.

4) *Kunnen de geulwandverdedigingen in de Westerschelde worden hersteld conform het ontwerp van de vooroeververdedigingen in de Westerschelde, waarbij de helling wordt aangepast naar 1:3 en de nabestorting een laagdikte krijgt van 50 cm met grover materiaal?*

Uit de ontwerprichtlijnen en criteria en de metingen volgt niet dat de geulwandbescherming zelf aangepast moet worden. Een constructie met een helling van 1:2 of 1:2,5 kan ook voldoende stabiel zijn voor afschuiving, uitvulling naar 1:3 is dus niet noodzakelijk. Bovendien is er (ook bij Ossenisse 1 en 2) nog geen schade geconstateerd aan het steile zwaar verdedigde deel van de geulwandverdediging, alleen in de bestorting bij de teen. Voor bescherming tegen erosie en zettingsvloeiing is geen zware bestorting nodig, het risico zit in de ondermijning van de onbestorte teen.

5.3 Aanbevelingen

Alleen bij Ossenisse 2 is tot nog toe aanzienlijke schade opgetreden. Bij Ossenisse 1 is nog geen schade waargenomen, maar is de situatie eveneens instabiel. Herstel is nodig om te voorkomen dat in de komende jaren (nog grotere) schade zal optreden. Overwogen kan worden de geulwandverdediging uit te breiden naar de nu nog onbeschermden locaties waar wel achteruitgang wordt waargenomen.

Voor de ontwerpeisen van bestortingen die zijn bedoeld om de stabiliteit van geulwanden te behouden (faalmechanisme zettingsvloeiing of afschuiving door ondermijning) worden de WBI ontwerp- en beoordelingscriteria aanbevolen zoals:

- Mate van erosiebestendigheid (gewichtsklasse stortstenen),
- Aanwezigheid van een filterlaag (om uitspoeling te voorkomen),
- Materiaal, zoals wel / niet geotextiel / zinkstuk,
- Helling maximaal 1:2 à 1:3, te bepalen veiligheid voor afschuiving op basis van werkelijke grondgesteldheid (harde lagen),
- Minimale dikte nodig? Falling-apron werking bij ondermijning. Bij Ossenisse 2 te diep / te weinig steen om het te stoppen.

Voor monitoring / bewaking wordt een jaarlijkse gedetailleerde (minimaal 1x1 m) meting van de bathymetrie aanbevolen (zoals deze nu al wordt uitgevoerd). Vervolgens beoordeling van:

- Integriteit (vlakdekkend, geen gaten of schade),
- Erosie bij teen wel / niet en in welke mate.

In het algemeen kan de beoordelingsmethodiek toegepast worden volgens de WBI methode 'Stabiliteit voor onbestorte onderwaterhellingen', net zoals dat al gebeurt met de oeverwerken van de primaire waterkeringen door het waterschap Scheldestromen. Beschikbare tools zijn:

- D-GeoStab voor afschuiving vooroever,
- D-Flow Slide voor zettingsvloeiing vooroever,
- Morphan voor kusterosie /zandstranden / duinen.

Voor een goede beoordeling van de bestorting is het noodzakelijk om een norm toe te voegen aan WBI 2017 voor deels bestorte oevers / onbestorte teen in het geval van erosie bij de teen. Hiervoor is betere kennis nodig van de diepteligging van de teen. De aanbevolen normen zijn:

- Helling maximaal 1:6 over 5 m diepte in zand (zettingsvloeiing),
- Helling maximaal 1:2 à 3 in klei / harde lagen (afschuiving).

Aanbevolen wordt om een digitaal 3D-model te maken van de geulwandverdediging / en de oeverwerken in de Westerschelde (en vervolgens ook andere kustlocaties in Nederland waar geulwandverdedigingen of oeverwerken zijn). Dit bodemmodel kan tezamen met de gemeten bathymetrie opgenomen worden in beoordelingstools zoals D-Flow Slide, Morphan en / of Delft 3D. voor periodieke beoordeling van de stabiliteit en de erosie ter plaatse van de teen (door RWS).

Informatie over de precieze diepteligging van de teen kan verkregen worden op basis:

- detailbathymetrie + aanlegdata (dit zou door Deltares binnen KPP Schelde-estuarium opgepakt kunnen worden). Het werk bestaat om op basis van de huidige shapefiles, ontwerptekeningen en detailbathymetrie zoals in dit rapport al is geanalyseerd de precieze diepteligging van de geulwandverdediging vast te stellen. Dit levert een digitaal model van de geulwandverdediging in de Westerschelde. Een dergelijk as-built digitaal 3D model is al gemaakt op basis van de vaklodingen voor alle oeverwerken, maar de nauwkeurigheid daar van is nog beperkt.
- Het digitale model kan verder geverifieerd (en waar nodig aangepast) worden op basis van aanlegtekeningen (op papier of digitaal in Autocad) en archieven (in samenwerking tussen Deltares en RWS) voor geulwandverdediging
- Het model kan uitgebreid worden voor alle oeverwerken in de Westerschelde in samenwerking met RWS en Waterschap Scheldestromen,
- Waar onvoldoende informatie beschikbaar is zijn speciale metingen nodig om de diepteligging van de teen vast te stellen (Deltares kan hiervoor adviseren en ook metingen uitvoeren met speciale instrumenten in samenwerking met RWS en/ of Scheldestromen).

De volgende meetmethoden om de diepteligging van de bestorting te bepalen zijn beschikbaar en al eerder toegepast, maar geen van deze methoden is altijd bruikbaar gebleken. Onderzoek naar gebruik van deze en mogelijk nieuwe meetmethoden wordt aanbevolen. Dit is ook van belang voor het beoordelen van overige kust- en riviervakken in Nederland. Hieraan wordt ook gewerkt in het kader van het opstellen van een Handboek bestortingen (in voorbereiding) door Deltares en RWS in het kader van KPP B&O Kust:

- Multibeam echo sounder.(MBES). resolutie van tenminste 1x1 meter nodig. Geven ligging zeebodemoppervlak in detail weer. Nog hogere resolutie (0,1 m x 0,1 m) kan extra info over bodemvormen / stenen geven
- Backscatter informatie van de echo sounder. Deze data geven informatie over de samenstelling van het bovenste stukje (orde centimeters) van de zeebodem, waarmee bijvoorbeeld stenen, schelpenbanken, zand en klei mogelijk kunnen worden onderscheiden. Een proef bij Ameland ZW laat gemengde resultaten zien (Gaida et al, 2020). De methode is nog volop in ontwikkeling.
- Sidescan sonar (SSS) data geven gedetailleerde informatie over het oppervlak van de zeebodem . In het backscatter signaal zijn objecten op en 'textuur' van de zeebodem te zien.
- Seismiek: seismische meetmethoden om informatie te krijgen over bestorting die zich (deels) onder het zand bevindt, (maar in dat geval is er geen sprake van erosie tenzij er net een zandsuppletie is uitgevoerd).

5.4 Mogelijke herstelmaatregelen

Rijkswaterstaat werkt aan versterking van de vooroeververdediging in de Ooster- en Westerschelde (VOV 3).

Om grotere schade te voorkomen zijn bij Ossensisse 1 en 2 maatregelen nodig. De klassieke oplossing volgens de ontwerprichtlijnen is het uitvullen van het talud van de teen tot de bodem tot 1:3 (waar dit te steil is) en dan afstorten met zware breuksteen. Maar omdat hier geen sprake is van golven en de erosie minder sterk is als bij het oppervlak kan waarschijnlijk volstaan worden met een lichtere bestorting. Hiervoor zijn ook WBI criteria.

Een mogelijkheid is opnieuw zand aanbrengen tot -10 m, onder een helling van maximaal 1:4 en afstorten met steenachtig materiaal, aansluitend aan de bestaande teen, tot de harde laag op -22 m. Om uitspoeling te voorkomen is wel een filterlaag nodig, dus eerst een laag fijnere steen en dan een laag grovere steen. Het suppleren aan de teen van de geulwand en vervolgens hierop afstorten, is ook bij de aanleg in 1998-2000 gebeurd, tot een diepte van ongeveer -10 m in raai 2650. De bestorting lag bij aanleg dus al op ruim 10 m suppletiezand dat tot ruim 400 m van de insteek aanwezig was op de bodem. De kans op ondermijning is geringer als, in tegenstelling tot bij de aanleg, de bestorting bij de teen aansluit op een diepere slecht erodeerbare laag.

Het is belangrijk dat een nieuwe bescherming aansluit op de bestaande bestorting die er nog ligt op -12 m en doorloopt tot de harde laag op -22 m om opnieuw ondermijning te voorkomen. Bovendien moet de helling gereduceerd worden tot maximaal ca 1:2,5 tot 3 (met steenslag uitvulling) of maximaal 1:4 tot 6 (met zand). Waarschijnlijk kan het werk wel uitgevoerd worden in een beperkte tijd waarin niet gelijk al het gesuppleerde zand weer weg erodeert, immers dat duurt meestal toch wel enige weken tot maanden. Het gedeelte tussen Ossensisse 1 en 2 zal ook beschermd moeten worden, niet alleen treedt hier regressie op, ook de kop van de geulwandverdediging wordt aangetast en de afwateringsgeul diept ook steeds meer uit.

In de onbeschermd zone tussen Ossensisse 1 en 2 vindt behalve verdieping ook nog gestage achteruitgang plaats. Dit is ook het geval in de onbeschermd zone bij Bath en Land van Saeftinghe (oost). Om dit te stoppen is ook hier een uitbreiding van de geulwandverdediging noodzakelijk.

6 Referenties

Van der Sleen, 2019:

Rijkswaterstaat Zee en Delta, N. v.d. Sleen (2019), Memo onderzoek stabiliteit geulwandverdedigingen in de Westerschelde, Rijkswaterstaat Zee en Delta, 8 juli 2019

Rijkswaterstaat, 2018

M. Bijleveld, G. den Hartog, M. Schrijver (2018), Bodembemonstering Proefstortlocaties Inloop Ossensisse en Put van Hansweert, Rapportage van de uitgevoerde werkzaamheden en resultaten van de geanalyseerde data, Rijkswaterstaat CIV

Schrijver, 2017

RWS Zee en Delta, M. Schrijver (2017), Geulwandverdediging Ossensisse, profielen 23-5-2017 GVO.001 t/m 20 (profielen 23-5-2017 GVO.001 t/m 20)

Sinke, 2017:

Rijkswaterstaat, O. Sinke (2017), Monitoring geulwanden Westerschelde 2016; Locaties Ossensisse, Zuidergat, Baalhoek, Valkensisse, Bath en Saeftinghe, RWS CIV Centrale informatievoorziening, Inwinning & gegevens analyse, mei 2017 (ook beschikbaar 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015)

Rijkswaterstaat, 2017

Evaluatie Stortingen geulwand Ossensisse (presentatie), Rijkswaterstaat, 2017

Rijkswaterstaat, 2013

Beheer Oosterscheldekering nader bekeken, Eindrapport, 2013, Rijkswaterstaat

Saathof, 2008:

Rijkswaterstaat, K. Saathof (2008) Geulwandverdediging Westerschelde, RWS WD rapport 2008.003

MOVE 2003

Monitoring van de effecten van de verruiming vaargeul Westerschelde 48/43, MOVE Evaluatierapport 2003, RIKZ 2003.027

GIS Atlas harde kustverdediging – Scheldestromen, Deltares (shapefiles)

Deltares, 2019

Taal, Marcel, Dick Mastbergen, Jelmer Cleveringa e.a. (2019), Mesoschaal Westerschelde, Integratierapport 2014-2018, Deltares, Vlaams-Nederlandse Scheldec commissie VNSC

Deltares (in voorbereiding)

Van der Vegt, H. en Mastbergen, D.R (2020), Harde lagen in de Westerschelde, Deltares, 1210301 (in voorbereiding)

Handboek bestortingen (in voorbereiding)

Rinsema, J.H., Hoogland, R., Vermaas, T., Mastbergen, D.R. (2020), Handboek onderwater bestorting (in voorbereiding), RWS/Deltares (in voorbereiding)

Deltares, 2018:

Mastbergen, Dick, Maria Luisa Taccari, Geeralt van den Ham (2018), Beoordeling drie onderwateroevers Den Helder en Texel, Deltares, 11201569, in opdracht van HHNK

Deltares, 2017

Ham, Geeralt van den, Maria Luisa Taccari (2017), Gedetailleerde beoordeling zettingsvloeiing ten behoeve van de restproblematiek oeverbestorting Zeeland, Deltares, 11201411, in opdracht van Waterschap Scheldestromen

Land+ Water (2010), Stortsteen verlost Dordtsche Kil van zettingsvloeiing.

IMDC 2017:

Maandrapport Flexibel Storten april-mei 2017, Rapport 17.086 (Verschilkaart Inloop van Ossenisse, 02-09-2016 (T6) / 4-04-2017 (T7))

IMDC 2019:

Eleftheria Kragiopolou, Pieter Mallants (2019), Hard layer identification Put van Hansweert, NO 19072

Mastbergen et al, 2019

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>

Van Dijk et al 2018

Van Dijk, W.M.; Mastbergen, D.R.; Van den Ham, G.A.; Leuven, J.R.F.W.; Kleinhans, M.G. Location and probability of shoal margin collapses in a sandy estuary. *Earth Surf. Process. Landf.* **2018**, *43*, 2342–2357

Vermaas et al. 2018:

Tommer Vermaas, Marco de Kleine, Chris Mesdag (2018), Kartering bestortingen Vlietepolder en Margarethapolder, Deltares, 11200538-001, in opdracht van Waterschap Scheldestromen

Gaida et al 2020

Monitoring underwater nourishments using multibeam bathymetric and backscatter time series (2020) Timo C. Gaida, Thaiënne A.G.P. van Dijk, Mirjam Snellen, Tommer Vermaas, Chris Mesdag, Dick G. Simons, *Coastal Engineering*, Volume 158, June 2020,

<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103666>

Wilderom, M.H. (1968) Tussen Afsluitdammen en Deltadijken, deel 3, Midden Zeeland (Walcheren en Zuid-Beveland)

Wilderom, M.H. (1973) Tussen Afsluitdammen en Deltadijken, deel 4, Zeeuws-Vlaanderen

VOV 3

<https://www.rijkswaterstaat.nl/water/projectenoverzicht/vooroeverdedigging-oosterschelde-en-westerschelde/index.aspx>

WBI 2017 / BOI 2023

<https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/applicaties-modellen/wbi-2017/>

<https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen/nieuwsbrieven/nieuwsbrief-landelijke-beoordeling/nieuwsbrief-boi-oktober-2019/>

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