



Vlaanderen
is wetenschap

21_014_1
WL rapporten

Oostende –Middelkerke, Monitoring duin voor dijk pilots

Evolutie gedurende het 1e jaar

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Oostende-Middelkerke, Monitoring duin voor dijk pilots

Evolutie gedurende het 1e jaar

Verwaest, T.; Montreuil, A.-L.; Dan, S.

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.

De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.

Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2022
D/2022/3241/129

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Verwaest, T.; Montreuil, A.-L.; Dan, S. (2022). Oostende-Middelkerke, Monitoring duin voor dijk pilots: Evolutie gedurende het 1e jaar. Versie 2.0. WL Rapporten, 21_014_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	MDK afdeling Kust	Ref.:	WL2022R21_014_1
Trefwoorden (3-5):	Duin, morfodynamiek, helmgras		
Kennisdomeinen:	erosiebescherming kust > duinen > in situ metingen		
Tekst (p.):	49	Bijlagen (p.):	/
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s):	Verwaest, T.; Montreuil, A.-L.
------------	--------------------------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Dan, S.	Getekend door: Sebastian Dan (Signature) Getekend op: 2022-06-26 22:14:01 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed  Vlaanderen
Projectleider:	Verwaest, T.	Getekend door: Toon Verwaest (Signature) Getekend op: 2022-06-27 10:45:57 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed 

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Abdelkarim Bellafkih (Sign) Getekend op: 2022-06-26 19:22:40 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed 
-----------------	---------------	--



Abstract

Begin 2021 werden door MDK afdeling Kust op drie locaties duinen aangelegd op het droog strand voor een zeedijk. Op deze locaties werd een intensieve monitoring gestart om de ontwikkeling van de morfologie en de helmvegetatie van nabij op te volgen. Over de evolutie in het 1^e jaar van deze duin voor dijk pilots wordt in dit rapport verslag gedaan.

Op de twee duinpilots in Oostende, t.h.v. de Spinoladijk en te Raversijde-Mariakerke, is in een eerste jaar een substantiële aanwas opgetreden in de zones waar helm en/of rijshout aangelegd is. Het eolisch aangevoerde zand werd er in meer of mindere mate gecapteerd dankzij de windluwte die gecreëerd werd door de helm / het rijshout. Afslag tijdens opgetreden stormvloeden was relatief beperkt.

Monitoring van de pilot te Westende is slechts beperkt gerealiseerd kunnen worden omdat er zeer veel geplande drone-vluchten niet konden doorgaan door het niet verkrijgen van toelatingen van de militaire overheid.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
1 Inleiding	1
2 Aanleg van de duin voor dijk pilots	2
2.1 Spinoladijk te Oostende	2
2.2 Raversijde-Mariakerke.....	3
2.3 Westende	5
3 Monitoring.....	7
3.1 Metingen	7
3.2 Nauwkeurigheid	10
3.2.1 Voorafgaande test nauwkeurigheid drone opnames.....	10
3.2.2 Opvolging nauwkeurigheid drone DEMs.....	10
3.2.3 Invloed weersomstandigheden drone DEMs	11
3.2.4 Validatie door vergelijking met LIDAR vlucht 28/4/2021	12
4 Morfologische analyse.....	13
4.1 Spinoladijk te Oostende	13
4.1.1 Meteo-mariene condities tijdens de monitoring	13
4.1.2 Morfologische veranderingen	14
4.1.3 Volumetrische veranderingen	20
4.2 Raversijde-Mariakerke.....	22
4.2.1 Morfologische veranderingen	22
4.2.2 Volumetrische veranderingen	33
4.2.3 Sortering	35
4.3 Westende	40
4.3.1 Meteo-mariene condities tijdens de monitoring	40
4.3.2 Morfologische veranderingen	40
4.3.3 Volumetrische veranderingen	44
5 Discussie	45
5.1 Korte termijn ontwikkeling.....	45

5.2	Lange termijn ontwikkeling	45
6	Conclusies	47
7	Aanbevelingen	48
	Referenties	49

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Uitgevoerde opnames (dronevlucht + profielen) in het eerste werkjaar na aanleg van de drie duin voor dijk pilots.	9
Tabel 2 – Nauwkeurigheid (RMSE z-waarde) van de DEMs per drone opname.	10
Tabel 3 – Sedimentbudget bij Spinola tussen de onderzoeksperioden.	21
Tabel 4 – Sedimentbudget voor de pilot Raversijde-Mariakerke.....	33
Tabel 5 – Sedimentbudget voor enkele subzones van de pilot Raversijde-Mariakerke.	35
Tabel 6 –Gemiddelde korrelgrootte-kenmerken D10, D50, D90 in het studiegebied (monsters genomen op 9/3/2022).....	38
Tabel 7 – Sedimentbudget voor de pilot Westende.....	44

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Situering van aanleg duin voor dijk pilot (groene zone van 120 m x 20 m) en zones voor embryonale duinvorming (geel) thv Spinoladijk (Oostende).....	2
Figuur 2 – Aanleg duin voor dijk pilot thv Spinoladijk (Oostende). Foto 27/1/2021.....	2
Figuur 3 – Droog strand in sectie 120 op 11/1/2021.	3
Figuur 4 – Orthofoto op het einde van de aanleg van de duin voor dijk pilot te Raversijde-Mariakerke (31/3/2021).	4
Figuur 5 – Typeprofiel suppletie te Raversijde en Mariakerke uitgevoerd begin 2021	4
Figuur 6 – Droog strand tussen Raversijde en Mariakerke op 31/3/2021:	5
Figuur 7 – Grasdijk te Middelkerke in aanbouw (middelkerke.be). NB de paden zijn daarna nog verhard (schelpenzand).....	5
Figuur 8 – Hoogteligging van de grasdijk in het pilootgebied te Westende op 30/3/2021.	6
Figuur 9 – Phantom 4 RTK drone met camera.	7
Figuur 10 – Monitoring duin voor dijk pilot Spinoladijk: drone (grijze rechthoek) + profielen (groen).....	7
Figuur 11 – Monitoring duin voor dijk pilot Raversijde-Mariakerke: drone (grijze rechthoek) + profielen (groen).	8
Figuur 12 – Monitoring duin voor dijk pilot Westende: drone (grijze rechthoek) + profielen (groen).....	8
Figuur 13 – Vergelijking tussen de onbetrouwbare punten voor T1 en T1bis	11
Figuur 14 – Verschilplot T1bis minus T1.....	12
Figuur 15 – Tijdreeks van het waterpeil in Oostende, golfhoogte 10% en golfrichting te Oostende “Poortjes” (boei gelegen op 7 km van de kust), windsnelheid en -richting van weerstation Zeebrugge.....	13
Figuur 16 – Verschil DEM (DoD) T0 (11/01/2021)-T13 (08/03/2022), periode 1.15 jaar. De zeewaartse grens bevindt zich rond de +4 m TAW.	14
Figuur 17 – Dwarswaterprofielen gemeten met het GPS-systeem, behalve op T0 (11/01/2021) en T9 (07/12/2021), die zijn afgeleid van de DEM van de drone-opnames.	16
Figuur 18 – Opeenvolgende DoD's tussen T10 (22/01/2022)-T13 (08/03/2022).	18
Figuur 19 – Dwars profielen van pre- en post-stormopnames.	20
Figuur 20 – Beschrijving van de afgebakende zones voor de volumetrische berekeningen.	20
Figuur 21 – Tijdreeks van het waterpeil in Oostende, golfhoogte 10% en golfrichting te Oostende “Poortjes” (golfboei gelegen op 7 km van de kust), windsnelheid en -richting van het weerstation Zeebrugge	22
Figuur 22 – verschil DEM (DoD) T0 (31/03/2021)-T9 (23/02/2022), periode 0.8 jaar	23
Figuur 23 – Dwarsprofielen gemeten met het GPS-systeem, behalve op T6 (7/12/2021) en T7 (18/01/2022), afgeleid van de DEM van de drone.	26
Figuur 24 – Foto van beperkte klifvorming (ter hoogte van profiel 4) genomen na storm Corrie	27
Figuur 25 – Opeenvolgende DoD's tussen T7 (18/01/2022)-T9 (23/02/2022).	29
Figuur 26 – Dwarsprofielen van het effect van storm Corrie. NB: T7 (18/01/2022) is afgeleid van het drone DEM	32

Figuur 27 – Afbakening van de deelzones gebruikt bij de kuberingen in Raversijde-Mariakerke.	33
Figuur 28 – Afbakening van subzones voor detail volumeberekeningen op enkele secties met enkel helmaanplant (secties 2 en 17) en naburige secties met rijshouthagen (secties 3 en 16).	34
Figuur 29 – korrelverdelingskrommen zandmonsters (klif na storm Corrie)	35
Figuur 30 – Locaties zandmonsters 9/3/2022 en resultaten korrelverdelingsproeven (D10, D50, D90)	38
Figuur 31 – Variatie van korrelverdelingen in dwarsprofielen (monsters genomen op 9/3/2022). Boven: resultaten in profiel 6 (ten westen van de pilootzone). Onder: profiel 3 (in het midden van de pilootzone).39	
Figuur 32 – Tijdreeks van het waterpeil in Oostende, golfhoogte 10% en richting in Oostende Poortjes (gelegen op 7 km van de kust), windsnelheid en -richting van weerstation Zeebrugge.....	40
Figuur 33 – A) Verschil DEM (DoD) T0 (30/03/2021)-T4 (23/11/2021), periode 0.65 jaar, B) T0 (30/03/2021)-LiDAR (23/02/2022), periode 0.9 jaar.	41
Figuur 34 – Dwarsprofielen gemeten met het GPS-systeem. Inzet: ligging van de profielen.....	43
Figuur 35 – Afbakening van de deelzones gebruikt bij de kuberingen in Westende.	44

1 Inleiding

Begin 2021 werden door MDK afdeling Kust op drie locaties duinen aangelegd op het droog strand voor een zeedijk. Op deze locaties werd een intensieve monitoring gestart om de ontwikkeling van de morfologie en de helmvegetatie van nabij op te volgen. De dynamiek van duinen gaat traag. Vandaar dat het project een looptijd heeft van 10 jaar (2021-2030).

Door monitoring en onderzoek van deze pilots zullen lessen getrokken kunnen worden voor een betere kustbescherming in de badplaatsen. Duin voor dijk is immers een belangrijke bouwsteen voor een robuuste kustbescherming in de badplaatsen bij een doorgaande zeespiegelstijging.

Over de evolutie in het 1^e jaar van deze duin voor dijk pilots wordt in dit rapport verslag gedaan. Er wordt in dit rapport enkel een globale analyse uitgevoerd van de morfologische evolutie. Detailonderzoek wordt uitgevoerd door KULeuven (groep prof. Pieter Rauwoens) en UGent (groep prof. Dries Bonte), respectievelijk met focus op de morfologie en de vegetatie.

2 Aanleg van de duin voor dijk pilots

2.1 Spinoladijk te Oostende

Op het droog strand in sectie 120 (thv Fort Napoleon) werd in januari-februari 2021 in een kleine zone helm aangeplant. De helmaanplant werd uitgevoerd in 6 vierkante plots van 20 m x 20 m in het centrum van de sectie (Figuur 1). De zone werd omheind om betreding te vermijden.

De densiteit van de helmaanplant is verschillend in elke plot. Van zuidwest naar noordoost neemt de densiteit van de aanplant toe (6 plantjes/m² in de meest zuidwestelijke plot, 9 plantjes/m² in de 4 centrale plots en 15 plantjes/m² in de meest noordoostelijke plot). Ook het plantpatroon werd gevarieerd.

In het ruimere gebied (gele zones op Figuur 1) voert de stad Oostende de zandwerken voor het vrijhouden van de Spinoladijk uit zodanig dat maximale kansen gegeven worden aan de vorming van embryonale duinen vermijden. Namelijk worden de gele zones op Figuur 1 gevrijwaard. Deze zones zijn op het terrein afgeperkt door houten palen. Men graaft een sleuf langs de voet van de zeedijk om eolisch zandtransport zoveel als mogelijk te capteren vlak voor de zeedijk, zodat er minder zandoverlast op de dijkkruin optreedt. Het vervoer van zand gebeurt via de doorgangen tussen de afgeperkte zones.



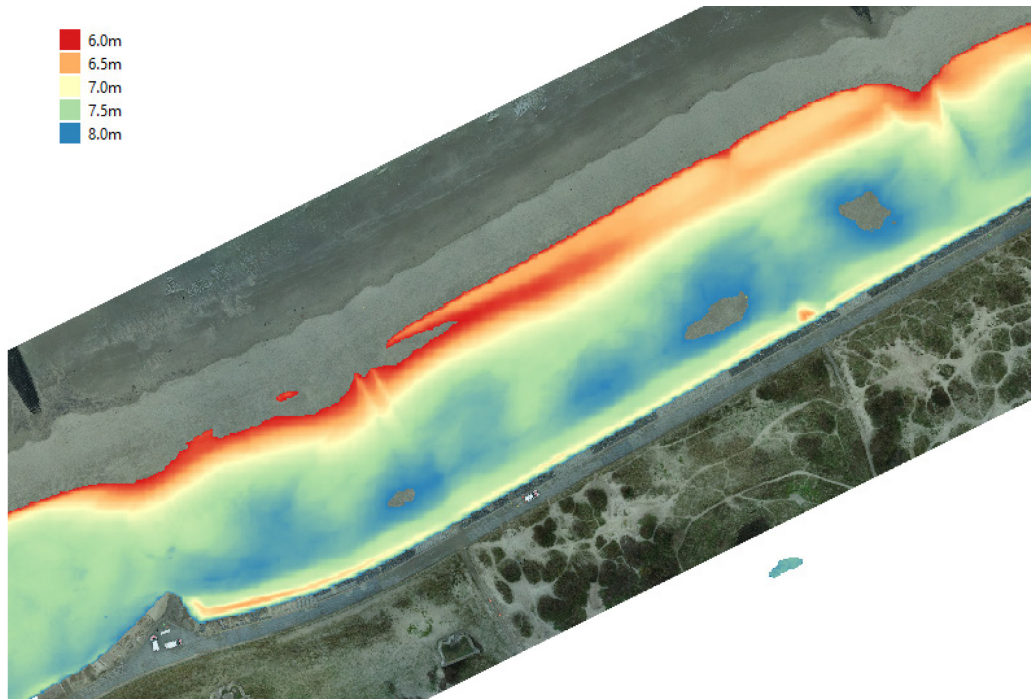
Figuur 1 – Situering van aanleg duin voor dijk pilot (groene zone van 120 m x 20 m) en zones voor embryonale duinvorming (geel) thv Spinoladijk (Oostende).



Figuur 2 – Aanleg duin voor dijk pilot thv Spinoladijk (Oostende). Foto 27/1/2021

De uitgevoerde ingrepen hebben als bedoeling om duinvorming te bevorderen, in eerste instantie vanuit een ecologisch perspectief. Daarnaast is de aangeplante zone een pilot voor duinaanleg op het droog strand voor een zeedijk.

Het droog strand in deze sectie was bij aanleg van de duin voor dijk pilot 50 à 60 m breed (gemeten vanaf de + 6 m TAW lijn tot aan de zeedijk) (Figuur 3).



Figuur 3 – Droog strand in sectie 120 op 11/1/2021.

2.2 Raversijde-Mariakerke

Tussen de badplaatsen van Raversijde en Mariakerke, in secties 100-102, werd begin 2021 een strandsuppletie gerealiseerd waarna op het droog strand rijshouthagen werden gezet en helm werd geplant (Figuur 4). Primaire doel van deze ingreep is om hinder op de kustbaan/tramlijn/zeedijk door eolische zand te beperken. Daarnaast is het een pilot voor duinaanleg op het droog strand voor een zeedijk.

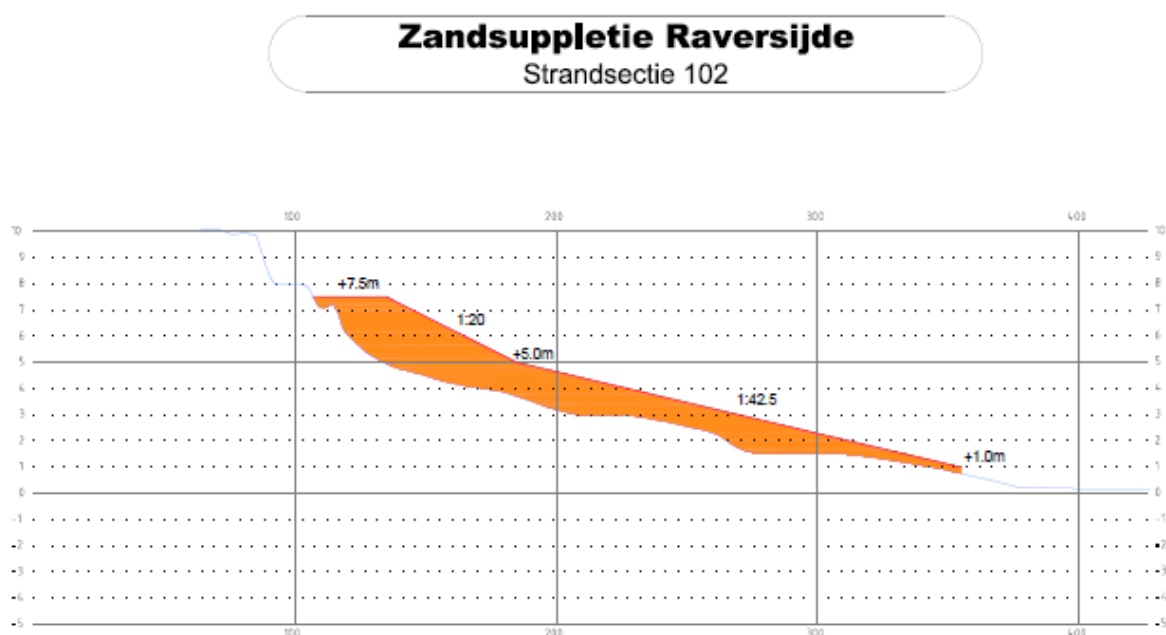
Voorafgaand aan de plaatsing van het rijshout werd het strand genivelleerd (24/2/2021-3/3/2021). Plaatsing van het rijshout liep van 10/3/2021 tot 2/4/2021 en aanplanting van het helmgras van 15/3/2021 tot 2/4/2021.

De totale lengte van deze pilot bedraagt 750 m. De rijshouthagen werden in twee rijen compartimenten geplaatst. Sommige compartimenten zijn volledig afgesloten; andere compartimenten zijn bereikbaar gemaakt voor voetgangers via openingen. Op enkele plaatsen zijn er geen rijshouthagen gezet / werd er geen helm aangeplant. De helmaanplant gebeurde in verschillende dichtheden (5 à 16 plantjes/m²) en patronen. De pilot bestaat uit 18 onderzoeksvelden (Figuur 6).



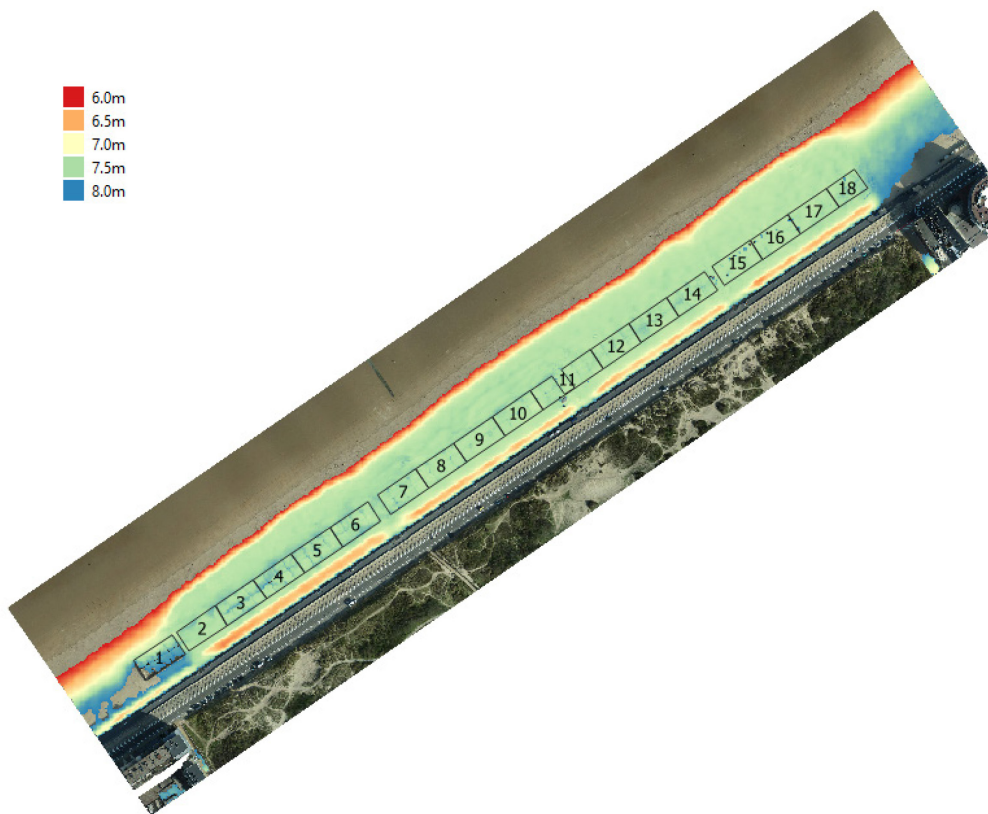
Figuur 4 – Orthofoto op het einde van de aanleg van de duin voor dijk pilot te Raversijde-Mariakerke (31/3/2021).
Nog niet alle rijshouthagen en helm zijn geplaatst.

De suppletie begin 2021 is in een ruimer gebied uitgevoerd, namelijk in secties 97-105, van 26/01/2021 t.e.m. 19/02/2021, met een totaal van 421423 m³ (in situ). Relatief grof zand werd aangevoerd afkomstig van de winzone 4a (de meest noordwestelijke winzone op het BCP), met een gemiddelde D50 van 370 micron, een D10 van 260 micron en een D90 van 525 micron (gebaseerd op beunmonsters genomen tijdens elke reis, Jan De Nul, 2021). Het typeprofiel van deze suppletie is weergegeven op Figuur 5.



Figuur 5 – Typeprofiel suppletie te Raversijde en Mariakerke uitgevoerd begin 2021 (Jan De Nul, 2021).

Het droog strand was bij aanleg van de duin voor dijk pilot 65 à 85 m breed (gemeten vanaf de + 6 m TAW lijn tot aan de zeedijk). In het gebied neemt deze breedte geleidelijk toe van zuidwest naar noordoost. Voor de plaatsing van de rijshouthagen en het helmgras is een droogstrandprofiel met een berm op niveau +7,5 m TAW aangelegd. Ook is een greppel gegraven langs de zeedijk om eolische aanvoer naar de kustbaan te verminderen. De geometrie net na de realisatie van de duin voor dijk pilot wordt getoond op Figuur 6 (opname 31/3/2021). Merk op dat het droogstrandprofiel in de naburige badplaatsen licht verschilt van het profiel in het pilootgebied, hetgeen verklaard kan worden door de uitgevoerde profileringswerken.



Figuur 6 – Droog strand tussen Raversijde en Mariakerke op 31/3/2021:

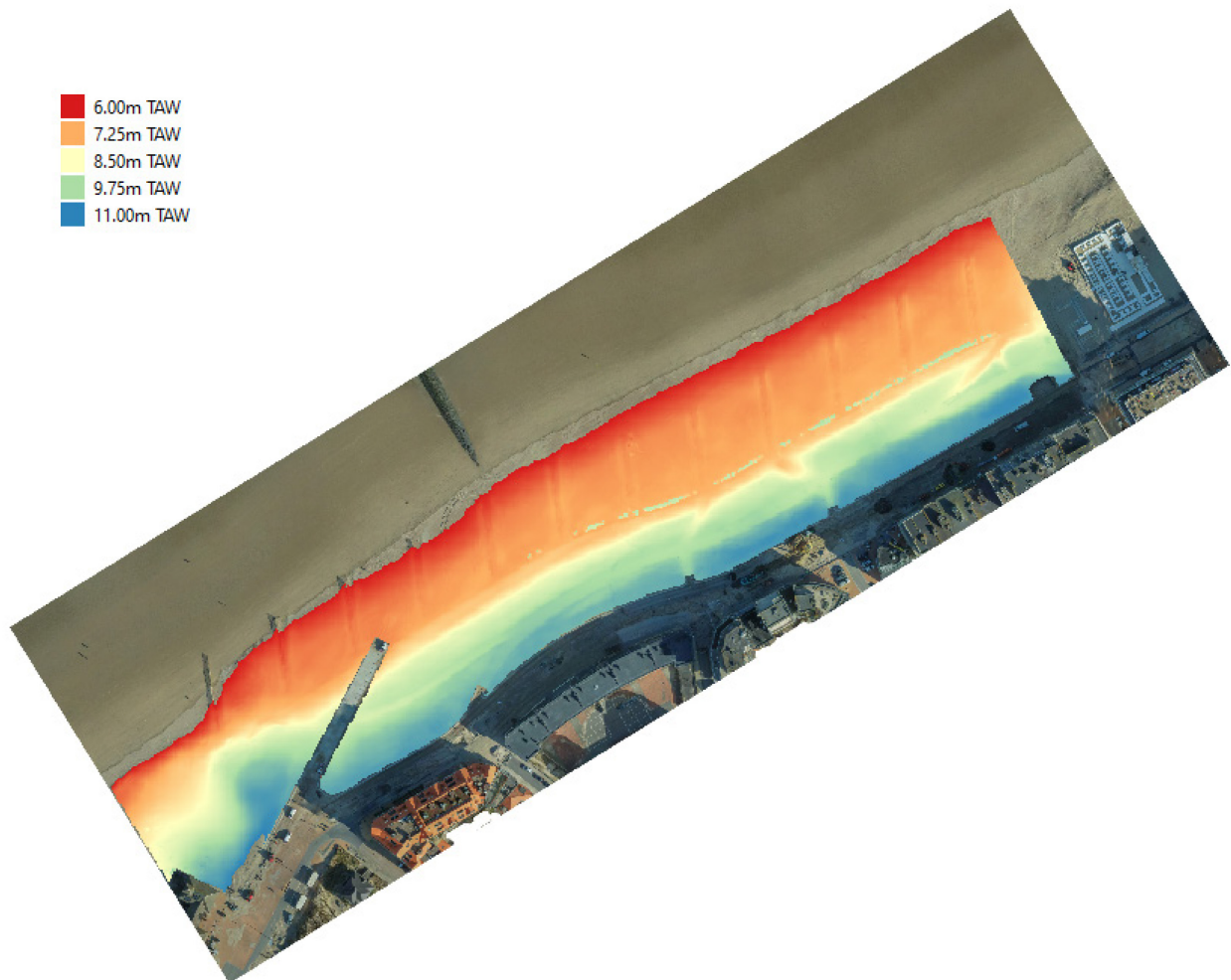
2.3 Westende

In januari-maart 2021 is een 1^e fase van grasdijk aangelegd in Westende als onderdeel van het zeeweringsproject te Middelkerke (Masterplan Kustveiligheid). De grasdijk te Middelkerke wordt aangelegd met een hoge kruin (+10.5 m TAW) teneinde dat er voldaan wordt aan de kustveiligheidsnorm bij een 1000-jarige storm. Ter vergelijking, de duin voor dijk pilots te Spinoladijk en te Raversijde-Mariakerke hebben een 3 m lagere kruin (+7.5 m TAW). Hierdoor is ook de breedte van het duin te Middelkerke een stuk groter dan in de andere twee pilots, namelijk 50 m te Middelkerke en 30 m te Spinoladijk en te Raversijde-Mariakerke.



Figuur 7 – Grasdijk te Middelkerke in aanbouw (middelkerke.be). NB de paden zijn daarna nog verhard (schelpenzand)

Het meest zuidwestelijke deel van de grasdijk, in secties 74-75, werd geselecteerd als 3^e duin voor dijk pilot. Het droog strand was bij aanleg van deze duin voor dijk pilot ca. 75 m breed (gemeten vanaf de + 6 m TAW lijn tot aan de zeedijk) (Figuur 8). Het kruinniveau van de duinen is ongeveer gelijk aan het kruinniveau van de zeedijk.



Figuur 8 – Hoogteligging van de grasdijk in het pilootgebied te Westende op 30/3/2021.

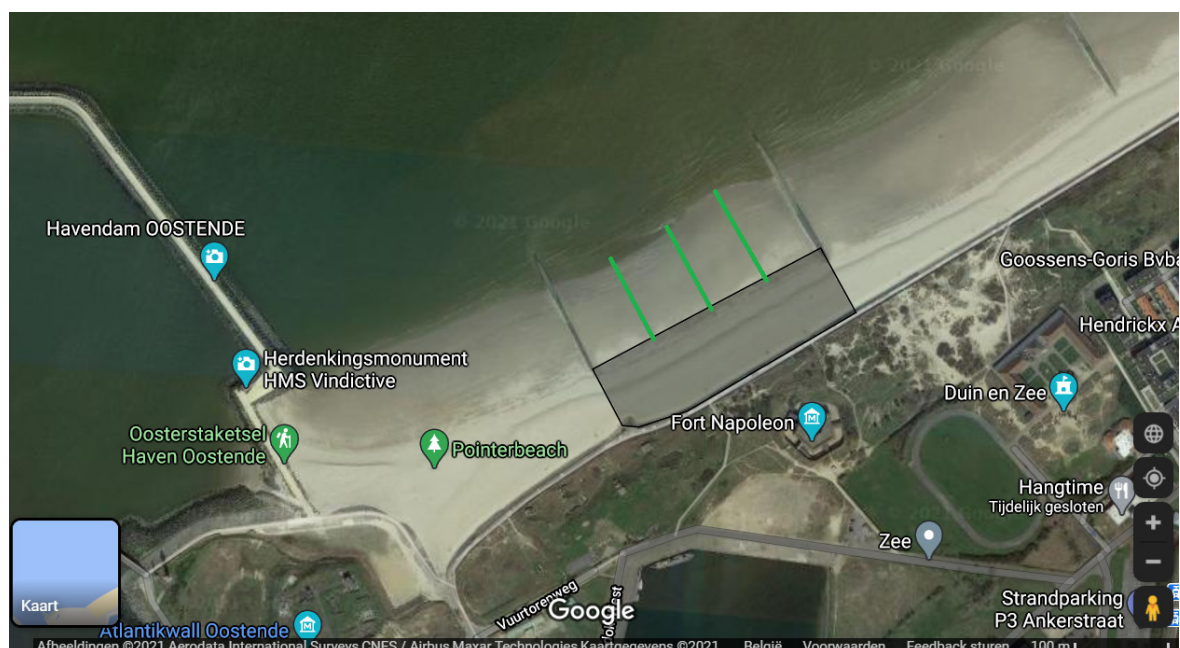
3 Monitoring

3.1 Metingen

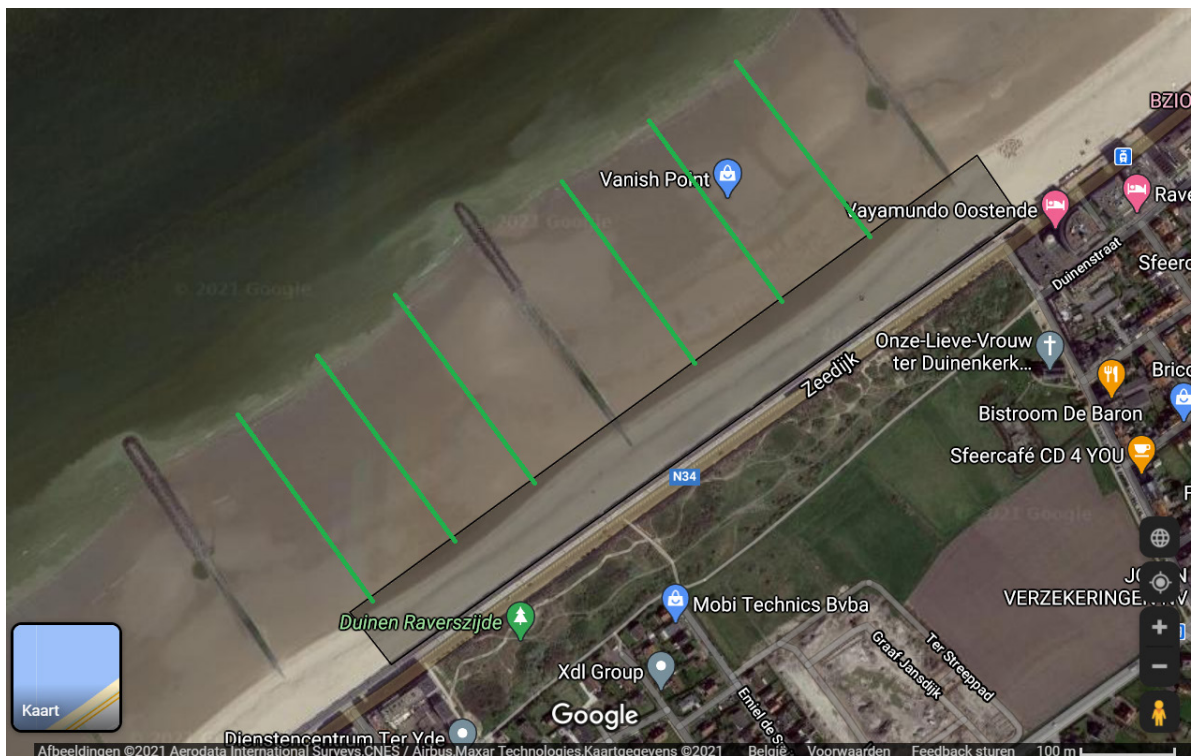
Elk van de 3 duin voor dijk pilots wordt het droog deel van het strand gebiedsdekkend fotografisch opgenomen met drones door Xperta-ATO. De opnames worden uitgevoerd met een Phantom 4 RTK drone (Figuur 9). Zowel de topografie (~fotogrammetrie) als de vegetatiebedekking (~kleurherkenning) worden hiermee opgemeten (zeewaarts ongeveer tot aan de hoogwaterlijn). Daarnaast wordt de topografie van het strand tot aan de laagwaterlijn in raaien opgemeten. Deze monitoring is geïllustreerd op onderstaande figuren (Figuur 9, Figuur 11, Figuur 12).



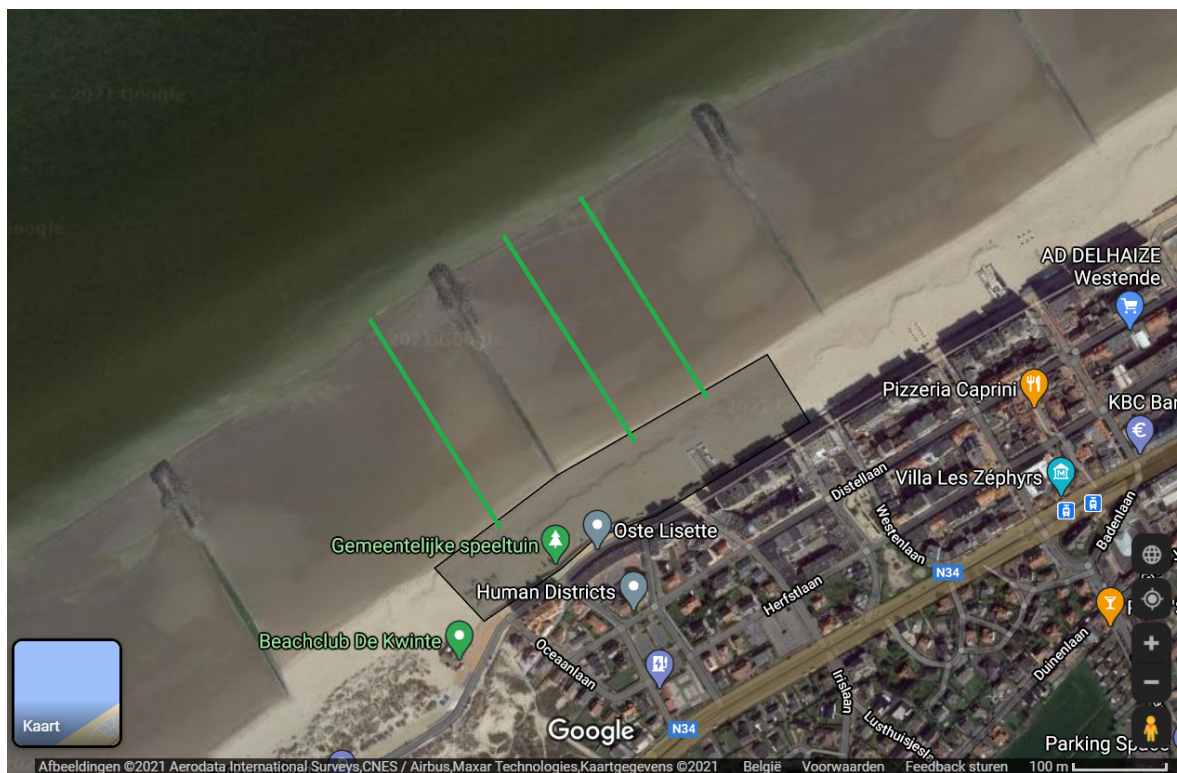
Figuur 9 – Phantom 4 RTK drone met camera.



Figuur 10 – Monitoring duin voor dijk pilot Spinoladijk: drone (grijze rechthoek) + profielen (groen).



Figuur 11 – Monitoring duin voor dijk pilot Raverszijde-Mariakerke: drone (grijze rechthoek) + profielen (groen).



Figuur 12 – Monitoring duin voor dijk pilot Westende: drone (grijze rechthoek) + profielen (groen).

Aanvullend wordt gebruik gemaakt van de data van de kustbrede monitoring door MDK-aKust (vanuit vliegtuig; minstens 1 x per jaar de hele kust met LIDAR).

Op basis van resultaten van testvluchten, uitgevoerd in 2020, is gekozen voor een vlieghoogte op 90 m met de RTK-drone en het inmeten van basispunten met totaalstation (zie verder onder 3.2.1.).

De vooropgestelde monitoringfrequentie was gemiddeld 1 keer per maand, dus 12 keer per jaar. In het zomerhalfjaar (15 maart – 15 september) is de morfodynamiek minder en dus waren slechts ca. 4 opnames voorzien (geen opnames in juli-augustus). In het winterhalfjaar (15 september – 15 maart) waren ca. 8 opnames voorzien, zoveel als mogelijk afgestemd op het voorkomen van stormen : idealiter is er een opname vóór een storm en een opname na een storm zodat het morfologisch stormeffect waargenomen kan worden.

Dankzij een flexibele organisatie teneinde rekening te kunnen houden met de weersomstandigheden werd de vooropgestelde monitoringfrequentie gerealiseerd op de 2 pilots te Oostende. De pilot te Westende daarentegen kon slechts beperkter gemonitord worden voornamelijk omdat dikwijls pas in laatste instantie door de militaire overheid geweigerd werd om te vliegen. Dit is gelinkt met de militaire activiteiten te Lombardsijde. Hieronder een overzicht van alle uitgevoerde opnames (Tabel 1).

Tabel 1 – Uitgevoerde opnames (dronevlucht + profielen) in het eerste werkjaar na aanleg van de drie duin voor dijk pilots.

Spinoladijk		Raversijde-Mariakerke		Westende	
T0	11/1/2021	T0	31/3/2021	T0	30/3/2021
T1	23/2/2021	T1	28/4/2021	T1	30/4/2021
T1bis	2/3/2021	T2	27/5/2021	T2	31/5/2021
T2	19/3/2021	T3	25/6/2021	T3	28/6/2021
T3	30/4/2021	T4	8/9/2021	T4	23/11/2021
T4	28/5/2021	T5	22/11/2021		
T5	28/6/2021	T6	7/12/2021		
T6	9/9/2021	T7	6/1/2022		
T7	26/10/2021	T8	11/2/2022		
T8	23/11/2021	T9	23/2/2022		
T9	7/12/2021				
T10	17/1/2022				
T11	11/2/2022				
T12	23/2/2022				
T13	8/3/2022				

De droneopnames werden in Agisoft verwerkt tot DEMs en orthofoto's met een pixelresolutie van 5 cm. Bij deze verwerkingsprocedure wordt rekening gehouden met de individuele betrouwbaarheid van elk punt van de puntenwolk. De punten met een lage betrouwbaarheid worden niet meegenomen bij de constructie van een DEM. Op plaatsen waar deze filtering gaten veroorzaakt worden deze opgevuld door interpolatie.

3.2 Nauwkeurigheid

3.2.1 Voorafgaande test nauwkeurigheid drone opnames

Op 7/2/2020 werd een test uitgevoerd in de zeereep ter hoogte van het Zwin om de nauwkeurigheid van de DEMs bekomen met drone-fotogrammetrie te bepalen. Er werd geconcludeerd dat een vlieghoogte van 40 m met verwerking in Agisoft perfecte resultaten opleverden, in de zin dat de topografische nauwkeurigheid gelijk was aan wat bereikt kan worden met RTK-GPS namelijk geen systematische afwijking en een toevallige fout (standaarddeviatie) van 2 cm. Ook werd gevonden dat op een vlieghoogte van 90 m de fout groter werd: een systematische fout van ca. 3 cm + een toevallige fout (standaarddeviatie) van ca. 3 cm, dus een totale fout van rond de 5 cm. Als een compromis tussen operationele efficiëntie en topografische nauwkeurigheid werd besloten om de drone vluchten uit te voeren vanop een vlieghoogte van 90 m.

Voor meer detail en ook een validatie van de vegetatiekarteringsmethode (door UGent) wordt verwezen naar Verwaest en Van De Walle, 2020.

3.2.2 Opvolging nauwkeurigheid drone DEMs

Bij elke drone-opname wordt gecontroleerd dat er niet te veel punten als onbetrouwbaar gecatalogeerd worden bij de verwerking in Agisoft. De ervaring heeft geleerd dat sommige weersomstandigheden (bewolkt, regenachtig,...) aanleiding kunnen geven tot minder betrouwbare resultaten. Het is een paar keer voorgekomen dat een drone-vlucht enkele dagen later herdaan werd omdat de betrouwbaarheid van de eerste opname te wensen overliet. Bijvoorbeeld was dit het geval voor de T1 opname te Spinoladijk. Voor meer detail hierover, cfr. 3.2.3.

Bij elke drone-opname wordt ter controle een vergelijking gemaakt tussen de hoogtewaarden van het DEM en een aantal onafhankelijk met totaal station opgemeten punten (#punten 10 à 20), de "check points" genoemd. Omdat deze met totaal station opgemeten zijn en er wordt gebruik gemaakt van basispunten met slechts enkele mm onzekerheid, is de fout op de z-waarde van de check points slechts enkele mm. De aldus bekomen gemiddelde fout op de z-waarden van de DEMs voor elke drone opname zijn samengevat in Tabel 2. Voor meer detail over de nauwkeurigheid van elk DEM wordt verwezen naar de individuele rapporten die gegenereerd worden bij elke verwerking in Agisoft.

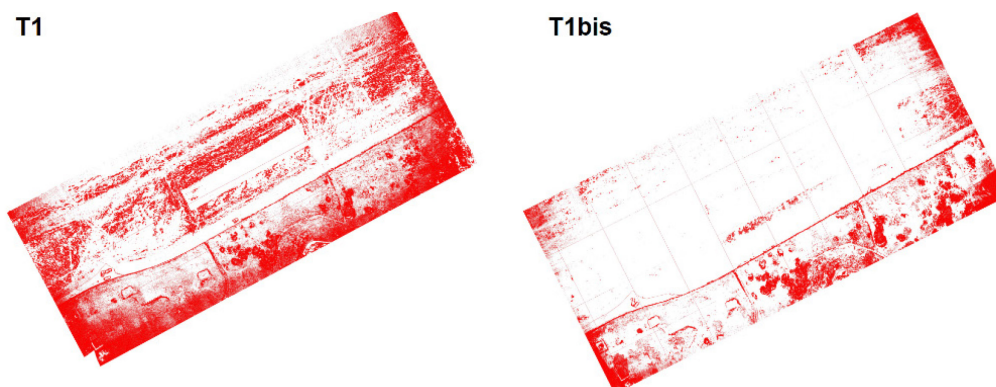
Tabel 2 – Nauwkeurigheid (RMSE z-waarde) van de DEMs per drone opname.

Spinoladijk		Raversijde-Mariakerke		Westende	
T0	1.0 cm	T0	1.0 cm	T0	0.6 cm
T1	1.1 cm	T1	1.0 cm	T1	0.7 cm
T1bis	1.7 cm	T2	1.4 cm	T2	1.0 cm
T2	0.7 cm	T3	1.0 cm	T3	0.6 cm

T3	0.5 cm	T4	1.0 cm	T4	0.6 cm
T4	0.5 cm	T5	0.9 cm		
T5	0.4 cm	T6	1.1 cm		
T6	0.8 cm	T7	1.1 cm		
T7	0.6 cm	T8	0.8 cm		
T8	0.4 cm	T9	1.1 cm		
T9	0.5 cm				
T10	1.0 cm				
T11	0.7 cm				
T12	1.7 cm				
T13	0.7 cm				

3.2.3 Invloed weersomstandigheden drone DEMs

Omdat er twijfels waren over de betrouwbaarheid van de DEM voor de T1 opname te Spinoladijk, werd deze opname herhaald (T1bis). De betrouwbaarheid van de puntenwolken voor deze beide opnames geeft aan dat er bij de T1 opname relatief veel als onbetrouwbaar gecatalogeerde punten voorkomen (Figuur 13, cfr. de individuele Agisoft rapporten voor deze twee opnames).



Figuur 13 – Vergelijking tussen de onbetrouwbare punten voor T1 en T1bis (rode punten).

Bij de T1bis opname zijn er heel weinig onbetrouwbare punten (behalve in de duinen en op de randen maar deze liggen buiten het interessegebied). Bij de T1 opname zijn er te veel onbetrouwbare punten.

Een verschilplot tussen T1bis en T1 geeft aan dat het effect van de weersomstandigheden op een verminderde nauwkeurigheid zich vooral situeert op de rand van en buiten het studiegebied ttz langs de palenrij / langs de rand van objecten (zeedijk, strandhoofd) tgv schaduw, maar ook -weliswaar in mindere mate- in de zone met vegetatie in het midden van het studiegebied (Figuur 14).



Figuur 14 – Verschilplot T1bis minus T1.

Door kubering van het verschil tussen T1bis en T1 is de gemiddelde fout tgv de mindere weersomstandigheden tijdens T1 berekend voor elke vierkante plot. Er kon hieruit worden besloten dat er een systematische fout van iets minder dan 5 cm aanwezig was bij de T1 opname. Vermoedelijk is dit te wijten aan minder optimale weersomstandigheden tijdens de T1 opname (bewolkt itt zonnig tijdens T1bis). Voor meer detail hierover wordt verwezen naar Verwaest, 2021.

3.2.4 Validatie door vergelijking met LIDAR vlucht 28/4/2021

Toevallig zijn op 28/4/2021 quasi-gelijktijdig een LIDAR strandvlucht en een drone-opname uitgevoerd te Raversijde-Mariakerke. De LIDAR strandvlucht is uitgevoerd tussen 6u en 8u (heel de kust). De drone-opname is uitgevoerd tussen 8u en 9u. Analyse van de windgegevens in die periode (meetnet Vlaamse Banken, Oostende Meteopark) toont aan dat de kritische windsnelheid voor eolisch transport (ca. 7 m/s voor wind op 10 m hoogte) overschreden werd vanaf 28/4 8u30 tot 29/4 's middags (windrichting krimpnd van NO tot NNW). Er kan dus vanuit gegaan worden dat quasi-dezelfde morfologie opgemeten is door enerzijds de LIDAR strandvlucht en anderzijds de drone-opname te Raversijde-Mariakerke.

Een vergelijking tussen beide hoogte-opnames leidde tot verschillen kleiner dan 5 cm, met plaatselijk enkele uitzonderingen. Belangrijkste vaststelling was dat ter plaatse van de helmvegetatie de ligging van het maaiveld gedetecteerd werd, zowel door de LIDAR vanuit het vliegtuig als door de fotogrammetrie van de dronebeelden. De reden dat niet de top van de helmvegetatie gedetecteerd werd (deze bevindt zich ca. 50 cm boven het maaiveld) is dat de vegetatie nog zeer ijl was.

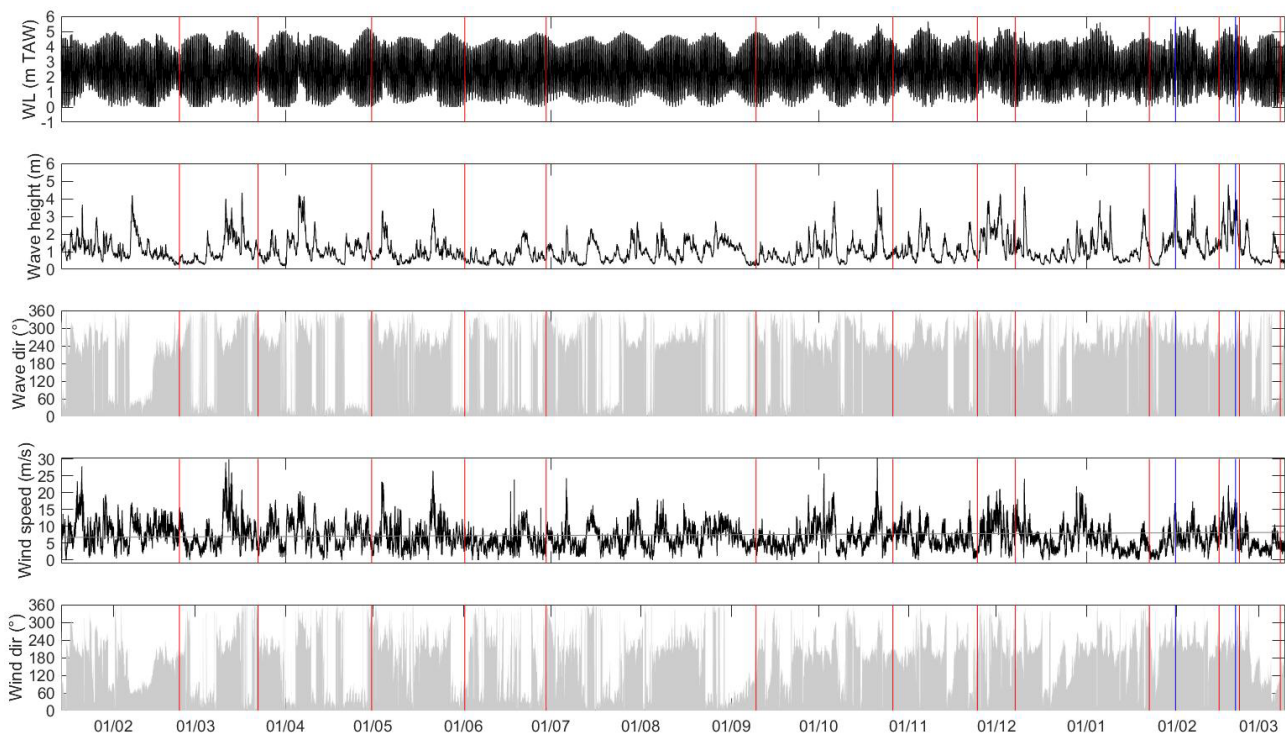
Voor meer informatie over deze validatie wordt verwezen naar Verwaest, 2021bis.

4 Morfologische analyse

4.1 Spinoladijk te Oostende

4.1.1 Meteo-mariene condities tijdens de monitoring

Figuur 15 toont tijdreeksen van waterniveau in Oostende, golfhoogte 10% en golfrichting in Oostende Poortjes (gelegen op 7 km van de kust), windsnelheid en -richting van het weerstation te Zeebrugge. Het waterpeil overschreed vier maal 5.5 m TAW, namelijk op 7/11/2021, 5/1/2022, 31/1/2022 (Corrie storm), en 21/2/2022 (Franklin storm). Tijdens de Corrie storm op 31/1/2022 om 12:00 bereikte het waterpeil 5.73 m TAW (een opzet van 1.49 m), was de 10% golfhoogte ongeveer 5.24 m komende uit NW (loodrecht ten opzichte van de kustlijn). De windsnelheid bedroeg ongeveer 15 m/s. Tijdens de Franklin storm op 21/2/2022 om 3:00, waren de meteo-mariene condities lager dan bij de Corrie storm met een waterpeil van 5.57 m TAW (een opzet van 0.82 m), de 10% golfhoogte was ongeveer 4.31 m uit W (schuin ten opzichte van de kustlijn) en de windsnelheid bedroeg ongeveer 14 m/s.



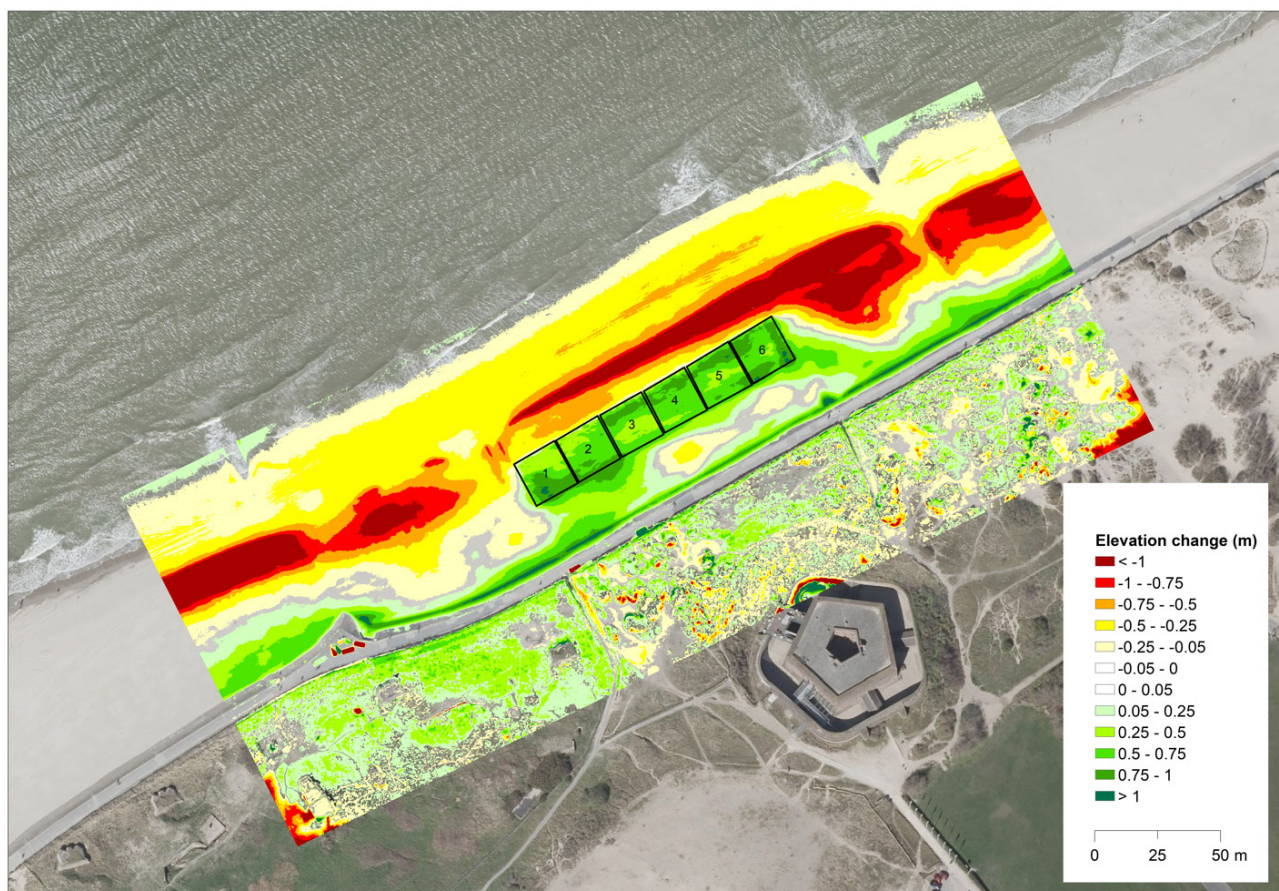
Figuur 15 – Tijdreeksen van het waterpeil in Oostende, golfhoogte 10% en golfrichting te Oostende “Poortjes” (boei gelegen op 7 km van de kust), windsnelheid en -richting van weerstation Zeebrugge ([Meetnet Vlaamse Banken](#)).

Verticale rode en blauwe lijnen corresponderen respectievelijk met de drone surveys en het optreden van storm.
Horizontale grijze lijn op de windsnelheid tijdreeks is de kritische windsnelheid voor eolisch zandtransport (7 m/s).

4.1.2 Morfologische veranderingen

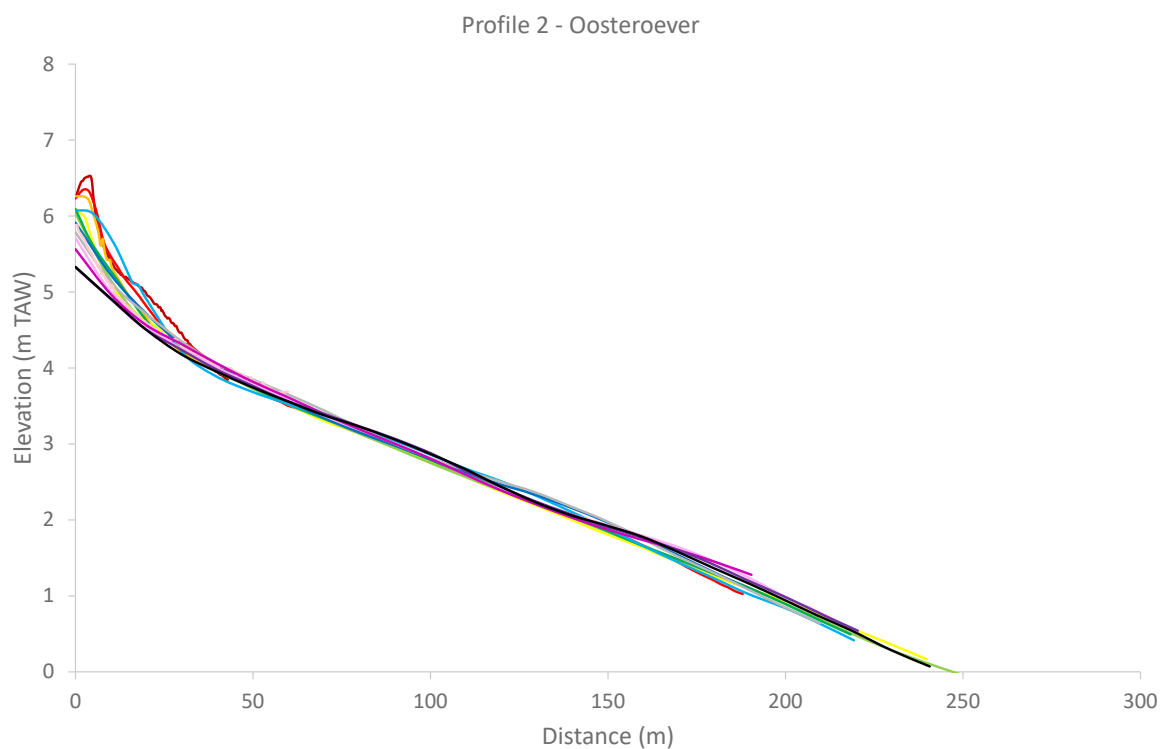
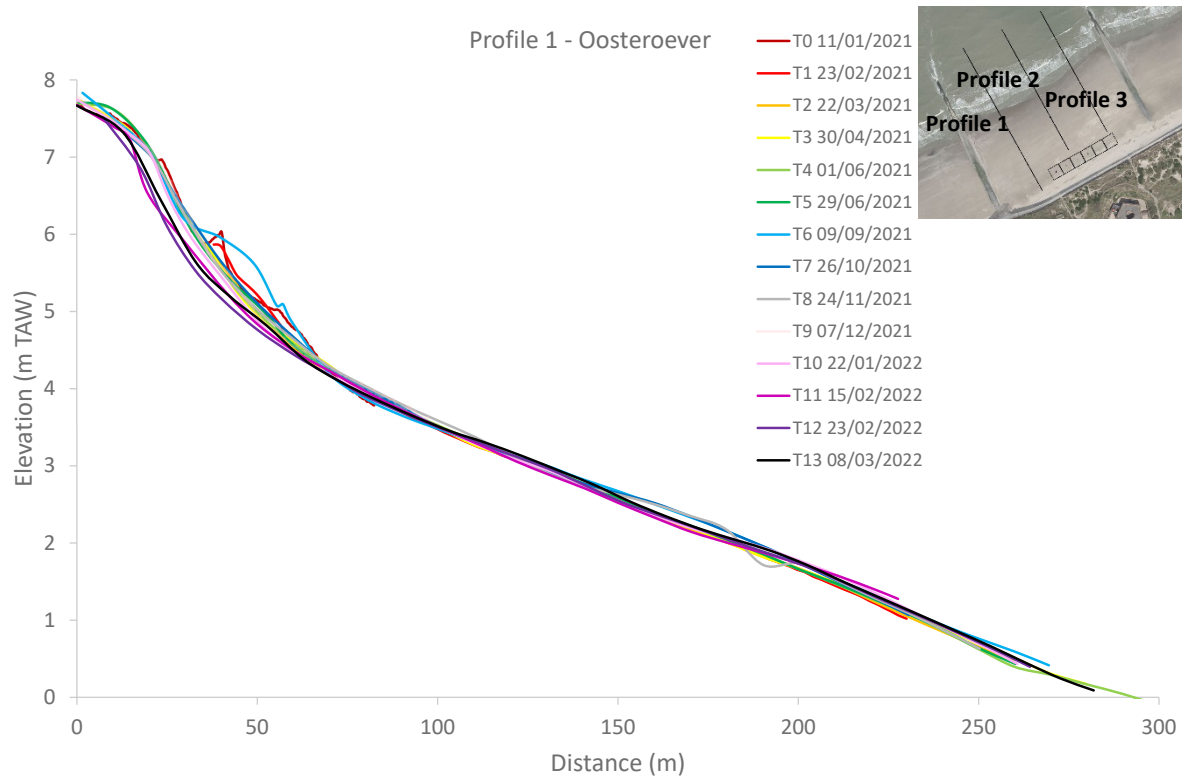
A) Evolutie gedurende 1 jaar

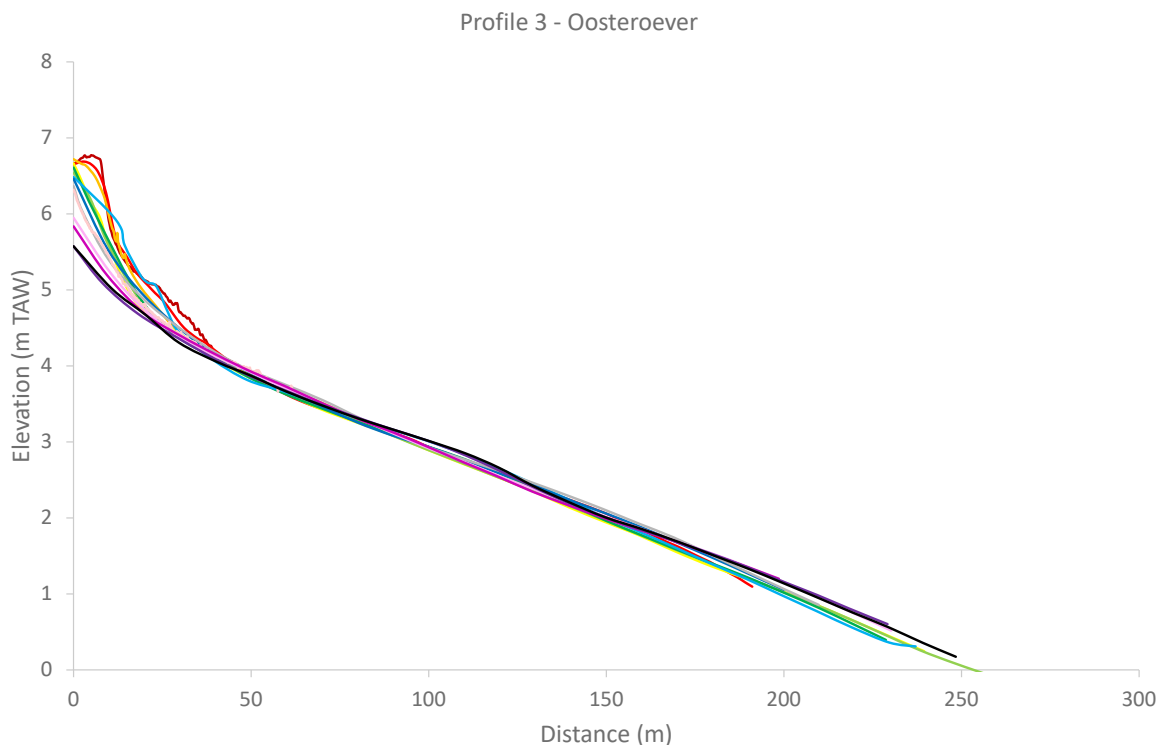
DoD T0-T13 geeft duidelijk accretie aan in de begroeide vakken (vakken 1 tot en met 6 in Figuur 16). Het bovenste deel van het droge strand toont een grote zandaanwas tot 1.1 m hoog langs de dijk, maar er dient hierbij vermeld dat meermaals door stad Oostende graafwerken werden uitgevoerd in deze zone in het kader van het beleid om de hinder van zand op de Spinoladijk te beperken. Het onderste deel van het droge strand vertoont daarentegen erosie, maar ook hier dient er vermeld te worden dat er interferentie was door de genoemde werkzaamheden van de stad Oostende, namelijk werd meermaals zand afkomstig van op de Spinoladijk teruggevoerd naar het strand. Er bevindt zich een lijn van morfologische stabiliteit op 7.5 à 7.7 m TAW.



Figuur 16 – Verschil DEM (DoD) T0 (11/01/2021)-T13 (08/03/2022), periode 1.15 jaar.
De zeewaartse grens bevindt zich rond de +4 m TAW.
NB wijzigingen in de duinen en aan de randen zijn onbetrouwbaar

Een analyse van de profielmetingen is gemaakt in Figuur 17. De locatie van de profielen wordt gegeven rechtsboven op de eerste deelfiguur van Figuur 17. De drie profielen laten een netto landwaartse evolutie (erosie) zien van het droog strand. De aparte vorm van de profielen opgenomen op 9/9/2021 laat vermoeden dat deze beïnvloed zijn door zandwerken door de stad Oostende. Merk op dat profiel 1 zich naast de helmaanplant bevindt en dat de profielen 2 en 3 slechts reiken tot aan de zeewaartse rand van de helmaanplant.





Figuur 17 – Dwarswaterprofielen gemeten met het GPS-systeem, behalve op T0 (11/01/2021) en T9 (07/12/2021), die zijn afgeleid van de DEM van de drone-opnames. Inzet: ligging van de profielen.

B) Effect van opeenvolgende stormen in Jan-Feb 2022

Verschil DEM's (DoD's) zijn gemaakt voor de periode Jan-Feb-Maart 2022 (Figuur 18).

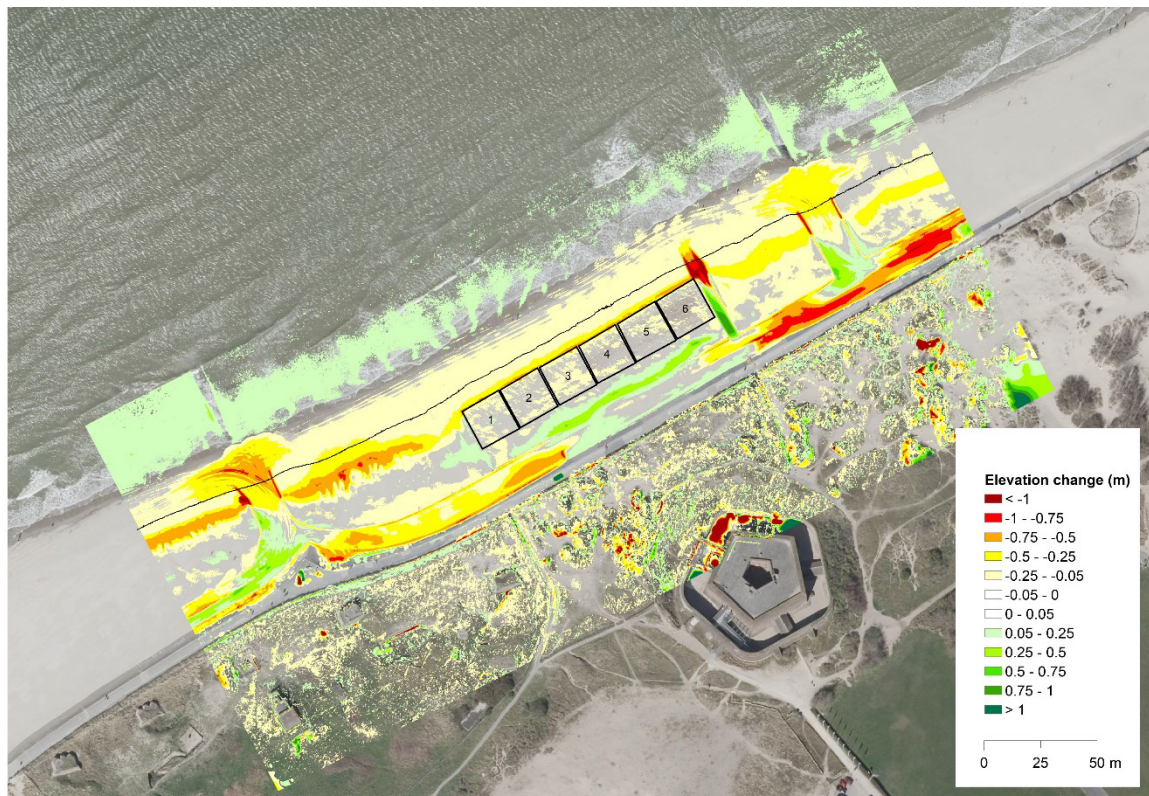
De eerste deelfiguur is voor analyse van het effect van storm Corrie. Storm Corrie bereikte een maximale waterstand van 5.73 m TAW (still water level gemeten door de maregraaf te Oostende). Dit waterniveau is minder dan 20 m verwijderd van de begroeide vakken. Door golfploop werd de zeewaartse rand van de helmaanplant bereikt. Erosie vond plaats vóór de begroeide vakken, terwijl binnen en landwaarts van de vakken geen significante veranderingen optraden. Beperkte aanwezigheid van een kleine klif. Er is ook erosie zichtbaar langs de dijk. De vraag stelt zich of dit een natuurlijk fenomeen is, dan wel het gevolg van zandwerken uitgevoerd door de stad Oostende. Er zijn echter geen gegevens beschikbaar over de door de stad Oostende uitgevoerde zandwerken.

De tweede deelfiguur is voor analyse van het effect van storm Franklin. Storm Franklin bereikte een maximale waterstand van 5.57 m TAW. Dit gemiddeld waterniveau is ca. 20 m verwijderd van de begroeide vakken. De storm had relatief weinig invloed op het droge strand.

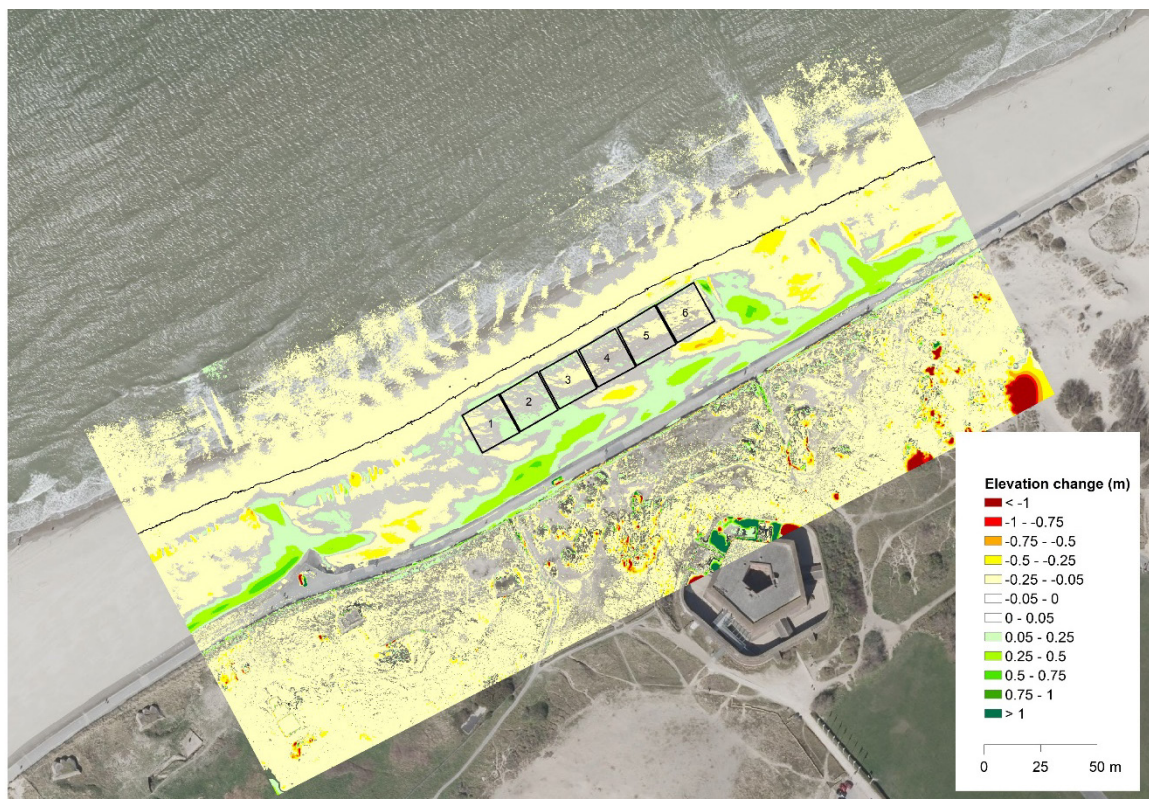
De derde deelfiguur geeft aan dat in een volgende periode zonder stormen quasi geen significante hoogtewijzigingen opgetreden zijn (hoogteverschil < 5 cm).

De vierde deelfiguur geeft het cumulatief effect weer voor heel de betreffende periode in Jan-Feb-Maart 2022.

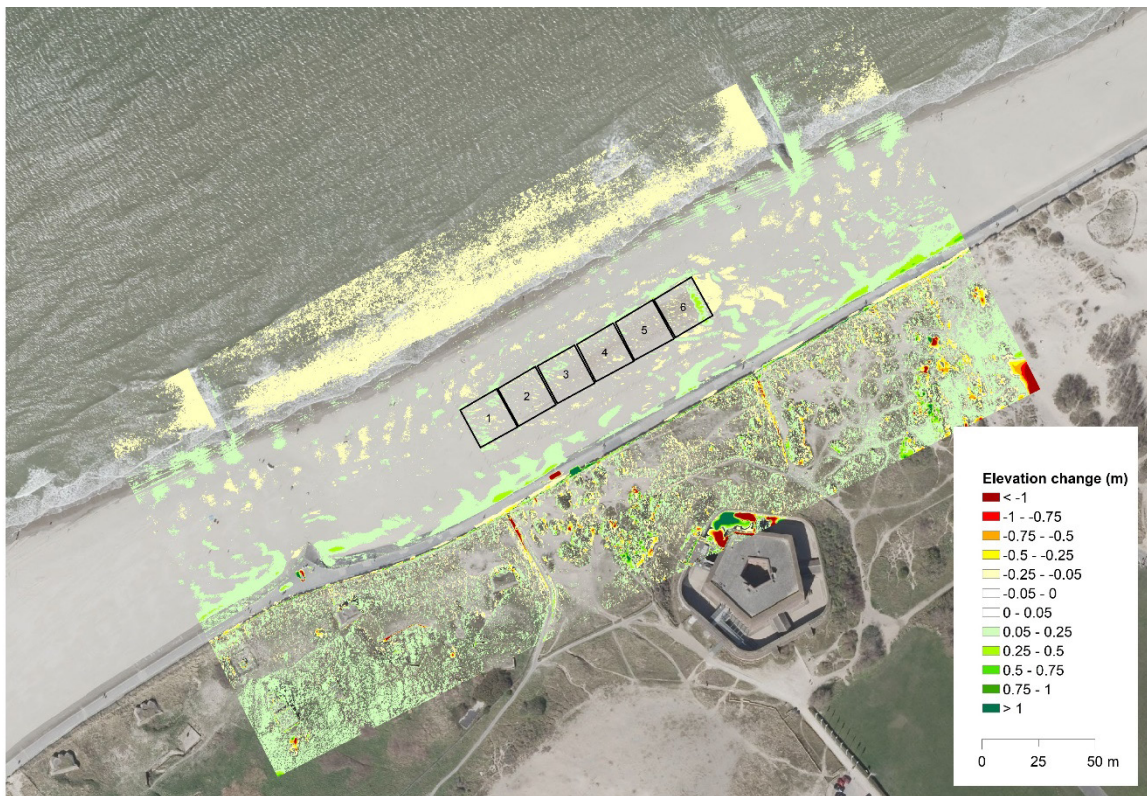
T10 (22/01/2022, pre-Corrie storm) - T11(15/02/2022, post-Corrie storm)



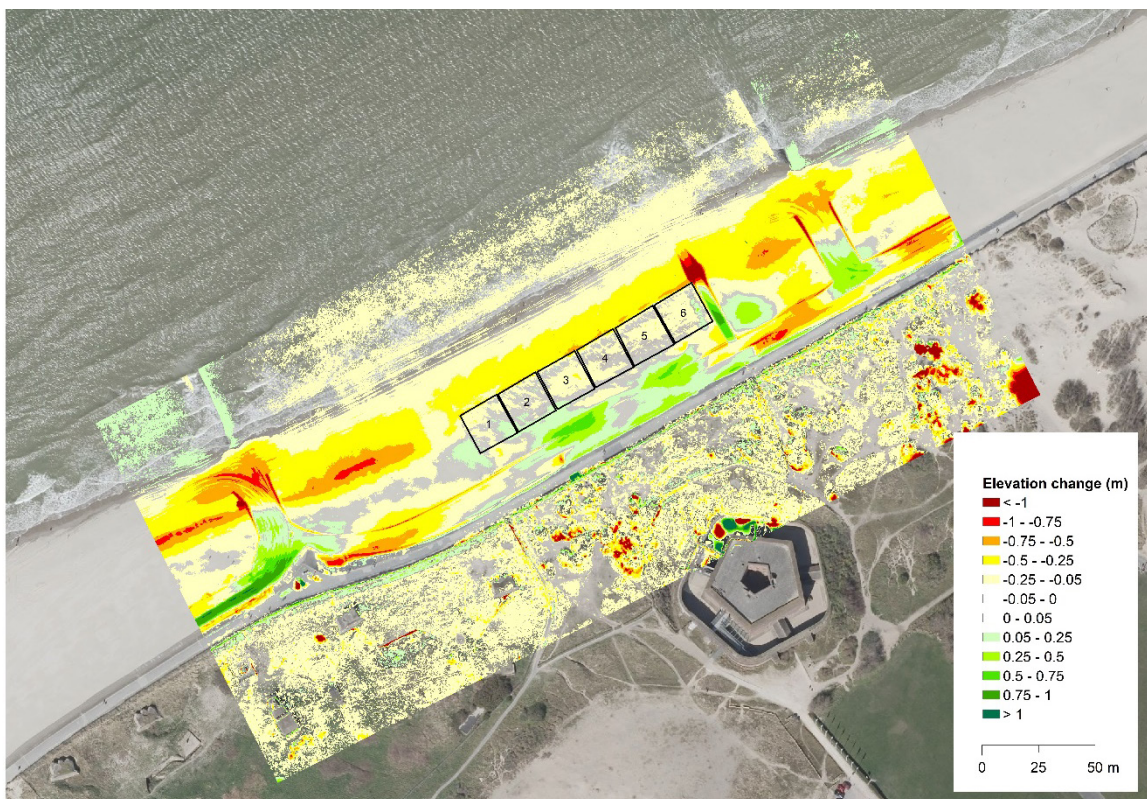
T11 (15/02/2022, pre-Franklin storm) - T12 (23/02/2022, post-Franklin storm)



T12 (23/02/2022) - T13 (08/03/2022)



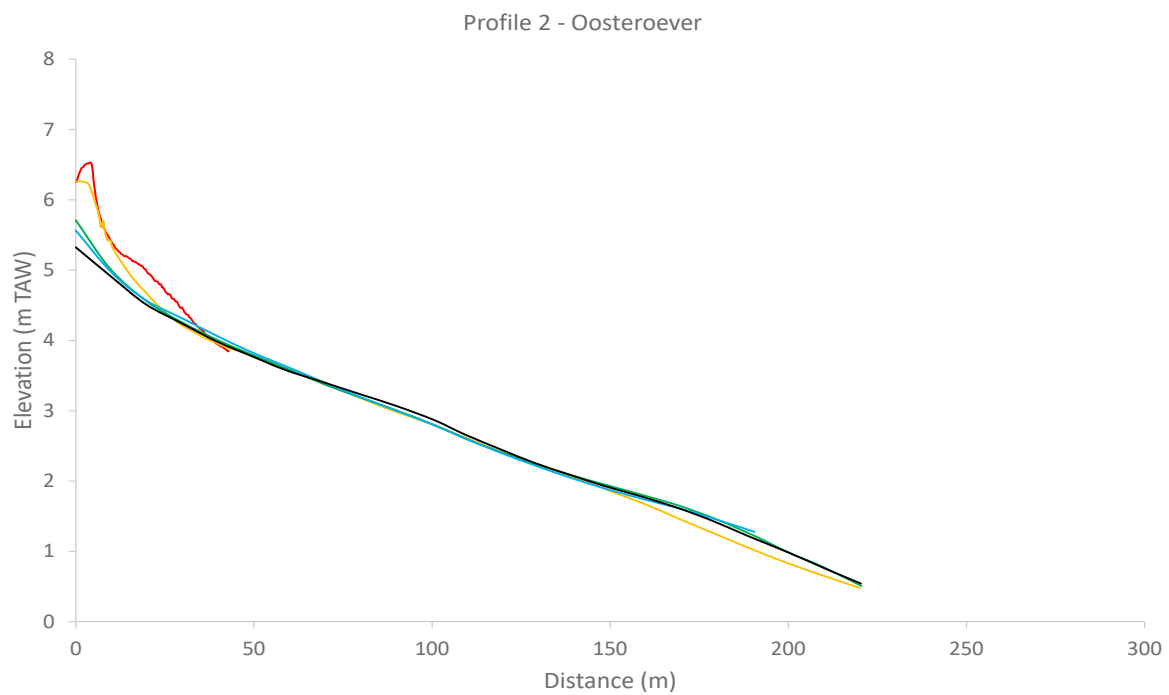
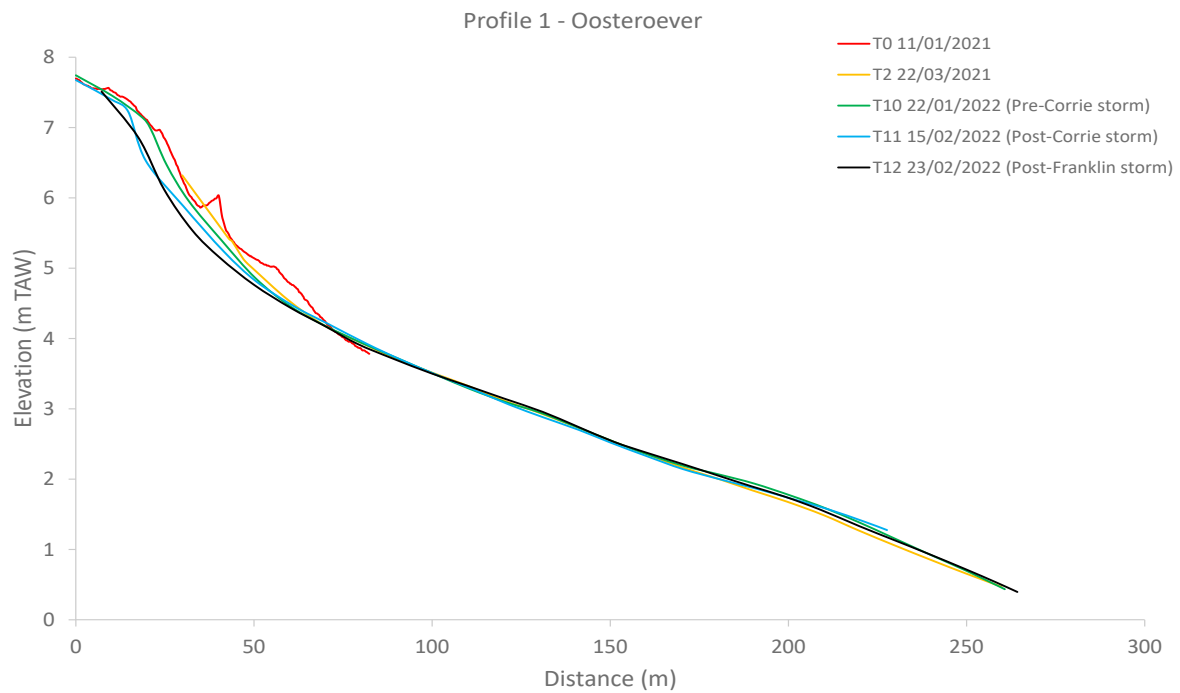
T10 (22/01/2022,) - T13 (08/03/2022)

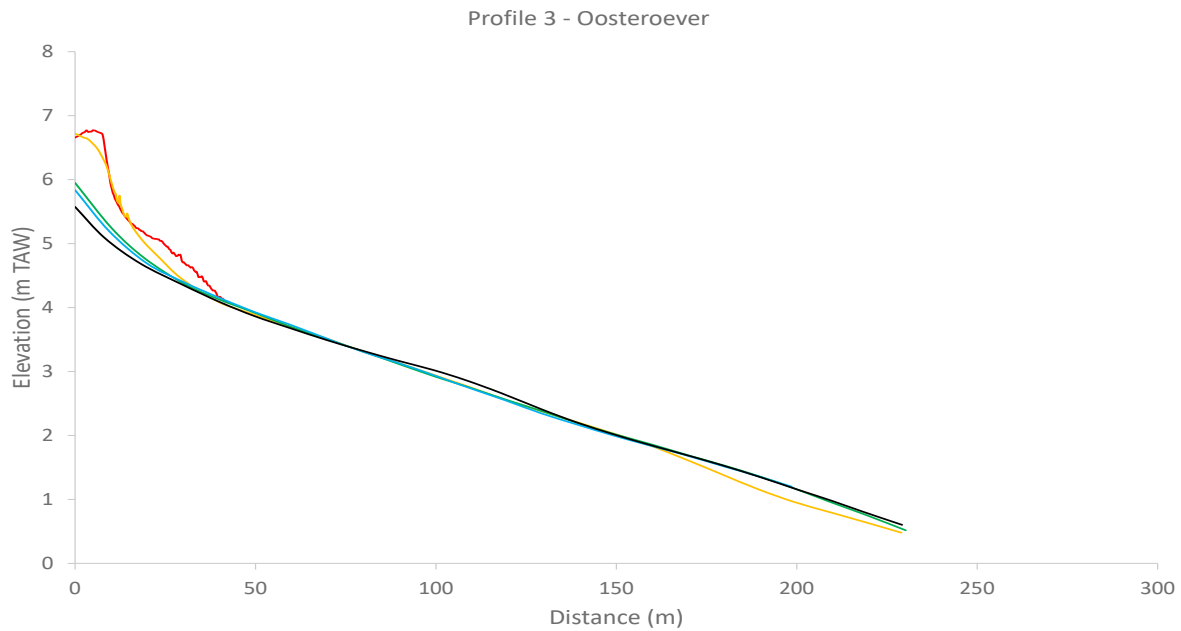


Figuur 18 – Opeenvolgende DoD's tussen T10 (22/01/2022)-T13 (08/03/2022).
De zwarte lijn geeft het maximale waterniveau aan dat tijdens de stormen werd bereikt.

Een analyse van de profielmetingen is gemaakt in Figuur 19.

De drie profielen laten een landwaartse beweging (erosie) zien van het droog strand.

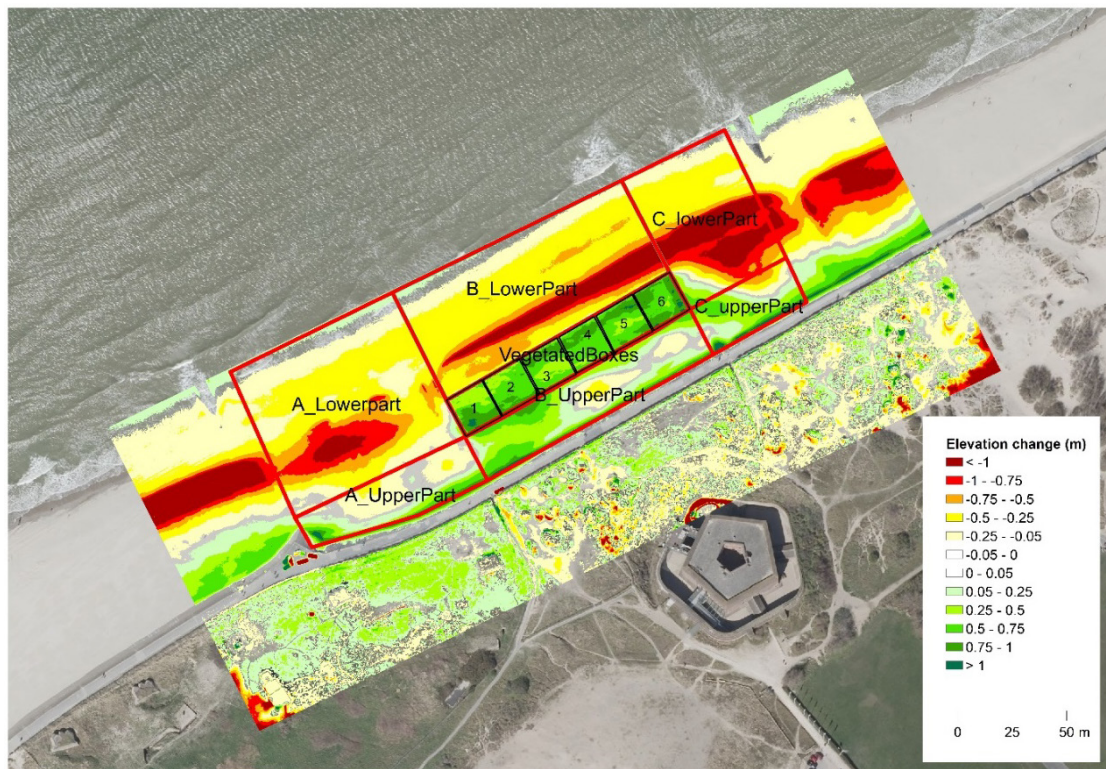




Figuur 19 – Dwars profielen van pre- en post-stormopnames. Opmerking: T0 (11/01/2021) werd afgeleid van een drone DEM

4.1.3 Volumetrische veranderingen

Het studiegebied is opgedeeld in een aantal zones (Figuur 20). De volumetrische evolutie in deze zones is berekend gebruik makend van de drone-DEM's en de resultaten zijn gegeven in Tabel 3. Merk op dat het nat strand geen deel is van deze kuberingen.



Figuur 20 – Beschrijving van de afgebakende zones voor de volumetrische berekeningen.
Achtergrond: verschil DEM (DoD) T0 (11/01/2021)-T13 (08/03/2022), periode 1.15 jaar.
De grens tussen “UpperPart” en “LowerPart” is gesitueerd nabij de +7.5 m TAW hoogtelijn.

Tabel 3 – Sedimentbudget bij Spinola tussen de onderzoeksperiodes.

Groen (aanwas), rood (erosie), grijs (stabiliteit: de waargenomen verschillen zijn van dezelfde grootte-orde als de nauwkeurigheid van de morfologische monitoring d.w.z. er is geen significant verschil vast te stellen).

Time	Volume difference (m ³)						
	Vegetated Boxes	A_Upper Part	A_Lower part	B_Upper Part	B_Lower Part	C_Upper Part	C_Lower Part
T0-T10	1631	526	-1197	536	-2123	506	-1356
T10-T11 (pre-post Corrie)	-127	-364	-536	7	-344	-289	-418
T11-T12 (Post Corrie-Post Franklin storm)	-20	-38	-433	202	-395	47	-271
T12 (Post-Franklin storm)-T13	-12	49	-145	41	-159	15	-65
T0-T13	1473	174	-2311	785	-3021	279	-2109
T0-T13 (m ³ /m/yr)	11	2	-24	6	-22	5	-35

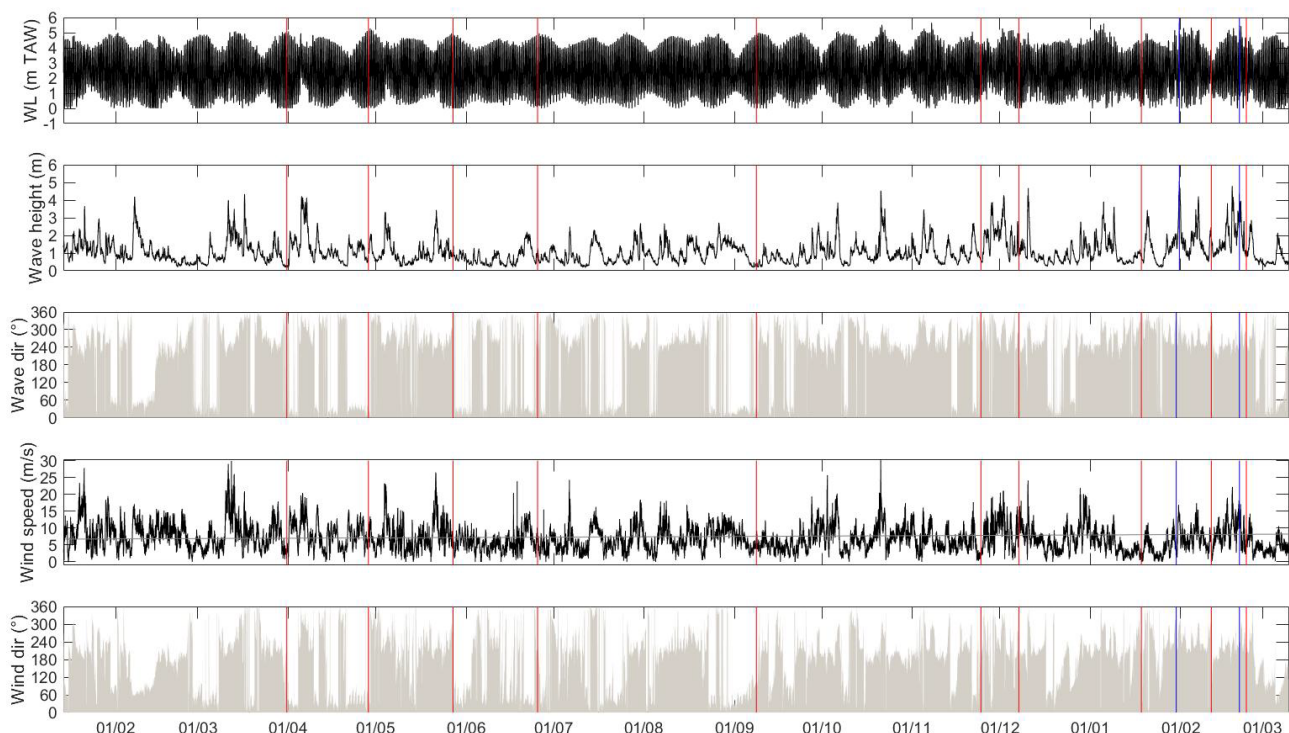
Zoals eerder is waargenomen op het verschil-DEM, vindt er aan landwaartse zijde van het droog strand netto aangroei plaats gedurende het beschouwde jaar, terwijl er aan de zeewaartse zijde erosie optreedt. De interpretatie van deze gegevens wordt bemoeilijkt omdat er in de beschouwde periode meermaals zandwerken zijn uitgevoerd door de stad Oostende, waarover er geen gegevens beschikbaar zijn.

In de zone met helmaanplant is een gemiddelde aanwas van 11 m³/m/jaar opgetreden. Dit komt overeen met een hoogte-toename van 0.6 m in het eerste jaar. In de zone landwaarts hiervan is ook netto aanwas opgetreden, namelijk 6 m³/m/jaar. Dit ondanks mogelijke graafwerken door de stad Oostende. Dit wijst erop dat een deel van de eolische aanvoer opgevangen is door de helm, maar een deel ook niet.

Het feit dat de globale zandbalans in het gebied niet sluitend is (netto verlies van -16 m³/m/jaar), is vermoedelijk deels te wijten aan de uitgevoerde zandwerken door de stad Oostende, en deels aan natuurlijke erosie (dit kan kustdwars zijn richting nat strand en/of kustlangs).

4.2 Raversijde-Mariakerke

1.1. Meteo-mariene condities tijdens de monitoring



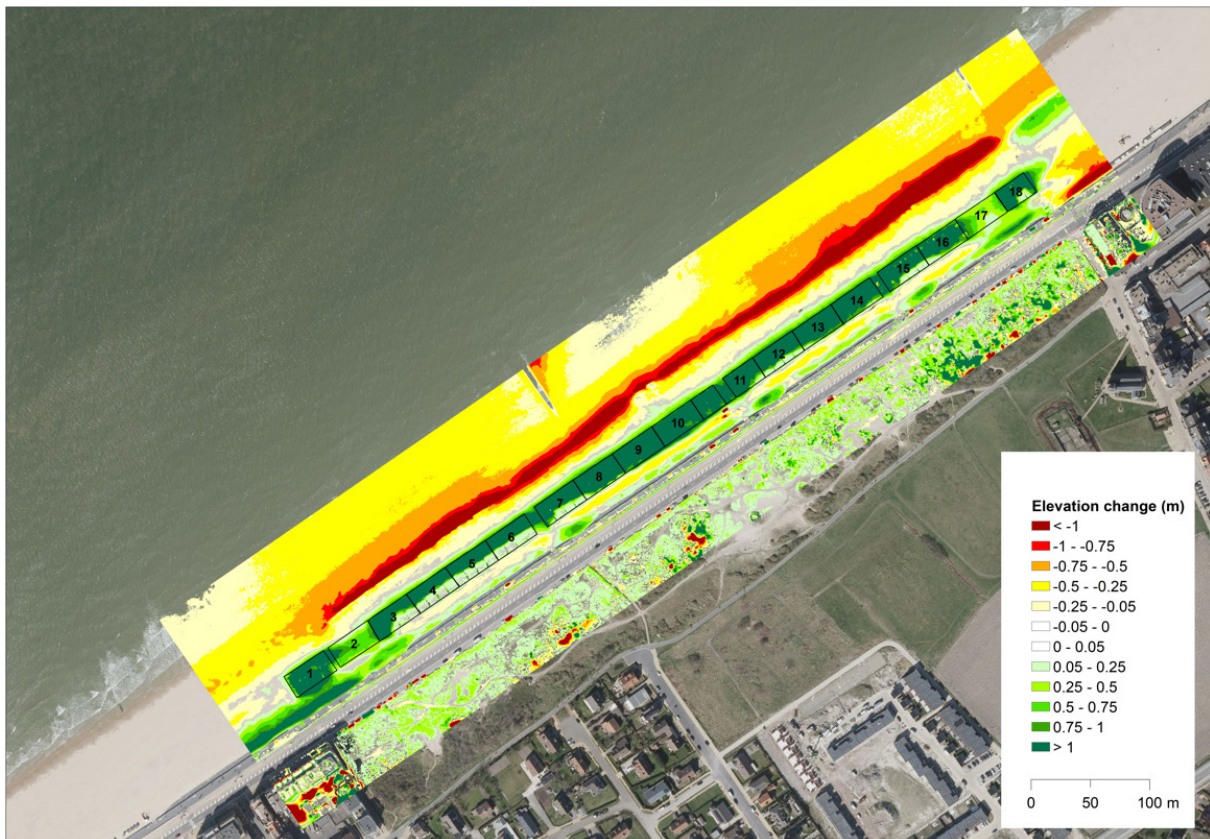
Figuur 21 – Tijdreeks van het waterpeil in Oostende, golfhoogte 10% en golfrichting te Oostende “Poortjes” (golfboei gelegen op 7 km van de kust), windsnelheid en -richting van het weerstation Zeebrugge ([Meetnet Vlaamse Banken](#)). Verticale rode en blauwe lijnen corresponderen respectievelijk met de drone surveys in Raversijde-Mariakerke en het optreden van stormen. Horizontale grijze lijn op de windsnelheid tijdreeks is de kritische windsnelheid voor eolisch zandtransport (7 m/s)

4.2.1 Morfologische veranderingen

A) Evolutie gedurende 1 jaar

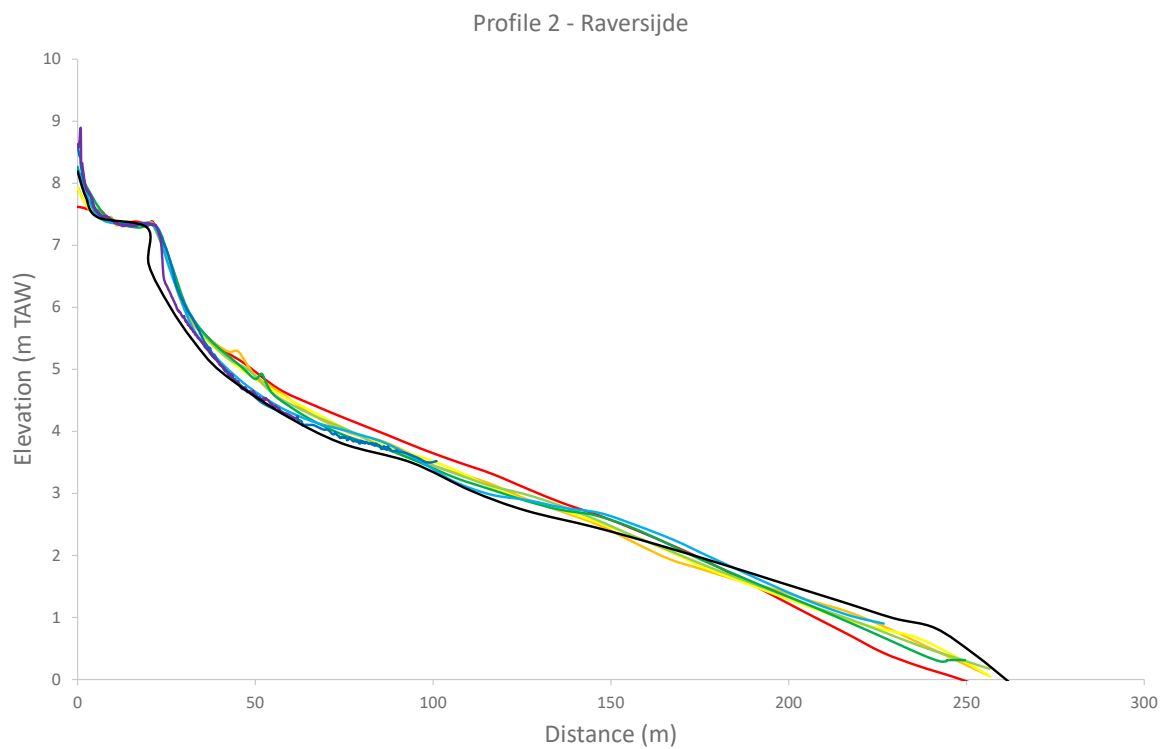
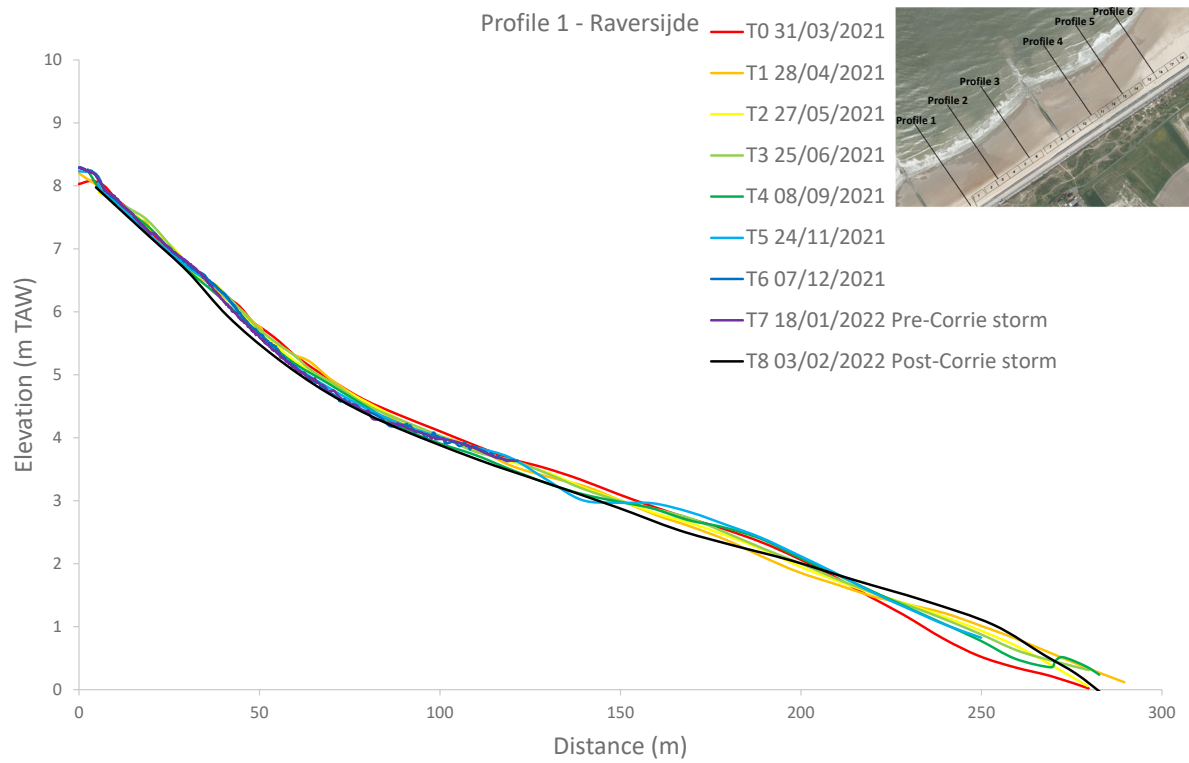
De verschil DEM's wijzen op een progressieve aanzanding in de begroeide vakken. Tussen T0 en T9 liep de zandaanwas op tot 1.5 m (Figuur 22). Op het droge strand wordt erosie waargenomen in het zeewaartse deel en wordt aangroei vastgesteld in het landwaartse deel. De grens tussen beide delen is een smal en homogeen gebied zonder significante verandering. Deze grens bevindt zich op ca. 8 m aan de zeezijde van de vakken, en op een hoogte van gemiddeld 7 à 7.5 m TAW.

Interessant is dat ten zuidwesten van vak 1 (buiten de pilootzone) een aangroei optrad met een noordoostwaartse progressie. 2D eolische processen (onshore en alongshore) manifesteren zich daar. In het pilootgebied worden deze eolische processen gereduceerd door de aanwezigheid van de rijshouthagen en het helmgras. Door de eolische aanzanding is er in de zeewaartse rij vakken ca. 1.5 m verhoging opgetreden (cf. de hoogte van de rijshouthagen). Er is doorwaaiing te zien in de zone achter de vakken ten oosten van de doorgangen en ook ten oosten van de zones zonder rijshouthagen (nrs. 2 en 17).

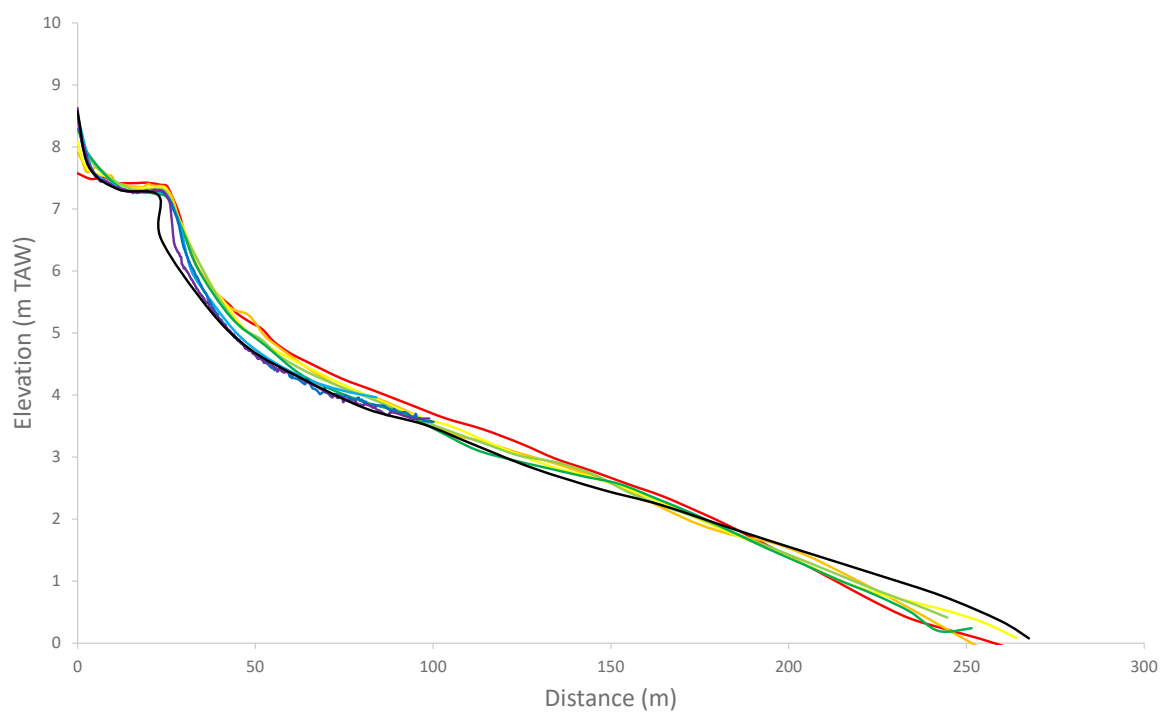


Figuur 22 – verschil DEM (DoD) T0 (31/03/2021)-T9 (23/02/2022), periode 0.8 jaar

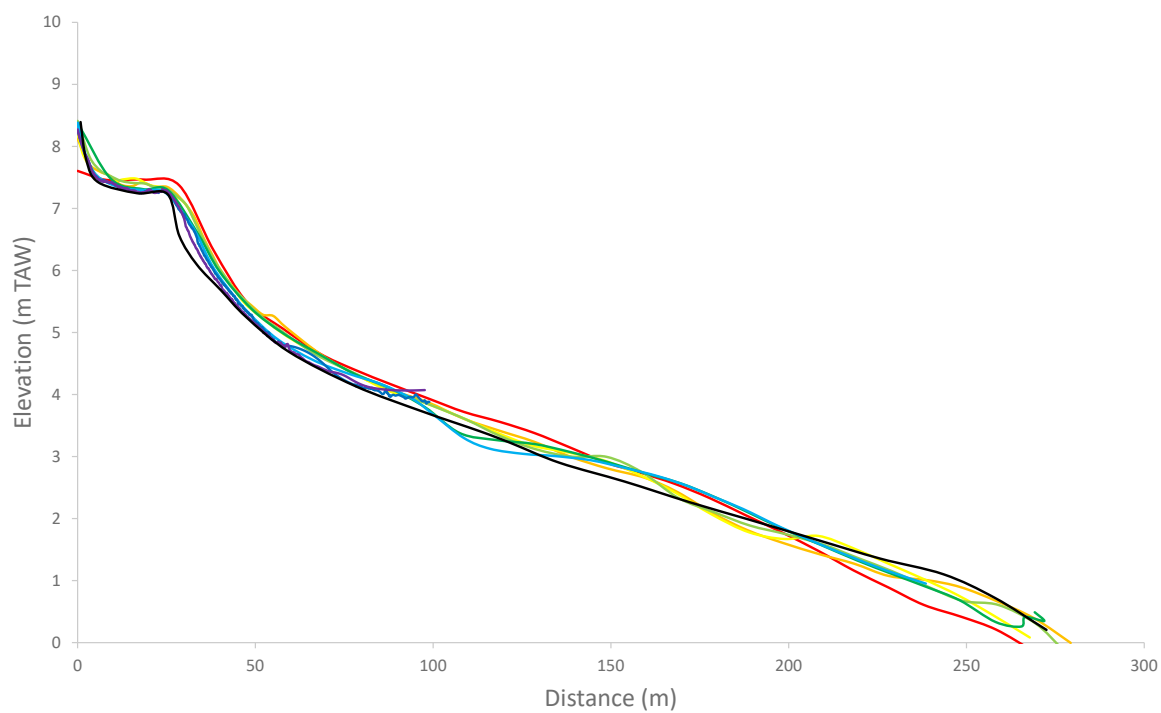
Een analyse van de profielmetingen is gemaakt in Figuur 23. De locatie van de profielen wordt gegeven rechtsboven in de eerste deelfiguur van Figuur 23. Profiel 1 bevindt zich ten zuidwesten van het pilootgebied. De profielen 2 tot en met 6 lopen vanaf de zeekant van de vakken tot aan de laagwaterlijn. Op deze figuren kan men waarnemen dat niet enkel het zeewaartse deel van het droog strand geërodeerd is, maar ook het grootste deel van het intertidaal strand vertoont erosie. Het laagste deel van het profiel, de zone rond de laagwaterlijn vertoont daarentegen aangroei. Men kan dit verklaren door de afzetting van zand dat in het hoger deel van het profiel geërodeerd werd bij stormachtige condities. Merk ook op dat het profiel 1 relatief stabiel was in de droog strand zone dan de overige profielen. Dit kan vermoedelijk gelinkt worden aan het plateau dat gecreëerd werd bij de aanleg van de pilot, hetgeen niet aanwezig is ter hoogte van profiel 1.

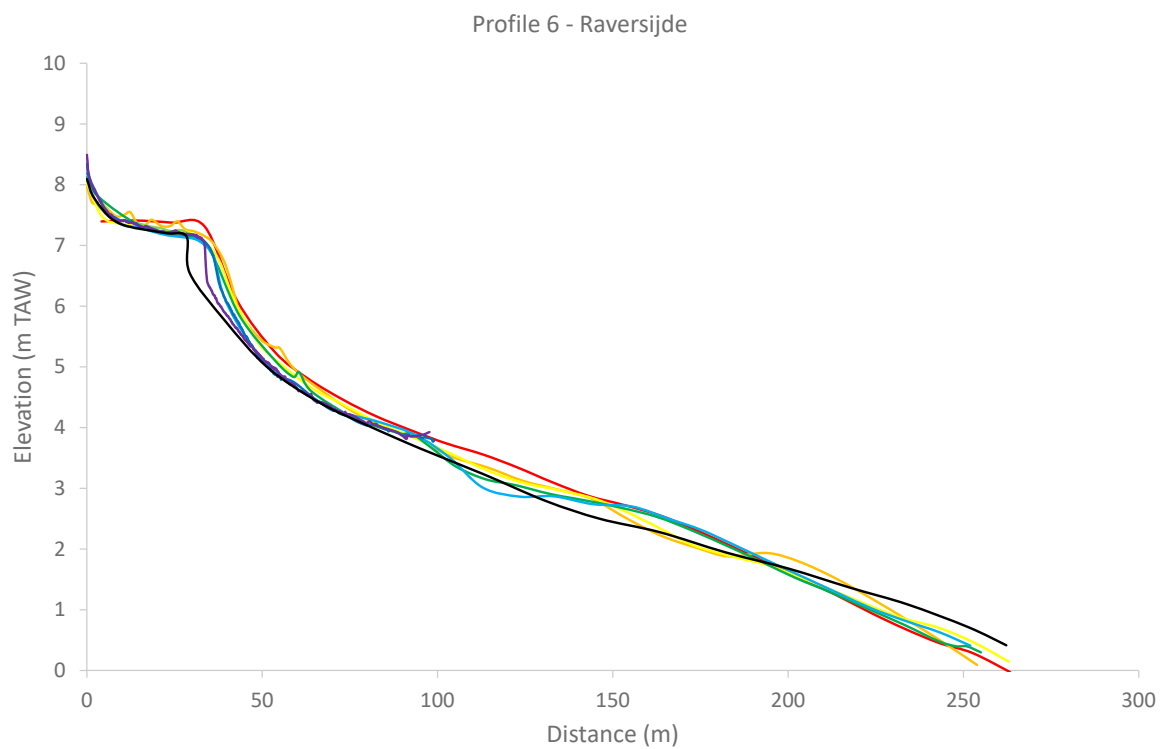
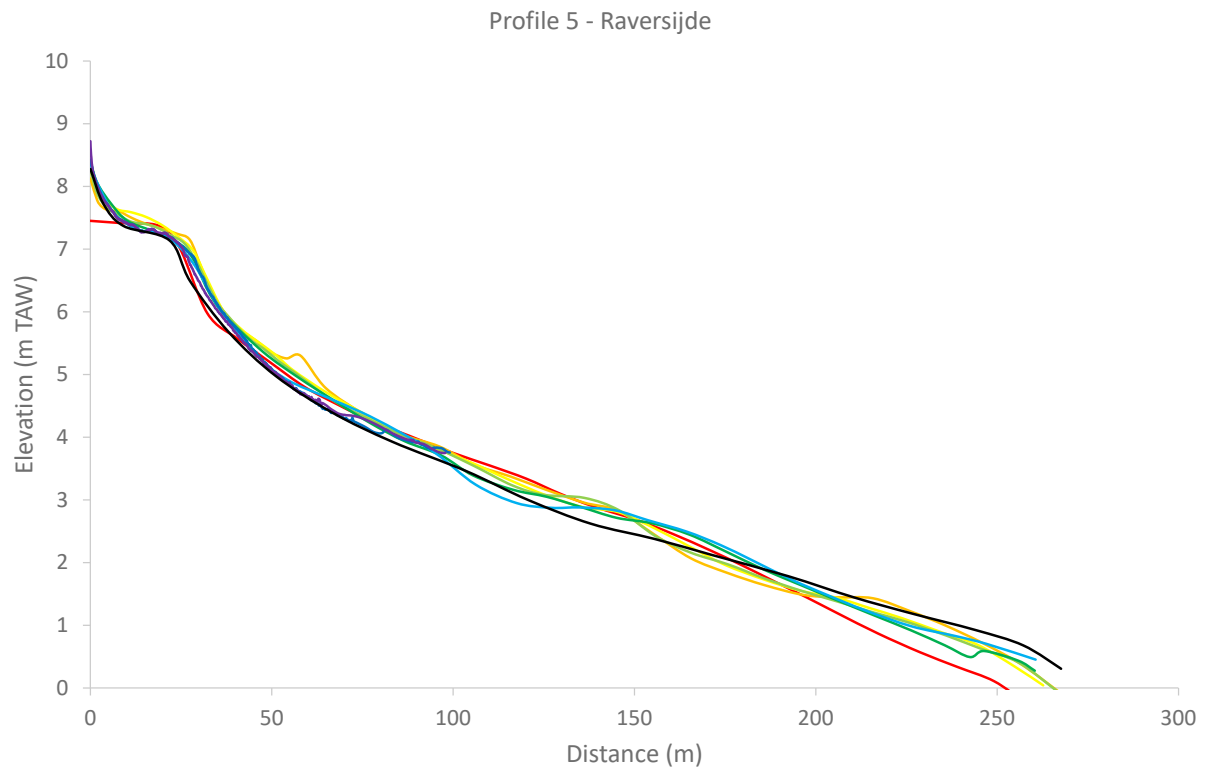


Profile 3 - Raversijde



Profile 4 - Raversijde





Figuur 23 – Dwarsprofielen gemeten met het GPS-systeem, behalve op T6 (7/12/2021) en T7 (18/01/2022), afgeleid van de DEM van de drone. Inzet: ligging van de profielen.

B) Effect van opeenvolgende stormen in Jan-Feb 2022

Verschil DEM's (DoD's) zijn gemaakt voor de periode Jan-Feb 2022 (Figuur 25).

De eerste deelfiguur is voor analyse van het effect van storm Corrie. Storm Corrie bereikte een maximale waterstand van 5.73 m TAW (maregraaf haven Oostende). Er werden kleine kliffen gevormd met als top ca. 6.4 m TAW (Figuur 24). De kliffen bevonden zich 25 à 35 m zeewaarts van de vakken. De aanwezigheid en de kenmerken van de kliffen waren variabel in het studiegebied. Het effect van storm Corrie is ook geïllustreerd in enkele dwarsprofielen (Figuur 26).

De tweede deelfiguur op Figuur 25 is voor analyse van het effect van storm Franklin. Storm Franklin bereikte een maximale waterstand van 5.57 m TAW. De klif die tijdens de Corrie-storm was ontstaan, was nog steeds aanwezig na storm Franklin, maar een stuk landwaarts verschoven. De Franklin storm versterkte de eerdere impact van de Corrie storm.

De derde deelfiguur geeft het cumulatief effect weer voor heel de betreffende periode.



Figuur 24 – Foto van beperkte klifvorming (ter hoogte van profiel 4) genomen na storm Corrie (foto genomen op 3/2/2022).

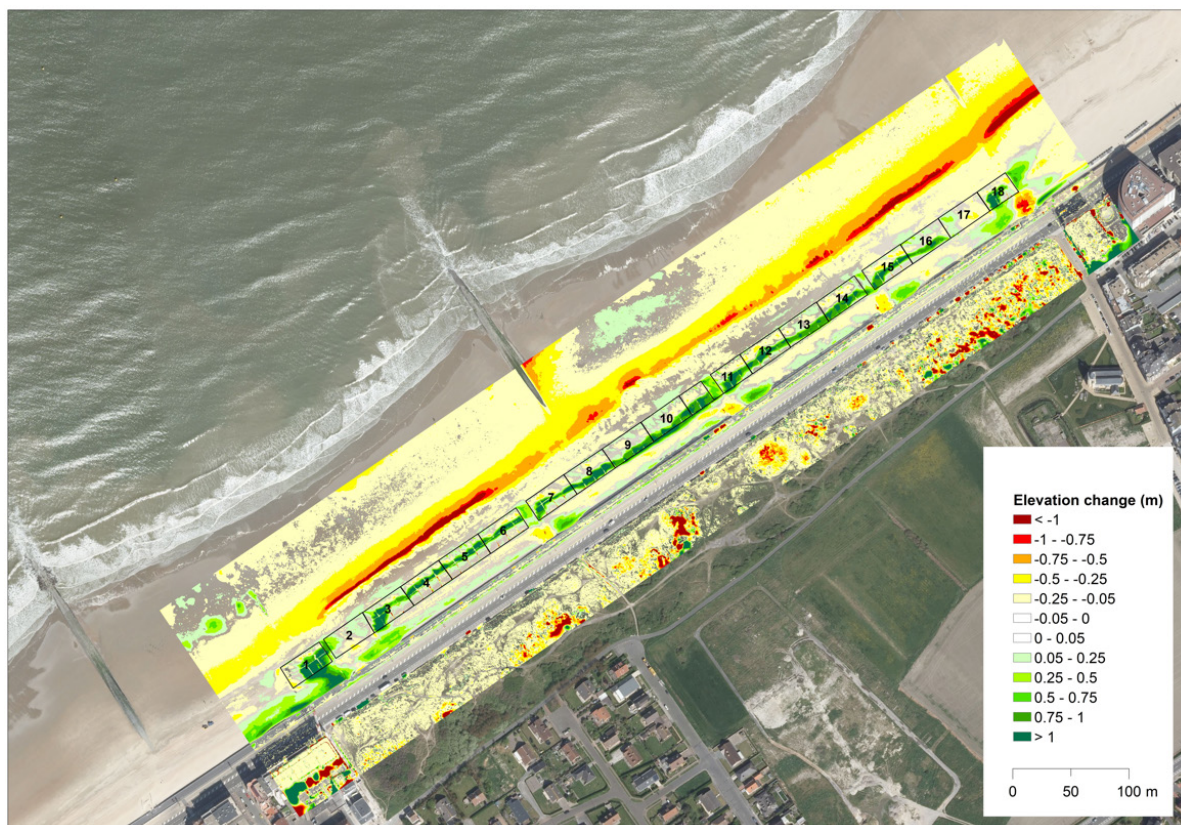
T7 (18/01/2022, pre-Corrie storm) - T8 (11/02/2022, post-Corrie storm)



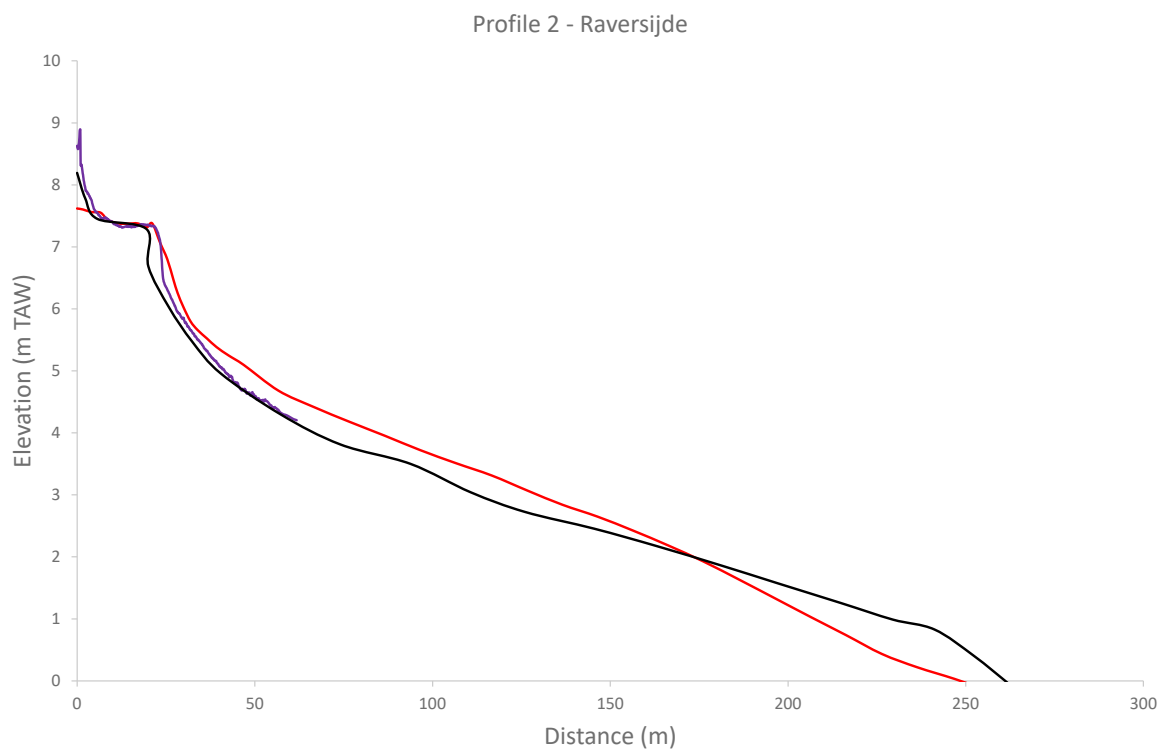
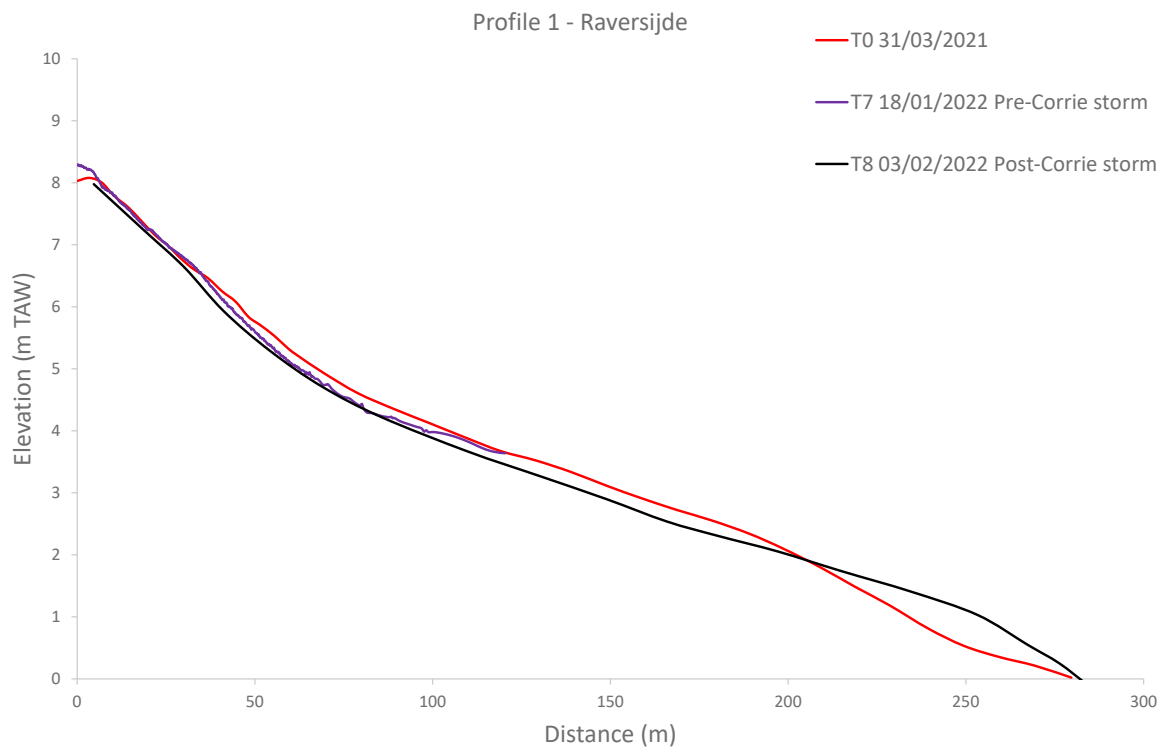
T8 (11/02/2022, pre-Franklin) - T9 (23/02/2022, post-Franklin)



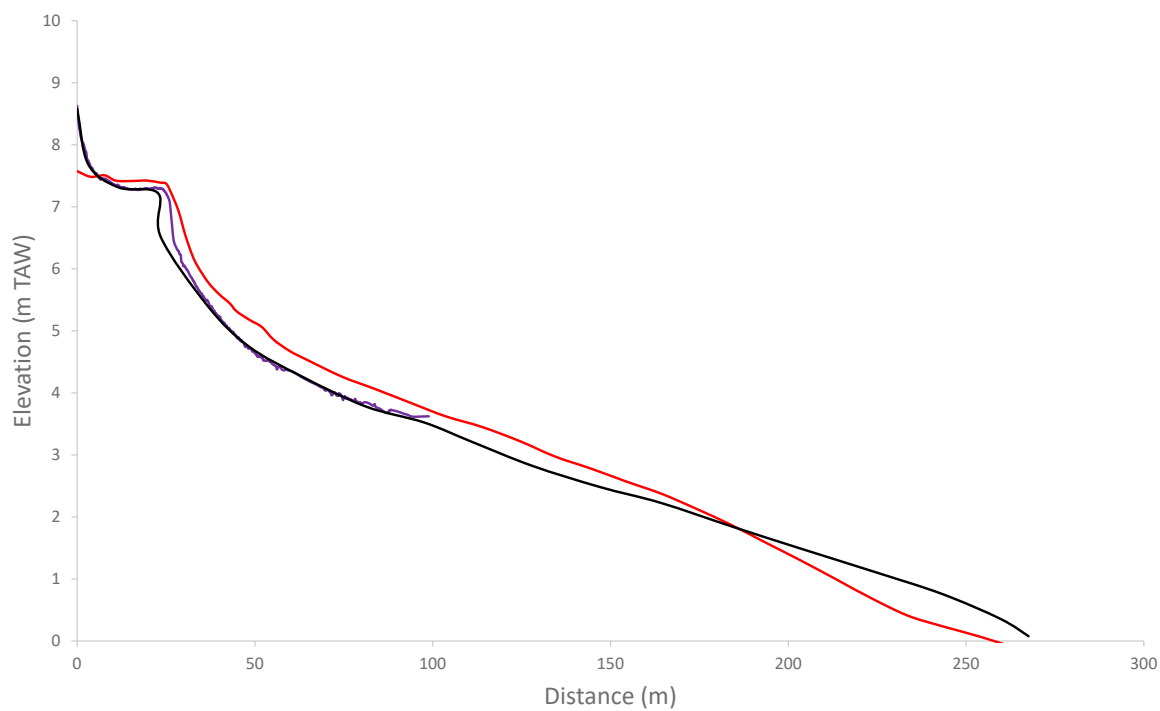
T7 (18/01/2022) -T9 (23/02/2022)



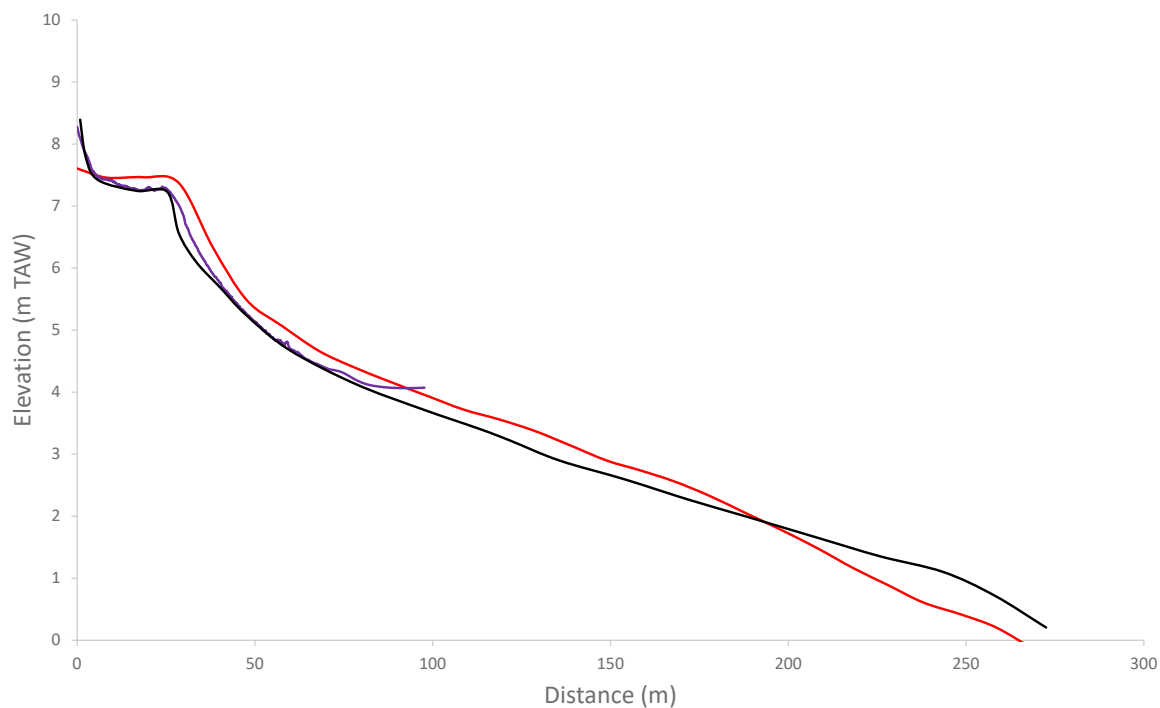
Figuur 25 – Opeenvolgende DoD's tussen T7 (18/01/2022)-T9 (23/02/2022).
De zwarte lijn geeft het maximale waterniveau aan dat tijdens de stormen werd bereikt

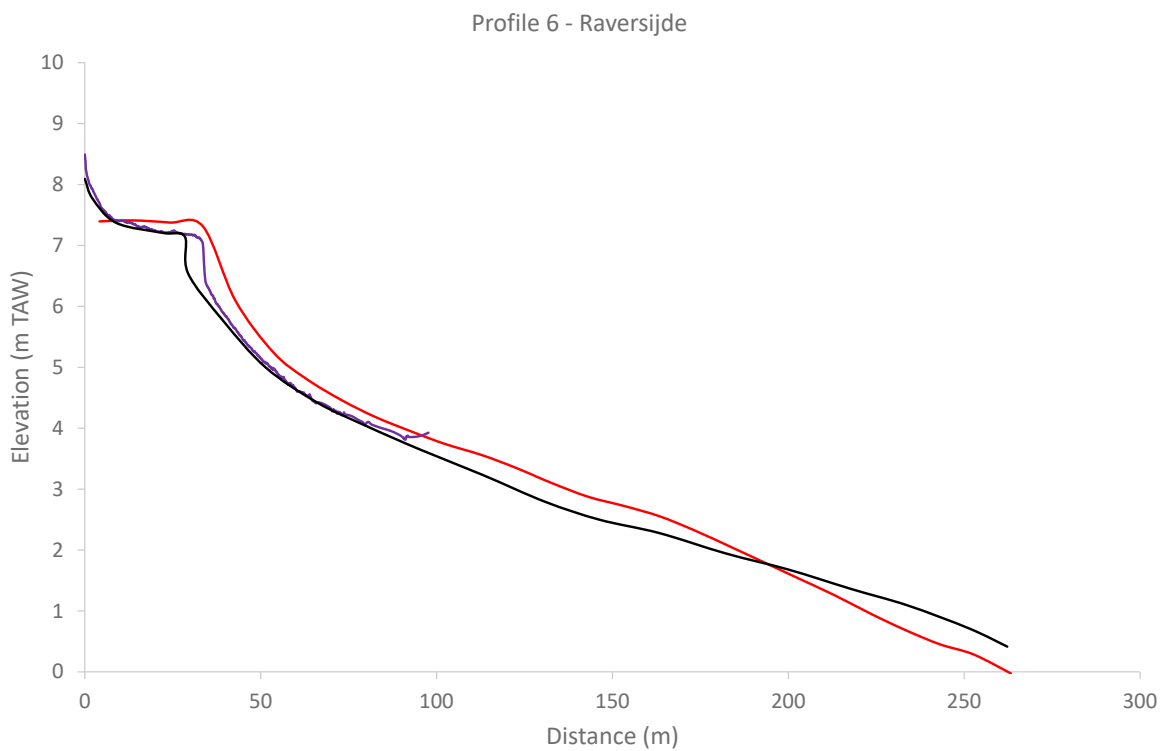
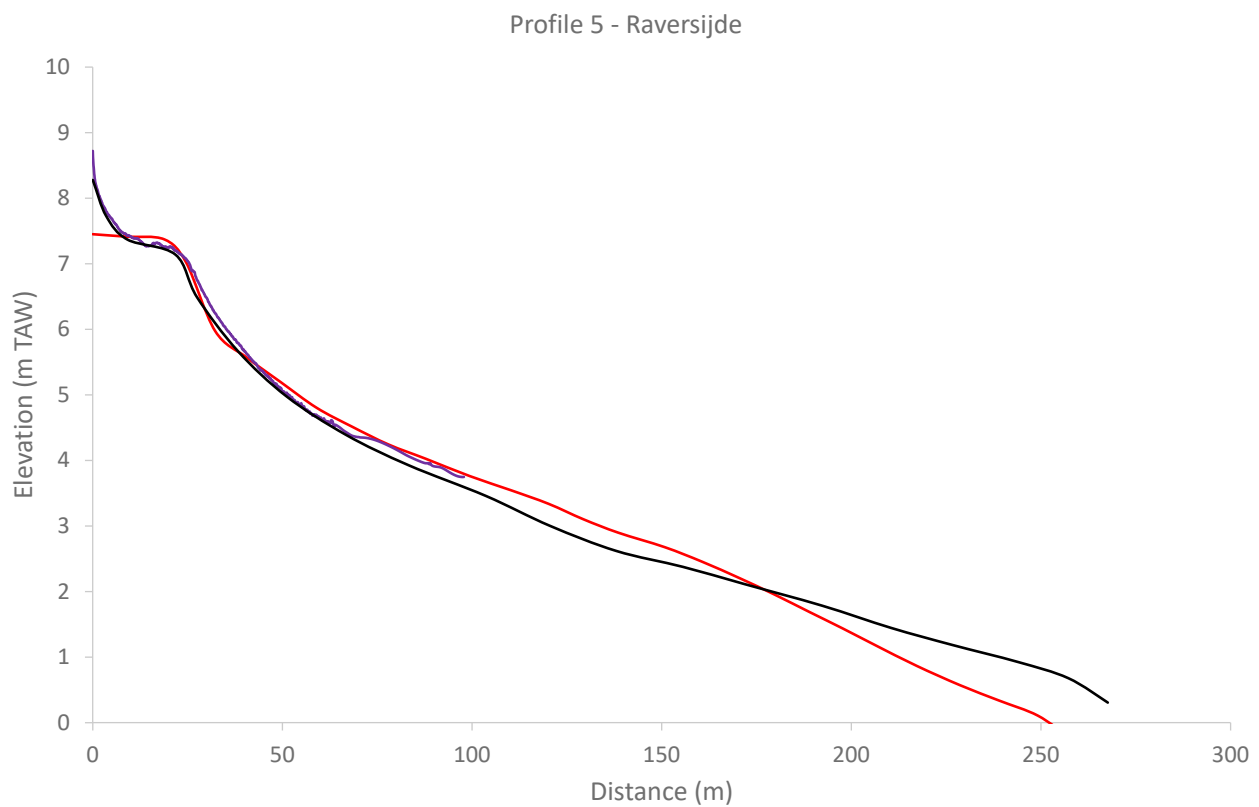


Profile 3 - Raversijde



Profile 4 - Raversijde

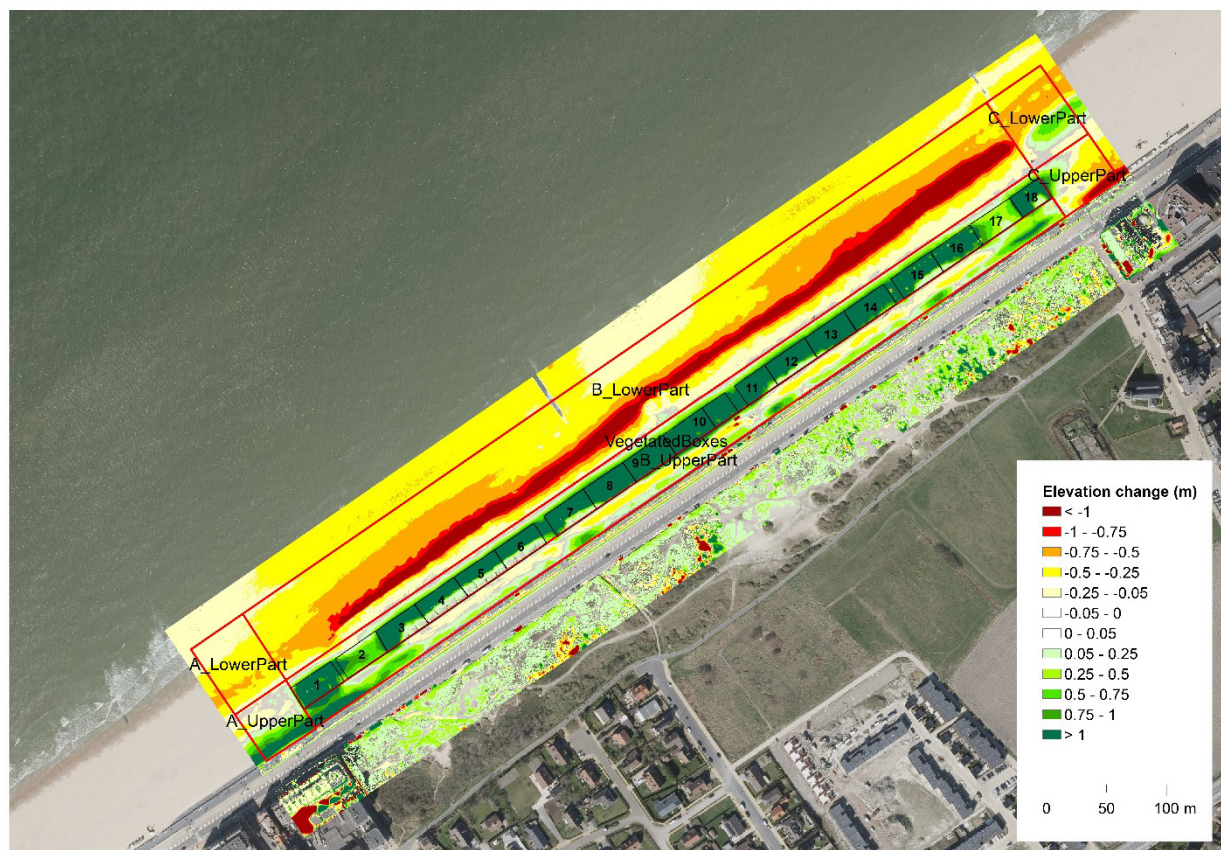




Figuur 26 – Dwarsprofielen van het effect van storm Corrie.
NB: T7 (18/01/2022) is afgeleid van het drone DEM

4.2.2 Volumetrische veranderingen

Het studiegebied is opgedeeld in een aantal zones (Figuur 27). De volumetrische evolutie in deze zones is berekend gebruik makend van de drone-DEM's en de resultaten zijn gegeven in Tabel 4.



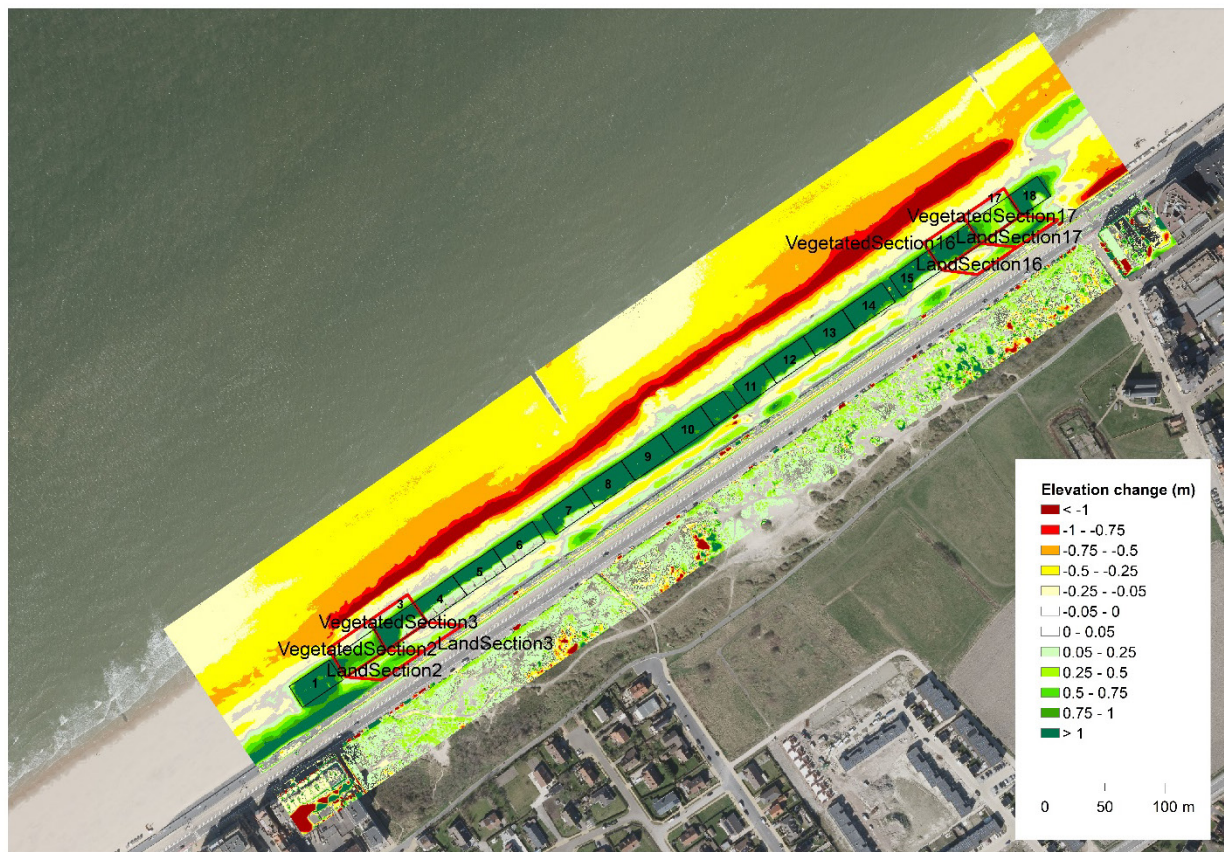
Figuur 27 – Afbakening van de deelzones gebruikt bij de kuberingen in Raversijde-Mariakerke.
Achtergrond: verschil DEM (DoD) T0 (31/03/2021)-T9 (23/02/2022), periode 0.8 jaar.
De grens tussen “UpperPart” en “LowerPart” is gesitueerd nabij de +7.5 m TAW hoogtelijn.

Tabel 4 – Sedimentbudget voor de pilot Raversijde-Mariakerke. Groen (aanwas), rood (erosie), grijs (stabiliteit).

	Diff Volume (m ³)						
Time	Vegetated Boxes	A_UpperPart	A_LowerPart	B_UpperPart	B_LowerPart	C_UpperPart	C_LowerPart
T0-T7	13477	487	-692	1435	-13515	-737	768
T7-T8 (pre-post Corrie)	938	134	-147	474	-5394	106	-575
T8-T9 (Post- Corrie-Post Franklin)	2800	218	-234	566	-7660	-66	-938
T0-T9	17215	839	-1073	2475	-26570	-697	-746
T0-T9 (m ³ /m/yr)	29	21	-25	4	-44	-16	-17

Gedurende het beschouwde jaar is er aangroei in het hogere deel van het profiel, en erosie in het lagere deel van het profiel. De volumetrische omvang van de aangroei in de pilootzone (alle 18 vakken samen) bedraagt in het totaal 33 m³/m/jaar, maar de erosie is nog iets groter, namelijk -44 m³/m/jaar. Dit is het gevolg van natuurlijke erosie die opgetreden is (kustdwars richting het nat strand en/of kustlangs). Merk op dat het verlies in het hoogste deel van zone C (C_UpperPart) wellicht te verklaren is door graafwerken door de stad Oostende. De evolutie in zone A bij Raversijde-Bad is interessant ter vergelijking met de evolutie in het pilootgebied (zone B), al is zone A relatief heel klein en daarom niet volledig representatief.

In de vakken met rijshouthagen en helmaanplant is een gemiddelde aanwas van 29 m³/m/jaar opgetreden. Landwaarts hiervan is ook nog een gemiddelde aanwas van 4 m³/m/jaar opgetreden. Er is echter een duidelijk verschil tussen enerzijds de zones met rijshouthagen en anderzijds de zones met enkel helmaanplant. Om dit verder te kwantificeren zijn nog enkele volumetrische berekeningen gedaan in geselecteerde subzones. De afbakening van deze subzones is weergegeven in Figuur 28. Er zijn twee secties met rijshouthagen (nrs. 3 en 16) en twee secties met enkel helmaanplant (nrs. 2 en 17). Aan de landzijde zijn grenzen van de subzones schuin gelegd om rekening te houden met de dominante westelijke windrichting voor het eolisch transport dat daar plaatsvindt: de grenzen zijn bepaald op basis van de accumulatiepatronen waargenomen op het verschil DEM na ca. 1 jaar (Figuur 28). De resultaten van de volumetrische berekeningen zijn gegeven in Tabel 5.



Figuur 28 – Afbakening van subzones voor detail volumeberekeningen op enkele secties met enkel helmaanplant (secties 2 en 17) en naburige secties met rijshouthagen (secties 3 en 16).

Achtergrond: verschil DEM (DoD) T0 (31/03/2021)-T9 (23/02/2022), periode 0.8 jaar.

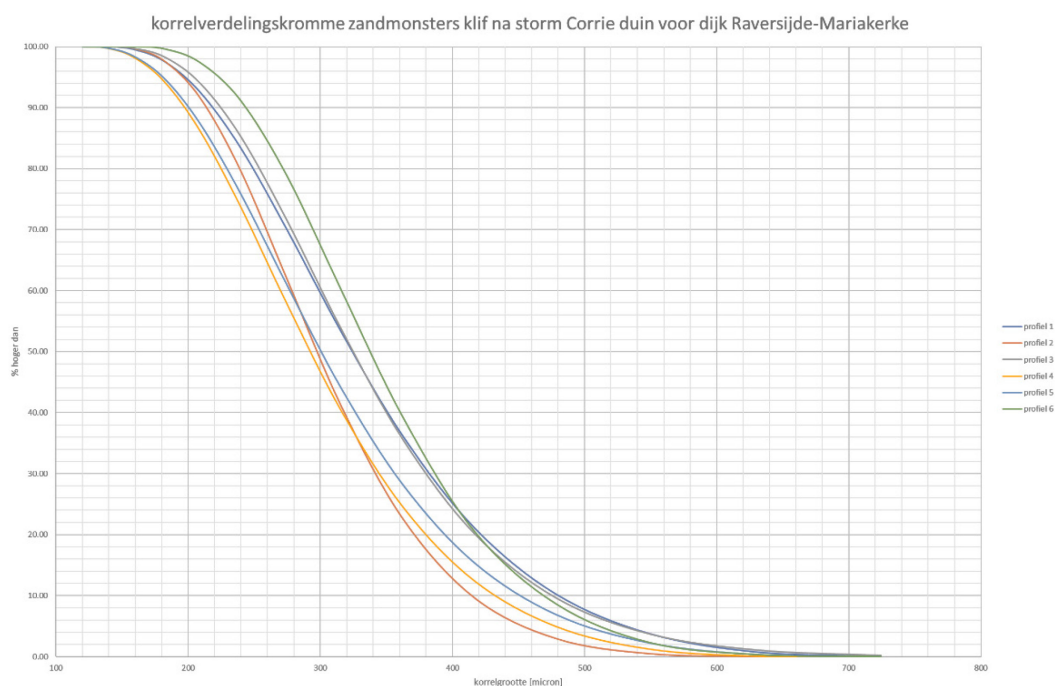
Tabel 5 – Sedimentbudget voor enkele subzones van de pilot Raversijde-Mariakerke.
Groen (aanwas), rood (erosie), grijs (stabiliteit).
In de secties 2 en 17 is enkel helmaanplant. In de secties 3 en 16 zijn er rijshouthagen.

Time	Diff Volume (m ³)							
	VegetatedS ection2	LandSec tion2	VegetatedS ection3	LandSec tion3	VegetatedS ection16	LandSect ion16	VegetatedS ection17	LandSect ion17
T0-T7	429	129	563	13	746	80	505	244
T7-T8 (pre-post Corrie)	-42	152	44	19	41	18	-86	118
T8-T9 (post Corrie- post Franklin)	109	13	273	64	126	-42	37	27
T0-T9	496	294	880	96	913	56	456	388
T0-T9 (m ³ /m/yr)	15	9	27	3	29	2	14	12

In de zone met enkel helmaanplant (secties 2 en 17) is de aangroei in de vakken 14 à 15 m³/m/jaar geweest, wat slechts ca. 50 % is van de aangroei in de vakken met rijshouthagen (secties 3 en 16) nl. 27 à 29 m³/m/jaar. Er is ook beduidend meer aanwas opgetreden landwaarts van de vakken met enkel helmaanplant, namelijk 9 à 12 m³/m/jaar, in vergelijking met de naburige vakken met rijshouthagen, namelijk 2 à 3 m³/m/jaar. Men kan stellen dat de rijshouthagen efficiënter zijn geweest als zandvang dan de helmaanplant.

4.2.3 Sortering

Op 3/2/2022 werden zandmonsters genomen van de klif die gevormd werd op het droog strand na storm Corrie. 1 monster werd genomen in elk profiel (die dezelfde dag opgemeten werden met RTK-GPS). Voor de in het totaal 6 monsters werden door middel van laserdiffractie korrelverdelingskrommen bepaald. De resultaten hiervan zijn gegeven in Figuur 13. De D50 varieert tussen 290 en 340 micron. Er is geen ruimtelijke trend waarneembaar. Deze gemeten D50 is wel beduidend fijner dan de korrelgrootte van het suppletiezand (D50 370 micron).



Figuur 29 – korrelverdelingskrommen zandmonsters (klif na storm Corrie)

Een tweede reeks zandmonsters werden genomen op 9/3/2022 in zes raaien verspreid over het studiegebied. In het labo werden hierop korrelverdelingen bepaald.

De locaties van de monsters en de resultaten van de korrelverdelingsproeven van deze campagne zijn weergegeven op Figuur 30, Tabel 6 en Figuur 31.

Location of sand samples



D10



D50



D90

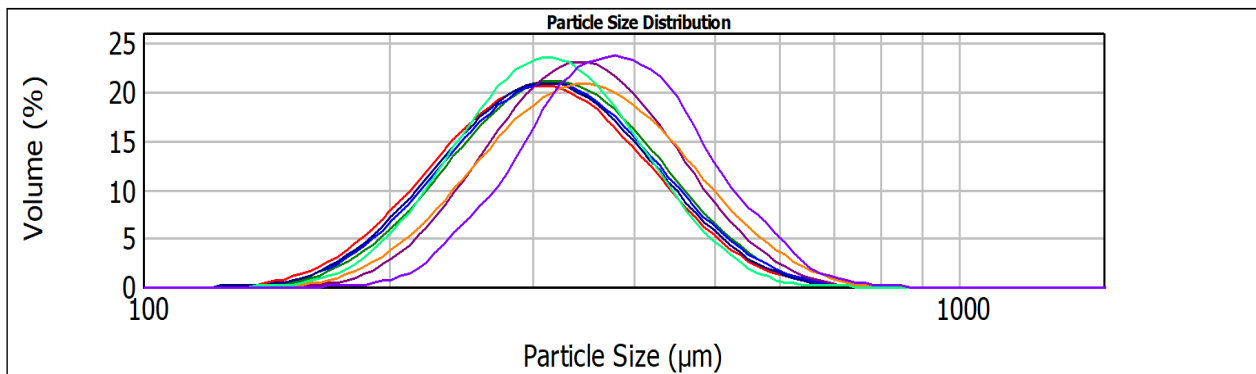


Figuur 30 – Locaties zandmonsters 9/3/2022 en resultaten korrelverdelingsproeven (D10, D50, D90)

Tabel 6 – Gemiddelde korrelgrootte-kenmerken D10, D50, D90 in het studiegebied (monsters genomen op 9/3/2022). NB de hoogte-informatie is gebaseerd op de drone-DEM T9 (23/02/2022).

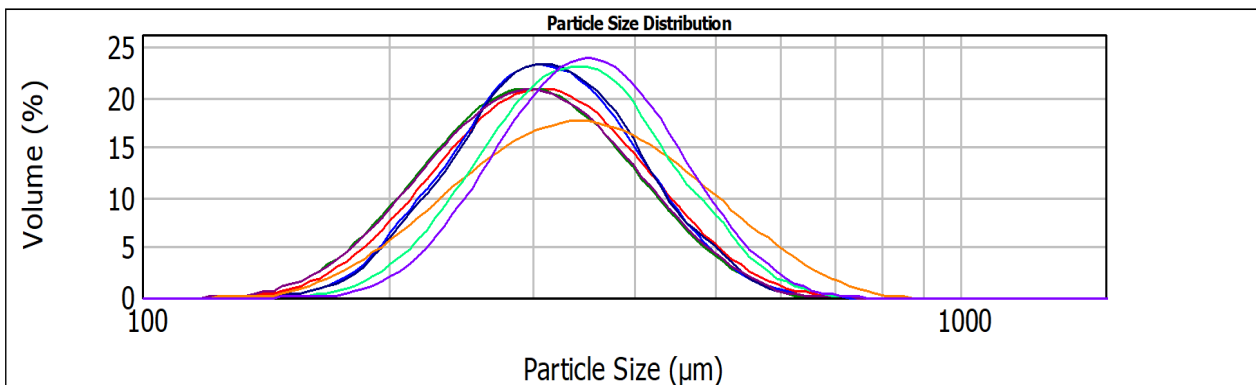
Locatie	D10 (micron)	D50 (micron)	D90 (micron)	Aantal monsters	Hoogte (m TAW) volgens drone- DEM T9 (23/2/22)
A	206	295	421	6	8.2-7
B	216	310	444	6	8.7-7
C	224	317	449	6	8.6-7.1
D	236	332	468	6	9
E	220	313	443	6	7.3-5.5
F	244	348	497	6	6-5.5
G	234	322	444	6	5-4.6
H	273	380	530	6	4.5-4
I	278	394	563	3	3.7-3.5
J	279	383	528	2	3.4-3.3

Reference line (west side)



6A - Average, 11 March 2022 15:42:41	6B - Average, 11 March 2022 14:47:05
6C - Average, 14 March 2022 10:48:58	6D - Average, 14 March 2022 12:05:04
6E - Average, 14 March 2022 14:03:55	6F - Average, 14 March 2022 15:07:20
6G - Average, 14 March 2022 15:58:51	6H - Average, 15 March 2022 11:21:34

Sample line 3



3A - Average, 11 March 2022 15:17:15	3B - Average, 11 March 2022 13:26:50
3C - Average, 14 March 2022 10:25:40	3D - Average, 14 March 2022 11:31:33
3E - Average, 14 March 2022 13:05:29	3F - Average, 14 March 2022 14:40:22
3G - Average, 14 March 2022 15:35:20	3H - Average, 15 March 2022 10:43:01

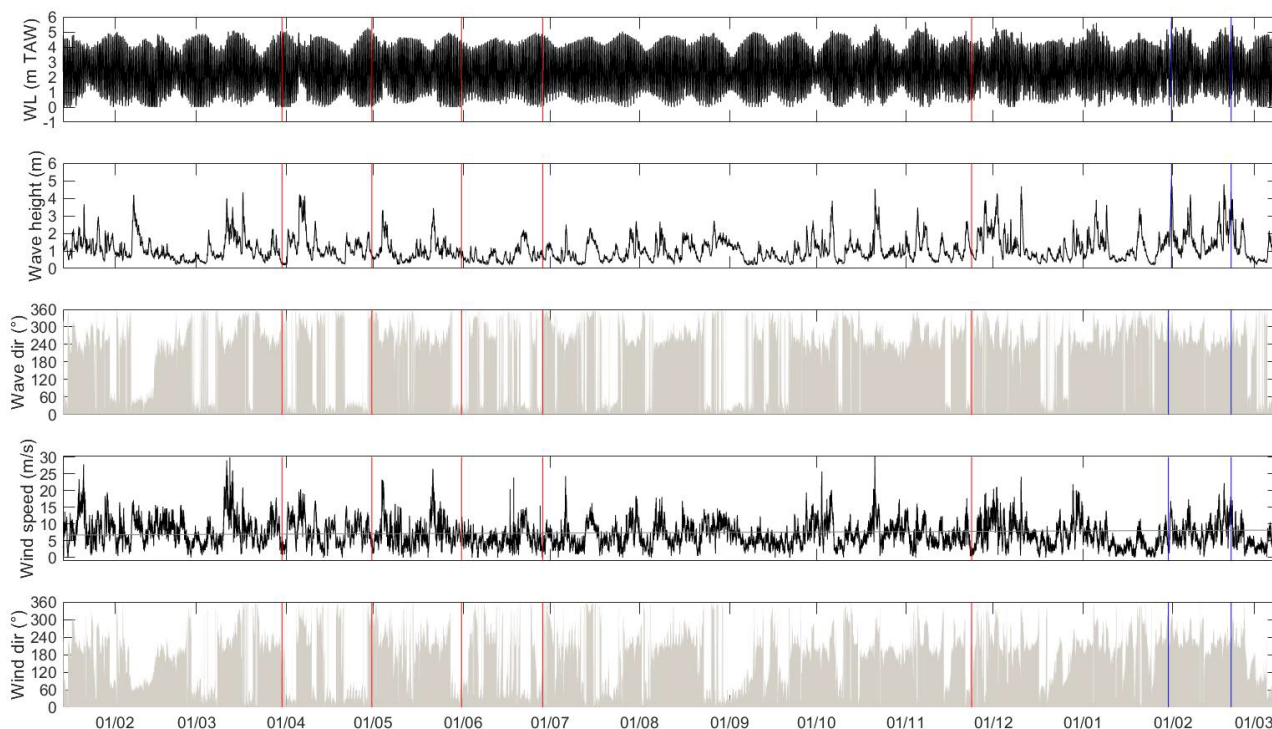
Figuur 31 – Variatie van korrelverdelingen in dwarsprofielen (monsters genomen op 9/3/2022).
 Boven: resultaten in profiel 6 (ten westen van de pilootzone). Onder: profiel 3 (in het midden van de pilootzone).

De resultaten van de campagne van 9/3/2022 tonen duidelijk aan dat er een afname is van de korrelgrootte naarmate de monsters hoger in het profiel genomen zijn. De gemiddelde korrelgrootte (D50) in de zone tegen de dijk aan (locaties A) is ca. 300 µm, in de vakken (locaties C, D) is het ca. 325 µm, aan de landwaartse kant van het droog strand (locaties F) is het rond 350 µm, en op het nat strand (locaties J) is het rond 380 µm.

4.3 Westende

4.3.1 Meteo-mariene condities tijdens de monitoring

5 dronevluchten werden uitgevoerd in de periode 30/3/2021-23/11/2022 (0.65 jaar). De laatste maanden werden de aanvragen voor het uitvoeren van dronevluchten telkens geweigerd door de militaire overheid (wegens nabijheid militair domein Lombardsijde ~ schietoefeningen).



Figuur 32 – Tijdreeks van het waterpeil in Oostende, golfhoogte 10% en richting in Oostende Poortjes (gelegen op 7 km van de kust), windsnelheid en -richting van weerstation Zeebrugge.

Verticale rode en blauwe lijnen corresponderen respectievelijk met de drone surveys in Westende en het optreden van storm. Horizontale grijze lijn op de windsnelheid tijdreeks is de kritische windsnelheid voor eolisch zandtransport (7 m/s).

4.3.2 Morfologische veranderingen

Evolutie gedurende 1 jaar

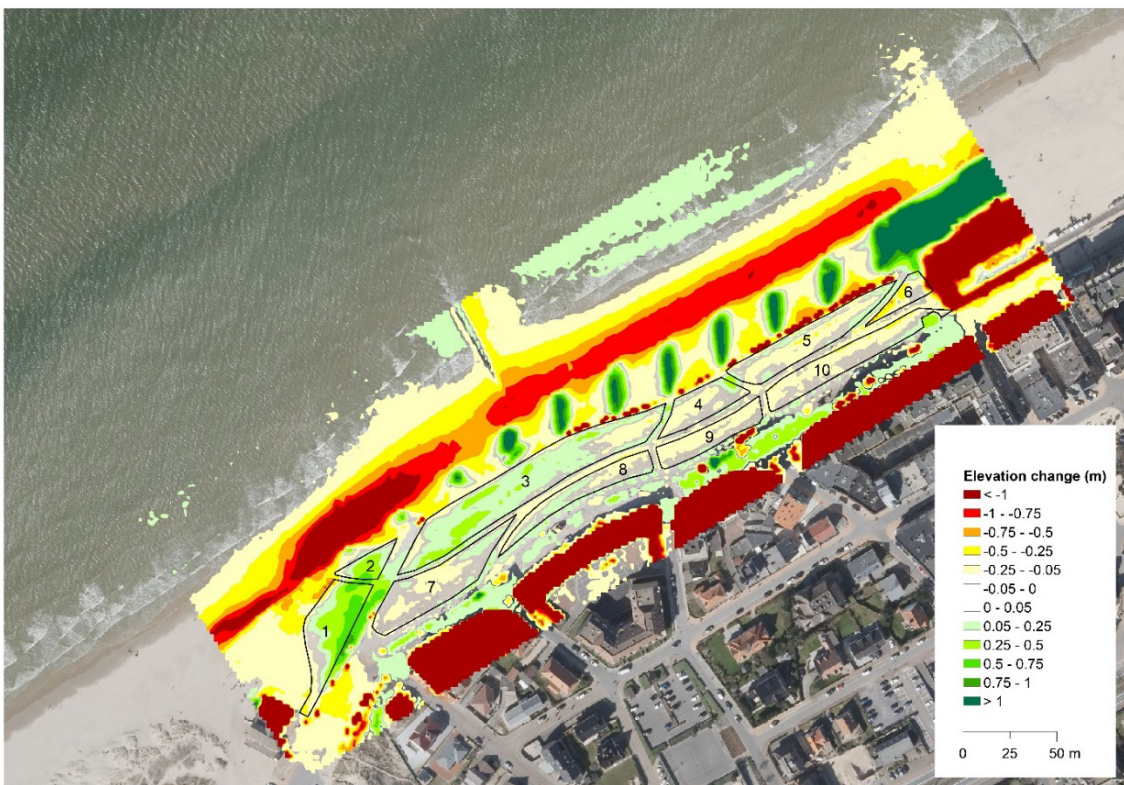
Op het verschil DEM T0-T4 (0.65 jaar) (Figuur 33) is aangroei merkbaar in de begroeide vakken, voornamelijk in de meest westwaartse vakken (nrs. 1, 2, 3). Ook is een netto aangroei merkbaar rond de windschermen. Ook op deze site is het zo dat de aangroei in het hogere deel van het droog strand gepaard gaat met een erosie op het lagere deel van het droog strand.

Nog een randbemerking over de aangroei rond de windschermen. Als men de opeenvolgende maandelijkse opnames bekijkt, ziet men een alternerend sedimentatie/erosie-patroon aan weerszijden van de windschermen. Bijvoorbeeld, op de verschilkaarten T0-T1 en T2-T3 (niet getoond) ziet men aangroei aan de westkant van de windschermen en erosie aan de oostkant. Het omgekeerde patroon ziet men op de verschilkaarten T1-T2 en T3-T4 (niet getoond). Dit is te verklaren door een verschil in windregime tijdens de verschillende deelperiodes (T0-T1 en T2-T3 waren periodes met dominante wind uit het noordoosten, terwijl T1-T2 en T3-T4 periodes waren met dominante wind uit het zuidwesten). Het netto resultaat is zoals eerder gesteld te zien op Figuur 33.

A)

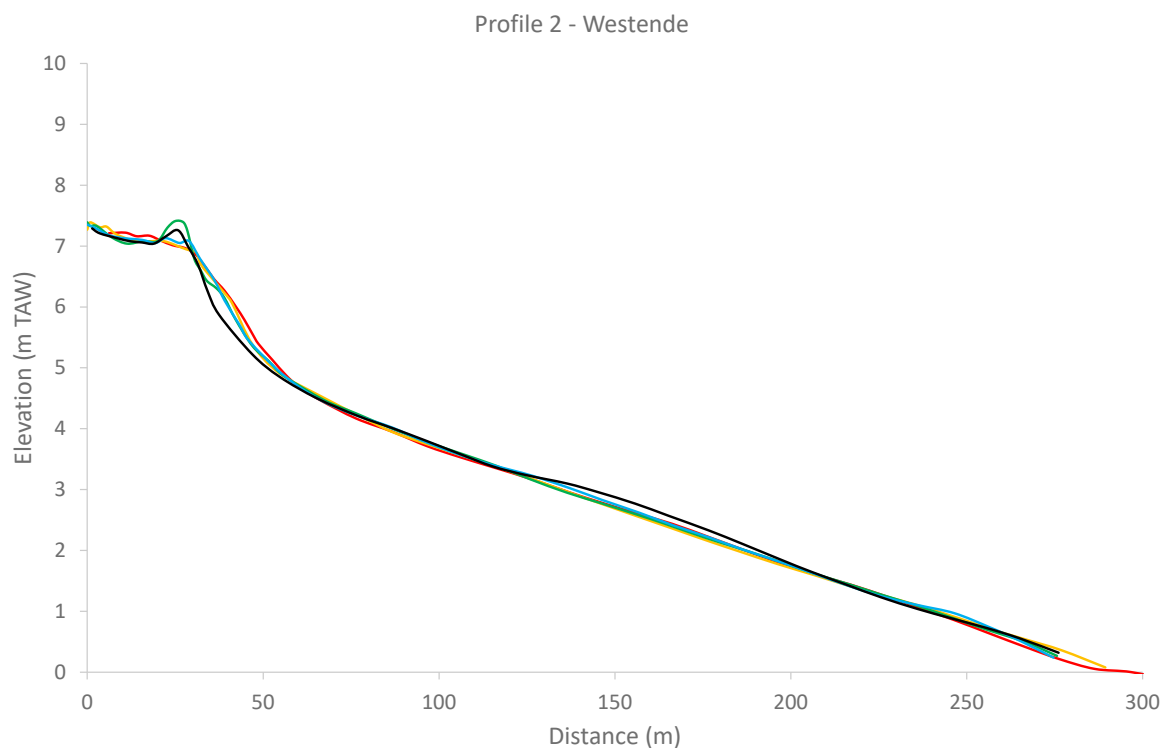
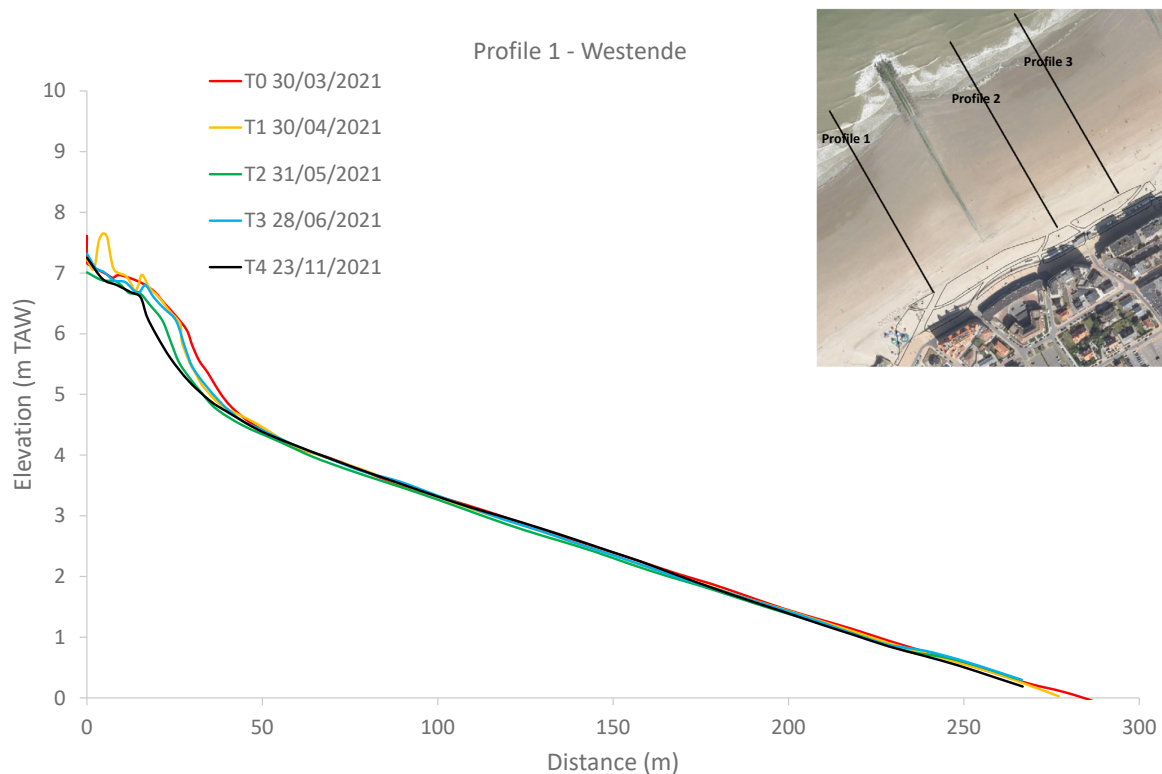


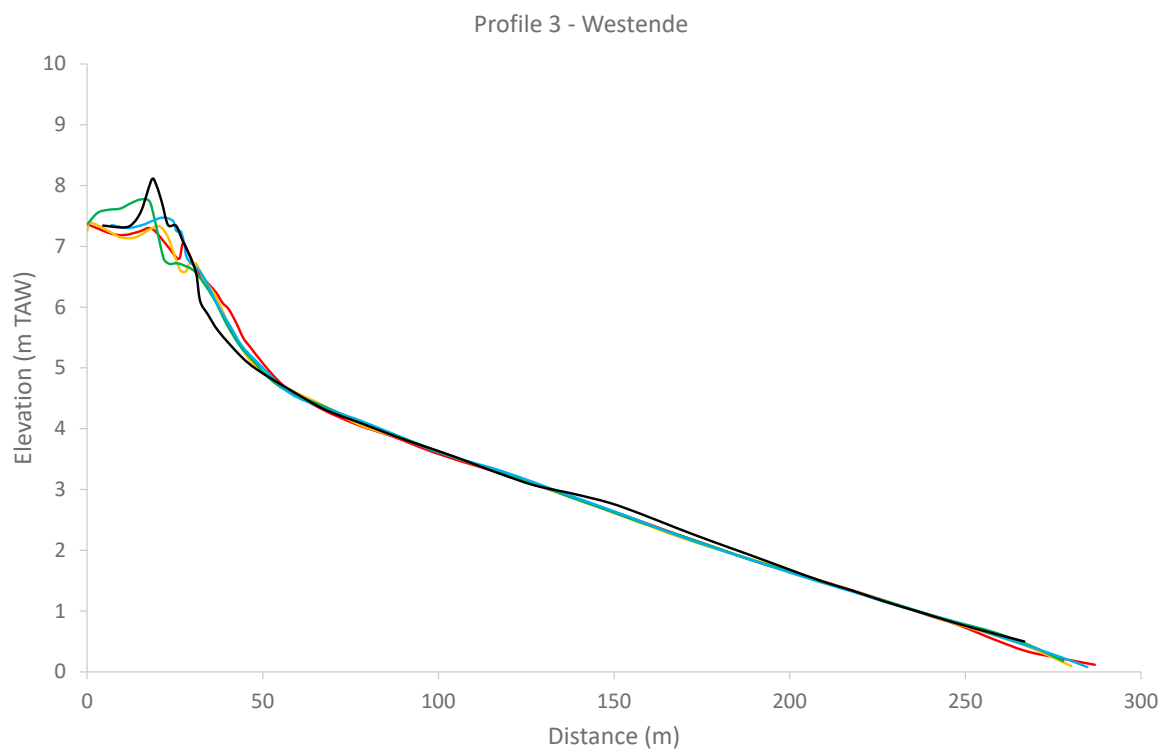
B)



Figuur 33 – A) Verschil DEM (DoD) T0 (30/03/2021)-T4 (23/11/2021), periode 0.65 jaar, B) T0 (30/03/2021)-LiDAR (23/02/2022), periode 0.9 jaar. NB aan de oostkant zijn de verschillen op het strand ten gevolge van de daar uitgevoerde zandwerken. NBbis De verschillen op de zeedijk zijn niet betrouwbaar

De profielmetingen die gelijktijdig met de drone-opnames uitgevoerd zijn, zijn getoond op Figuur 34. Telkens zijn 3 profielen opgemeten in de pilootzone, vanaf de rand van de helmaanplant richting zeewaarts. Men ziet de eerder genoemde erosie aan de zeewaartse zijde van het droog strand. Men ziet ook dat de wijzigingen op het intertidaal strand klein zijn.



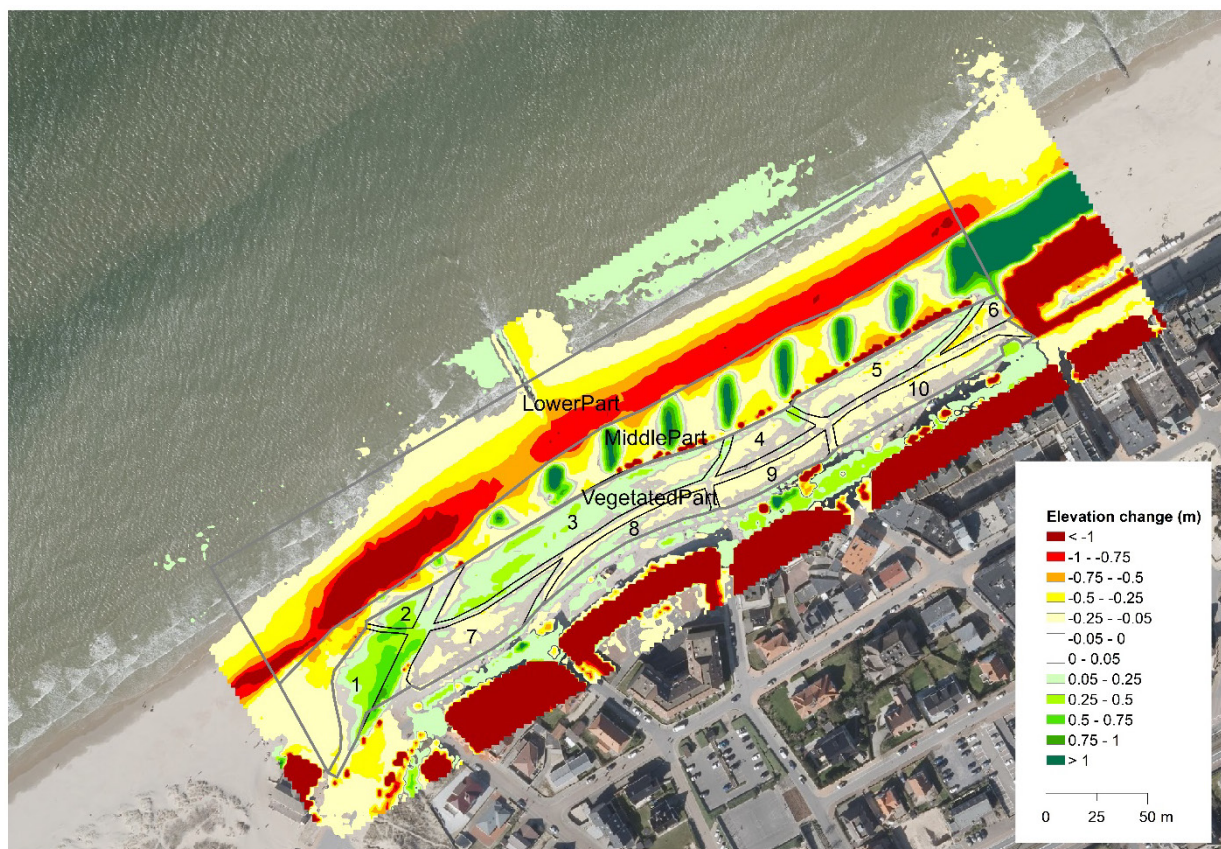


Figuur 34 – Dwarsprofielen gemeten met het GPS-systeem. Inzet: ligging van de profielen.
Men merkt op deze profielen de aangroei rond de windschermen (als “bultjes” in het profiel).

4.3.3 Volumetrische veranderingen

Voor de volumetrische berekeningen is het studiegebied opgedeeld in een aantal zones gebaseerd op het grootschalige erosie/sedimentatie patroon (Figuur 35). De volumetrische evolutie in deze zones is berekend gebruik makend van de drone-DEM's en de resultaten zijn gegeven in Tabel 7.

De zone met de helmaanplant heeft gemiddeld gezien een aangroei gekend van $1 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$. Een netto stabiel zandvolume is te noteren voor de middelste zone met de windschermen ($-1 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$). De zone zeewaarts ervan verloor zand, tegen een gemiddeld ritme van $-20 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$.



Figuur 35 – Afbakening van de deelzones gebruikt bij de kuberingen in Westende.

Tabel 7 – Sedimentbudget voor de pilot Westende. Groen (aanwas), rood (erosie), grijs (stabiliteit).

Time	Diff Volume (m^3)		
	VegetatedPart	MiddlePart	LowerPart
T0-T1	159	494	-925
T1-T4	890	96	-2161
T0-LiDAR 02/2022	480	-618	-8196
T0- LiDAR 02/2022 ($\text{m}^3/\text{m}/\text{yr}$)	1	-1	-20

5 Discussie

5.1 Korte termijn ontwikkeling

In de drie pilootzones is er een gelijkaardig erosie-sedimentatiepatroon zichtbaar op het droog strand in het eerste jaar na aanleg, namelijk aanwas door eolisch transport in het hoogste deel van het profiel en erosie zeewaarts ervan. De grenslijn tussen beide zones wordt ondermeer beïnvloed door de aanwezigheid van structuren die eolisch zand kunnen capteren, zij het helmgras, rijshouthagen of windschermen. Dit wijst op een proces van herverdeling loodrecht op de kust (dwarstransport).

Een tweede proces van herverdeling in het profiel is afslag tijdens stormen. De stormen Corrie en Franklin hebben erosie veroorzaakt aan de zeewaartse zijde van het droog strand en op het intertidaal. Dit materiaal is afgezet nabij en onder de laagwaterlijn.

Het gecombineerd effect van de twee hoger genoemde processen verklaart dat de volumes in de erosiezones in de omgeving van de hoogwaterlijn groter is dan de volumes van de aanwas op het hoogste deel van het profiel. Wegens het niet beschikbaar zijn van gebiedsdekkende opnames van het intertidaal strand zijn geen volumes berekend kunnen worden in het laagste deel van het profiel.

De aanwassnelheden in de drie pilootzones verschillen sterk van elkaar. In de zone Spinoladijk is de aanwas in het totaal gemiddeld 17 m³/m/jaar; in de zone Raversijde-Mariakerke bedraagt deze 33 m³/m/jaar; en in de zone Westende is er nauwelijks sprake van een significante aangroei. Voor de zone Spinoladijk dient ook herhaald te worden dat ten gevolge van het uitvoeren van graafwerken op het droog strand tegen de dijk de gegeven waarde een onderschatting is van de natuurlijke aanwas die zou zijn opgetreden zonder deze werken. De hoge waarde voor Raversijde-Mariakerke is mogelijks gelinkt aan een hoge beschikbaarheid aan zand ten gevolge van de suppletie (incl. profilering met een plateau) die net voor de monitoring uitgevoerd is.

5.2 Lange termijn ontwikkeling

Een jarenlang doorgaande duingroei is enkel mogelijk mits beschikbaarheid van zand. Maar wat kunnen we zeggen over de beschikbaarheid van zand in elk van de 3 pilootzones?

Op de schaal van de actieve zone tussen de voet van de vooroever en de zeedijk, zijn de actuele gecorrigeerde volumetrische trends negatief (Houthuys et al, 2022), behalve voor het gedeelte onder laagwater voor de locatie Spinoladijk maar daarin zit een grote invloed van de baggerwerken in de vaargeul naar Oostende. Omdat de locatie Spinoladijk zich aan de noordoostkant van de voorhaven bevindt, waar het natuurlijk netto langstransport terug oppikt na volledig geblokkeerd te zijn geweest door de voorhaven, kan men ervan uitgaan dat er in deze zone een natuurlijke erosieve trend bestaat. Voor de locatie Spinoladijk is er dus een netto verlies aan zand in de actieve zone ten gevolge van de gradiënt in het langstransport plausibel. Voor de twee andere locaties kunnen de erosieve trends wellicht (deels) gerelateerd worden aan de in deze zones uitgevoerde stranduitbreidingswerken door zandsuppleties. Deze werden er uitgevoerd in het kader van het realiseren van een 1000-jarig beschermingsniveau in het kader van het Masterplan Kustveiligheid.

Op de lange termijn is er dus een verlies aan zand te verwachten in elk van de 3 locaties. Dit zou op de lange termijn kunnen betekenen dat de duingroei zou kunnen stoppen en misschien zelfs omslaan in afslag. Echter, zeker is het niet want afhankelijk van de lokale omstandigheden kan een actuele trend van kustlijnachteruitgang ook geleidelijk verminderen in de tijd en mogelijks een evenwichtstoestand bereiken. Hier kan een onderscheid worden gemaakt tussen enerzijds de locatie Spinoladijk en anderzijds de locaties Westende en Raversijde-Mariakerke.

- Zoals hoger aangegeven is de kustlijnachteruitgang op de locatie Spinoladijk gelinkt aan de blokkering van het netto langstransport door de voorhaven. Deze configuratie wordt weinig beïnvloed door een beperkte landwaartse of zeewaartse verschuiving van de kustlijn. Het is en blijft structureel aanwezig. Op de lange termijn is de verwachting dat de duingroei zal stoppen wegens verlies aan zand door het oppikken van het netto langstransport “afwaarts” van de voorhaven van Oostende.
- Voor de locaties Westende en Raversijde-Mariakerke is de situatie complexer. We verwachten dat de natuurlijke evolutie van kustlijnachteruitgang er langzaam zou kunnen afnemen in de tijd, naarmate de progradatie die gerealiseerd werd door de suppletiewerken ikv Masterplan Kustveiligheid langzaam reduceert. Immers, kustlijnerosie ten gevolge van gradiënten in langstransport reduceert naarmate zand van een suppletie naar de naburige kustgebieden verplaatst is. Dit alles in de veronderstelling dat er geen externe zandaanvoer zou gebeuren, hetgeen enkel kan als de kustveiligheid tegen een 1000-jarige storm door andere maatregelen zou op peil gehouden worden.

Zelfs in een context van kustlijnachteruitgang kan duingroei blijven doorgaan. Dat is wat er in het afgelopen jaar ook is waargenomen op de 3 locaties. De verklaring hiervan is de aanwezigheid van een buffer op het droog strand. Ten gevolge van strandsuppleties die uitgevoerd zijn op deze 3 locaties is er zeewaarts van de duin voor dijk pilots een brede droog strand zone aanwezig. Dit is de bron van zand die momenteel voor duingroei zorgt, ook al is er een achtergronderosie in het hele actieve profiel. Het gaat met andere woorden over herverdeling van zand in het profiel.

6 Conclusies

Op de twee pilots in Oostende, te Spinoladijk enerzijds en te Raversijde-Mariakerke anderzijds, is stuivend zand (eolisch transport) gesedimenteerd op locaties waar ten gevolge van de aanwezigheid van de rijshouthagen of het helm de zandtransportcapaciteit van de wind lager is. De dikte van de aanwas is gerelateerd aan de hoogte van de obstakels. Bij de rijshouthagen die bij aanleg ca. 1.5 m boven het maaiveld uitkwamen wordt een aanwas tot 1.5 m waargenomen. Bij de velden met enkel helm, met een vegetatiehoogte van ca. 0.5 m, is de aanwas in dikte beperkt tot ca. 0.5 m. Het helm capteerde slechts een deel (~50 %) van de eolische aanvoer, terwijl het rijshout quasi 100% capteerde (~90%). Er dient wel benadrukt te worden dat dit gemiddelde waarden zijn die op de pilots geobserveerd zijn gedurende het 1^e monitoringjaar. Detailanalyse dient uitgevoerd te worden om de temporele en spatiale variatie van de captatie-efficiëntie verder uit te klaren. Stuivend zand sedimenteert op locaties waar ten gevolge van de aanwezigheid van de rijshouthagen en/of het helm de zandtransportcapaciteit van de wind lager is. De captatie-efficiëntie is gerelateerd aan de geometrie van de obstakels (hoogte en dichtheid) en de ruimere omgeving voor zover deze bepalend zijn voor het lokale windprofiel.

Op de pilot te Westende is veel minder aanwas opgetreden. Aanwas is merkbaar in de meest zuidwestelijke deelzone. In de rest van deze pilot is minder aanwas opgetreden omdat het eolisch zand gecapteerd werd door de windschermen die zich zeewaarts van de duinpilot bevinden.

Op de drie locaties is er in het eerste jaar netto aanwas opgetreden van het hoogste deel van het profiel. De groei door eolische aanwas was dus sterker dan het verlies door afslag door de enkele stormtijden die zijn opgetreden (waarvan stormvloed Corrie het meest erosief was). Deze observatie is in lijn met wat in de afgelopen decennia vastgesteld wordt als morfologische trend voor (quasi) heel de Belgische kust, namelijk dat het zandvolume in de “duinvoet” (in deze studies per definitie de zone hoger dan +6.89 m TAW) gestaag toeneemt. Dit kan verklaard worden door een grote beschikbaarheid van zand in het actieve profiel, en dan vooral in het deel van het profiel boven de laagwaterlijn. Men stelt voor de betrokken kuststroken “Westende-Bad”, “Raversijde-Oost” en “Oostende-Oost” op schaal van decennia een toename vast van het zandvolume in de zone boven laagwater (Houthuys et al, 2022). Dit is een gevolg van het gevoerde beleid van kustlijnhandhaving en verhoging van het beschermingsniveau tegen superstormen door uitvoering van zachte maatregelen die aanvoer van extern gewonnen zand inhielden in alle drie deze kuststroken. Gegeven een grote beschikbaarheid van zand in het actieve profiel, dan zorgen de natuurlijke eolische processen ervoor dat een belangrijk deel ervan terecht komt in het hoogste deel van het profiel.

De verdere langjarige evolutie van de duinvolumes op deze drie locaties zal bepaald worden door de zandbalans op een grotere schaal dan die van de pilots zelf. Op een schaal van jaren dient rekening gehouden te worden met een actieve zone die zeewaarts reikt tot aan de voet van de vooroever. Op een schaal van decennia dient ook rekening gehouden te worden met de interactie tussen vooroever en kustnabije zeebodem. Voor de eerstvolgende jaren is er dankzij de aanwezigheid van een buffervolume op het droog strand een bron van zand die voor doorgaande duingroei kan zorgen. Op de langere termijn echter, eens deze buffer opgebruikt zal zijn, wordt verwacht dat de duingroei zal stoppen. De reden hiervoor is een trend van kustlijnachteruitgang door langzaam zandverlies in de actieve zone die aanwezig is in elk van de 3 locaties (tussen de vooroevervoet en de zeedijk). Vanzelfsprekend kan externe zandaanvoer door suppletiewerken ervoor zorgen dat duingroei ook op de langere termijn doorgaat.

7 Aanbevelingen

Te Raversijde-Mariakerke heeft de duin voor dijk pilot geleid tot minder hinder door eolisch aangevoerd zand op de zeedijk/tramlijn/kustbaan. Al het aangevoerde zand werd gecapteerd door de geplaatste rijshouthagen, en plaatselijk ook het aangeplante helm. Echter, na 1 jaar werking is de accommodatieruimte grotendeels opgebruikt. Het wordt aanbevolen om in deze zone opnieuw helm aan te planten. Op deze manier zou het eolisch zand opnieuw gevangen worden en voor duingroei zorgen. Het plaatsen van rijshouthagen is ook effectief maar minder duurzaam. Het helm kan immers meegroeien met de groei van de duin; rijshouthagen niet. Om de impact op de zandoverlast op de dijk de site Raversijde-Mariakerke cijfermatig te kunnen begroten wordt het aanbevolen om de stad Oostende te vragen om hierover gegevens bij te houden. Bedoeld wordt gegevens over de uitgevoerde zandwerken (graven geul langs de dijk; opruimen zand van op de dijk/weg/tramlijn; nivelleren van de droog strand berm tot een plateau...).

Het zou waardevol zijn om de duin voor dijk pilot uit te breiden naar Raversijde-Bad. Enerzijds zou dit de eolische zandoverlast in de badplaats reduceren, anderzijds zou dit een integraal onderzoeksproject faciliteren over duin voor dijk voor kustbescherming in een badplaatsomgeving. Het integraal onderzoeksproject zou niet enkel de invalshoeken vanuit kustbescherming, morfodynamiek en ecologie bekijken maar ook en vooral de socio-economische invalshoek met als cruciale elementen het verzoenen van de toeristisch-recreatieve exploitatie van het strand met de aanwezigheid van een duin voor dijk.

Om de morfologische veranderingen nog beter te kunnen opvolgen wordt het aanbevolen om in plaats van de profielen te nemen op het nat strand gebiedsdekkende opnames te realiseren tot tegen de laagwaterlijn. Dit kan hetzij door uitbreiding van de dronevluchten hetzij door de inzet van mobiele laserscanning vanop een voertuig. Het wordt aanbevolen om deze methodes te testen naar nauwkeurigheid, logistieke haalbaarheid en praktische mogelijkheden gelet op apparatuur die al dan niet beschikbaar is of aangekocht kan worden voor gebruik door Xperta (afdeling ATO).

Een validatie van de methodiek om afslag te modelleren met behulp van XBeach is mogelijk gebruik makend van de data die verzameld zijn op de pilot te Raversijde-Mariakerke vóór en na storm Corrie.

Om de langetermijnevolutie van duin voor dijk pilots kwantitatief te kunnen beschrijven, wordt het aanbevolen om morfologische modellen te ontwikkelen die zowel de cross-shore interactie tussen strandzone en duinzone kunnen beschrijven als de longshore-interactie tussen naburige strandsecties. In het kader van het TKI ShorelineS project (2022-2024) zal een dergelijk model ontwikkeld worden. Dit zal resulteren in een uitbreiding van de scope van wat er klassiek met kustlijnmodellen gesimuleerd kan worden.

Op de locatie Spinoladijk wordt de analyse van de morfologische veranderingen bemoeilijkt door het gebrek aan gegevens over de door de stad Oostende uitgevoerde zandwerken (graven van geul langs de dijk, opruimen van zand op de Spinoladijk, terugvoeren van dit zand verder op het strand). Het wordt aanbevolen om de stad Oostende te vragen om hierover gegevens bij te houden.

Op de locatie Westende is het praktisch niet haalbaar om maandelijkse dronemetingen uit te voeren, omdat toelatingen systematisch geweigerd worden door de militaire overheid. Het wordt aanbevolen om de pilotzone in Westende te wijzigen naar de oostelijke grasdijk zone (in plaats van de westelijke grasdijk zone), van zodra de oostelijke grasdijk zone aangelegd zal zijn, want op die manier is er voldoende afstand tot het militair domein Lombardsijde zodat toelatingen verkrijgen haalbaar wordt.

Referenties

Houthuys, R.; Verwaest, T.; Dan, S. (2022). Morfologische trends aan de Belgische Kust: Evolutie van de Vlaamse kust tot 2019. Versie 3.0. WL Rapporten, 18_142_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Jan De Nul (2021), uitvoeringsplannen en monitoringgegevens van de suppletiewerken te Raversijde-Mariakerke in januari-februari 2021, in opdracht van MDK afdeling Kust.

Strypsteen, G.; Dan, S.; Verwaest, T.; Roest, B.; De Wulf, A.; Bonte, D.; Rauwoens, P. Long-term dune foot morphodynamics in a developed macro-tidal environment (*in preparation*).

Verwaest, Toon (WL), Van De Walle, Ruben (UGent) (2020). testvlucht duinmonitoring adhv drone-foto's. Versie 1.0. WL Memo's, 19_049. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Verwaest, Toon (WL) (2021). pilot Oosteroever – analyse eerste resultaten. Versie 1.0. WL Memo's, 21_014. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Verwaest, Toon (WL) (2021bis). duin voor dijk pilot Raversijde-Mariakerke – analyse eerste resultaten. Versie 1.0. WL Memo's, 21_014. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be