RAPPORT

Windpark Maasvlakte 2

Beoordeling waterveiligheid Zachte Zeewering

Klant: Eneco Wind B.V.

Referentie: BG8375-RHD-ZZ-XX-RP-G-0007

Status: Definitief/P4.0

Datum: 25 augustus 2020

Eneco

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together

HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Laan 1914 no.35
3818 EX AMERSFOORT
Water
Trade register number: 56515154

+31 88 348 20 00 **T**
+31 33 463 36 52 **F**
info@rhdhv.com **E**
royalhaskoningdhv.com **W**

Titel document: Windpark Maasvlakte 2

Ondertitel: Waterveiligheid ZZ
Referentie: BG8375-RHD-ZZ-XX-RP-G-0007
Status: P4.0/Definitief
Datum: 25 augustus 2020
Projectnaam: Windpark Maasvlakte-2
Projectnummer: BG8375
Auteur(s): [redacted]

Opgesteld door: [redacted]

Gecontroleerd door: [redacted]

Datum/paraaf: 15 juli 2020

Goedgekeurd door:

Datum/paraaf:

Classificatie
Projectgerelateerd

Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden verveelvoudigd of openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. HaskoningDHV Nederland B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever.

Inhoud

1	**Inleiding en uitgangspunten**	**1**
1.1	Achtergrond	1
1.2	Aanpak onderzoek	2
1.3	Uitgangspunten en eisen: Risicobeheersplan en verificatiematrix	2
2	**Systeemanalyse**	**5**
2.1	Algemeen	5
2.2	Data	5
2.3	Onderhoudsstrategie MV-2	7
2.4	Grootschalige dynamiek van MV-2	10
2.5	Natuurlijke variatie van het kustprofiel over de jaren	14
2.6	Variatie van het kustprofiel ter hoogte van de windturbines	19
2.7	Seizoendynamiek van de bodemverandering	21
2.8	Samenvatting systeemanalyse	23
3	**Effecten op veiligheid zeewering**	**25**
3.1	Effecten harde elementen op zachte zeewering – algemene beschouwing	25
3.2	Zachte zeewering	26
3.3	Controle aanwezigheid extra volume zand in schillen	28
3.4	Overgangszone harde – zachte zeewering	32
3.5	Bouwen tijdens stormseizoen	37
3.5.1	Duinovergangen	39
3.5.2	Kraanopstelplaatsen	42
3.5.3	Kabelboringinstallatie	46
3.5.4	Bouwwegen	47
3.5.5	Los materieel	47
4	**Analyse minimum bodemligging**	**49**
5	**Lokale ontgrondingen**	**56**
6	**Beheer en Onderhoud**	**62**
6.1	Suppletiestrategie	62
6.2	Beheer en Onderhoud door Eneco	63
6.2.1	Dagelijkse inspectie	63
6.2.2	Inspectie eind stormseizoen	63
6.2.3	Strandsuppleties	63
6.2.4	Onderhoud duinovergangen	63
6.3	Voorstel aanpassing methodiek keuringen	64

6.3.1 Zachte Zeewering 64
6.3.2 Overgangszone 65

7 Effecten op veiligheid strandbezoekers 66

8 Dekking kabels en leidingen 67

9 Bibliografie 69

Bijlagen

A1 Samengestelde bodemontwikkeling bij windturbines

1 Inleiding en uitgangspunten

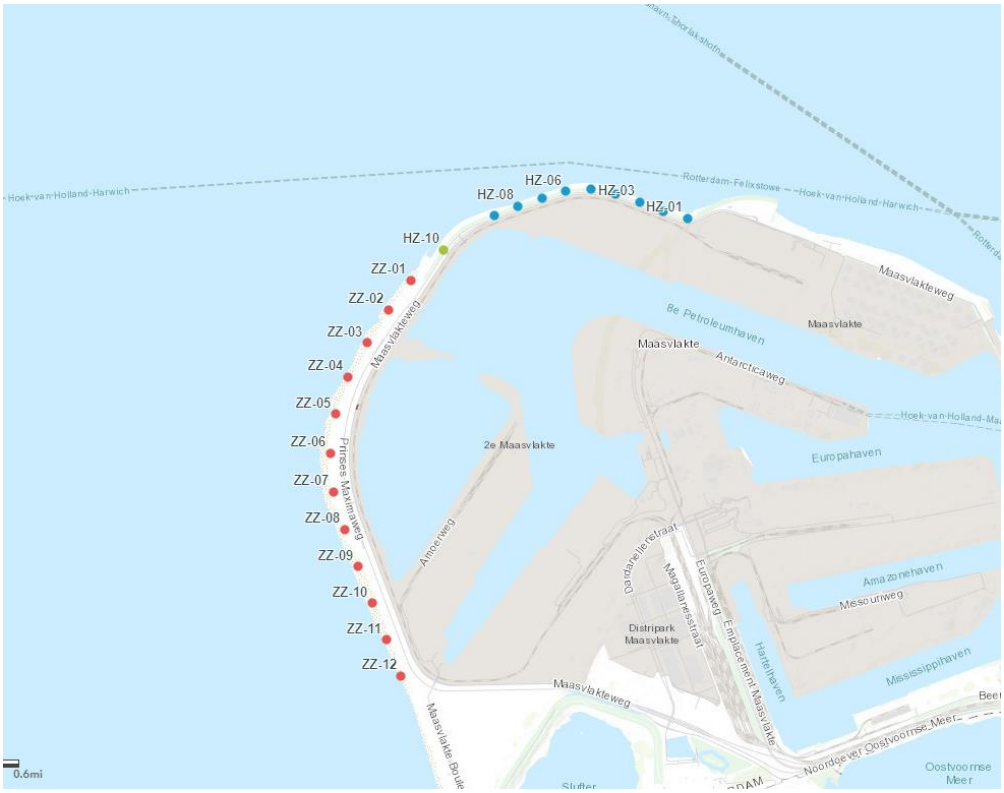
1.1 Achtergrond

Rijkswaterstaat is voornemens een onshore windpark op de Maasvlakte-2 (MV-2) aan te leggen. Eneco heeft in februari 2020 concessie gekregen om dit windpark met een vermogen van ruim 100 MW te bouwen. De concessie geldt voor een periode van 25 jaar vanaf start bouw in 2023. Voorafgaand aan de bouw dienen verschillende vergunningen te worden verkregen, waaronder een Waterwetvergunning en Omgevingsvergunning.

Een deel van de windturbines komt op de zachte zeewering te staan (windturbines ZZ-01 t/m ZZ-12, zie Figuur 1-1). De aanwezigheid van deze windturbines op het strand kan mogelijk negatieve effecten hebben op de waterveiligheid van de zachte zeewering en op het Beheer en Onderhoud van MV-2. Deze effecten zijn onderzocht en beschreven in dit rapport.

Specifieke aandacht is gegeven aan de volgende aspecten:

- Effecten op de veiligheid van de zachte zeewering;
- Effecten op het Beheer en Onderhoud van MV-2;
- Effecten op de veiligheid van strandbezoekers;
- Dekking van kabels en leidingen.



Figuur 1-1. Overzicht van windturbines windpark Maasvlakte-2 (ZZxx - windturbines op de Zachte Zeewering, HZxx – windturbines op de Harde Zeewering).

1.2 Aanpak onderzoek

Het onderzoek bestaat uit een aantal stappen:

- Systeemanalyse van de morfologische ontwikkeling van MV-2. Deze analyse geeft inzicht in het natuurlijk gedrag van het zandlichaam waarop de windturbines worden geplaatst en de invloed van onderhoudssuppleties op dat gedrag. Het schept kader en randvoorwaarden voor de vervolganalyses.
- Analyse waterveiligheid Zachte Zeewering. Met modelberekeningen is door Svasek Hydraulics de duinafslag tijdens een ontwerpstorm met een frequentie van 1/10.000 per jaar en de effecten van de windturbines op deze afslag bepaald. De modelresultaten zijn vertaald naar de veiligheid tegen overstromen.
- Analyse waterveiligheid Overgangszone tussen de Harde en Zachte Zeewering. De veiligheid van deze zone is beoordeeld op basis van een conceptuele beschouwing aangevuld met modelberekeningen van Svasek Hydraulics.
- Analyse waterveiligheid met betrekking tot duinovergangen en tijdelijke constructies die ten behoeve van de bouw van de windturbines op het strand worden neergezet. Dit is gedaan aan de hand van een conceptuele beschouwing aangevuld met modelberekeningen van Svasek Hydraulics.
- Analyse minimum bodemligging. Op basis van de gegarandeerde minimum zandvolumes in het strand en duin is de laagst mogelijke bodemligging bij de windturbine locaties bepaald.
- Analyse lokale ontgrondingen bij windturbines. Deltares heeft modelberekeningen uitgevoerd waarmee de ontgrondingen die ontstaan door de interactie van de windturbines met golven, getijden en wind zijn bepaald.
- Invloed op Beheer en Onderhoud van MV-2. Op basis van de resultaten van de afslagberekeningen is een inschatting gemaakt van de impact van het windmolenpark op het suppletieprogramma van Rijkswaterstaat
- Veiligheid van recreanten. Resultaten van het onderzoek zijn vertaald naar de mogelijk onveilige situaties voor de strandbezoekers, en mitigerende maatregelen zijn geformuleerd.
- Dekking Kabels en Leidingen. Op basis van de analyses zijn mitigerende maatregelen gedefinieerd die moeten voorkomen dat de kabels van de windturbines naar het inkoopstation door ontgrondingen bloot komen te liggen.

1.3 Uitgangspunten en eisen: Risicobeheersplan en verificatiematrix

In het risicobeheersplan en de verificatiematrix voor het windpark MV-2 zijn eisen opgenomen ten aanzien van de veiligheid van de zachte zeewering. Deze eisen zijn overgenomen in Tabel 1-1 waarbij is aangegeven in welk hoofdstuk van dit rapport de desbetreffende eis wordt behandeld.

Tabel 1-1. Uitsnede verificatiematrix

Eis nr.	Eis	Toelichting eis	Hoofdstuk
Zachte zeewering			
16. Aanpak weringveiligheid Windpark Maasvlakte 2	Eis veiligheidsniveau zeewering	Aangetoond dient te worden dat –de wijze van- het plaatsen, exploiteren en ontmantelen van het windpark het minimale veiligheidsniveau van de zeewering niet vermindert.	3

		Toelichting: Onder de veiligheidsnorm wordt verstaan de gemiddelde overschrijdingskans van de hoogste waterstand, die ter plaatse kan voorkomen. De bescherming tegen overstroming van MV2 hangt samen met het aanlegniveau van de terreinen en de faalkans van de harde en zachte zeewering. In de concessie voor de aanleg van MV2 wordt uitgegaan van een overschrijdingsrisico van 1:10.000, deze norm komt overeen met het beschermingsniveau voor de primaire waterkeringen rondom in dijkring 14.	
46.4 RWS Memo watervergunning ZZ		Voor of tijdens stromen van windkracht 7 mogen er geen voertuigen, materieel en materialen aanwezig zijn op de wering	3
46.4 Memo watervergunning Zachte Zeewering		De belangrijkste voorwaarde van RWS is dat het veiligheidsniveau van de zeewering niet negatief wordt beïnvloed door de plaatsing van windturbines.	3
46.4 Memo watervergunning Zachte Zeewering	Ontwerpeisen voor plaatsen windturbines	Ontwerpeisen voor plaatsen windturbines - Voor het ontwerp en de dimensionering van funderingen dient per turbine te worden uitgegaan van het minimum gegarandeerde veiligheidsprofiel alsmede erosie ter plaatse. - In het kader van kustlijnzorg: Zandverlies als gevolg van menselijk handelen moet zoveel mogelijk worden beperkt.	3 / 4
46.4 Memo watervergunning Zachte Zeewering	Eisen in relatie aanleg, exploitatie ontmanteling	Behoudens de windturbinefundaties mogen er geen andere permanente harde elementen zoals steenzettingen en verhardingen op het strand zijn	8
46.4 Memo watervergunning Zachte Zeewering	Eisen in relatie aanleg, exploitatie ontmanteling	Compenserende maatregelen zoals zandbuffers worden in grof zand (d50>250mu) uitgevoerd en dienen beplant te zijn met helmgras.	3.5 / 3.6
46.4 Memo watervergunning Zachte Zeewering	Eisen in relatie aanleg, exploitatie ontmanteling	Kabels en leidingen op het strand moeten onder de minimale bodemligging en onder het afslagprofiel liggen	8
46.4 Memo watervergunning Zachte Zeewering	Eisen in relatie aanleg, exploitatie ontmanteling	Het zand dat als zandbanket wordt aangebracht en het zand dat voor het construeren door exploitant van de turbines nodig is, wordt van buiten het kustfundament betrokken en is en blijft na aanbrengen eigendom van de Staat.	3.5 / 3.6

46.4 Memo watervergunning Zachte Zeewering	Eisen in relatie aanleg, exploitatie ontmanteling	Exploitant is verantwoordelijk voor onderhoud binnen een nader te bepalen cirkel rondom de turbines. Dit betreft onderhoud als gevolg van scour en veiligheid.	5 / 8
Duinovergangen			
105. Eisen voor extra duinovergangen 20 september 2019		Het bestaande duinprofiel mag niet dusdanig worden verlaagd of versmald dat de waterveiligheidsfunctie in het geding komt of dat de aanwezige zandbuffers geminimaliseerd/verlaagd worden. De exploitant dient te bepalen op basis van zijn ontwerp welke compenserende maatregelen dienen te worden genomen om de waterveiligheid te waarborgen. Dit ontwerp behoeft voorafgaand aan de werkzaamheden instemming van de beheerder.	3.5
105. Eisen voor extra duinovergangen 20 september 2019		Buiten het stormseizoen mogen de duinen lokaal verlaagd worden. De beheerder bepaalt de effecten en eventueel benodigde compenserende maatregelen van deze duinverlaging waarbij de waterveiligheid te allen tijde gewaarborgd wordt.	3.5
105. Eisen voor extra duinovergangen 20 september 2019		Op- en afritten worden geconstrueerd met zand dat betrokken wordt van buiten het fundament van de zeewering of andere materialen. Hierbij geldt dat het zand van minimaal dezelfde kwaliteit moet zijn als het zand van de zeewering.	3.5

2 Systeemanalyse

2.1 Algemeen

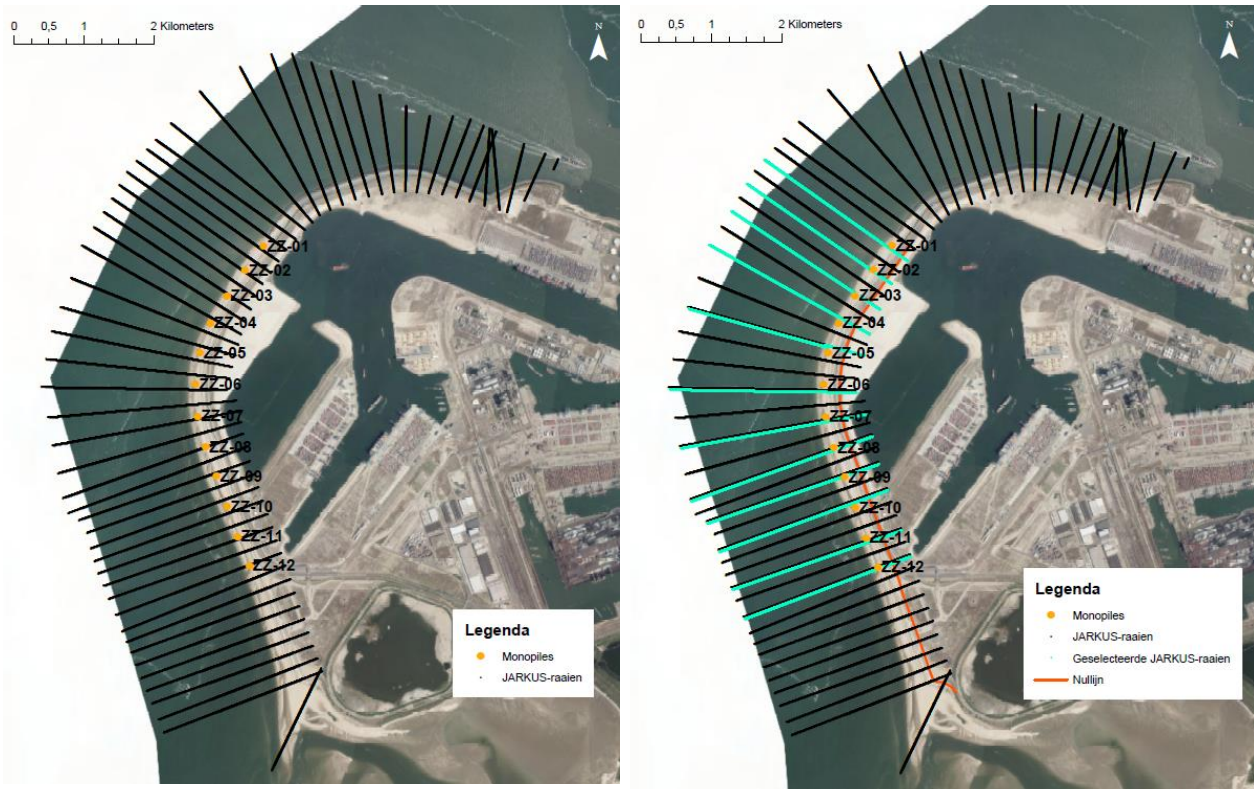
De Tweede Maasvlakte (MV-2) is in 2013 aangelegd als grote zeewaartse uitbouw van de Rotterdamse haven. Het is over het algemeen een erosief systeem, wat inhoudt dat de kustlijn geleidelijk landinwaarts verplaatst. Om dat tegen te gaan wordt het systeem onderhouden door suppleties. In de laatste jaren zijn suppleties uitgevoerd in 2014, 2016 en 2018 (Svasek Hydraulics, 2019b) (PUMA, 2018). De volgende suppletie is gepland in 2020 (PUMA, 2018). Een analyse van de natuurlijke dynamiek in het gebied sinds de aanleg (veranderingen van vooroever, strand en duin onder invloed van golven en getijden) is uitgevoerd en wordt in dit hoofdstuk beschreven. Analyses van jaarlijkse bodemopnames voor de periode 2013-2019 geven een duidelijk inzicht in het 'natuurlijk' gedrag van de kust en wat er de komende jaren verwacht kan worden. In de analyse is aandacht geschonken aan de reeds uitgevoerde suppleties op basis van informatie uit het Beheer en Instandhoudingsplan (BIP) (PUMA, 2019c). Op basis van het huidige suppletiebeleid in het BIP is een schatting gemaakt van de maximale erosie van het strand. De combinatie van trendanalyse en de grenzen aan erosie die uit het BIP voortvloeien geven een bandbreedte van de mogelijke bodemveranderingen ter plaatse van de windturbines.

2.2 Data

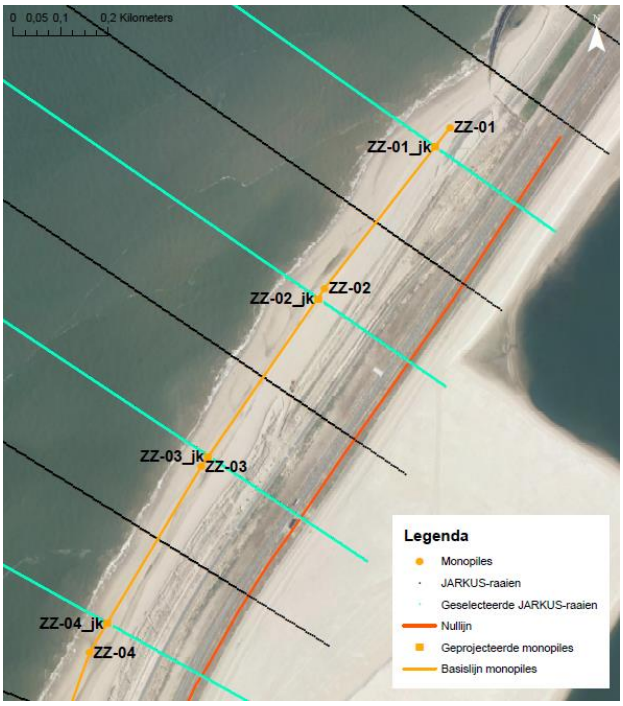
Voor de systeemanalyse is JARKUS data gebruikt. Deze data bestaat uit gemeten bodemligging op raaien langs de kust van MV-2 om de circa 200 m. Kustdwars is de resolutie 5 m. De metingen zijn gedaan in Q1 van elk jaar, variërend van januari tot maart. De raaien zijn te zien in Figuur 2-1. Data is beschikbaar voor de jaren 2013 – 2018. Daarnaast zijn door Rijkswaterstaat de volgende datasets aangeleverd (Rijkswaterstaat, 2019b):

- De bodemligging in kwartaal 2 van 2019;
- De ontwerpbodemligging van de zachte zeewering, welke de basis is van de huidige onderhoudsstrategie.

Voor de analyse zijn de raaien geselecteerd die het dichtst bij de twaalf windturbines liggen, zie Figuur 2-1 rechts. De afstand langs elke raai heeft zijn beginpunt op de nullijn: een lijn getrokken langs de binnenwaartse zijde van het duin (zoals in de data van 2019). De locatie van de windturbines is loodrecht geprojecteerd op de JARKUS raaien, zie Figuur 2-2 als illustratie van deze methode. De meeste windturbines liggen binnen 50 meter van de dichtstbijzijnde JARKUS raai, de grootste afstand tussen de JARKUS raai en de ernaast gelegen windturbines ZZ-05 en ZZ-10 bedraagt circa 100 meter.



Figuur 2-1: Links - JARKUS raaien rondom MV-2. Ook de locatie van de windturbines is getoond. Rechts - Geselecteerde JARKUS-raaien en de nullijn (een lijn getrokken langs de binnenwaartse zijde van het duin, zoals in de data van 2019).



Figuur 2-2: Illustratie van de projectiemethode van de windturbines op de geselecteerde JARKUS-raaien.

Naast deze databronnen is gebruik gemaakt van reeds bestaande analyses naar het morfologische gedrag van MV-2 (zoals (Lako, 2019), (PUMA, 2018) en (Svasek Hydraulics, 2019c)) en keuringsdocumenten van PUMA (zoals (PUMA, 2019a)).

2.3 Onderhoudsstrategie MV-2

MV-2 wordt onderhouden door middel van suppleties. De huidige contractuele onderhoudsperiode door PUMA loopt tot half april 2023. Daarbinnen worden jaarlijkse keuringen uitgevoerd, waarbij gecontroleerd wordt of het volume binnen verschillende morfologische schillen voldoende groot is om de standzekerheid van de zeewering voor 1 jaar na peildatum te waarborgen (of tot de volgende geplande suppletiecampagne) (PUMA, 2018). Ook wordt gekeurd op het volume wat nodig is om de suppletiefrequentie te beperken tot maximaal eens per twee jaar en het benodigde volume om de voorspelde erosie op de strandoever en vooroever te compenseren in de volgende 2,35 respectievelijk 2,25 jaar.

Het gaat hierbij om volgende morfologische schillen:

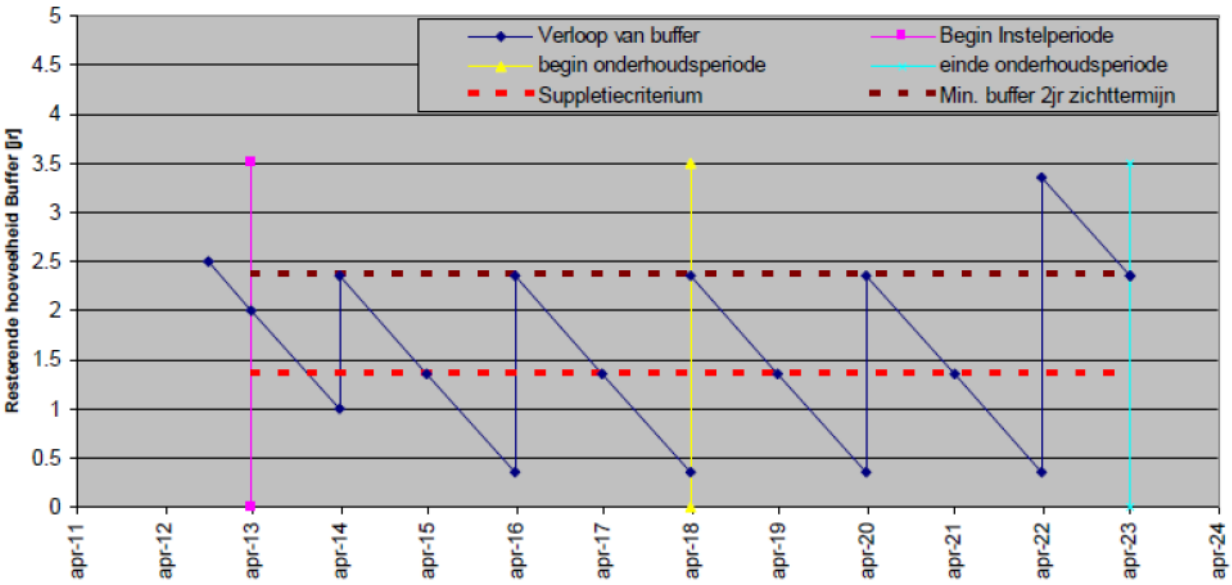
- Duinreep: kustprofielzone gelegen boven NAP +3m
- Strandoever: kustprofielzone gelegen tussen NAP +3m en NAP-4m
- Vooroever: kustprofielzone gelegen tussen NAP -4m en NAP -8m
- Kustfundament: kustprofielzone gelegen onder NAP -8m

De ontwerpvolumes in deze verschillende kustschillen zijn te zien in Figuur 2-3. Het daadwerkelijk aanwezig volume in de strandschil wordt bepaald door het volume boven de -4 m NAP en onder de +3 m NAP lijn te bepalen. Eventuele overschotten in de duinreep mogen gebruikt worden om tekorten in de strandschil te compenseren tot maximaal 250 m^3/m (PUMA, 2019a). Hetzelfde geldt voor de strandschil en de vooroever.

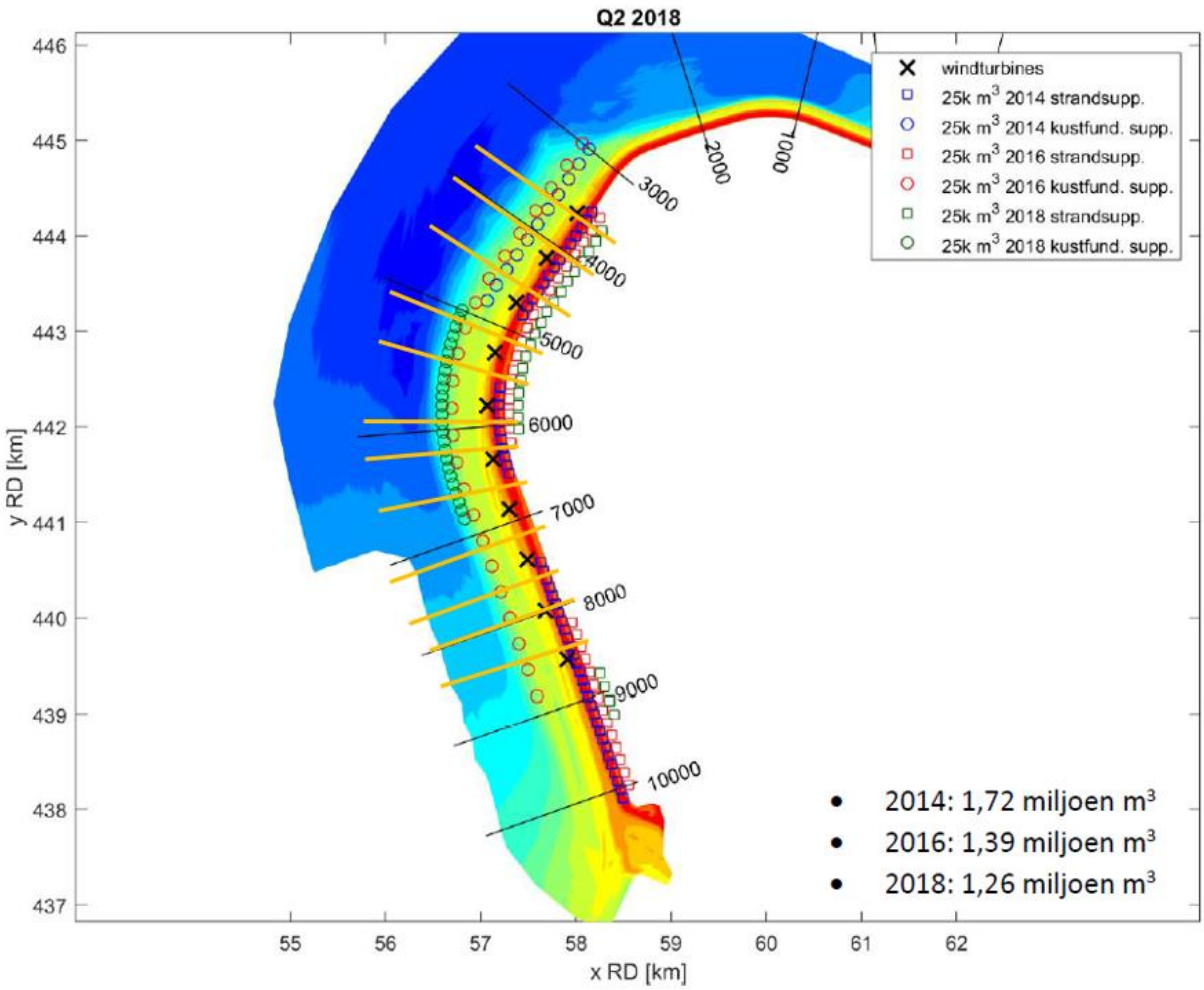
	Ontwerp/toetsvolume [m3/m]			Ligging windturbines
	Duin	*Strandoever*	*Vooroever*	
BC_3495	612	1444	1988	
BC_3600	625	1446	1993	ZZ-01
BC_3800	567	1419	1985	
BC_4000	472	1365	1955	ZZ-02
BC_4200	430	1340	1940	
BC_4400	430	1340	1940	ZZ-03
BC_4600	441	1349	1946	
BC_4800	441	1350	1946	ZZ-04
BC_5000	441	1349	1946	
BC_5200	441	1349	1946	ZZ-05
BC_5400	441	1349	1946	
BC_5600	429	1340	1940	
BC_5800	429	1340	1940	ZZ-06
BC_6000	429	1340	1940	
BC_6200	409	1323	1931	ZZ-07
BC_6400	409	1323	1931	
BC_6600	423	1342	1942	ZZ-08
BC_6800	380	1321	1930	
BC_7000	339	1300	1918	ZZ-09
BC_7200	339	1300	1918	
BC_7400	339	1300	1918	ZZ-10
BC_7600	330	1297	1916	
BC_7800	330	1297	1916	
BC_8000	330	1297	1916	ZZ-11
BC_8200	304	1272	1902	
BC_8400	304	1272	1902	ZZ-12
BC_8600	218	1271	1912	
BC_8800	212	1334	1955	
BC_9000	207	1398	1998	
BC_9200	207	1467	2044	
BC_9400	207	1537	2090	
BC_9600	204	1605	2138	
BC_9800	204	1674	2184	
BC_10000	204	1739	2228	
BC_10200	208	1668	2220	
BC_10205 cone	220	1475	2085	
BC_10210 cone	208	1352	1967	
BC_10400	208	1185	1876	
BC_10590	208	1175	1848	

Figuur 2-3: Ontwerpvolumes in de duin-, strand- en vooroever schil op de verschillende PUMA raaien. De gekleurde vakken geven de zones aan waar de windturbines komen te staan (PUMA, 2018).

Bij oplevering is een bepaalde buffer (slijtlaag) aangebracht, ter compensatie van de verwachte erosie. Tijdens de instelperiode 2013 – 2018 hebben drie suppleties plaatsgevonden (2014, 2016 en 2018). Daarmee wordt de buffer weer aangevuld, zie Figuur 2-4. De locatie van de strand- en kustfundament suppleties in deze drie jaren is te zien in Figuur 2-5. Ook in de onderhoudsperiode (2018 – 2023) zijn suppleties gepland om de twee jaar. In totaal is op de zachte zeewering in de instelperiode 2,22 miljoen m^3 zand gestort op de strandoever, 0,89 miljoen m^3 op het kustfundament en 3,1 miljoen m^3 totaal (exclusief suppletie van 2018).



Figuur 2-4: Verloop van de zandsuppleties over de jaren 2013 - 2023, overgenomen uit (PUMA, 2018).



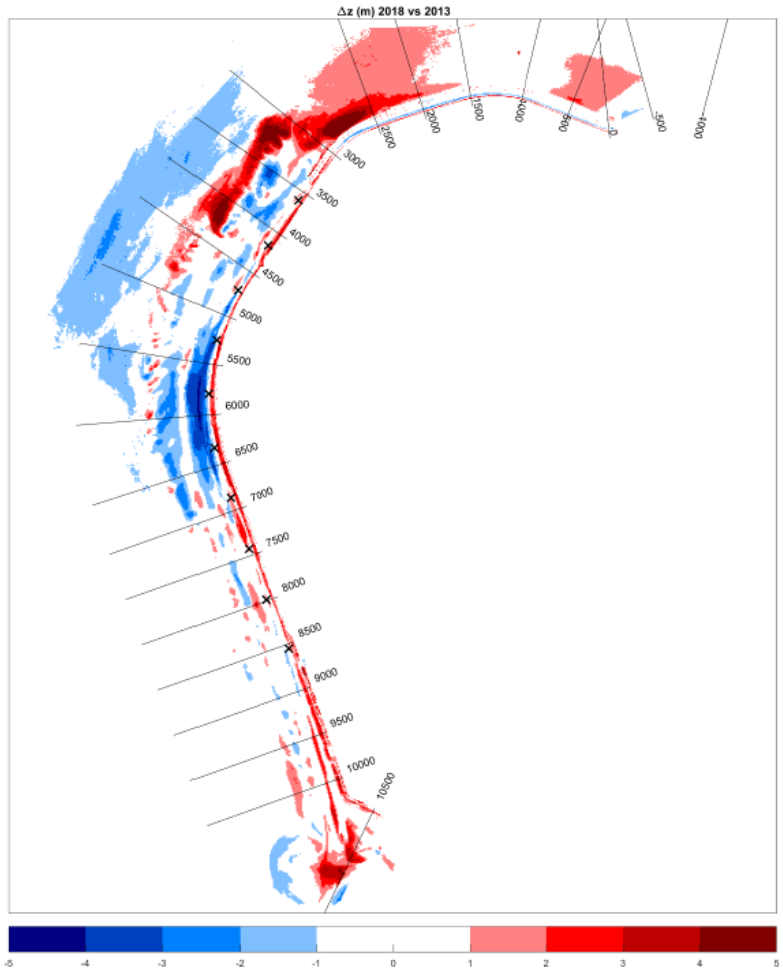
Figuur 2-5: Locatie van de strand- en kustfundament suppleties in 2014, 2016 en 2018 (Svasek Hydraulics, 2019c).

Uit de instelperiode is gebleken dat het lastig is de schilvolumes rondom de overgang tussen de harde en de zachte zeewering in stand te houden door middel van regelmatige suppleties (PUMA, 2019b). Het morfologisch systeem wordt steeds uit evenwicht gebracht, wat leidt tot sterkere erosie. Voor dit deel is een aangepaste keuringsmethodiek ontwikkeld op basis van daadwerkelijke duinafslag en een kritisch afslagpunt (PUMA, 2019d).

2.4 Grootschalige dynamiek van MV-2

MV-2 is een kunstmatig zandlichaam, opgespoten in 2013. Dit systeem is niet in evenwicht met de natuurlijke krachten van getijstromingen en golven, en het moet in stand gehouden d.m.v. regelmatige suppleties, zoals hierboven beschreven.

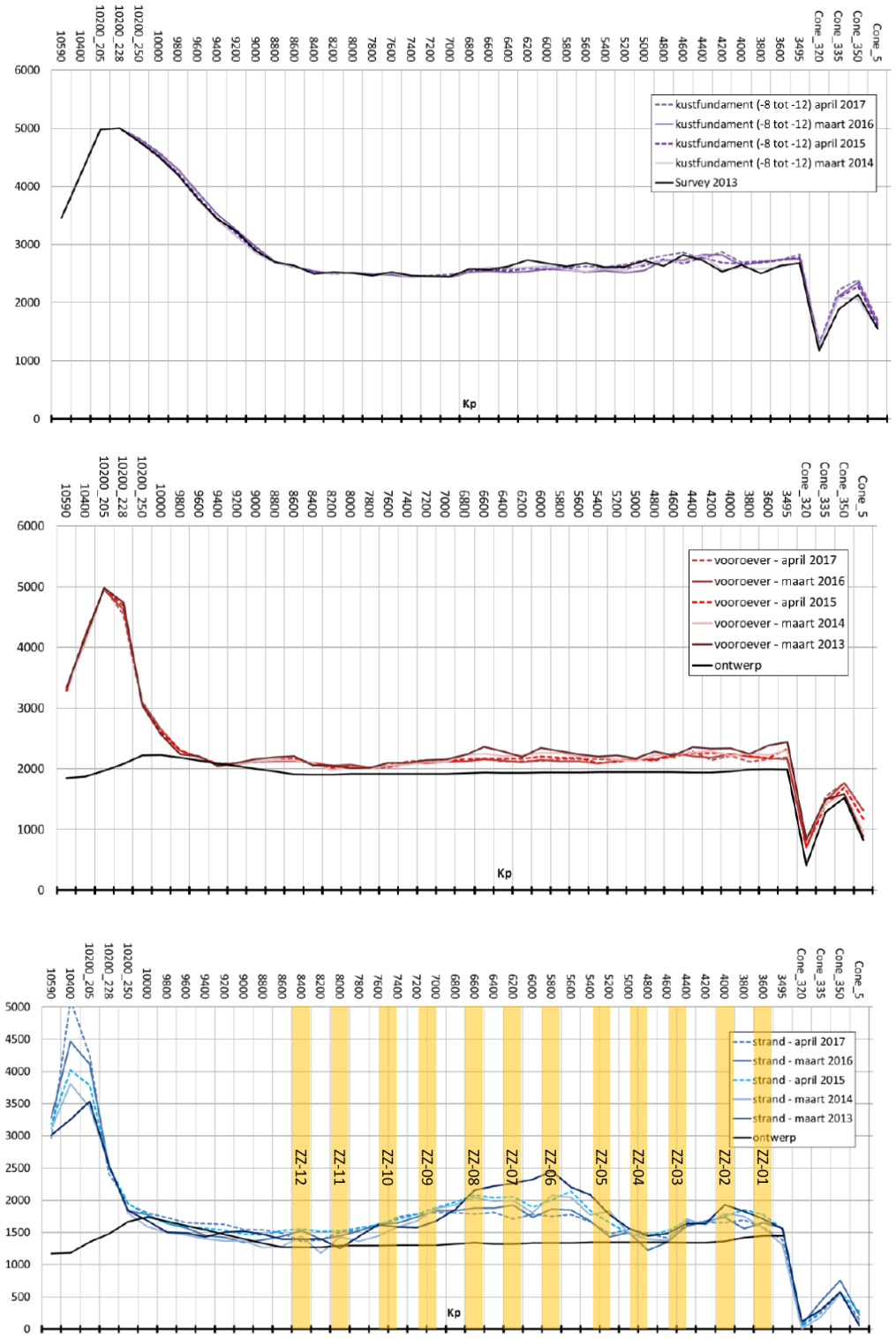
In de studie van (Svasek Hydraulics, 2019b) worden de grootschalige sedimentatie-erosie patronen in de periode tussen 2013 en 2018 beschreven, zie Figuur 2-6. Grote erosiezones zijn te zien bij de bocht (BC-5000 tot BC-7000), bij de overgang tussen de harde en de zachte zeewering (BC-3500) en op dieper water. In het uiterste zuiden van de zachte zeewering vindt sedimentatie plaats.



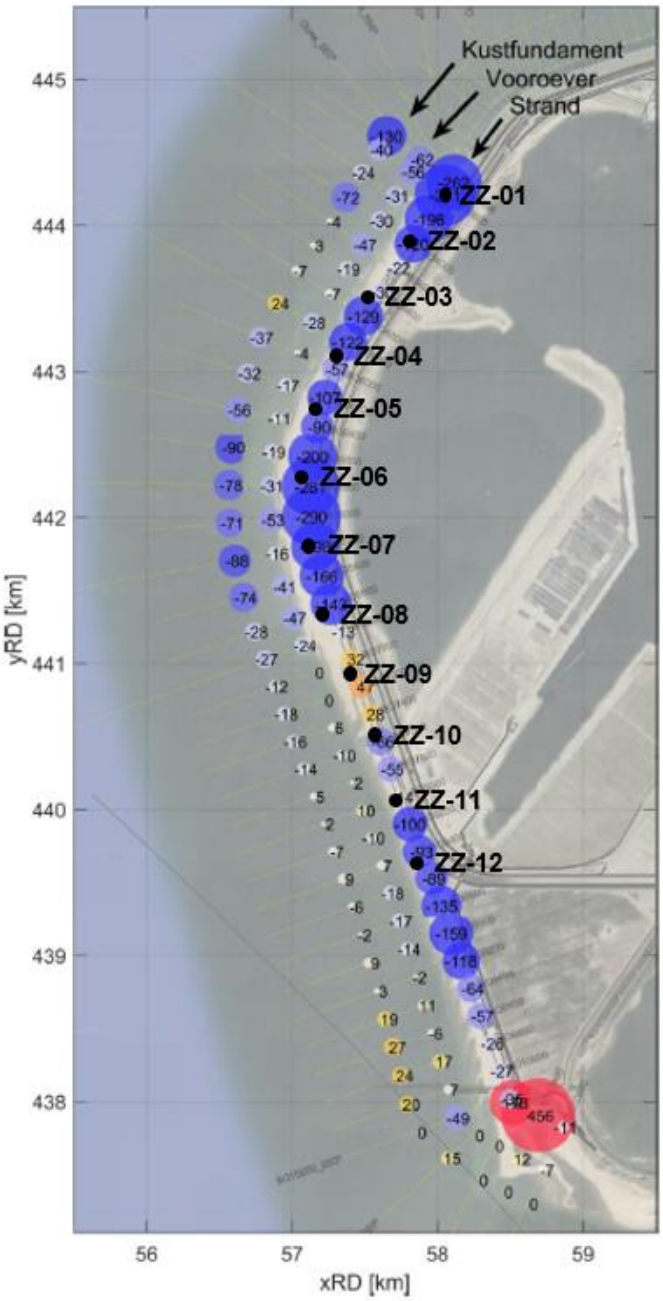
Figuur 2-6: Erosie en sedimentatie zones tussen 2013 en 2018. Overgenomen uit (Svasek Hydraulics, 2019c). Blauw: erosie. Rood: sedimentatie.

In (PUMA, 2018) zijn de observaties beschreven wat betreft de grootschalige dynamiek van MV-2 tijdens de instelperiode (april 2013 – april 2018). De bevindingen zijn als volgt (zie ook Figuur 2-7 en Figuur 2-8):

- Het kustfundament is dynamisch in het noorden van de zachte zeewering, in het zuiden is deze redelijk stabiel;
- De vooroever is over het algemeen licht eroderend;
- De strandoever zandt aan in het uiterste zuiden van de zachte zeewering, maar erodeert bij de overgang tussen de harde en de zachte zeewering, in de bocht (rond raai 6000) en bij raai 8200-9400. Er is een sterke fluctuatie zichtbaar in het profiel;
- De erosie is het grootst op de strand en het kleinst op de vooroever;
- Er is veel jaarlijkse fluctuatie.



Figuur 2-7: Volume (m^3/m) in de verschillende schillen langs de gehele zachte wering. Boven: kustfundament. Midden: vooroever. Beneden: strand. Overgenomen uit (PUMA, 2018). Bij de strandschil zijn de locaties van de windturbines indicatief weergegeven. In de figuren is noord rechts en zuid links.



Figuur 2-8: Gemiddelde erosie/sedimentatie in m^3/m per jaar voor de drie verschillende schillen gebaseerd op data tussen 2013 en 2017 (PUMA, 2018). De rode bollen en positieve getallen geven sedimentatie aan, de blauwe bollen en negatieve getallen geven erosie aan. De grootte van de bollen staat in verhouding met de mate van sedimentatie of erosie. De locatie van de windturbines is indicatief weergegeven.

Er kunnen grote gradiënten in zandtransport optreden langs de kust van MV-2, waardoor de erosielocaties zijn te verklaren. Bij de meest noordelijke raaien zorgt de overgang van de harde naar de zachte zeewering voor deze gradiënten. In de bocht zorgt de sterke kustkromming hiervoor. Dit was al voorzien, de buffer is hier immers geplaatst. Bij raai 8200-9400 zorgt een sterk scheve golfinval in combinatie met een wisselend voorland bij verschillende golfinvalshoeken (breed voorland aan de zuidkant, smaller voorland aan de noordkant) voor de gradiënt in zandtransport (PUMA, 2018). Naast golfinval speelt ook getij een belangrijke rol: door contractie zijn de stromingen ruimtelijk zeer variabel.

Rond de overgang tussen de harde en de zachte zeewering (meest noordelijke raaien) vertoont het morfologisch gedrag een sterke mate van grilligheid. Deze grilligheid wordt voornamelijk bepaald door de sterkte en de richting van stormen. Suppleties in de strandschil zijn hier minder effectief, het volume verspreidt zich snel over aangrenzende delen. Een overschot aan sediment op de vooroever kan echter positief werken voor de standzekerheid van deze raaien (PUMA, 2018).

De gemiddelde sedimentatie of erosie per jaar over de periode 2013-2017 is getoond in Figuur 2-8. Bij de noordelijke raaien erodeert er jaarlijks circa 300 m^3/m op de strandschil, circa 60 m^3/m op de vooroever en circa 130 m^3/m op het kustfundament. Rond de bocht erodeert er jaarlijks circa 300 m^3/m op de strandschil, 50 m^3/m op de vooroever en 90 m^3/m op het kustfundament. Bij de zuidelijke raaien erodeert er jaarlijks circa 150 m^3/m op de strandschil en 20 m^3/m op de vooroever. Op het kustfundament vindt hier lichte erosie of lichte sedimentatie plaats. In totaal erodeert er tussen 2013 en 2016 0,74 miljoen m^3 van de strandoever, 0,17 miljoen m^3 van de vooroever en 0,18 m^3 van het kustfundament. De erosie of sedimentatie in de strandschil ter hoogte van de windturbines volgt uit Figuur 2-8 en is opgesomd in Tabel 2-1.

Tabel 2-1: Gemiddelde erosie/sedimentatie op de strandschil per jaar in m^3/m (over de jaren 2013 – 2017) ter hoogte van de windturbines, op basis van (PUMA, 2018).

Gemiddelde erosie/sedimentatie per jaar voor de strandoever schil [m3/m], rekening houdend met zandaanvoer

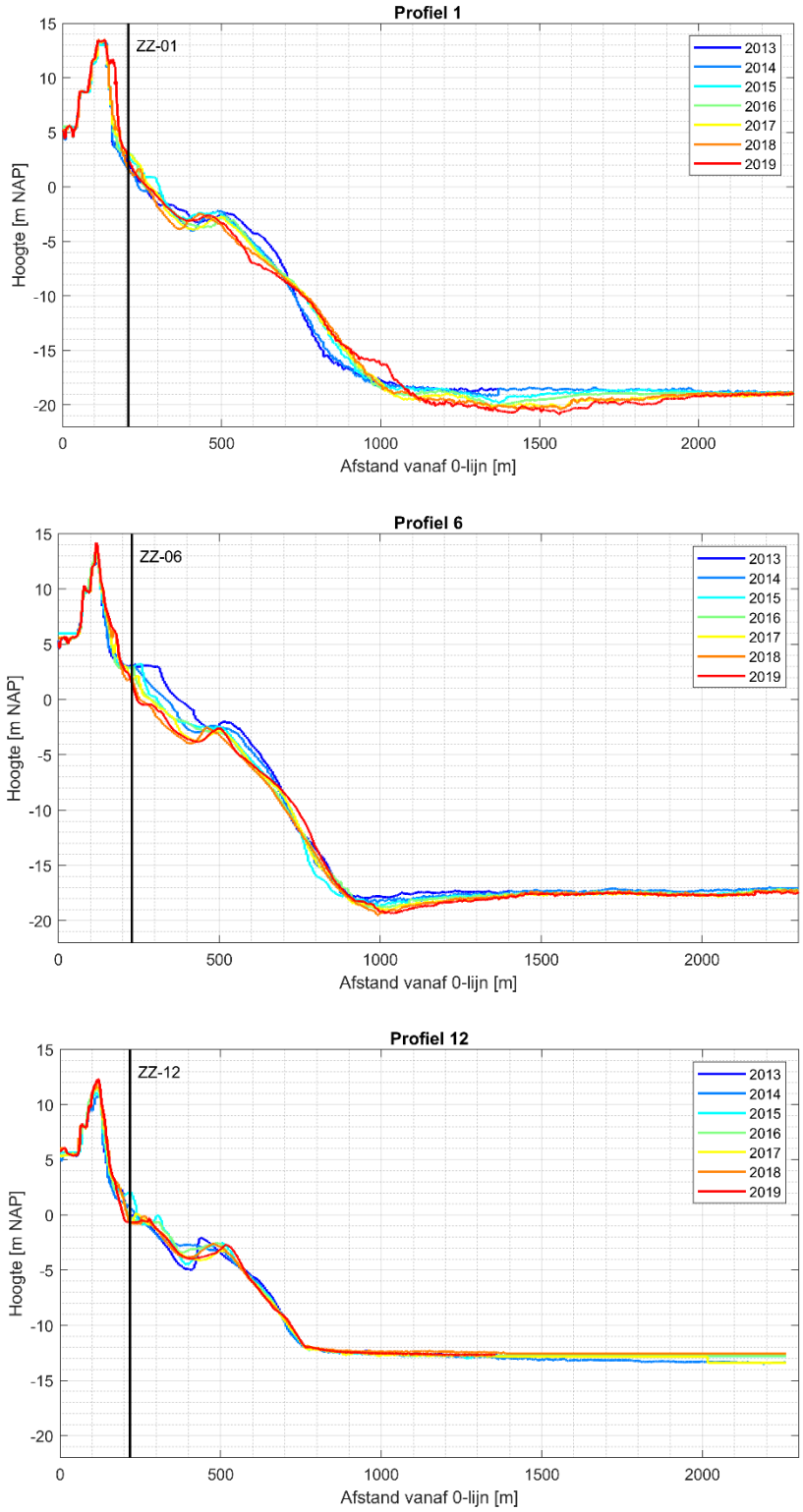
	ZZ-01	ZZ-02	ZZ-03	ZZ-04	ZZ-05	ZZ-06	ZZ-07	ZZ-08	ZZ-09	ZZ-10	ZZ-11	ZZ-12
Jaar / Raai	*3600*	*4000*	*4400/4600*	*4800/5000*	*5200/5400*	*5800*	*6200*	*6600*	*7000/7200*	*7400/7600*	*8000*	*8400*
2013-2014	-345	-152	-27	-73	-28.5	-376	-271	-113	149	-87	174	44
2014-2015	-223	-97	-69.5	-97	-56	-326	-168	-171	59	27	-191	-153
2015-2016	-241	-137	-134	-118	-191	-139	-129	-201	-47.5	-26.5	-81	-22
2016-2017	-449	-100	-90	-75.5	-124.5	-296	-233	-92	-1	9.5	40	-245
Gemiddeld	-311	-120	-79.5	-89.5	-98.5	-281	-198	-143	39.5	-19	-14	-93

Figuur 2-7 toont naast de jaarlijkse volumes ook het ontwerpvolume op de vooroever en de strandschil. In het uiterste zuiden is er gedurende alle jaren een overschot aan volume. Dit neemt sterk af naar het noorden, al liggen op de vooroever de daadwerkelijke volumes meestal hoger dan de ontwerpvolumes. Op de strandschil heeft het daadwerkelijke volume af en toe onder het ontwerpvolume gelegen.

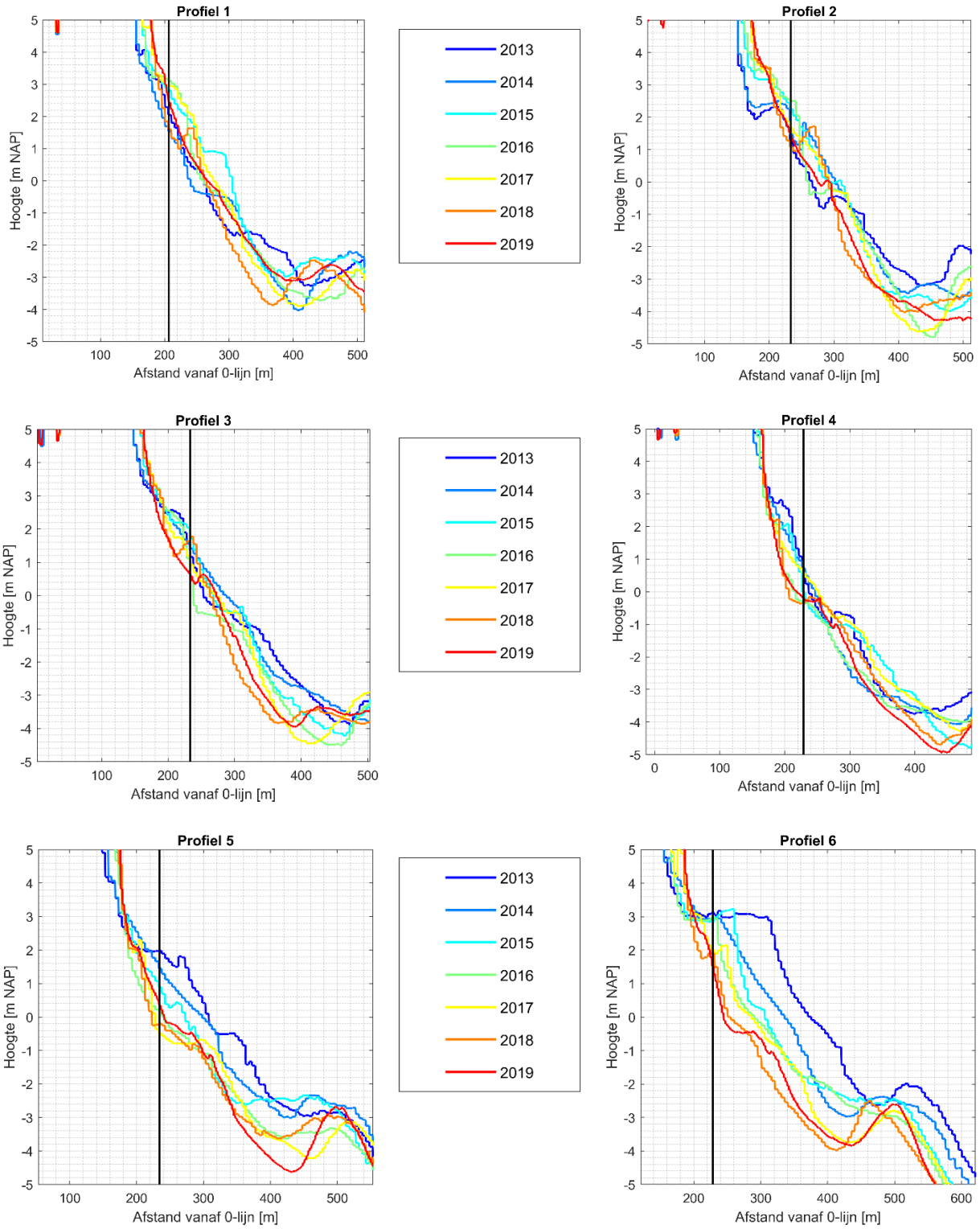
2.5 Natuurlijke variatie van het kustprofiel over de jaren

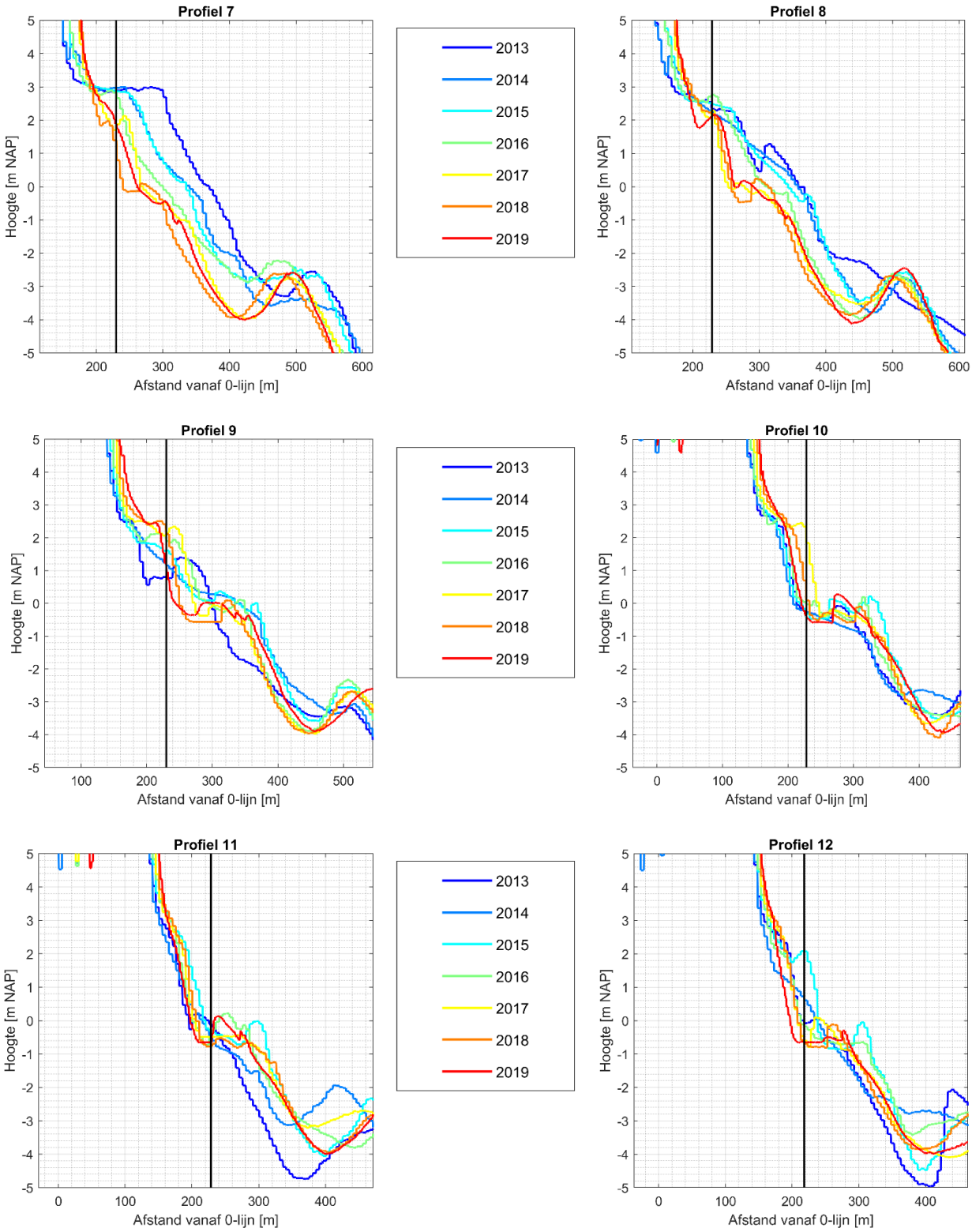
In deze sectie wordt de natuurlijke variatie van het kustprofiel over de jaren 2013-2018 beschreven op basis van de JARKUS data. De bodemligging in 2019 is toegevoegd vanuit de data ontvangen van RWS. In Figuur 2-9 is de verandering van het gehele kustprofiel getoond voor drie raaien: raai 1, 6 en 12. Dit zijn raaien ter hoogte van de windturbines ZZ-01, ZZ-06 en ZZ-12, zie Figuur 2-8 voor locatie raaien. Voor alle raaien is een figuur getoond met de verandering van de bodemligging rond de waterlijn, zie Figuur 2-10. Hierbij wordt de waterlijn gedefinieerd als de 0 m NAP lijn, oftewel het gemiddelde zeeniveau.

We zien dat er over het algemeen erosie van het strandprofiel plaats vindt. De vooroever is vrij dynamisch bij raai 1 en raai 6: de ‘offshore bar’ die rond x = 500 m ligt verschuift gedurende de jaren richting de kust, maar blijft op ongeveer dezelfde locatie in profiel 12. In raai 6 erodeert een flink stuk van de strandoever (zone tussen circa +3 m NAP en -4 m NAP) tussen 2013 en 2018: de kustlijn trekt zich circa 100 m terug. Dit effect is minder sterk te zien bij de andere raaien. De variabiliteit in strandprofiel is groot bij de raaien dicht bij de overgang tussen de harde en zachte zeewering (raai 1 en 2) en rond de bocht (raai 5, 6 en 7), maar neemt vervolgens af naar het zuiden toe.



Figuur 2-9: Ligging van het kustprofiel voor drie raaien (1, 6 en 12) voor de verschillende jaren; zwarte lijn geeft de locatie van de windturbine in het profiel aan.

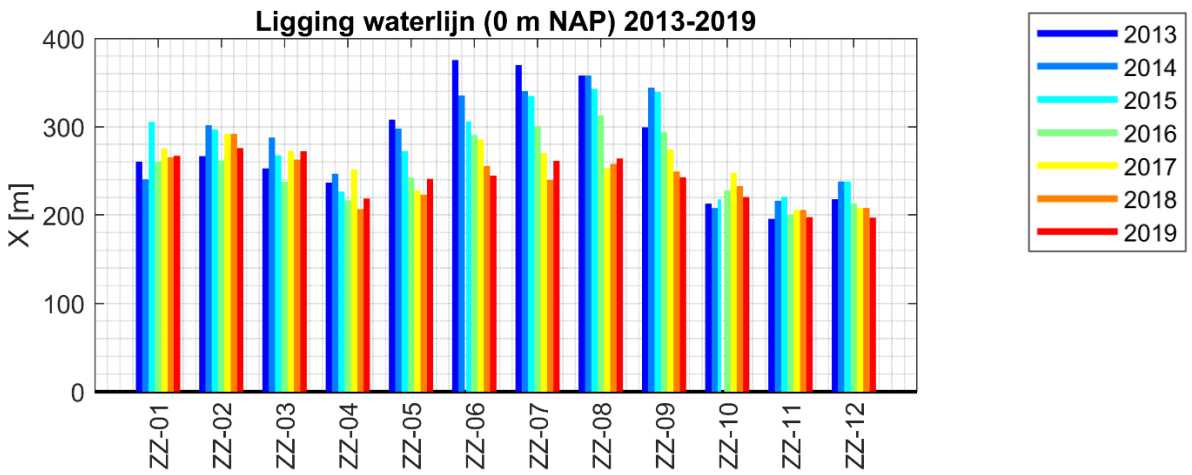

Profiel 1
Profiel 2
Profiel 3
Profiel 4
Profiel 5
Profiel 6
Hoogte [m NAP]
Afstand vanaf 0-lijn [m]
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019



Figuur 2-10: Ligging van het kustprofiel voor alle raaien voor de verschillende jaren, ingezoomd rondom de waterlijn (0 m NAP) ; zwarte lijn geeft de locatie van de windturbine in het profiel aan.

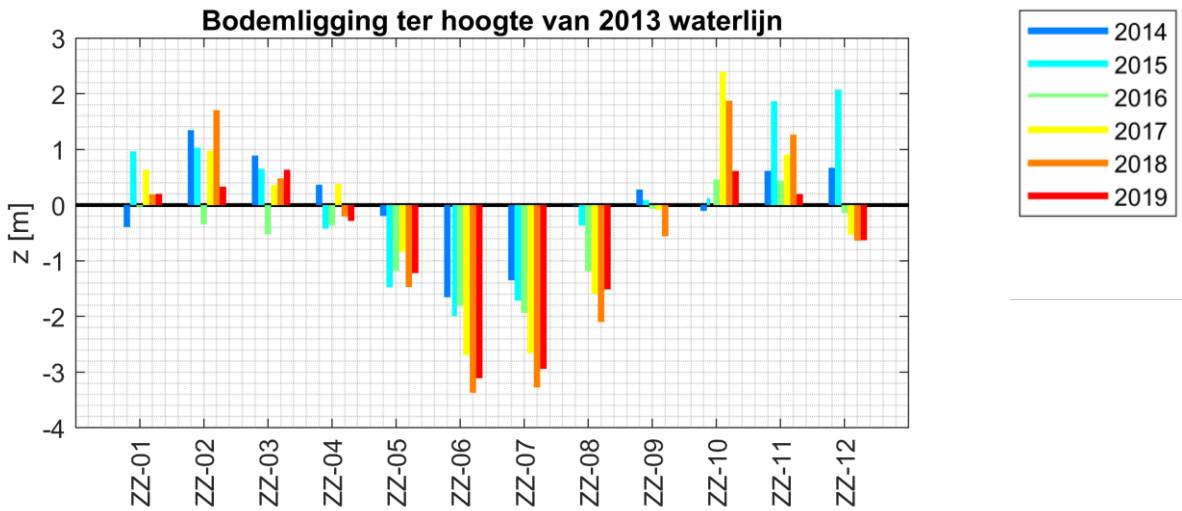
In Figuur 2-11 is de ligging van de kustlijn tussen 2013 en 2019 t.o.v. de nullijn te zien voor alle raaien. De waterlijn heeft zich tussen 2013 en 2019 op de meeste raaien teruggetrokken, met een maximale terugtrekking van circa 125 m bij raai 6. Bij raai 5, 6, 7 en 8 treedt de kustlijn structureel terug. Bij de overige raaien trekt de kustlijn zich in sommige jaren terug en groeit deze in sommige jaren aan. Samenvattend voor het verschil in kustlijnligging tussen 2019 en 2013:

- De kustlijn trekt zich terug bij raai 4, 5, 6, 7, 8, 9 en 12. De maximale terugtrekking t.o.v. 2013 is circa 130 m;
- De kustlijn is nagenoeg stabiel bij raai 1, 2, 3, 10 en 11. De maximale aangroei tussen 2013 en 2019 circa 20 m.



Figuur 2-11: Ligging van de waterlijn (0 m NAP) voor de verschillende jaren.

In Figuur 2-12 is de bodemligging ter hoogte van de 2013 waterlijn getoond. Bij de raaien 5 tot 9 is er sprake van een forse bodemdaling als gevolg van erosie. De maximale daling van de bodem vindt plaats bij raai 6, waar een daling van ruim 3 m zichtbaar is. De gradiënt in bodemligging is hier vrij constant. Bij de overige raaien is er sprake van afwisselende toename en afname van de bodemhoogte.



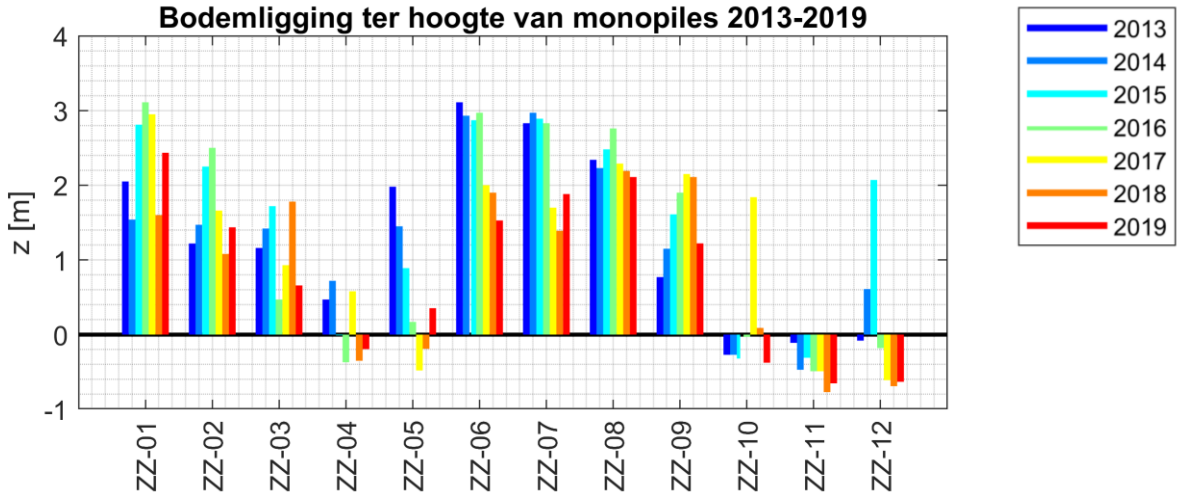
Figuur 2-12: Bodemligging ter hoogte van de 2013 waterlijn voor de verschillende jaren.

2.6 Variatie van het kustprofiel ter hoogte van de windturbines

De variatie in bodemligging ter hoogte van de beoogde locatie van de windturbines is getoond in Figuur 2-13. Bij ZZ-05, ZZ-06, ZZ-07, ZZ-08 en ZZ-11 daalt de bodem tussen 2013 en 2018 gestaag. Bij ZZ-09 is gestage aanzanding te zien over deze jaren. Bij de overige windturbines treedt afwisselend sedimentatie en erosie op. In de meeste jaren treedt er bij sommige windturbines erosie op en bij sommige sedimentatie, er is geen duidelijke trend te zien in 'sedimentatiejaren' of 'erosiejaren'. Netto zien we tussen 2013 en 2019:

- Erosie bij ZZ-01, ZZ-02, ZZ-04, ZZ-05, ZZ-06, ZZ-07, ZZ-08, ZZ-11 en ZZ-12. De netto erosie ligt tussen de 0,2 en 2,25 m;
- Sedimentatie bij ZZ-03, ZZ-09 en ZZ-10. De netto sedimentatie ligt tussen de 0,5 en 1,5 m.

De variabiliteit in bodemligging lijkt toe te nemen van raai 1 en 12 naar het midden toe, de erosie is maximaal bij raai 5. De variabiliteit is het grootst tussen 2016 en 2017. In Figuur 2-14 is nogmaals het verloop van de bodemverandering bij de verschillende windturbines getoond[1].



Figuur 2-13: Bodemligging over de jaren heen voor de twaalf windturbine locaties. De gekleurde lijnen tonen de bodemhoogte in de individuele jaren.

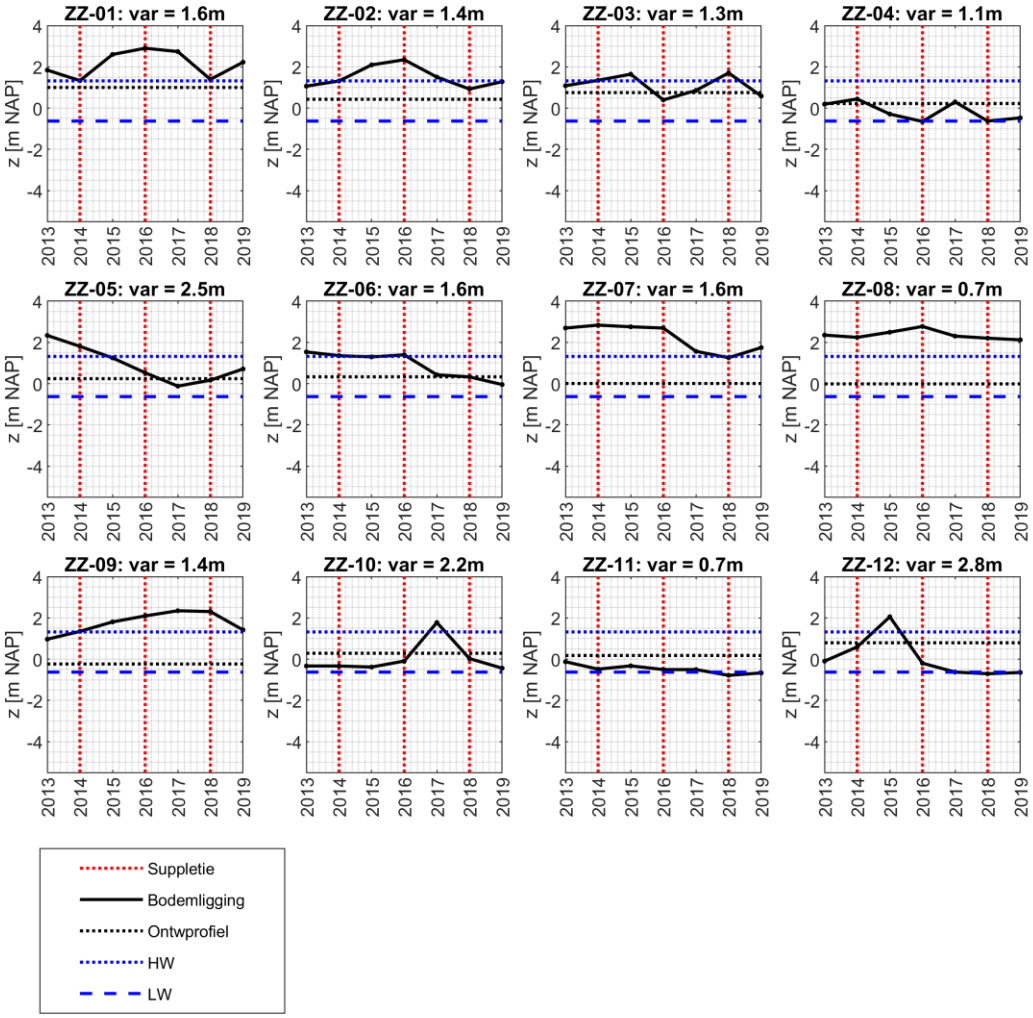
In Figuur 2-14 is ook de ontwerpbodem en hoog- en laagwater getoond (hoogwater gem. springtij is 1,32 m NAP, laagwater gem. springtij is -0,63 m NAP (Rijkswaterstaat, 2013)). Tevens zijn de jaren waarin gesuppleerd is (2014, 2016 en 2018) getoond.

Bij ZZ-03, ZZ-04, ZZ-05, ZZ-06, ZZ-10, ZZ-11 en ZZ-12 heeft de bodem geruime tijd gelegen of ligt nog steeds beneden het niveau van de ontwerpbodem. In 2019 ligt de bodem lager dan de ontwerpbodem bij ZZ-03, ZZ-04, ZZ-06, ZZ-10, ZZ-11 en ZZ-12. Bij ZZ-11 ligt de bodem echter al lager dan de ontwerpbodem sinds 2013. Op al deze locaties is overigens geen sprake van een structureel volumetekort, het strand lijkt steiler te liggen dan in het ontwerpprofiel.

De suppleties zijn (gedeeltelijk) als vooroeversuppleties uitgevoerd (PUMA, 2018) en deels als strandsuppleties, waarbij niet in alle jaren op alle locaties is gesuppleerd. Hierdoor is het effect bij de

[1] *In deze figuur is de bodemvariatie uit de JARKUS raai geprojecteerd op de bodemligging in 2019 ter hoogte van de daadwerkelijke windturbine. Dit is gedaan omdat er bij sommige windturbines een verschil zit in de bodemligging in 2019 ter plaatse van de windturbine zelf en de geprojecteerde windturbinelocatie op de JARKUS raai.*

locaties van de windturbines pas na geruime tijd, of helemaal niet, zichtbaar in de profielen. De suppleties in 2014 en 2016 zorgen bij sommige windturbine locaties voor aanzanding in het jaar daarna. Bij de overige windturbine locaties treedt of alsnog erosie op in het jaar na de suppletie, of na sommige suppletiejaren erosie en na andere sedimentatie. Het is aannemelijk dat door de suppleties om de twee jaar geen duidelijke trend in de bodemligging te zien is voor de meeste windturbine locaties.



Figuur 2-14: Verandering van de bodemligging ter hoogte van de windturbines over de jaren heen (zwarte doorgetrokken lijn). De jaren waarin gesuppleerd is, zijn gemarkeerd met rode lijnen. Hoog- en laagwater zijn getoond met blauwe lijnen. De ontwerpbodem is getoond met zwarte stippellijnen. De waterstanden horen bij gemiddeld springtij 2011.0 (Rijkswaterstaat, 2013). Bij elke subplot is de maximale variatie (var) in bodemligging weergegeven ($z_{max} - z_{min}$).

In Tabel 2-2 is een overzicht gegeven van de ligging van de bodem ter hoogte van de verschillende windturbines ten opzichte van de waterstanden en het ontwerpprofiel. Ook is de maximale variatie in de bodemligging weergegeven.

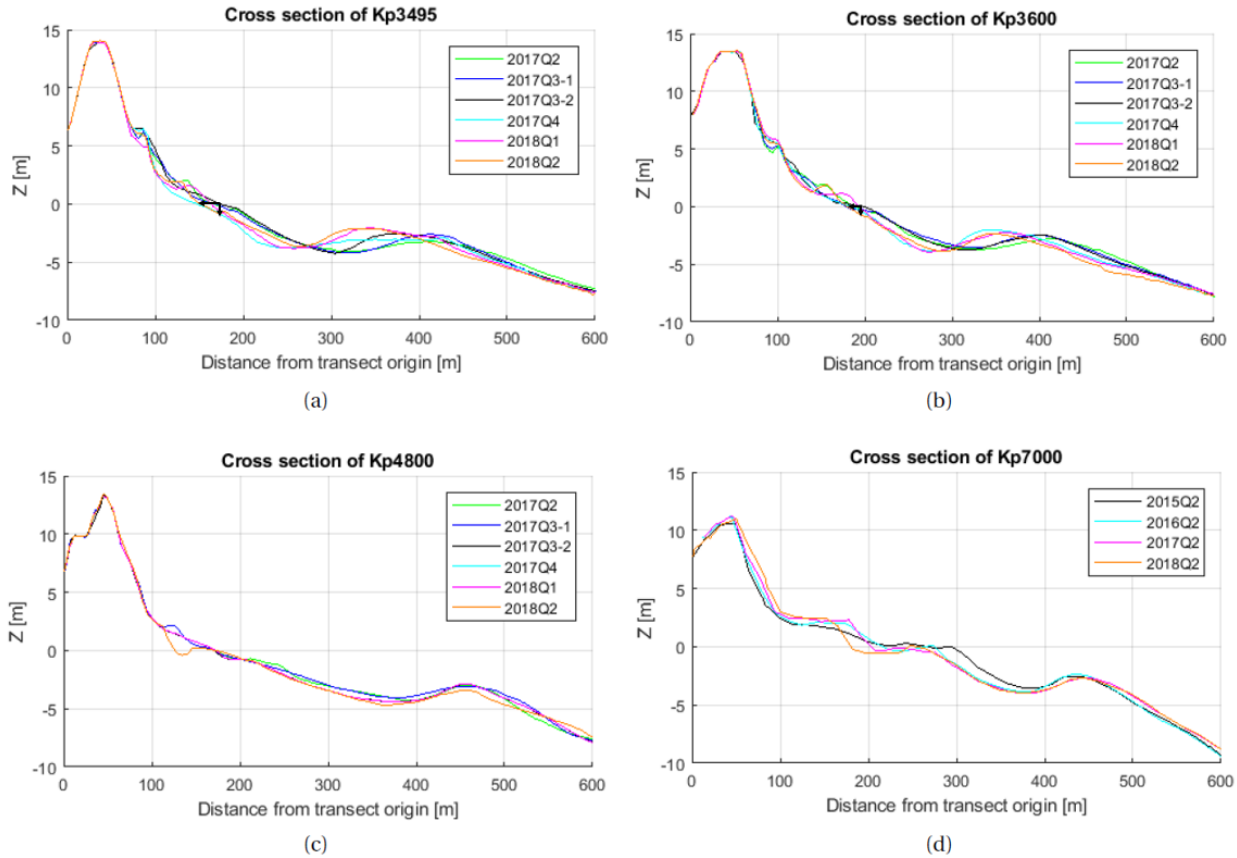
Tabel 2-2: Overzichtstabel van de variatie in bodemligging ter hoogte van de windturbines. >: bodem ligt hoger. <: bodem ligt lager. ~: bodem ligt op ongeveer hetzelfde niveau .

Windturbine	Ligging '19 tov HW	Ligging '19 tov LW	Ligging '19 tov ontwerprofiel	Max variabiliteit [m]
ZZ-01	>	>	>	1,6
ZZ-02	~	>	>	1,4
ZZ-03	<	>	<	1,3
ZZ-04	<	>	<	1,5
ZZ-05	<	>	>	2,2
ZZ-06	<	>	<	1,2
ZZ-07	>	>	>	1,6
ZZ-08	>	>	>	0,7
ZZ-09	>	>	>	1,6
ZZ-10	<	>	<	2,6
ZZ-11	<	~	<	0,7
ZZ-12	<	~	<	2,7

2.7 Seizoendynamiek van de bodemverandering

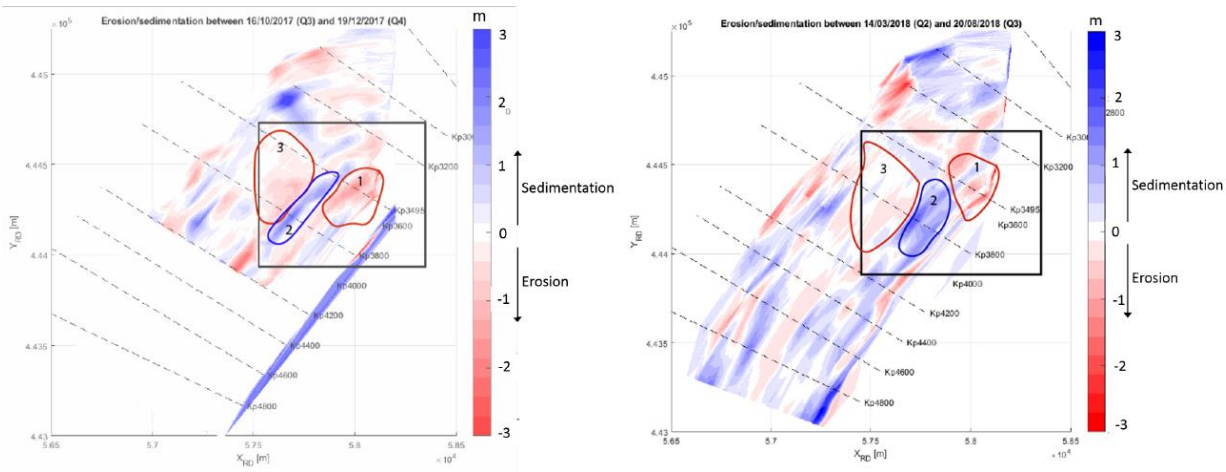
In (Lako, 2019) zijn meerdere bodemmetingen binnen de jaren 2017 en 2018 vergeleken, waarbij de focus ligt op de transitie tussen de harde en de zachte zeewering (vlakbij windturbine ZZ-01). Een aantal profielen uit deze data is te zien in Figuur 2-15. Kp3495 en Kp3600 bevinden zich rondom de transitie van de harde naar de zachte zeewering, Kp4800 bevindt zich circa 1 km naar het zuiden en Kp7000 bevindt zich ten zuiden van de bocht. Voor Kp7000 zijn alleen jaarlijkse lodingen getoond en kan dus geen seizoensdynamiek worden afgeleid. Het volgende kan worden afgeleid uit de Figuur 2-15:

- Kp3495: veel variatie is te zien in het strandprofiel. In 2017 Q4 is het strandprofiel flink geërodeerd, de waterlijn is circa 25 landinwaarts verschoven en de bodem ter hoogte van de waterlijn is circa een meter gedaald. In 2018 Q1 en Q2 is het strandprofiel weer wat aangegroeid (met circa de helft van de erosie in 2017 Q4). Er is ook veel variatie te zien in het profiel van de vooroever: de 'subtidal bar' verschuift met circa 100 m richting de kust. In Q4 van 2017 verdwijnt deze 'subtidal bar' bijna geheel, om vervolgens in 2018 weer aan te groeien;
- Kp3600: grotendeels dezelfde trends als hierboven beschreven gelden ook voor deze raai. De kustwaartse verschuiving van de waterlijn en de bodemdaling zijn wat kleiner dan bij Kp3495. In dit profiel is ook een 'intertidal bar' te zien, welke in Q1 2018 zeewaarts verschuift, om vervolgend weer kustwaarts te migreren.
- Kp4800: dit profiel is veel stabieler dan Kp3495 en 3600. De 'subtidal bar' blijft op ongeveer dezelfde locatie. Lichte erosie vindt plaats in Q1 en Q2 van 2018. De waterlijn blijft op ongeveer dezelfde locatie.



Figuur 2-15: Profielen van raaien Kp3495, Kp3600, Kp4800 en Kp7000, overgenomen uit (Lako, 2019). Bij raai Kp3495 en Kp3600 is met pijlen aangegeven wat de bodemverandering is tussen 2017 Q3 en 2017 Q4.

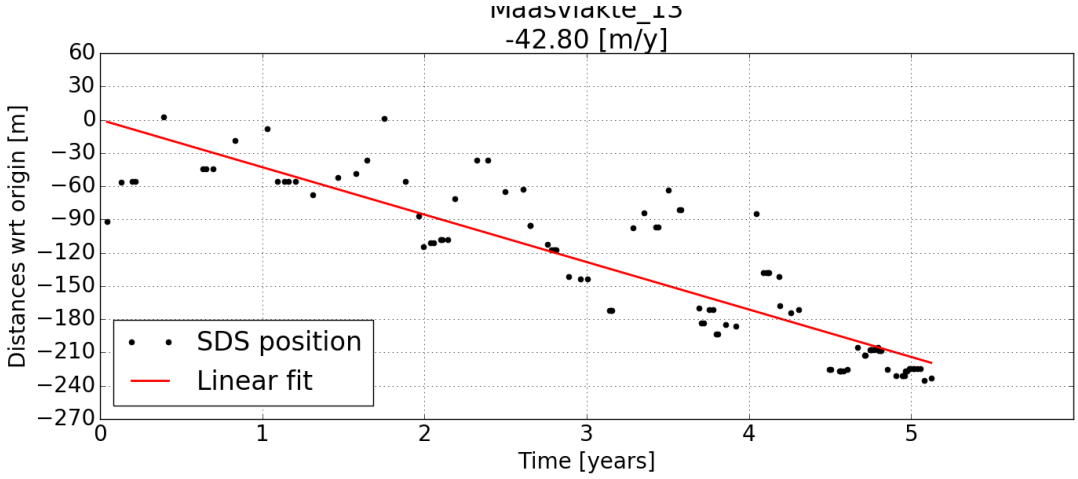
In Figuur 2-16 zijn de sedimentatie-erosie patronen getoond die optreden tussen Q4 en Q3 van 2017 (links) en tussen Q3 en Q2 van 2018 (rechts) rondom de overgang tussen de harde en zachte zeewering. Rondom de overgang treedt dicht langs de kust flinke erosie op (nummer 1), wat verder zeewaarts sedimentatie (nummer 2) en vervolgens weer erosie (nummer 3).



Figuur 2-16: Sedimentatie-erosiepatronen rondom de overgang tussen de harde en de zachte zeewering. Links: 2017 Q3 en 2017 Q4. Rechts: 2018 Q2 en 2018 Q3. Overgenomen uit (Lako, 2019).

Samenvattend: uit (Lako, 2019) kan worden afgeleid dat er rond de transitie tussen de harde en de zachte zeewering een grote seizoensdynamiek is. Binnen een jaar kan het strandprofiel flink variëren: een verschuiving van de waterlijn met circa 25 m en een daling van de bodem met circa 1 m zijn te zien. Wat verder langs de zachte zeewering (bij Kp4800) lijkt de seizoensdynamiek af te nemen.

Bij de bocht is echter weer een flinke seizoensvariatie te zien. In Figuur 2-17 is de positie van de waterlijn gedurende een aantal jaren getoond (jaar 0 = 2013). Binnen een jaar kan de kustlijnpositie met circa 100 m variëren, rondom een over het algemeen dalende trend. Uit Figuur 2-17 is af te leiden dat aan het begin en eind van het jaar (winterseizoen) de bodem lager ligt dan in het zomerseizoen. Deze seizoensvariatie is overigens een typische stranddynamiek, optredend (in verschillende mate) op alle zandige stranden van de wereld.



Figuur 2-17: Seizoensvariatie over de jaren (jaar 0 = 2013) voor een locatie in de bocht (bron: Deltares).

2.8 Samenvatting systeemanalyse

Op basis van eerdere studies en een analyse van JARKUS data rond MV-2 is hierboven een beeld geschetst van de bodemverandering van de afgelopen jaren.

MV-2 is een erosief systeem, waarbij erosie van de strandoever vooral plaatsvindt bij de overgang tussen de harde en de zachte zeewering (circa 300 m^3/m gemiddeld over de periode 2013-2016), rond de bocht (circa 300 m^3/m gemiddeld over deze periode) en bij het recreatiestrand (circa 100 m^3/m gemiddeld over deze periode). In de periode 2013 – 2016 is in totaal 0,74 miljoen m^3 geërodeerd van de strandoever, veel meer dan van de vooroever of het kustfundament.

Door deze erosie verschuift de waterlijn landinwaarts. De grootste verschuiving vindt plaats in de bocht met circa 130 m sinds 2013. Ook daalt de bodem daar met ruim 3 m. Ook binnen een jaar zijn grote variaties te zien: zo verschilt de ligging van de kustlijn[2] bij 0m NAP in de bocht binnen een jaar met ongeveer 100 m. Op de locaties van de windturbines daalt de bodem ook. Bij enkelen is dit een gestage daling, bij anderen zien we een schommeling van afwisselende erosie en sedimentatie.

Het feit dat geen eenduidige trend te ontdekken is in de bodemligging over de jaren komt waarschijnlijk door de suppleties die eens in de twee jaar worden uitgevoerd. Hierdoor wordt het volume binnen een

[2] *Positie kustlijn in getijdegebieden is niet eenduidig gedefinieerd, deze varieert tussen laag water en hoog water. positie waterlijn bij 0m NAP is een redelijke benadering van de getijgemiddelde ligging van de kustlijn*

bepaalde kustschil op een bepaald niveau terug gebracht. Deze suppleties zijn echter gericht op het handhaven van een bepaald volume, niet op van een bepaalde bodemligging. Een uitzondering hierop is de overgangszone tussen de harde en de zachte zeewering. In 2016 is in totaal 0,8 miljoen m^3 gesuppleerd op de strandoever om de grote erosie in deze zone te compenseren. Een eenduidige relatie tussen de bodemligging ter plaatse van de windturbines en de suppleties is niet te vinden. Het is zeer afhankelijk van waar het zand in het profiel en in de kustlangs locatie wordt neergelegd. Er kan dus niet vanuit gegaan worden dat het bodemniveau ter hoogte van de windturbines in stand gehouden zal worden door de tweejaarlijkse suppleties. Omdat het huidige onderhoudsbeleid niet gericht is op het in stand houden van het strand kan de bodem bij de windturbines nog verder dalen.

Kort samengevat kan uit de systeemanalyse het volgende geconcludeerd worden:

- Ter hoogte van de meeste windturbines trekt de kustlijn zich terug, het sterkst rondom de bocht (circa 130 m sinds de aanleg in 2013);
- Ter hoogte van de meeste windturbines daalt de bodem, ook dit effect is het sterkst in de bocht (circa 3 m bodemdaling sinds 2013). Bij drie windturbines vindt lichte aanzanding plaats;
- Gebaseerd op de 2019 bodem liggen twee van de windturbines onder of rondom de laagwater lijn. Vier windturbines liggen boven de hoogwater lijn. Zes windturbines liggen in de intergetijde zone. Het moet gerealiseerd worden dat tussen 2019 en 2020 opnieuw een grote variatie in bodemligging heeft kunnen optreden;
- Rond de transitie tussen de harde en zachte zeewering en rond de bocht is ook binnen een jaar flinke dynamiek te zien. Naar verwachting geldt dit langs de gehele kust van MV-2;
- De vooroever suppleties van 2014 en 2016 zijn lang niet bij alle windturbines terug te zien in een stijging van de bodemligging. De verwachting is dat dat ook in de toekomst niet het geval zal zijn, aangezien de suppleties gericht zijn op het garanderen van een bepaald volume in een schil en niet op daadwerkelijke bodemligging. De verwachting is dus dat bij sommige windturbines de bodem nog verder zal dalen.

3 Effecten op veiligheid zeewering

In dit hoofdstuk worden de effecten van de windturbines op de veiligheid van de waterkering besproken. Daarvoor wordt gestart met een algemene beschouwing van het effect van harde elementen op stranden. Vervolgens wordt het effect van de aanwezigheid van de windturbines behandeld: de overgangszone tussen de harde en zachte zeewering en de zachte zeewering ten zuiden van deze zone worden apart beschouwd. Tenslotte worden de effecten van de nieuwe duinovergangen en van de tijdelijke constructies op het strand (kraanopstelplaatsen) beschouwd.

In de analyse van de effecten van de windturbines op de veiligheid van de waterkering is aangenomen dat de veiligheid van de windturbines een klasse hoger (klasse CC2, jaarlijkse faalkans 1,4 x 10^{-6}) ligt dan de vereiste veiligheid van de waterkering (veilig bij 10^{-4} event). Dit betekent dat de kans dat de windturbine faalt tijdens de omstandigheden die voor de waterkering maatgevend zijn voldoende klein is (< 1%). De kans op niet storm- gerelateerd mechanisch falen van onderdelen van de turbine, zoals de bladen en de gondel is groter dan 10^{-6}. Dit is in detail uitgewerkt in het rapport BG8375-RHD-ZZ-XX-RP-G-0007 Beoordeling invloed op weringveiligheid.

3.1 Effecten harde elementen op zachte zeewering – algemene beschouwing

Door het aanbrengen van de windturbines worden harde objecten, weliswaar relatief klein in omvang[3], geïntroduceerd op de zachte zeewering van MV-2. Deze harde objecten kunnen een effect hebben op de morfologie, en dus de veiligheid, van de zachte zeewering. In deze paragraaf beschrijven we kwalitatief de mogelijke effecten van deze harde elementen, op basis van ervaringen met andere harde elementen op stranden. In (Svasek Hydraulics, 2019c) is een beschouwing opgenomen over het effect van bestaande Niet Waterkerende Objecten die zich op het strand bevinden. Hier wordt een korte samenvatting daarvan gegeven.

Op een aantal locaties langs de Nederlands kust worden permanente strandtenten toegestaan. Deze moeten dicht bij het duin geplaatst worden en hun vloer moet boven stormvloedniveau blijven (minimumhoogte ca 0,5m beneden maatgevend hoogwaterniveau). Bij een storm staat een strandtent aan de zuidkant van de Hondsbossche duinen midden in de brandingszone, de duinen direct achter de strandtent zijn echter niet meer of minder aangetast dan de naastgelegen duinsecties.

Op een aantal plekken langs de Nederlandse en Belgische kust liggen pieren, waarvan de fundatiepalen interacteren met het strand en de zee. Door de pier van Scheveningen zijn geen effecten in het jaarlijks langstransport te zien. Bij de Pier in Blankerberge is een salientachtige structuur te zien in de kustlijn, welke echter ook door een strekdam kan zijn veroorzaakt. Het blokkerende effect van de fundatiepalen bij pieren op de golfaanval is niet evident bij bovenstaande voorbeelden. Ook wordt bij het toetsen van de duinen en kering bij Scheveningen geen rekening gehouden met de pier.

Enkele bunkers langs de Franse kust zijn door kusterosie op het strand terecht gekomen en interacteren daar nu met kustprocessen. Uit een aantal voorbeelden blijkt dat de bunkers zelf niet leiden tot grootschalige erosie. Wel treden er kleinschalige effecten op, zoals tombolo vorming en lokale ontgrondingskuilen.

Tenslotte zijn de Argus meetmasten bij Egmond en Kijkduin beschouwd. Deze hebben over de tijd op verschillende hoogtes in het profiel gestaan, maar lijken geen invloed te hebben op de morfologische ontwikkeling. Hun fundering bestaat echter maar uit drie slanke palen.

[3] *De windturbines met een diameter van 5 m zijn relatief klein t.o.v. de golflengte van ruim 100 m*

Samenvattend: uit bovenstaande voorbeelden blijkt dat harde elementen op het strand niet leiden tot grootschalige morfologische effecten. Wel kunnen lokale effecten optreden, zoals ontgrondingskuilen of tombolo vorming.

3.2 Zachte zeewering

De veiligheid van de zachte zeewering wordt gegarandeerd in het Beheer en Instandhouding Plan (PUMA, 2019c) door de aanwezigheid van een minimum volume van zand in het profiel, zie ook paragraaf 2.3. Mogelijk kunnen de windturbines op het strand van MV-2 de golfaanval op de duinen beïnvloeden waardoor meer zand afslaat, met het risico van duindoorbraak bij een ontwerpstorm. Het gegarandeerde minimum zandvolume kan dan ontoereikend worden. Om dit risico te onderzoeken zijn afslagberekeningen uitgevoerd. Het 1-dimensionaal model DurosTA dat standaard voor dit type berekeningen wordt gebruikt is echter niet geschikt om het effect van harde elementen op het strand te bepalen. Om deze reden is gekozen om de afslagberekeningen uit te voeren met het 2-dimensionale model XBeach dat wel in staat is met relatief kleine obstakels te rekenen en daarmee het meest geschikte rekeninstrument is voor een dergelijke effectbepaling. Deze keuze volgt de aanbevelingen van de experts gemaakt in de expertmeeting op 18 maart 2019 (Svasek Hydraulics, 2019a).

(Svasek Hydraulics, 2020a) heeft deze berekeningen in opdracht van Eneco uitgevoerd. De windturbines zijn opgenomen in een fijnmazig 3x3 m rooster als harde elementen met een diameter van 10 m. Aangezien de windturbines in werkelijkheid een kleinere diameter hebben, zijn de resultaten van de afslagberekeningen conservatief.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor twee ontwerpstormen met een overschrijdingsfrequentie van 1/10.000 per jaar. Storm A is representatief voor maatgevende condities voor de noordkant van MV-2, en storm B is representatief voor de zuidkant. Opgemerkt wordt dat er veel meer 1/10.000 stormen mogelijk zijn, uit verschillende richtingen en met verschillende golfhoogte. De gekozen twee stormen worden echter als voldoende representatief beschouwd.

Tabel 3-1: 1/10.000 jaar randvoorwaarden.

	Hs [m]	Tp [s]	Golfrichting [°N]	Waterstand [m+NAP]
Storm A	8,1	13,5	317	4,95
Storm B	7,6	13,5	306	4,95

De bodemhoogte van MV-2 fluctueert sterk door de jaren heen, daarom zijn deze berekeningen uitgevoerd met twee bodems: de ontwerpbodem en de meest recente bodem uit 2019. Hiermee kan naar verwachting de bandbreedte van effecten bij verschillende bodemliggingen goed worden beschreven en zijn de berekende effecten van windturbines voldoende betrouwbaar voor de beoordeling van de veiligheid.

De resultaten zijn samengevat in Tabel 3-1. De berekeningen laten zien:

- een toename van de duinafslag van maximaal 12 m^3/m tussen de windturbines ZZ-02 en ZZ-03 en tussen ZZ-03 en ZZ-04 (afstand van ca 900m);
- een grotere toename van de duinafslag ten zuiden van de windturbine ZZ-12 van ca. 20 m^3/m over een afstand van 1 km.

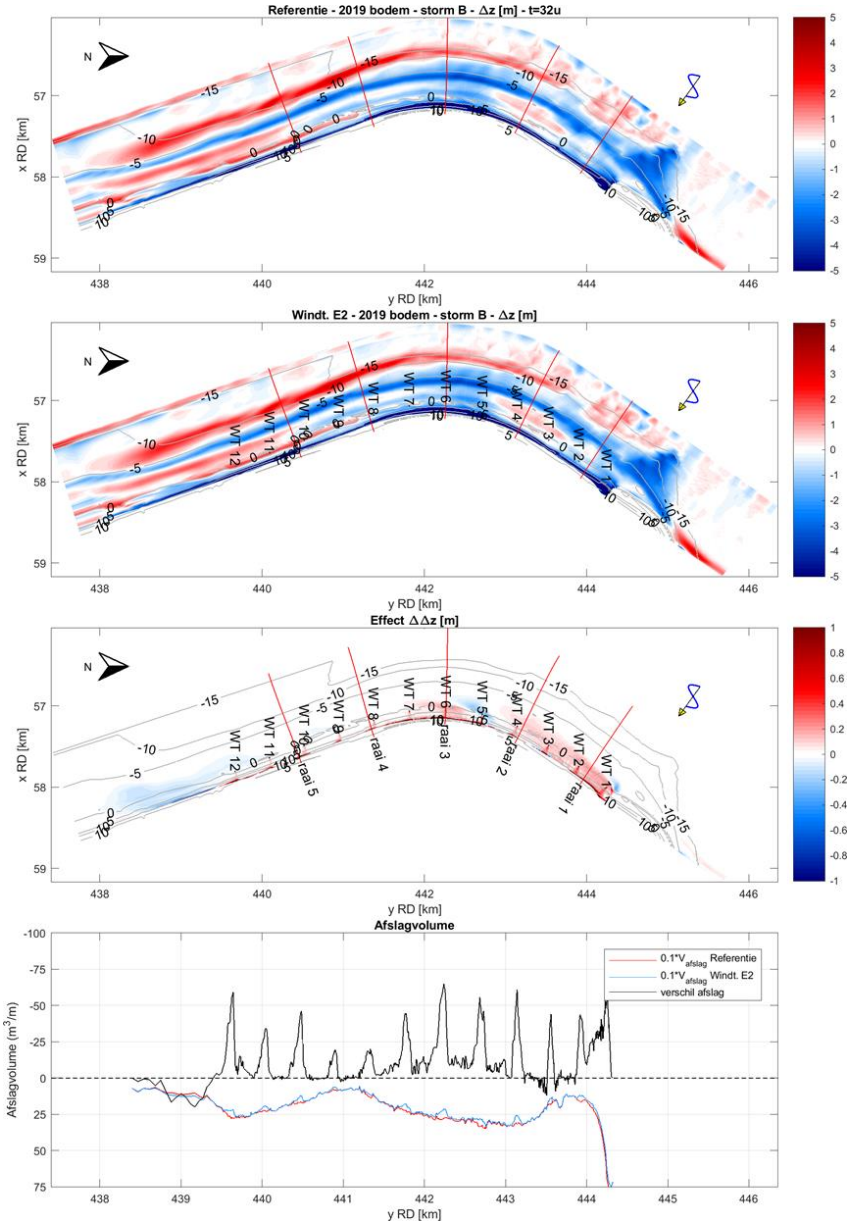
Dit is geïllustreerd in Figuur 3-1. In deze figuur is de erosie/sedimentatie van de referentiesituatie (geen windturbines) gegeven (bovenste figuur), eenzelfde figuur maar met windturbines (midden boven), een verschilfiguur tussen de eindsituaties van beide scenario's (midden onder) en een afslagvolume plot (onderste). Deze laatste geeft per scenario het afslagvolume boven rekenpeil (in al deze gevallen 4,95 m+NAP, de ontwerprandvoorwaarde van MV-2), en het verschil daartussen. Een negatief verschil betekent dat er minder afslag is in de situatie met windturbines.

Tabel 3-1. Maximum extra afslag voor elk scenario, verdeeld in de gebieden tussen en ten zuiden van de turbines; bron: (Svasek Hydraulics, 2020a)

	Maximum extra afslag tussen turbines	Maximum extra afslag ten zuiden van turbines
2019 bodem storm A na 32 uur	9,5 m^3/m	NVT, want niet maatgevend*)
2019 bodem storm B na 32 uur	12,1 m^3/m	19,9 m^3/m
Ontwerpbodem storm A na 16 uur	9,7 m^3/m	NVT, want niet maatgevend*)
Ontwerpbodem storm B na 16 uur	8,5 m^3/m	12,3 m^3/m

*) *Storm A is niet representatief voor maatgevende condities voor de zuidkant van MV2, waar de extra afslag ten zuiden van de turbines plaatsvindt*

(Svasek Hydraulics, 2020a) adviseert om het eerder afgegeven advies (Svasek Hydraulics, 2019b) aan te houden. Dit advies houdt in dat er uitgegaan dient te worden van 40 m^3/m extra toeslag boven rekenpeil, waarbij het berekende maximum effect van 19,9 m^3/m wordt verdubbeld om voor modelonzekerheid te compenseren. In eerste instantie werd in 2019 door Svasek onderscheid in locatie gemaakt, maar uiteindelijk is in overleg met Rijkswaterstaat het advies gegeven de toeslag over de gehele zachte wering toe te passen. Dit kan worden gegarandeerd door het bestaande ontwerpprofiel naar voren te schuiven, of het te onderhouden profiel aan te passen aan het profiel zoals dat over de afgelopen jaren is ontstaan, bijvoorbeeld door het zand bovenop het duin te garanderen. Dit is verder uitgewerkt in paragraaf 3.3.



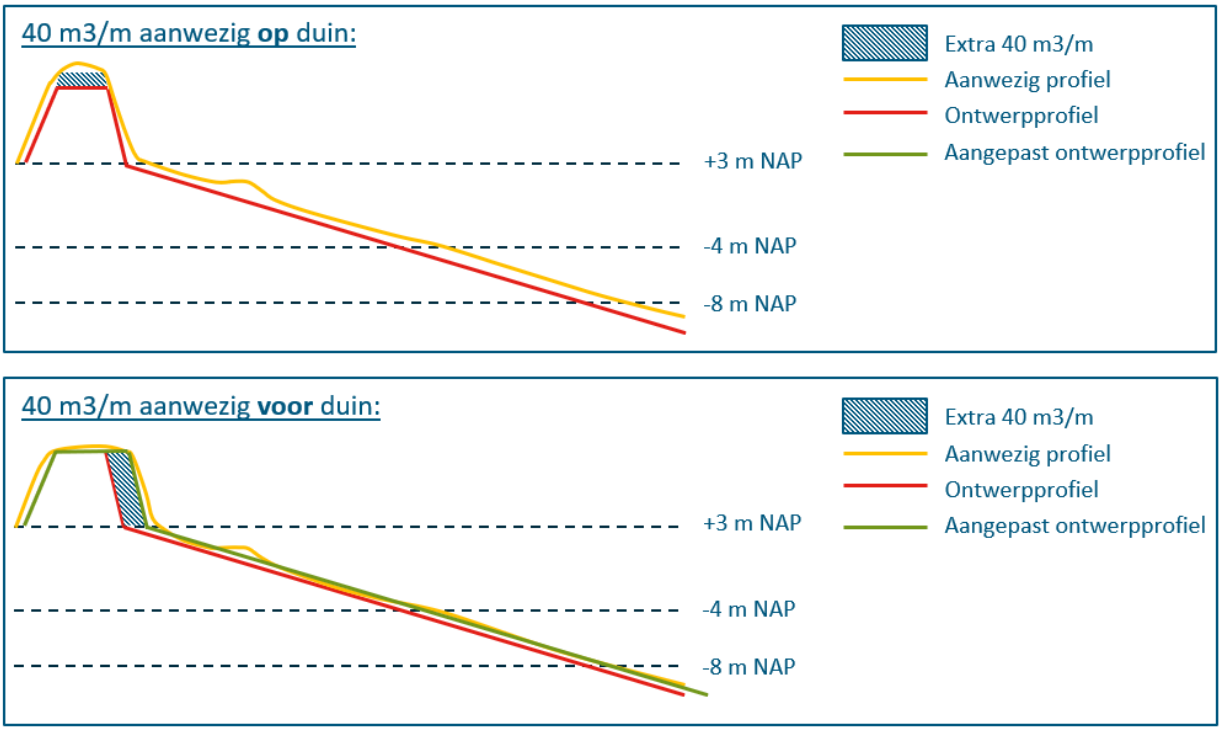
Figuur 3-1. Voorbeeld resultaten van afslagberekening: Effect bij storm B, op basis van 2019 bodem; erosie/sedimentatie in de referentiesituatie (bovenste figuur), erosie/sedimentatie met windturbines (midden boven), een verschilfiguur tussen de eindsituaties van beide scenario's (midden onder) en een afslagvolume plot (figuur onderaan)

3.3 Controle aanwezigheid extra volume zand in schillen

In deze paragraaf wordt nagegaan of er in de 2019 metingen (uitgaande van de keuring (PUMA, 2019a)) voldoende volume in de afzonderlijke schillen aanwezig is indien de toeslag van 40 m^3/m op het duin wordt toegepast. Hierin zijn twee scenario's onderscheiden conform aanbeveling van Rijkswaterstaat (Memo "Reactie RWS WNZ afdeling Vergunningverlening op PvA waterveiligheidsstudies Windpark Maasvlakte II" van 16 april 2020):

1. Toeslag van 40 m^3/m is aanwezig op het duin (zie Figuur 3-2 boven): het ontwerpvolume in de duinschil neemt toe met 40 m^3/m, de ontwerpvolumes in de overige schillen blijven gelijk;
2. Toeslag van 40 m^3/m is aanwezig voor het duinprofiel (zie Figuur 3-2 onder): in dit geval verschuift het ontwerpprofiel zeewaarts. Het ontwerpvolume in de duinschil neemt toe met 40

m^3/m, maar ook de ontwerpvolumes in de strand- en vooroeverschil veranderen als gevolg van de verschuiving van het ontwerpprofiel.



Figuur 3-2: Schematisatie van de twee scenario's voor het toepassen van de toeslag in het duin.

In Figuur 3-3 is het huidig ontwerpvolume getoond, voor alle raaien langs MV-2. In beide scenario's neemt dit in het 'nieuwe' ontwerpvolume toe met 40 m^3/m. In Figuur 3-4 is het aanwezige volume bij de 2019 keuring getoond, net als het overschot in de verschillende schillen (aanwezig – ontwerp). Te zien is dat bij alle raaien het overschot in de duinschil groter is dan 40 m^3/m. Op basis van beschikbare data (figuren in (PUMA, 2019a)) is niet exact vast te stellen in welke raaien het benodigde overschot van 40 m^3/m op of voor het duin aanwezig is, duidelijk is echter dat niet bij alle raaien het volume van 40 m^3/m op het duin gegarandeerd kan worden.

Daarom is ook gecontroleerd of er voldoende volume aanwezig is in het geval van scenario 2. Daarvoor zijn de nieuwe ontwerpvolumes van de strand- en vooroeverschil als volgt bepaald:

- De verschuiving van het profiel is bepaald door het extra ontwerpvolume in het duin (40 m^3/m) te delen door de minimale hoogte van het ontwerpduinprofiel langs MV-2. Dit is gelijk aan 7 m en treedt op bij raai BC7000 tot raai BC10590. De zeewaartse verschuiving van het profiel is hiermee gelijk aan 5,7 m;
- Aangenomen wordt dat het ontwerpprofiel van de strand- en vooroeverschil met dezelfde afstand verschuift. Dit houdt in dat het ontwerpvolume van de strandschil toe moet nemen met 40 m^3/m (5,7 m maal 7 m, de hoogte van de strandschil) en het volume van de vooroeverschil met 23 m^3/m (5,7 maal 4, de hoogte van de vooroeverschil).

Het 'nieuwe' ontwerpvolume van de strand- en vooroeverschil is te zien in Figuur 3-3. Het overschot ten opzichte van dit nieuwe ontwerpvolume is getoond in Figuur 3-4. Bij een aantal raaien treedt een tekort op de strandschil op (raai BC4800, BC5000, BC9600, BC9800 en BC10000). Echter, het overschot in het

duin is voldoende groot om voor deze tekorten te compenseren. Het overschot in de verschillende schillen na compensatie vanuit het duin naar de strandschil toe (alleen toegepast bij de hierboven genoemde raaien) is te zien in Figuur 3-5. Het overschot in het duin is dan afgenomen, maar bij alle raaien nog steeds groter dan nul.

Concluderend: er is voldoende volume in de verschillende schillen aanwezig om het extra ontwerpvolume in het duin van 40 m^3/m op te vangen. Dit geldt ook als dit extra volume niet op het duin aanwezig is, maar ervoor, waardoor de ontwerpprofielen en daardoor de ontwerpvolumes van de strand- en vooroeverschil naar voren komen.

Deze berekening heeft een beperkte nauwkeurigheid en dient bij voorkeur te worden gecontroleerd met de rekentools van PUMA. Tevens wordt opgemerkt dat in het huidige BIP geen onderscheid wordt gemaakt tussen volume op het duin en vóór de duin.

Raai (BC)	Huidig ontwerpvolume [m3/m]			Ontwerpvolume [m3/m]		
	Duin	*Strand*	*Vooroever*	*Duin*	*Strand*	*Vooroever*
3495						
3600						
3800	567	1419	1985	607	1459	2008
4000	472	1365	1955	512	1405	1978
4200	430	1340	1940	470	1380	1963
4400	430	1340	1940	470	1380	1963
4600	441	1349	1946	481	1389	1969
4800	441	1350	1946	481	1390	1969
5000	441	1349	1946	481	1389	1969
5200	441	1349	1946	481	1389	1969
5400	441	1349	1946	481	1389	1969
5600	429	1340	1940	469	1380	1963
5800	429	1340	1940	469	1380	1963
6000	429	1340	1940	469	1380	1963
6200	409	1323	1931	449	1363	1954
6400	409	1323	1931	449	1363	1954
6600	423	1342	1942	463	1382	1965
6800	380	1321	1930	420	1361	1953
7000	339	1300	1918	379	1340	1941
7200	339	1300	1918	379	1340	1941
7400	339	1300	1918	379	1340	1941
7600	330	1297	1916	370	1337	1939
7800	330	1297	1916	370	1337	1939
8000	330	1297	1916	370	1337	1939
8200	304	1272	1902	344	1312	1925
8400	304	1272	1902	344	1312	1925
8600	218	1271	1912	258	1311	1935
8800	212	1334	1955	252	1374	1978
9000	207	1398	1998	247	1438	2021
9200	207	1467	2044	247	1507	2067
9400	207	1537	2090	247	1577	2113
9600	204	1605	2138	244	1645	2161
9800	204	1674	2184	244	1714	2207
10000	204	1739	2228	244	1779	2251
10200_250	208	1668	2220	248	1708	2243
10200_228	220	1475	2085	260	1515	2108
10200_205	208	1352	1967	248	1392	1990
10400	208	1185	1876	248	1225	1899
10590	208	1175	1848	248	1215	1871

Figuur 3-3: Huidig ontwerpvolume volgens het BIP in de duin-, strand- en vooroeverschil (links) en nieuw ontwerpvolume in de duin-, strand- en oeverschil (rechts).

Raai (BC)	Volume 2019 [m3/m]			Reservevolume [m3/m]		
	Duin	*Strand*	*Vooroever*	*Duin*	*Strand*	*Vooroever*
3495						
3600						
3800	756	1662	2180	149	203	172
4000	632	1497	2110	120	92	132
4200	631	1743	2248	161	363	285
4400	672	1535	2265	202	155	302
4600	699	1426	2119	218	37	150
4800	624	1291	2054	143	-99	85
5000	623	1382	2084	142	-7	115
5200	644	1455	2089	163	66	120
5400	683	1575	2153	202	186	184
5600	710	1648	2156	241	268	193
5800	739	1606	2152	270	226	189
6000	736	1653	2111	267	273	148
6200	723	1656	2083	274	293	129
6400	753	1675	2130	304	312	176
6600	750	1774	2156	287	392	191
6800	665	1758	2167	245	397	214
7000	577	1810	2167	198	470	226
7200	515	1792	2167	136	452	226
7400	522	1678	2134	143	338	193
7600	516	1598	2066	146	261	127
7800	489	1477	2057	119	140	118
8000	477	1428	2067	107	91	128
8200	470	1398	2026	126	86	101
8400	521	1352	2089	177	40	164
8600	539	1484	2132	281	173	197
8800	601	1426	2126	349	52	148
9000	516	1504	2114	269	66	93
9200	500	1579	2103	253	72	36
9400	507	1607	2117	260	30	4
9600	521	1608	2227	277	-37	66
9800	479	1627	2382	235	-87	175
10000	549	1708	2652	305	-71	401
10200_250	472	2049	3052	224	341	809
10200_228	469	2614	4339	209	1099	2231
10200_205	512	4150	4977	264	2758	2987
10400	535	5453	4216	287	4228	2317
10590	351	3456	3380	103	2241	1509

Figuur 3-4: Aanwezig volume in de duin-, strand- en vooroeverschil bij de keuring in 2019 (links) en reservevolume in de duin-, strand- en oeverschil ten opzichte van de nieuwe ontwerpvolumes zoals getoond in Figuur 3-3.

Raai (BC)	Reservevolume incl compensatie [m3/m]		
	Duin	*Strand*	*Vooroever*
3495			
3600			
3800	149	203	172
4000	120	92	132
4200	161	363	285
4400	202	155	302
4600	218	37	150
4800	44	0	85
5000	135	0	115
5200	163	66	120
5400	202	186	184
5600	241	268	193
5800	270	226	189
6000	267	273	148
6200	274	293	129
6400	304	312	176
6600	287	392	191
6800	245	397	214
7000	198	470	226
7200	136	452	226
7400	143	338	193
7600	146	261	127
7800	119	140	118
8000	107	91	128
8200	126	86	101
8400	177	40	164
8600	281	173	197
8800	349	52	148
9000	269	66	93
9200	253	72	36
9400	260	30	4
9600	240	0	66
9800	148	0	175
10000	234	0	401
10200_250	224	341	809
10200_228	209	1099	2231
10200_205	264	2758	2987
10400	287	4228	2317
10590	103	2241	1509

Figuur 3-5: Reservevolume in de duin-, strand- en vooroeverschil na compensatie vanuit de duinschil naar de strandschil toe.

3.4 Overgangszone harde – zachte zeewering

De overgangszone tussen de harde en zachte zeewering ligt ten noorden van de raai BC-3700 (zie Figuur 3-8). Het toetsingsmechanisme in deze zone is anders dan bij de rest van de zachte zeewering: er wordt niet getoetst op aanwezig volume, maar op duinafslag. De eisen van Rijkswaterstaat met betrekking tot de windturbine in deze zone zijn als volgt geformuleerd (mail van Christiaan Jacobs (RWS-GPO) van 25.03.2020):

1. Het invloedsgebied van de windmolen mag niet samenvallen met het invloedsgebied van de overgangszone. Dat betekent dat het invloedsgebied volledig ten zuiden van raai BC-3700 gelegen moet zijn;
2. Indien het invloedsgebied wél samenvalt met het invloedsgebied van de overgangszone dient aangetoond te worden dat de effecten geen negatieve werking hebben op de volumes zoals genoemd in de keuringsmethodiek (puma-p-mon-mi06 en puma-p-mon-mi07);
3. Indien er wél negatieve effecten zijn dient een compensatiemaatregel te worden ontworpen tot het niveau van een uitvoeringsontwerp, inclusief een voorstel tot wijziging van de keuringsmethodiek.

De windmolen ZZ-01 ligt ten noorden van de raai BC-3700 (Figuur 3-6), daarmee valt het invloedsgebied van de windturbine binnen het invloedsgebied van de overgangszone. In deze sectie wordt het effect van deze windmolen op de veiligheid van de overgangszone geanalyseerd. Eerst wordt de huidige situatie besproken, vervolgens wordt een conceptuele beschouwing gegeven van het mogelijke effect van deze windmolen op de morfologie van deze zone, en een onderbouwing daarvan met modelberekeningen.

Figuur 3-6. Locaties van de windturbines op de zachte zeewering (rode punten) en het begin van de overgangszone (rode lijn).

Aan de noordkant van de overgangszone wordt het strand beschermd tegen golfaanval door een blokkendam. Ten zuiden van de blokkendam begint het onbeschermde strand. Ten zuiden van de blokkendam treedt stranderosie op. Golven uit de noordwestelijke richting breken op het strand en zorgen voor een zuidwaarts gericht langstransport van sediment. De zuidwaartse aanvoer van sediment langs de blokkendam is heel beperkt, de stroming is sedimentarm terwijl lokaal voorbij het einde van de blokkendam een grote transportcapaciteit ontstaat. Het gebrek aan evenwicht tussen sedimentaanbod en transportcapaciteit leidt hier tot grote erosie (zie Figuur 2-8). Dit is een klassiek voorbeeld van erosie die te zien is bij alle hard-zacht overgangen. Ook bij de zuidwestelijke stormen ontstaat bij het einde van de blokkendam veel turbulentie door de brekende golven die het sediment naar de zee afvoeren. Het strand is hier vrij smal. Daardoor bestaat een risico van duindoorbraak. Deze zone wordt door RWS dan ook in stand gehouden middels suppleties, zie voorbeeld in Figuur 3-7 en Figuur 3-8.

Figuur 3-7. De overgangszone bij laag water, in mei 2018 en in september 2019 (na suppletie)

Figuur 3-8: Overgangszone bij het einde van de blokkendam (links) en direct ten zuiden daarvan, nabij locatie windturbine ZZ-01. In september 2019 was PUMA bezig met zandsuppletie en daarmee verbreding van het duin. De situatie op de foto is van 22 mei 2020 vlak voor hoogwater.

De windturbine ZZ-01 ligt 120 m ten zuiden van het einde van de blokkendam, en ca 10 m vanaf de duinvoet. De bodemhoogte varieert tussen 1.3 m en 3 m boven NAP, dat wil zeggen dat de windturbine boven de hoogwaterlijn ligt. Dit betekent dat deze windturbine in normale condities op het droge strand

staat en geen invloed heeft op het langstransport van sediment. Tijdens een storm kunnen golven deze windturbine wel bereiken. De windturbine is een slanke ronde buis (monopaal) met een diameter van 5 m. De afstand vanaf de blokkendam is voldoende groot om deze windturbine buiten de bovengenoemde turbulentiezone te houden. Golven die de windturbine naderen, voor zover nog niet gebroken op het voorland, zullen om de windturbine heen buigen waardoor erachter een zandruggetje (een salient of een tombolo) zich kan ontwikkelen. Hierdoor zal het strand ernaast iets lager komen te liggen. Dit gedrag is bekend van de harde constructies op het strand, zie paragraaf 3.1. De verhouding tussen de buisdiameter en de golflengte is in de orde 1/20 (paaldiameter van 5m en een golflengte van 100-150m), voldoende klein om geen significante invloed te hebben op het golfveld. De ontgrondingskuil die zich voor de windturbine kan ontwikkelen (zie hoofdstuk 7) zal geen significante invloed hebben op de invallende golven, ook hier is de verhouding van de ontgrondingskuil diameter tot de golflengte te klein om effect op de golven te hebben.. Op grond van deze conceptuele beschouwing lijkt het effect van de windturbine op erosie van het strand en duinen zeer beperkt.

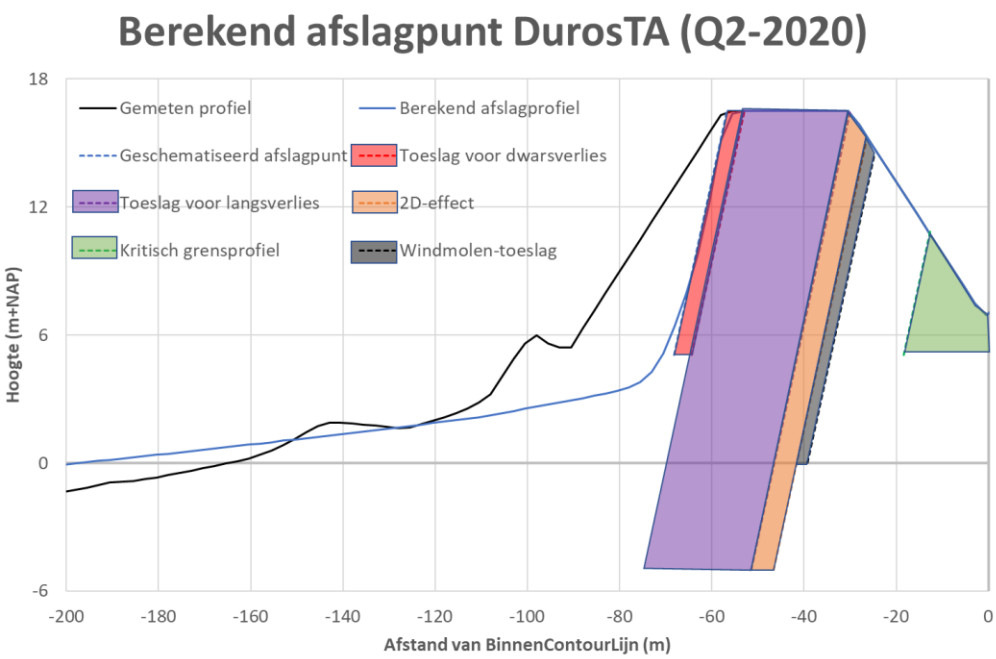
De keuringsmethodiek van PUMA voor de overgangszone is gebaseerd op modellen DurosTA en Unibest-LT. Deze methodiek is niet geschikt om de effecten van relatief kleine obstakels zoals windturbines in beeld te brengen. Als een gelijkwaardig alternatief is daarom gekozen om afslagberekeningen met XBeach model uit te voeren, net als bij de effectbepaling van de overige windturbines op de zachte zeewering (zie paragraaf 3.2).

Het effect van de aanwezigheid van de windturbine ZZ-01 tijdens de ontwerp (1/10.000 per jaar) storm is berekend met XBeach door (Svasek Hydraulics, 2020a). De berekeningen laten voor deze locatie geen negatief effect van de windturbine zien. De berekening suggereert eerder enige mate van beschermende werking (minder duinafslag, volgens Figuur 3-1 tussen 20 en 50 m^3/m, dit resultaat is echter te conservatief zoals in paragraaf 3.2 beschreven).

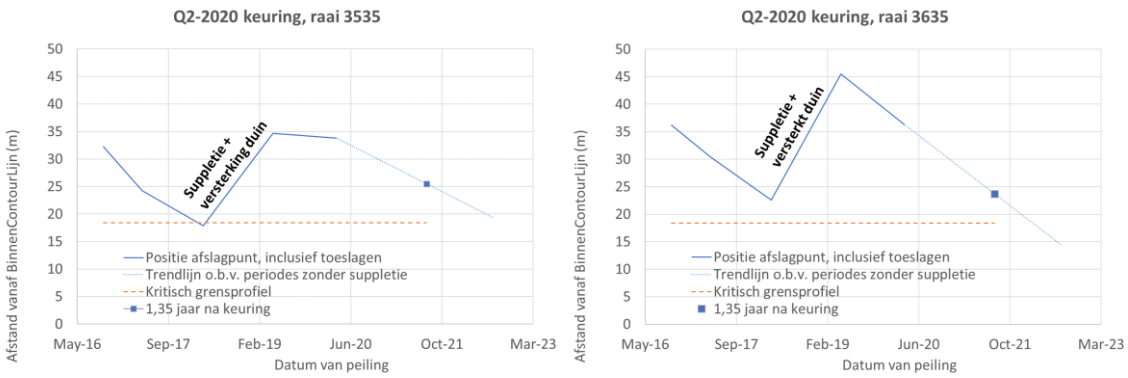
Op grond van het vóór de tenderfase overeengekomen advies adviseert (Svasek Hydraulics, 2020a) ook voor deze zone om een toeslag van 40 m^3/m op het ontwerpprofiel aan te brengen. In de berekeningen van Svasek voor deze zone is weliswaar geen negatief effect van de windmolens aangetoond, echter gelet op onzekerheden in de berekeningen (o.a. dat er met slechts twee stormen is gerekend) nemen we dit advies over. Rijkswaterstaat heeft laten weten deze toeslag van 40 m^3/m als voldoende zekerheid voor het effect van de windturbines te beschouwen.

De standzekerheid van de waterkering in de situatie met de windturbines (effect van de windturbines verwerkt als een toeslag van 40 m^3/m) is bepaald in (Arcadis, 2020) door middel van berekening met het model DurosTA conform de keuringsmethodiek beschreven in (PUMA, 2019d). De berekening is geïllustreerd in Figuur 3-9. Als gevolg van de nieuwe toeslag van 40 m^3/m schuiven de afslagpunten ca. 3m zeewaarts op.

Uit de berekening blijkt dat het afslagpunt voor de keuringsraaien Kp3535 en Kp3635 na 1,35 jaar (blauw punt in Figuur 3-10) ook voor een situatie inclusief windmolens nog zeewaarts liggen van het kritieke grensprofiel. Dit houdt in dat er geen suppletie ingepland zou hoeven te worden om nog 1,35 jaar vooruit te komen.

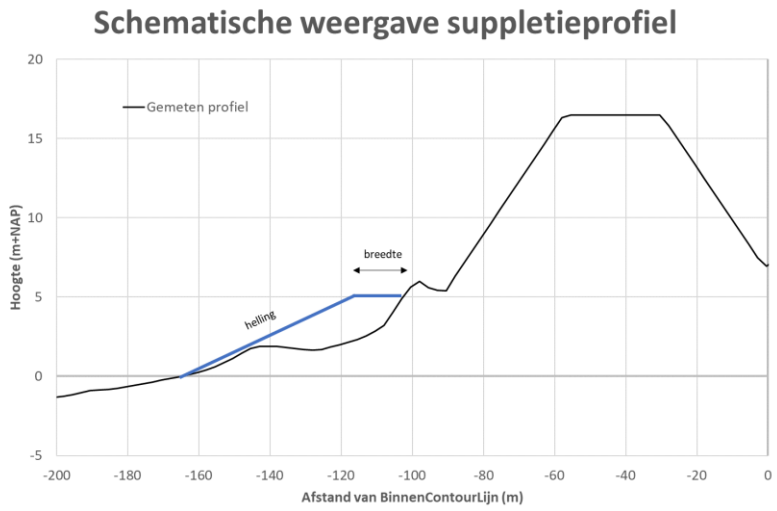


Figuur 3-9: Beschouwing standzekerheid voor profiel Kp3535, Q2-2020, inclusief toeslag t.b.v. windmolens



Figuur 3-10: Trendanalyse afslagpunt (inclusief toeslagen) voor raai Kp3535 (links) en Kp3635 (rechts), inclusief toeslag t.b.v. windmolens

Volgens het BIP (PUMA, 2019c) dient bij de suppleties een buffer te worden aangehouden waarmee tenminste 2,35 jaar standzekerheid wordt gegarandeerd. Uit de analyse van (Arcadis, 2020) blijkt dat er in 2020 - om deze buffer te garanderen - een extra suppletie van ca. 35 m³/m zonder windturbines nodig is. Wanneer er rekening wordt gehouden met het effect van de windturbines, neemt het suppletievolume toe met 65 m³/m tot 100 m³/m. Gerekend over een afstand van 200 m betekent dit een extra suppletie van orde 65 m³/m x 200 m = 13.000 m³ zand om het effect van de windturbines te compenseren. Dit zand kan worden aangebracht in de vorm van een zandbanket, zie Figuur 3-11.



Figuur 3-11: Schematisatie van ontwerpsuppletie

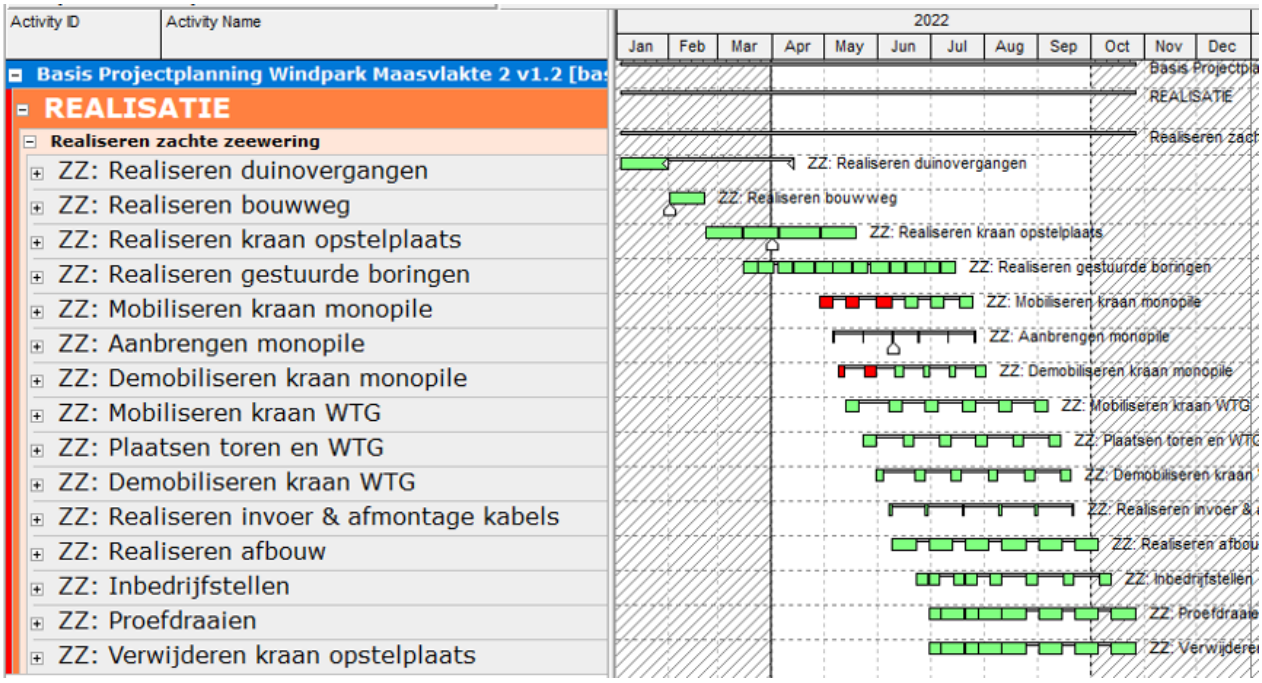
Deze berekening toont aan dat met deze extra suppletie van 13.000 m³ de zeewering standzeker is voor het komende 2,35 jaar. Indien het effect van de windmolens later in de keuring wordt ingebracht (de bouw van het windpark is gepland in 2022) zal er een vergelijkbaar volume van extra zand aangevuld dienen te worden. In de volgende keuringen zal steeds rekening moeten worden gehouden met de extra 40 m³/m toeslag in de overgangszone.

Dit betreft een eenmalige suppletie van dit extra zandvolume. (Arcadis, 2020) stelt dat in de jaren erna wordt verwacht dat de 3 m zeewaarts verschoven kustlijn niet zal leiden tot een merkbare verhoging van de onderhoudsbehoefte (een verschuiving van 3 meter kan als nihil worden gezien ten opzichte van de dimensies van het grote systeem). Daarbij dient te worden opgemerkt dat deze 13.000 m³ zand in perspectief dient te worden gezien van de 30.000 m³ nieuw zand dat door Eneco naar MV-2 wordt gebracht ten behoeve van de bouwwerkzaamheden; dit zand zal immers op het strand achterblijven en dienen als aanvulling op het sedimentaire systeem,

(Arcadis, 2020) heeft onderzocht in hoeverre het extra 40 m³/m zand op een andere manier ingebracht zou kunnen worden. De conclusie is dat er binnen de huidige afspraken tussen Havenbedrijf Rotterdam en Rijkswaterstaat geen ruimte aanwezig is om dit zand in het duin aan te brengen. Het aanbrengen van een zandbanket op het strand is wel toegestaan.

3.5 Bouwen tijdens stormseizoen

Het efficiënt en snel bouwen van het windpark is alleen mogelijk indien sommige bouwwerkzaamheden gedurende enkele maanden tijdens het stormseizoen worden uitgevoerd. Dit betreft aanleg van de duinovergangen en kraanopstelplaatsen voor de windturbines in het voorjaar. Tijdens het najaar en winter zullen de windturbines worden afgebouwd nadat de tijdelijke constructies zijn opgeruimd, zie Figuur 3-12.



Figuur 3-12: Planning bouwwerkzaamheden op hoofdlijnen, grijs gearceerd het stormseizoen

Rijkswaterstaat heeft in notitie Watervergunning ZZ Windpark MV2 (Rijkswaterstaat, 2019a) aangegeven dat er tijdens het stormseizoen geheid en ontgraven mag worden. Werken tijdens het stormseizoen moeten aantoonbaar geen invloed hebben. Indien onstuimig weer op komst is moet het strand schoon zijn (dus geen machines, rijplaten, palenvoorraad, enz. meer op het strand). Hiervan kan worden afgeweken indien kan worden aangetoond dat de aanwezigheid van deze objecten geen effect heeft op de weringveiligheid. Dit is bevestigd in de mail van Wim van Driesten van 7 juli 2020. De aanvullende toelichting van Rijkswaterstaat luidt:

"Heien en graven tijdens het stormseizoen is voor de ZZ toegestaan, mits aangetoond wordt dit geen negatief effect heeft op de weringveiligheid. Voor graven geldt dat er meestal geen bedreiging is voor de waterveiligheid als er geen materiaal wordt afgevoerd ("in hetzelfde profiel blijft"). Voor heien kan dat anders zijn: een slanke heipaal zal nauwelijks effect hebben, maar een lange doorgaande damwand kan wél veel effect geven. Vóór (zeewaarts van) een damwand kan bijvoorbeeld extra erosie optreden door reflectie. Extra erosie op het strand leidt bij duinafslag ook tot extra erosie op het duin, waardoor het afslagpunt landwaarts verschuift. Het hebben van damwanden op het strand kan daarom alleen als er kan worden aangetoond dat de extra erosie niet leidt tot te grote duinafslag. Daarbij mag er rekening worden gehouden met het momentane profiel. Wordt er bijvoorbeeld extra zand aangebracht op het strand voor kraanopstelplaatsen, dan kan dit worden meegenomen in de veiligheidsbeschouwing. Dit moet worden aangetoond middels een berekening. Voor groot/zwaar materieel geldt dit eveneens. Ook een grote kraan kan (net als bijvoorbeeld een bunker) leiden tot extra erosie, waarvoor dan ook extra zand aanwezig moet zijn."

In de volgende paragrafen wordt ingegaan op de effecten van deze tijdelijke werkzaamheden op de veiligheid van de waterkering, risico's en mitigerende maatregelen.

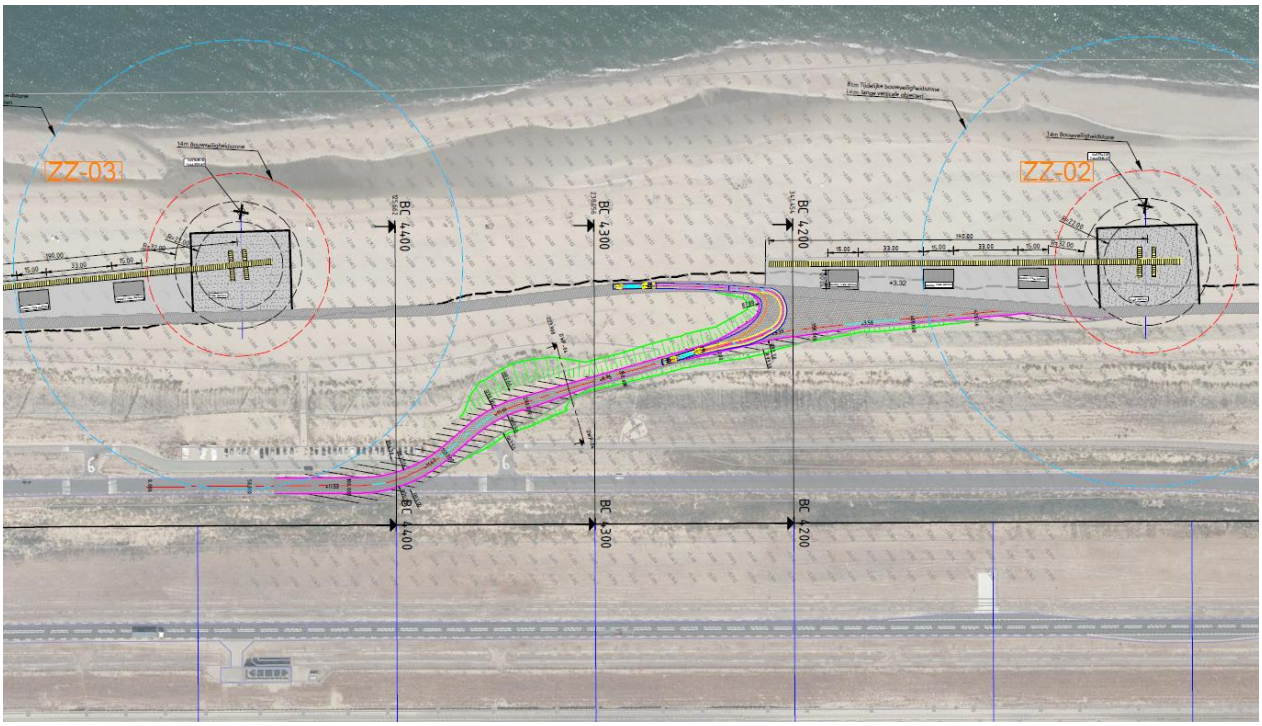
3.5.1 Duinovergangen

Voor transport van materiaal zullen vier duinovergangen gerealiseerd worden: tussen ZZ-02 en ZZ-03, ter hoogte van ZZ-05, tussen ZZ-07 en ZZ-08 en tussen ZZ-11 en ZZ-12. Deze duinovergangen zullen worden uitgevoerd naar voorbeeld van de reeds aanwezige duinovergang bij P6 (zie Figuur 3-13). De volgende eisen relevant voor de waterveiligheid zijn gesteld aan de duinovergangen:

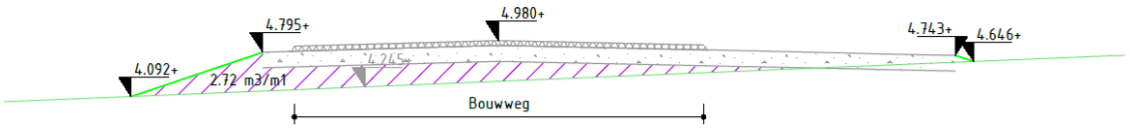
- Het bestaande duinprofiel mag niet dusdanig worden verlaagd of versmald dat de waterveiligheidsfunctie in het geding komt of dat de aanwezige zandbuffers geminimaliseerd/verlaagd worden. De exploitant dient te bepalen op basis van zijn ontwerp welke compenserende maatregelen dienen te worden genomen om de waterveiligheid te waarborgen. Dit ontwerp behoeft voorafgaand aan de werkzaamheden instemming van de beheerder.
- Op- en afritten worden geconstrueerd met zand dat betrokken wordt van buiten het fundament van de zeewering of andere materialen. Hierbij geldt dat het zand van minimaal dezelfde kwaliteit moet zijn als het zand van de zeewering (d50 ≥ 330 µm).
- Buiten het stormseizoen mogen de duinen lokaal verlaagd worden. De exploitant bepaalt de effecten en eventueel benodigde compenserende maatregelen van deze duinverlaging waarbij de waterveiligheid te allen tijde gewaarborgd wordt.

Figuur 3-13: Strand nabij bestaande duinovergang en locatie windturbine ZZ-06 op 22 mei 2020 vlak voor hoogwater. Voor het duin ligt een voorduin van zo'n 20 m breed en daarna een breed strand.

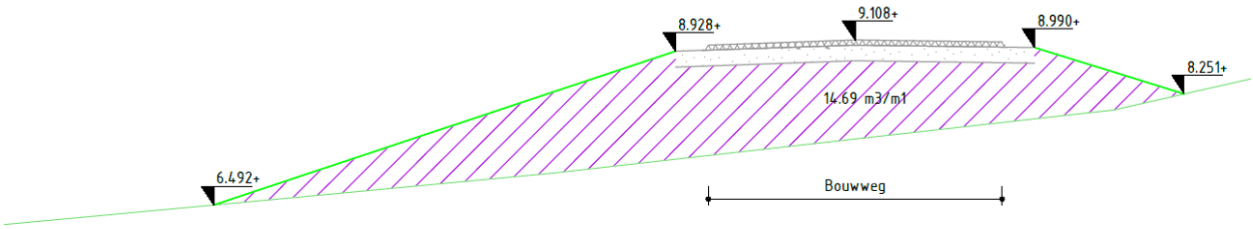
In deze paragraaf wordt aangetoond dat er geen effecten op de veiligheid van de waterkering ontstaan door het uitvoeren van werkzaamheden tijdens het stormseizoen.



Figuur 3-14: Voorbeeld van de duinovergang tussen ZZ-02 en ZZ-03.



Dwarsprofiel BC 4200
Schaal 1:50

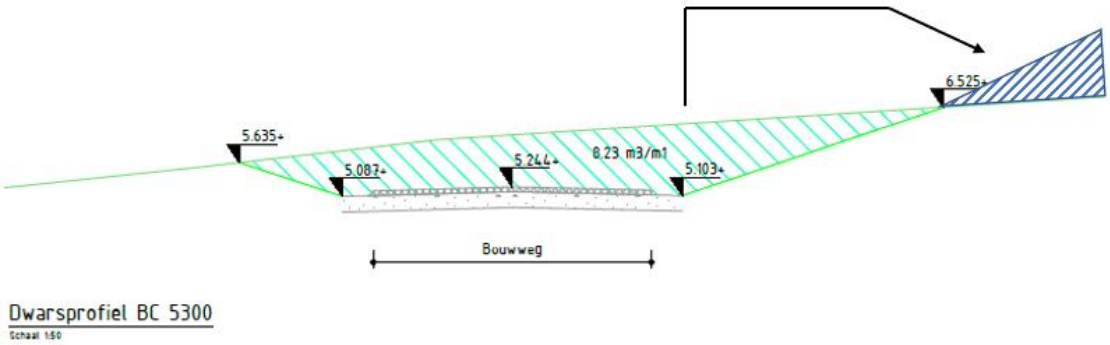


Dwarsprofiel BC 4300
Schaal 1:50

Figuur 3-15: Dwarsdoorsnedes op de raaien BC-4200, BC-4300 en BC-4400 van de duinovergang tussen ZZ-02 en ZZ-03. Volume wat wordt toegevoegd is paars gearceerd, volume wat wordt afgegraven is groen gearceerd.

In Figuur 3-14 is de duinovergang tussen ZZ-02 en ZZ-03 getoond als voorbeeld. Bij de raaien BC-4200, BC-4300 en BC-4400 zijn dwarsdoorsnedes te zien in Figuur 3-15. Er wordt per duinovergang netto zand toegevoegd aan het duin. Dit is ook te zien in Figuur 3-15 voor de genoemde dwarsdoorsnedes: in de raaien BC-4200 en BC-4300 wordt zand toegevoegd ten opzichte van het huidige profiel (2019). Dit zand wordt aangevoerd van buiten het kustfundament en is van voldoende kwaliteit (D_{50} van minimum 330 μm).

In het geval dat wel een stuk van het duin moet worden afgegraven voor de aanleg van de duinovergangen (zoals in BC-4400, zie Figuur 3-15), wordt het afgegraven zand aan de landzijde van de duinovergang in het duin geplaatst (zie Figuur 3-16). Zo veranderen het volume en de aanwezige buffers in het duin niet, en deze ingreep heeft geen negatief effect op de veiligheid en standzekerheid van de waterkering.



Figuur 3-16: Illustratie van het verplaatsen van het afgegraven volume naar de landzijde van de duinovergang.

Door het netto toevoegen van zand nemen de aanwezige buffers bij alle strandovergangen toe. De maximale hoogte van het duin wordt niet substantieel verlaagd door de aanleg van de duinovergangen. Hiermee is aangetoond dat de waterveiligheid niet in het geding is rond de duinovergangen. De verstuiving van zand zal worden gemitigeerd door de zijkanten van de duinovergang te voorzien van de rijsthoutschermen van voldoende dichtheid, en de ontblote delen van het duin te beplanten met helmgras. Daarmee wordt naar verwachting het overlast door verstuiving voldoende gemitigeerd.

De aanwezigheid van Stelcon platen op het strand tijdens het stormseizoen heeft geen negatief effect op veiligheid (Achtergronddocument toetsschema duinafslag WT2017 (Deltares, 2015)). Op grond daarvan heeft Rijkswaterstaat reeds toestemming gegeven voor de aanwezigheid van deze platen op het strand in de winter.

Een risico is dat tijdens een storm de stelcon platen worden afgedekt met zand of dat delen van de strandovergangen vervormen door duinafkalving. Hierdoor wordt de doorgang voor materiaal bemoeilijkt en de overgang moet worden hersteld. Dit risico is voor de uitvoerende aannemer.

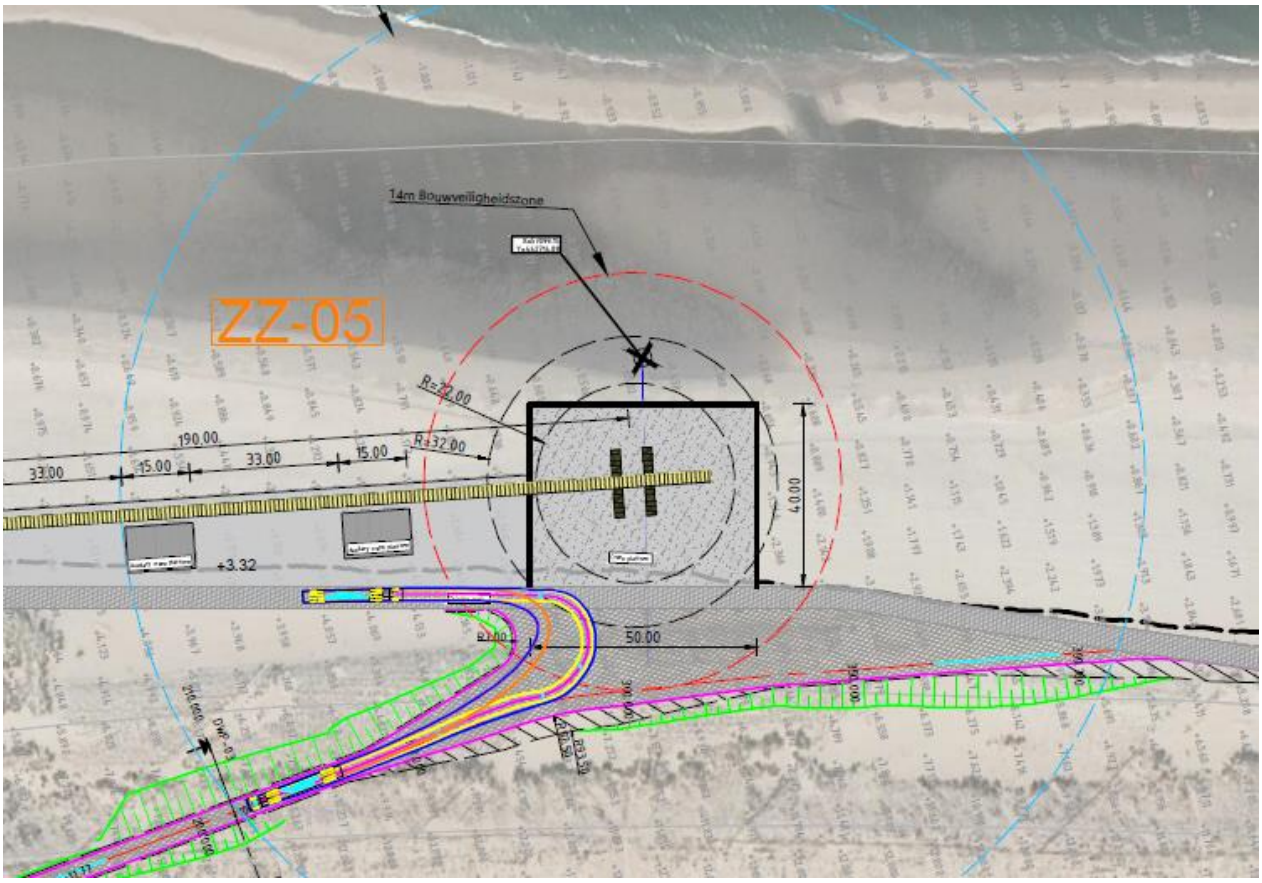
Deze duinovergangen worden gedurende het levensduur van het windpark gebruikt als toegangsweg voor de hulpdiensten en voor het (groot) onderhoud van de turbines. Dit wordt in meer detail beschreven in hoofdstuk 6. Het onderhoud van de nieuw aangelegde duinovergangen is de verantwoordelijkheid van Eneco.

3.5.2 Kraanopstelplaatsen

Voor het plaatsen van de windturbines worden tijdelijke constructies op het strand gebouwd. Deze kraanopstelplaatsen zijn plateaus met afmetingen van 40m x 50m (zie voorbeeld in Figuur 3-17), aan drie zijden begrensd door damwanden en opgevuld met zand tot het niveau van 3,3m +NAP. Het zand wordt aangevoerd van buiten MV-2 en voldoet aan de eisen aan suppletiezand conform het BIP. Aan de bovenkant worden deze plateaus afgewerkt met een 1,0 m dikke bovenlaag van menggranulaat en tenminste 2 lagen geogrid waarmee het verwaaien van zand wordt voorkomen. Aan de landzijde sluiten ze aan op het achterliggende duin. Deze harde constructies op de Zachte Zeewering zijn tijdelijk van aard; na voltooiing van de windturbines worden de damwanden verwijderd en wordt het zand met bulldozers over het strand verspreid[4]. De bouw van de eerste 6 kraanopstelplaatsen, voor windturbines ZZ-07 t/m ZZ-12 is gepland in het voorjaar 2022, de overige kraanopstelplaatsen worden gebouwd in de zomer. Het verwijderen van de eerste 8 kraanopstelplaatsen is gepland in de zomer. Van de resterende 4 kraanopstelplaatsen worden de eerste twee (ZZ-03 en ZZ-04) in de eerste week van oktober verwijderd en de laatste twee (ZZ01 en ZZ-02) worden verwijderd voor het einde van oktober 2022, zie planning bouwwerkzaamheden in Figuur 3-12.

Dit betekent dat deze constructies enkele weken tot maanden tijdens het winterstormseizoen op het strand aanwezig zullen zijn en daardoor een mogelijk risico voor de veiligheid van de waterkering kunnen vormen. Nadat de damwanden zijn getrokken, dus nadat alle kraanopstelplaatsen van het strand verwijderd zijn, zal ca 30.000 m^3 nieuw zand op het strand achterblijven wat een positief effect heeft op de veiligheid van de waterkering, het totale zandvolume in de strandschil neemt immers toe. Voor de aanleg van plateaus wordt het zand met korreldiameter van minstens 330 μm gebruikt wat aansluit bij de eisen in het BIP (PUMA, 2019c).

[4] *Het zand uit de kraanopstelplaatsen zal als een dunne laag gelijkmatig over het strand worden verspreid zodat er geen overlast ontstaat door het eolische transport richting duin en het achterliggend havengebied.*



Figuur 3-17. Voorbeeld kraanopstelplaats

Vergelijkbaar met de bepaling van de morfologische effecten van de windturbines (zie paragraaf 3.2) heeft (Svasek Hydraulics, 2020d) ook de morfologische effecten van de kraanopstelplaatsen bepaald, met behulp van het numerieke model XBeach. Hiervoor zijn twee configuraties gebruikt:

1) De zuidelijke zes kraanopstelplaatsen (ter hoogte van ZZ-06 tot ZZ-12) zijn aanwezig, de windturbines niet. Dit correspondeert met de periode in het voorjaar van 2022;
2) Alle twaalf kraanopstelplaatsen en windturbines zijn aanwezig. Dit betreft een worst-case waarbij de werkzaamheden tegen de verwachting in flink uitlopen en de kraanopstelplaatsen niet zijn verwijderd (volgens de planning staan in de herfst slechts 4 van de 12 kraanopstelplaatsen op het strand, zie Figuur 3-12).

De kraanopstelplaatsen zijn in het model opgenomen als niet-erodeerbare elementen met afmetingen van 40 bij 50 m en een hoogte van 3,3 m NAP. Er is in het model geen rekening gehouden met ca 2,500 m^3 zand tussen de damwanden in elke kraanopstelplaats wat tijdens storm (deels) door de golven naar het achterliggende duin kan worden verplaatst.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor twee ontwerpstormen met een overschrijdingsfrequentie van 1/10.000 per jaar. Dit zijn dezelfde stormen als gebruikt bij het bepalen van de effecten van de windturbines, zie Tabel 3-1. Dit leidt tot vier XBeach berekeningen. Er is gerekend met de 2019 bodem.

De resultaten zijn samengevat in Tabel 3-2. De berekeningen laten zien:

- een toename van de duinafslag van maximaal 12,5 m^3/m tussen de windturbines ZZ-02 en ZZ-03 en tussen ZZ-03 en ZZ-04 (afstand van ca 900m);
- een grotere toename van de duinafslag ten zuiden van de windturbine ZZ-12 van ca. 45 m^3/m over een afstand van 1 km.

Dit maximale effect treedt op in de situatie met twaalf kraanopstelplaatsen, 12 windturbines en storm B en is geïllustreerd in Figuur 3-18. In deze figuur is de erosie/sedimentatie van de referentiesituatie (geen kraanopstelplaatsen of windturbines) gegeven (bovenste figuur), eenzelfde figuur maar met twaalf kraanopstelplaatsen en twaalf windturbines (midden boven), een verschilfiguur tussen de eindsituaties van beide scenario's (midden onder) en een afslagvolume plot (onderste). Deze laatste geeft het afslagvolume boven rekenpeil (in al deze gevallen 4,95 m+NAP), en het verschil daartussen. Een negatief verschil betekent dat er meer afslag is in de situatie met kraanopstelplaatsen en windturbines. Te zien is dat het effect van de platformen geconcentreerd achter deze platformen optreedt.

Tabel 3-2 Maximum extra afslag voor elk scenario, verdeeld in de gebieden tussen en ten zuiden van de turbines; bron: (Svasek Hydraulics, 2020d)

	Maximum extra afslag tussen turbines	Maximum extra afslag ten zuiden van turbines
2019 bodem storm A 6 platformen	3,5 m^3/m	NVT, want niet maatgevend*)
2019 bodem storm B 6 platformen	6,3 m^3/m	31,5 m^3/m
2019 bodem storm A 12 platformen + 12 windturbines	7,0 m^3/m	NVT, want niet maatgevend*)
2019 bodem storm B 12 platformen + 12 windturbines	12,5 m^3/m	45,0 m^3/m

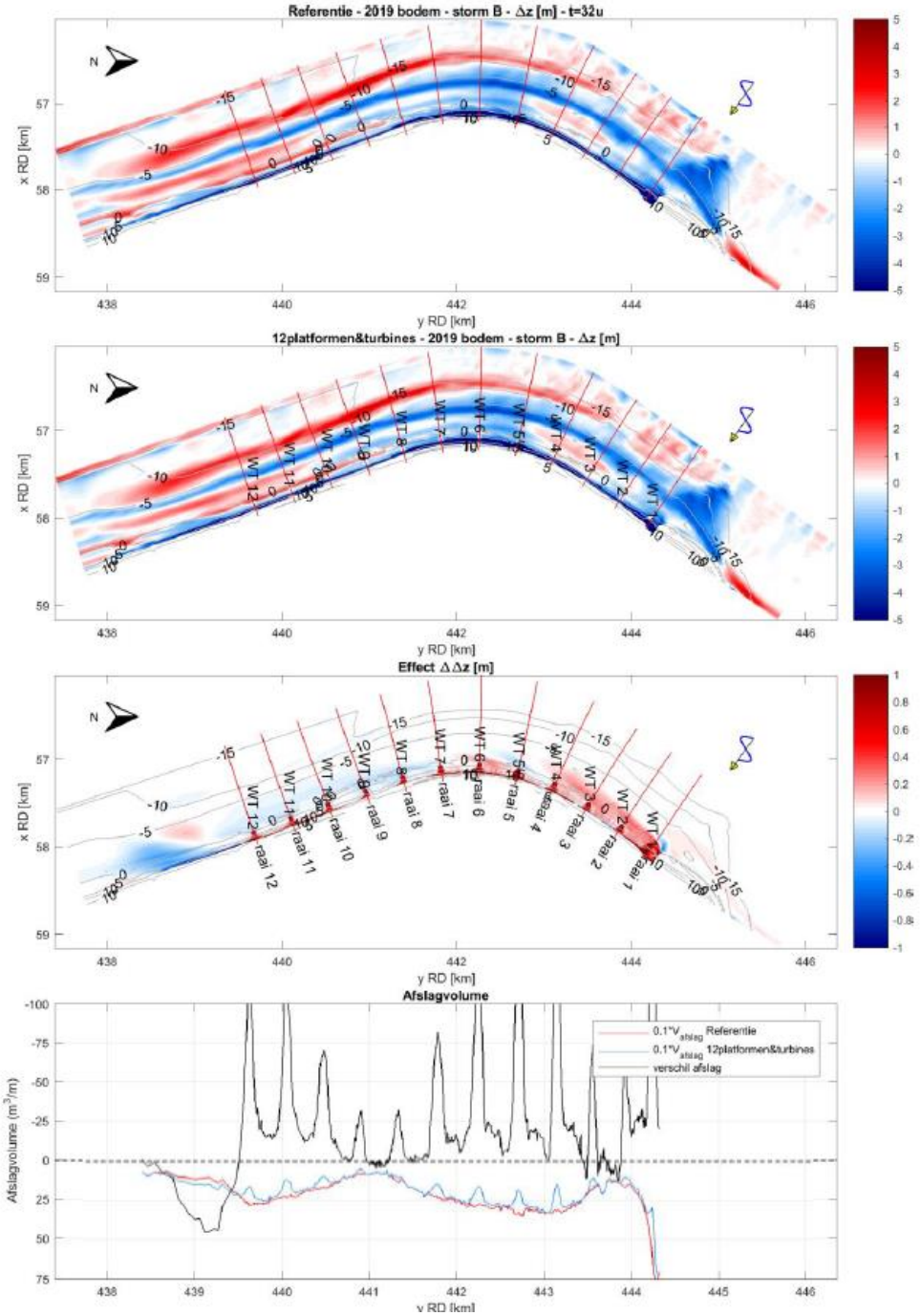
*) *Storm A is niet representatief voor maatgevende condities voor de zuidkant van MV2, waar de extra afslag ten zuiden van de turbines plaatsvindt*

(Svasek Hydraulics, 2020d) merkt op dat te simulatie tot op zekere hoogte conservatief is omdat er in het model geen zand uit de platformen (kraanopstelplaatsen) zelf kan eroderen, waardoor ter plaatse de blokkade van de duinen groot blijft en op andere locaties minder zand beschikbaar is voor de opbouw van de vooroever. In werkelijkheid zal in ieder geval een deel van het zand uit de platformen eroderen, dit zand kan de berekende duinafslag mogelijk reduceren. Echter, de redenen dat voorgaande berekeningen zeer conservatief waren vallen weg bij de voorliggende configuratie: overdimensioneren van de ingreep om numerieke reden en het om een slanke paal heenlopen van korte golven. De huidige berekening is daardoor beduidend minder conservatief dan eerdere berekeningen.

Het maximale *worst-case* effect van de kraanopstelplaatsen van 45 m^3/m is groter dan het maximale effect van 20 m^3/m van de windturbines. Er vanuit gaande dat de planning wordt gehaald is het maximale berekende effect kleiner: 31,5 m^3/m (let wel: dit effect betreft het gezamenlijke effect van de windturbines en kraanopstelplaatsen). In het duin ligt bij alle raaien ruim meer dan 45 m^3/m aan reserve. Daarnaast komt deze worst-case situatie met twaalf kraanopstelplaatsen en twaalf windturbines maar kort voor tijdens een stormseizoen. De veiligheid van de waterkering (overschrijdingskans van belasting) bedraagt 10^{-4} per jaar. Dit betekent dat de cumulatieve kans dat deze belasting wordt overschreden gedurende de levensduur van de windturbines op de waterkering (25 jaar) 0,25% bedraagt. De tijdelijke situatie waarbij alle kraanopstelplaatsen en windturbines op de waterkering aanwezig zullen zijn gedurende het winterstorm seizoen zal minder dan 3 maanden duren. De cumulatieve kans dat de maatgevende storm in deze periode optreedt, bedraagt 0,005%, dus 50 keer kleiner dan de cumulatieve kans voor de

permanente situatie. Er is voldoende zand in het duin aanwezig om de extra afslag als gevolg van een maatgevende storm op te kunnen vangen. In combinatie met de zeer kleine cumulatieve kans van optreden van deze storm in de 3 maanden wanneer de tijdelijke constructies op de waterkering aanwezig zijn, achten we bewezen dat dit geen situatie betreft waarbij de veiligheid van de waterkering in het geding is. De eventuele extra duinafslag ten gevolge van de aanwezigheid van kraanopstelplaatsen tijdens storm zal worden gecompenseerd[5] door de extra 30,000 m³ zand, wat na het verwijderen van de damwanden vrij zal komen, op het strand achter te laten.

[5] *XBeach berekeningen (Figuur 3-18) laten zien dat de duinafslag alleen lokaal tussen enkele windturbines ontstaat. De toeslag van 40 m³/m die over de hele lengte van ZZ wordt toegepast heeft betrekking op de onzekerheid m.b.t. de locatie van de afslag die afhankelijk is van de golfrichting. Het is echter zeer onwaarschijnlijk dat deze afslag zich over grote delen van ZZ uit zal strekken, en het door Eneco aan te brengen 30.000 m³ nieuwe zand is naar verwachting ruim voldoende om de extra duinafslag t.g.v. de tijdelijke constructies te compenseren*



Figuur 3-18: Voorbeeld resultaten van afslagberekening: Effect bij storm B, op basis van 2019 bodem; erosie/sedimentatie in de referentiesituatie (bovenste figuur), erosie/sedimentatie met 12 kraanopstelplaatsen en 12 windturbines (midden boven), een verschilfiguur tussen de eindsituaties van beide scenario's (midden onder) en een afslagvolume plot (figuur onderaan).

3.5.3 Kabelboringinstallatie

Ten behoeve van het insluiten van kabels op de windturbines worden op de kraanopstelplaatsen ook tijdelijke boorinstallaties aangebracht. Deze installaties zullen worden gebouwd nadat de kraanopstelplaatsen zijn gebouwd, en verwijderd tegelijk met het verwijderen van deze plateaus. Deze

constructies hebben geen extra effect op de veiligheid van de zeewering boven op de effect van de kraanopstelplaatsen zelf, zie voorgaande paragraaf.

3.5.4 Bouwwegen

Er zullen tijdelijke wegen op het strand worden aangelegd. Deze wegen komen op het bestaande strand te liggen. Er wordt geen zand afgegraven of toegevoegd, dus deze wegen hebben geen invloed op de sedimentvolumes in de keuringsprofielen, en daarmee geen effect op de veiligheid. De bouwwegen zullen worden verhard met de Stelcon platen. Dit wordt in detail beschreven in het rapport BG8375-RHD-ZZ-XX-RP-G-0007 Beoordeling invloed op weringveiligheid.

Zoals reeds eerder aangegeven, heeft de aanwezigheid van Stelcon platen op het strand tijdens het stormseizoen geen negatief effect op veiligheid (Achtergronddocument toetsschema duinafslag WT2017 (Deltares, 2015)). Op grond daarvan heeft Rijkswaterstaat reeds toestemming gegeven voor de aanwezigheid van deze platen op het strand in de winter.

3.5.5 Los materieel

Tijdens de werkzaamheden zal los materieel (bulldozers, kranen etc) en materialen op het strand aanwezig zijn. Overeenkomstig eis m.b.t. het verwijderen van materieel bij naderend onstuimig weer zullen deze bij een waarschuwing van windkracht 7 of meer van het strand worden verwijderd. Eerste waarschuwing voor naderend onstuimig weer is 72 uur van te voren beschikbaar maar is nog onbetrouwbaar. De opeenvolgende voorspellingen worden steeds betrouwbaarder. Op grond van de eerste waarschuwing wordt het ontruimingsprotocol in werking gesteld en organisatie in paraatheid gebracht. Indien de waarschuwing wordt bevestigd wordt, wordt het materieel tijdig van het strand weggehaald.
Eneco gaat een ontruimingsprotocol[6] opstellen waarmee aan de bovengenoemde eis wordt voldaan.

Analyse van windgegevens gemeten op MV-2 in de periode 2003-2018 in Tabel 3-3 laat zien dat de cumulatieve frequentie van overschrijding van windkracht 7 (=14 m/s) in het stormseizoen niet hoger dan 14% ligt; in februari en maart is deze frequentie zelfs lager. Deze gegevens zijn afkomstig uit de analyse van windmetingen die in (PONDERA, 2020) zijn gerapporteerd.

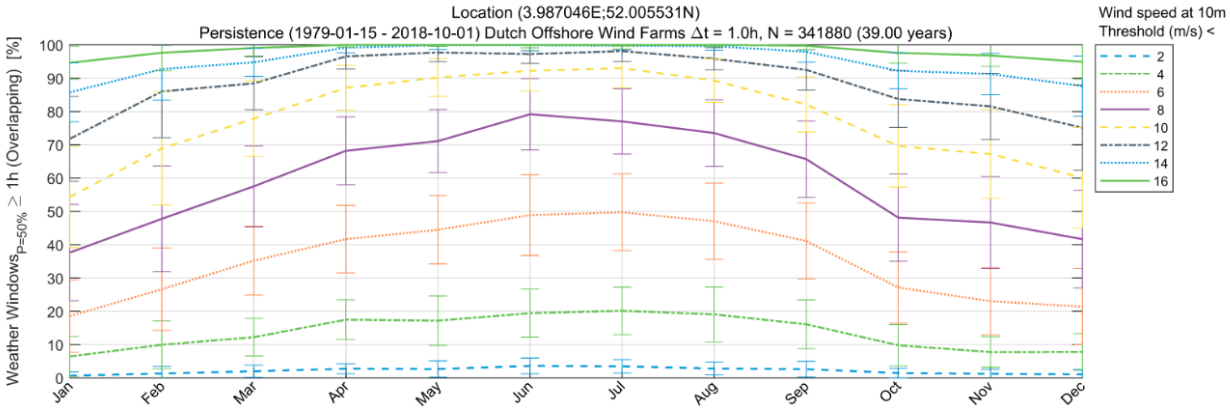
Tabel 3-3. Cumulatieve overschrijdingsfrequentie van windkracht 7 op Maasvlakte 2

	Cumulative Frequency distribution											
Wind Speed (m/s)	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
14	14%	9%	6%	2%	2%	2%	2%	2%	3%	14%	14%	14%

Dit beeld wordt bevestigd in de analyse van windmetingen die op de website Metocean On Demand is beschikbaar (database van RVO voor Dutch Offshore Wind). De persistentie van windsnelheid (d.w.z. windsnelheid die langer dan een uur aanhoudt) lager dan 14 m/s in het stormseizoen (blauwe lijn in Figuur 3-19) varieert tussen 85% en 100%.

Hieruit blijkt dat de werkbaarheid tijdens het stormseizoen redelijk goed is. Het betreft echter meerjarige statistiek; tijdens de uitvoering kan de aannemer worden geconfronteerd met tegenvallend slecht weer. Om deze reden zijn in de bouwplanning ruime marges voor tegenvallers aangehouden.

[6] *Dit type getrapte waarschuwing en opeenvolgende acties worden offshore toegepast, maar tevens ook in de sluitingsprotocollen van stormvloedkeringen*



Figuur 3-19: Persistentie windsnelheid offshore van MV-2; bron: Metocean On Demand database

4 Analyse minimum bodemligging

Voor de stabiliteit van de windturbine en de ingraafdiepte van kabels en leidingen is het belangrijk inzicht te hebben in de minimale bodemligging ter plaatse van de windturbines. Een inschatting van deze minimale bodemligging is op twee manieren gemaakt:

1. Op basis van maximaal erodeerbaar volume volgens het BIP (PUMA, 2019c). Dit geeft de minimale bodemligging tijdens normale condities en onderhoud volgens het BIP;
2. De minimumbodem gedurende stormcondities:
    a. De minimumbodem gedurende een maatgevende storm (1/10.000 jaar). Deze is afgeleid door (Svasek Hydraulics, 2020b).
    b. De minimumbodem gedurende vaker voorkomende stormen (1/10 en 1/100 jaar), afgeleid door (Deltares, 2020a).

Er dient te worden gekeken naar de laagste bodemligging, dat wil zeggen de kleinste waarde uit deze twee methoden. Een lage bodem onder normale condities betekent dat er veel volume in het duin en het hoge strand zit (uitgaande van gegarandeerde volumes volgens het BIP). Bij stormafslag kan dan worden aangenomen dat de bodem ter hoogte van de windturbines omhoog komt door het zand dat van het duin is afgeslagen (Svasek Hydraulics, 2020b). Ook kan een minder heftige storm leiden tot grotere strandafslag.

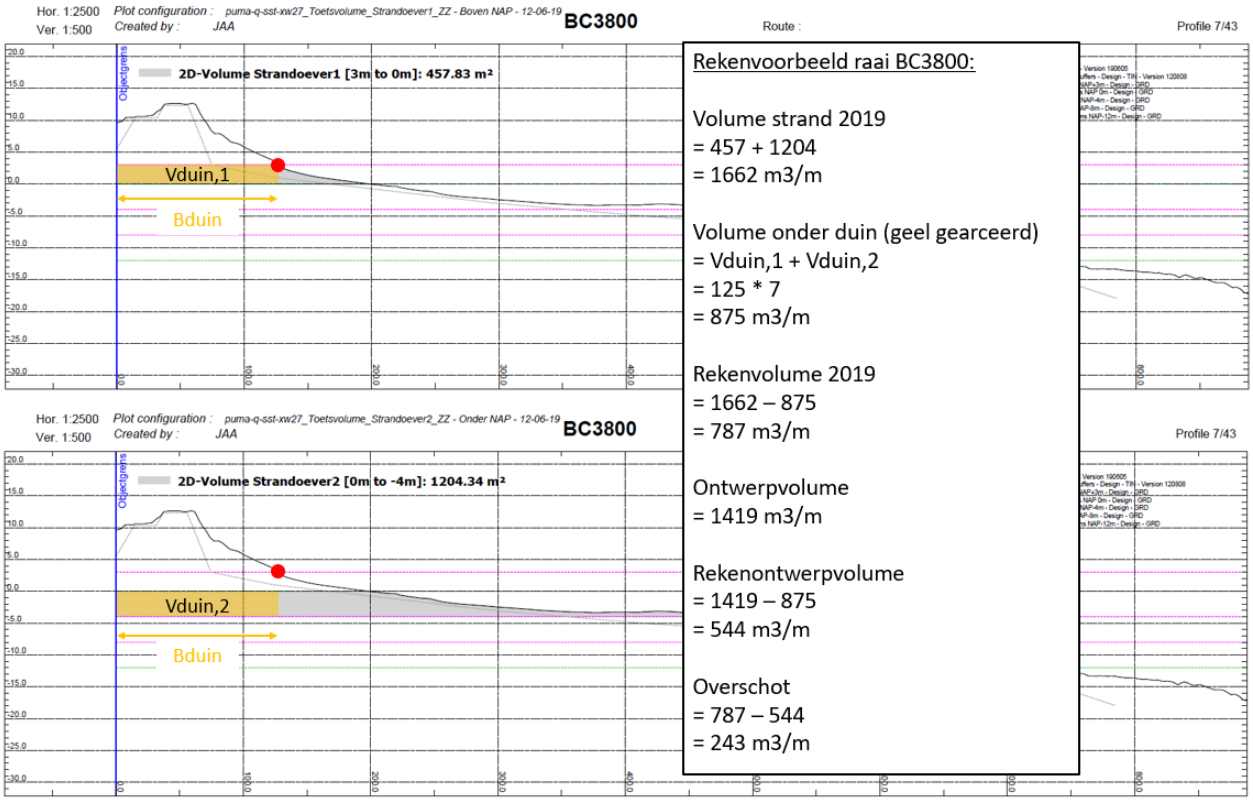
Hieronder zijn beide methoden beschreven, vervolgens worden de conclusies gegeven. Bij deze benadering is aangenomen dat het huidige ontwerpprofiel niet verandert als gevolg van extra toeslag die in paragraaf 3.3 is besproken. Dit is een conservatieve aanname voor de stabiliteit van de windturbines: als het ontwerpprofiel zeewaarts verschuift, komt de bodem ter plaatse van de windturbines omhoog.

Methode 1: Erodeerbaar volume volgens het BIP

Uit de keuringsformulieren van 2019 (PUMA, 2019a) blijkt hoeveel zand er per raai in de verschillende schillen ligt. Wanneer dit aanwezige volume ten opzichte van het ontwerp- (of toetsings-) volume wordt beschouwd en het overschot in de duinschil wordt meegenomen, kan bepaald worden hoeveel er maximaal mag eroderen per raai voordat het minimumvolume wordt bereikt en er moet worden gesuppleerd. Op basis hiervan kan bepaald worden wat de maximale bodemdaling ter hoogte van de windturbines is. In de keuringsformulieren is geen data beschikbaar over de raaien BC3495 en BC3600 waartussen de windmolen ZZ-01 komt te staan, voor dit gebied wordt het onderhoud gestuurd op het instandhouden van het afslagpunt en niet van het volume. De minimumbodem bij ZZ-01 wordt afgeleid op basis van methode 2.

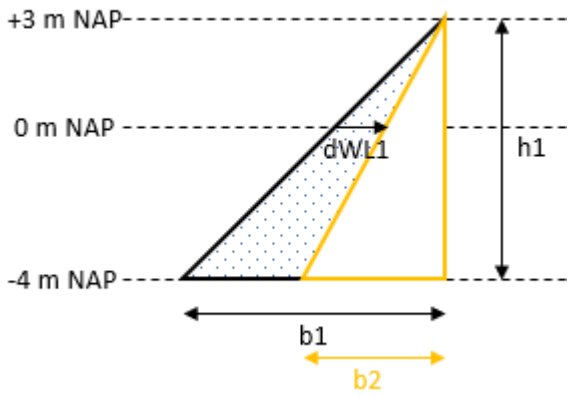
De volgende methode is gehanteerd:

1. Het ontwerpvolume ($V_{ontw,s}$), het strandvolume in 2019 ($V_{19,s}$) en het duinoverschot in 2019 ($V_{over19,d}$) zijn bepaald. Van $V_{over19,d}$ is 40 m^3/m afgetrokken om te voldoen aan de veiligheidseisen besproken in Hoofdstuk 3.
2. Er wordt aangenomen dat de duinvoet niet verschuift. Daarom is het volume in de strandschil wat zich onder het duin bevindt (dus oostelijk van de intersectie van het profiel en de +3 m NAP lijn) bepaald (V_{duin}). Dit wordt afgetrokken van het aanwezige volume en het ontwerpvolume van de strandschil, bij behoud van de duinvoet kan het volume daaronder immers niet eroderen. Dit geeft de rekenwaarde van het aanwezig strandvolume in 2019 (V_1) en de rekenwaarde van het ontwerpvolume ($V_{ontw,s,reken}$). Zie voor een voorbeeld Figuur 4-1.



Figuur 4-1: Voorbeeld van de bepaling van de rekenwaarde van het aanwezig en het ontwerpvolume.

3. Hiermee is een principe profiel bepaald in de vorm van een driehoek (zie Figuur 4-2). Het volume is gelijk aan het aanwezige strandvolume (V_1), de hoogte is gelijk aan de hoogte van de strandschil (7 m). De basis van deze driehoek is aangegeven met b_1. Aangenomen wordt dat de duinvoet (3 m + NAP) op dezelfde plek blijft.



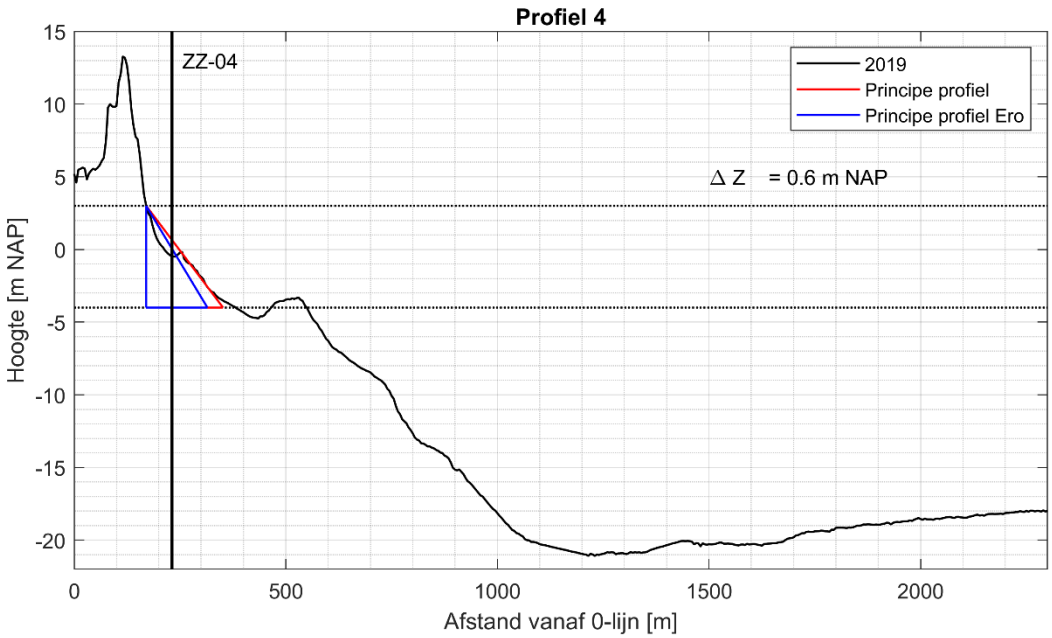
Figuur 4-2: Illustratie van de principe profielen.

4. Het maximale volume van het overschot in het duin wat volgens BIP gebruikt mag worden als compensatie van tekorten in de strandschil is 250 m^3/m. Met deze wetenschap is het compensatievolume van het duin in 2019 bepaald (C_{duin});
5. Het maximaal erodeerbare volume (V_{ero}) voordat ingrijpen noodzakelijk is, is gelijk aan het aanwezige volume in 2019 inclusief het compensatievolume in het duin minus het ontwerpvolume.

Daarmee wordt het minimale aanwezige volume op het strand (V_2) gelijk aan het aanwezige volume in 2019 minus het maximaal erodeerbare volume;

6. Met dit volume kan een nieuw principeprofiel worden afgeleid, met een basis (b_2) en een terugtrekking van de waterlijn (dWL_1). Met de terugtrekking van de waterlijn kan ook de daling van het profiel ter hoogte van de windturbine worden bepaald.

Visueel is deze methode getoond in Figuur 4-3. Het kustprofiel ter hoogte van de windturbine is getoond inclusief de twee principeprofielen. In dit specifieke voorbeeld is de bodemdaling ter hoogte van de windturbine circa 0,6 m. In 2019 ligt de bodem op circa -0,5 m NAP, de minimale bodemligging is -1,1 m NAP.



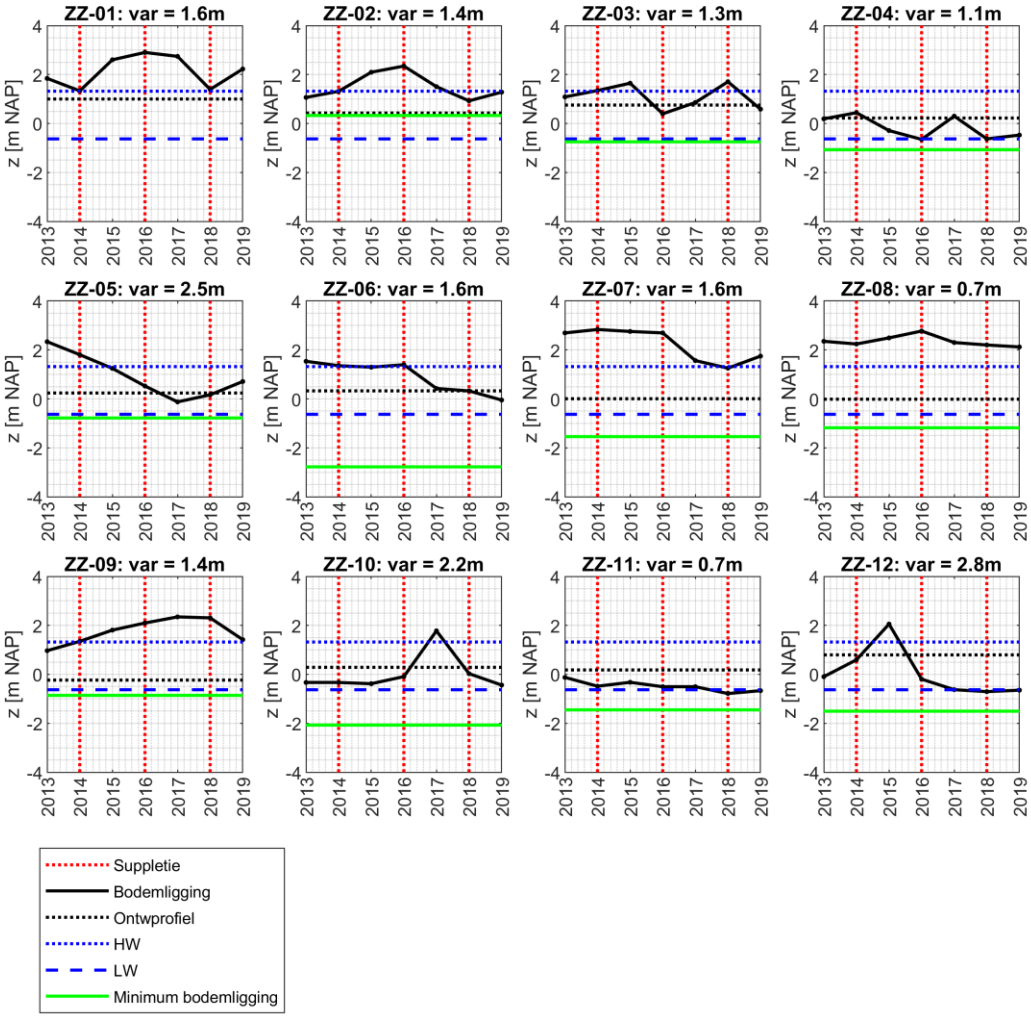
Figuur 4-3: Principe profielen geprojecteerd op de bodemligging in 2019.

In Tabel 4-1 is de huidige bodemligging (2019) ter hoogte van de windturbines weergegeven, samen met de berekende maximale bodemdaling en de resulterende minimale bodemligging. De zakking van de bodem is het grootst rondom de bocht (ZZ-06, ZZ-07 en ZZ-08). Het erodeerbaar volume is hier groot: bij ZZ-06 (BC5800) is het volume in de strandschil in 2019 bijvoorbeeld circa 300 m^3/m groter dan het ontwerpvolume en ook in het duin ligt circa 300 m^3/m aan overschot. Wanneer dit volume volledig erodeert leidt dat tot een terugtrekking van de waterlijn van 63 m en een zakking van de bodem van 2,7 m. Bij de noordelijke en zuidelijke windturbines is het erodeerbare volume en dus de terugtrekking van de waterlijn en de zakking van de bodem kleiner. De ligging van de minimumbodem ten opzichte van de historische bodemvariatie ter hoogte van de windturbines is ook te zien in Figuur 4-4.

Windturbine	Z_{2019} [m NAP]	Erosie [m]	Z_{min} [m NAP]
ZZ-01	2,2	-	-
ZZ-02	1,3	1,0	0,3
ZZ-03	0,6	1,3	-0,7
ZZ-04	-0,5	0,6	-1,1
ZZ-05	0,7	1,5	-0,8
ZZ-06	0,0	2,7	-2,8
ZZ-07	1,7	3,3	-1,5
ZZ-08	2,1	3,3	-1,2
ZZ-09	1,4	2,3	-0,9
ZZ-10	-0,4	1,6	-2,1
ZZ-11	-0,7	0,8	-1,5
ZZ-12	-0,6	0,9	-1,5

Tabel 4-1: Bodemligging ter hoogte van de windturbines in 2019, de erosie afgeleid op basis van de principe profielen en de minimum bodemligging ter hoogte van de windturbines.

De toegepaste methode kent een flinke mate van onzekerheid. Het vasthouden van de duinvoet houdt in dat alleen de helling van het principe profiel kan veranderen, wat kan leiden tot onrealistisch steile profielen. In werkelijkheid zou het duin dan afglijden, leidend tot een flauwere helling en een hogere bodemligging ter hoogte van de windturbines. Daarnaast is bijvoorbeeld het volume onder het duin (V_{duin}) geschat uit figuren in (PUMA, 2019a), leidend tot een grove schatting. De methodiek is daarmee gevoelig voor aannames en schattingen.



Figuur 4-4: Verandering van de bodemligging ter hoogte van de windturbines over de jaren heen (zwarte doorgetrokken lijn), inclusief de ligging van de minimumbodem bepaald aan de hand van het maximaal erodeerbare volume (groene lijn). De jaren waarin gesuppleerd is, zijn gemarkeerd met rode lijnen. Hoog- en laagwater zijn getoond met blauwe lijnen. De ontwerpbodem is getoond met zwarte stippellijnen. De waterstanden horen bij gemiddeld springtij 2011.0 (Rijkswaterstaat, 2013). Bij elke subplot is de maximale variatie (var) in bodemligging weergegeven ($z_{max} - z_{min}$).

Methode 2-a: afslag gedurende een maatgevende storm (1/10.000 jaar)

Op basis van afslagberekeningen met het numerieke model XBeach heeft (Svasek Hydraulics, 2020b) de minimale bodemligging ter hoogte van de windturbines bepaald voor de maatgevende storm (1/10.000 jaar). De volgende methodiek is gehanteerd:

- De simulaties zijn uitgevoerd met de ontwerpbodem (die de minimum volumes volgens het BIP bevat);
- In de simulaties zijn de windturbines niet meegenomen;
- Er wordt aangenomen dat MV-2 goed ontworpen is en dat de duinen stand houden bij de maatgevende storm. Dit houdt in dat het grensprofiel (28 m^2 boven rekenpeil) blijft liggen gedurende de storm. Daarnaast wordt aangenomen dat MV-2 efficiënt is ontworpen en dat dus niet veel meer dan 28 m^2 blijft liggen;

- De berekeningen zijn uitgevoerd voor twee ontwerpstormen: A en B. Diegeen die de laagste bodemligging geeft, wordt gekozen;

De minimum bodemligging is de bodemligging ter hoogte van de windturbine vlak voor het moment dat het grensprofiel wordt bereikt. Deze minimumbodemligging is getoond in Tabel 4-2. De erosie varieert tussen 0 m (bij ZZ-08) en 2.1 m (bij ZZ-01). De minimum bodemligging komt uit tussen 0 en -1.3 m NAP.

Tabel 4-2: Starthoogte in de afslagsimulaties en minimum bodemligging ter hoogte van de windturbines.

Windturbine	Starthoogte [m NAP] (= ontwerpbodem)	Erosie [m]	Minimumhoogte [m NAP]
ZZ-01	0.8	2.1	-1.3
ZZ-02	0.2	0.3	-0.1
ZZ-03	0.2	0.1	0.1
ZZ-04	-0.1	0.2	-0.3
ZZ-05	0.0	0.4	-0.4
ZZ-06	0.0	0.5	-0.5
ZZ-07	-0.1	0.3	-0.4
ZZ-08	-0.1	0	-0.1
ZZ-09	-0.1	0.2	-0.3
ZZ-10	-0.1	0.3	-0.4
ZZ-11	-0.1	0.5	-0.6
ZZ-12	0.3	0.3	0.0

(Svasek Hydraulics, 2020b) adviseert om een onzekerheidstoeslag van 2 m te hanteren, om de vele onzekerheden in deze analyse mee te nemen.

Methode 2-b: Afslag gedurende een 1/10 en 1/100 jaar storm

In (Deltares, 2020a) is de minimale bodemligging ter hoogte van de windturbines na een 1/10 en 1/100 jaar storm als gevolg van grootschalige dynamiek tijdens een storm beschreven. Deze bodemliggingen zijn bepaald met XBeach, voor zowel het ontwerpprofiel als de 2019 bodemligging. Bodemverlagingen kunnen oplopen tot 2,4 en 3,4 m respectievelijk voor de 2019 bodem en het ontwerpprofiel voor de 1/100 jaar storm. Tijdens de 1/10 jaar storm lopen deze op tot 2,2 m. In Tabel 4-3 is de bodemligging na de relevante stormen ter hoogte van de windturbines getoond.

Tabel 4-3: Bodemligging ter hoogte van de windturbines na een 1/10 en 1/100 jaar storm, voor de 2019 bodem en het ontwerpprofiel (Deltares, 2020a).

Windturbine	Bodemligging na 1/10 jaar storm [m NAP]		Bodemligging na 1/100 jaar storm [m NAP]	
	2019 bodem	Ontwerpprofiel	2019 bodem	Ontwerpprofiel
ZZ-01	0,02	-1,13	-0,15	-2,42
ZZ-02	1,29	0,15	1,45	-0,03

ZZ-03	0,39	0.47	0.29	0.53
ZZ-04	-0.27	-0,60	-0,75	-0,79
ZZ-05	-0,82	-1,20	-1,04	-2,02
ZZ-06	-0,01	-1,29	-0,72	-2,17
ZZ-07	0,71	-1,31	-0,11	-2,04
ZZ-08	1,10	-1,10	0,51	-1,68
ZZ-09	0,94	-0,87	0,87	-1,16
ZZ-10	0,10	-0,48	0,60	-0,69
ZZ-11	-0,19	-0,61	-0,16	-0,84
ZZ-12	0,01	0,11	0,11	0,02

Combinatie van de twee methodes

Zoals aan het begin van deze sectie is aangegeven, de laagste waarde van de op twee manieren bepaalde minimum bodemligging wordt genomen als de meest conservatieve schatting. De bepaling van de maatgevende minimum bodemligging is te zien in Tabel 4-4. De maatgevende waarde (methode 1, methode 2a of methode 2b is geel gearceerd). Voor ZZ-01 tot ZZ-05, ZZ-09 en ZZ-11 is methode 2 maatgevend, voor ZZ-06 tot ZZ-08, ZZ-10 en ZZ-12 is methode 1 maatgevend. De maatgevende minimum bodemligging ligt tussen -0.9 m NAP en -2.8 m NAP.

Op de resultaten van methode 2a is een onzekerheidstoeslag van 1 m gehanteerd, anders dan de 2 m geadviseerd door (Svasek Hydraulics, 2020b). Deze 2 m wordt gezien als een forse onzekerheidstoeslag, leidend tot zeer lage bodemliggingen[7]. Over het algemeen zit er veel onzekerheid in de bepaling van de minimum bodem, zowel in methode 1 als in methode 2. Er wordt dan ook aangeraden deze onzekerheid met verder onderzoek te verkleinen.

Tabel 4-4: Minimum bodemligging bepaald volgens methode 1, minimum bodemligging bepaald volgens methode 2a (inclusief onzekerheidstoeslag van 1 m), methode 2b en de gecombineerde minimum bodemligging.

	Methode 1	Methode 2					
Windturbine	Zmin [m NAP]	Zmin,2019 1/10 jaar [m NAP]	Zmin,2019 1/100 jaar [m NAP]	Zmin,ontw 1/10 jaar [m NAP]	Zmin,ontw 1/100 jaar [m NAP]	Zmin,ontw 1/10000 jaar [m NAP]	Zmin,tot [m NAP]
ZZ-01	-	0.0	-0.2	-1.1	-2.4	-2.3	**-2.4**
ZZ-02	0.3	1.3	1.5	0.2	0.0	-1.1	**-1.1**
ZZ-03	-0.7	0.4	0.3	0.5	0.5	-0.9	**-0.9**
ZZ-04	-1.1	-0.3	-0.8	-0.6	-0.8	-1.3	**-1.3**
ZZ-05	-0.8	-0.8	-1.0	-1.2	-2.0	-1.4	**-2.0**
ZZ-06	-2.8	0.0	-0.7	-1.3	-2.2	-1.5	**-2.8**
ZZ-07	-1.5	0.7	-0.1	-1.3	-2.0	-1.4	**-2.0**
ZZ-08	-1.2	1.1	0.5	-1.1	-1.7	-1.1	**-1.7**
ZZ-09	-0.9	0.9	0.9	-0.9	-1.2	-1.3	**-1.3**
ZZ-10	-2.1	0.1	0.6	-0.5	-0.7	-1.4	**-2.1**
ZZ-11	-1.5	-0.2	-0.2	-0.6	-0.8	-1.6	**-1.6**
ZZ-12	-1.5	0.0	0.1	0.1	0.0	-1	**-1.5**

[7] *Bij de bepaling van de diepte van de kabelaansluiting wordt daarnaast rekening met een aantal extra toeslagen*

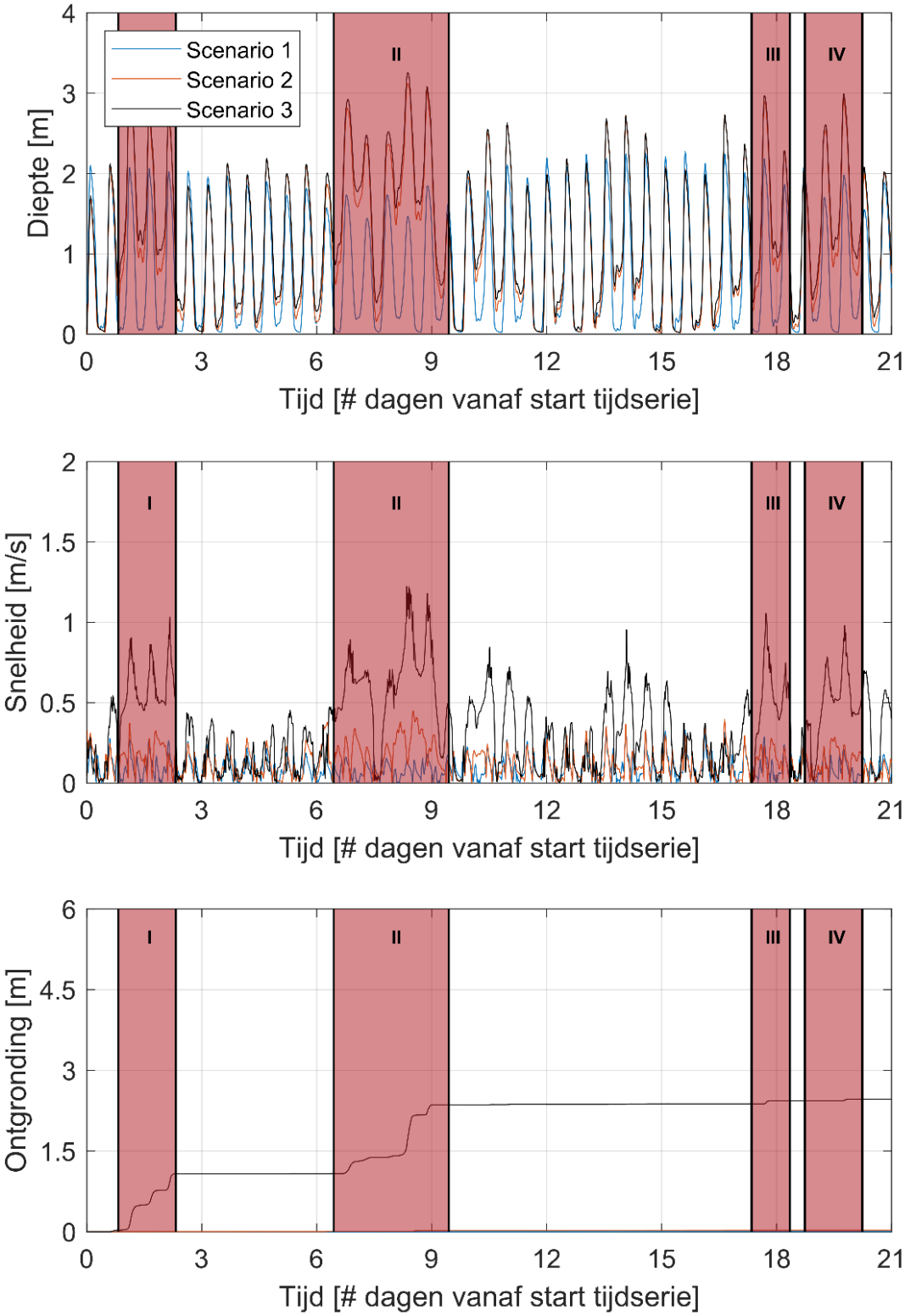
5 Lokale ontgrondingen

De windturbines worden dicht bij de waterlijn geplaatst waardoor er lokaal interactie met golven en stromingen zal ontstaan. Door deze interactie kunnen zich rondom de windturbines ontgrondingskuilen (scour holes) ontwikkelen. Ook kan de interactie tussen de windturbines en wind tot eolische ontgrondingen leiden. Deze effecten zijn onderzocht in (Deltares, 2020a).

In de studie van Deltares zijn diverse numerieke modellen ontwikkeld met hoge resolutie rondom het Maasvlakte 2 strand. Hiermee zijn tijdseries van hydrodynamische condities (o.a. waterdieptes, stromingen) afgeleid per windturbine. Er zijn 6 scenario's opgesteld variërend van 3-weekse golfcondities tijdens een typisch winter seizoen tot individuele stormen met herhalingsfrequenties van 1, 10 en 100 jaar. De hydrodynamische tijdseries voor deze scenario's zijn als invoer gebruikt voor een ontgrondingsvoorspelling met een empirisch model. De ontgrondingskuildiepte is sterk afhankelijk van de waterdiepte, en deze diepte varieert met de eerder beschreven grootschalige bodemveranderingen. Berekeningen zijn daarom uitgevoerd voor een tweetal bodems: de recente (2019) bodem en de ontwerpbodem. Dit geeft naar verwachting een bandbreedte van mogelijke ontgrondingsdieptes bij verschillende windturbines.

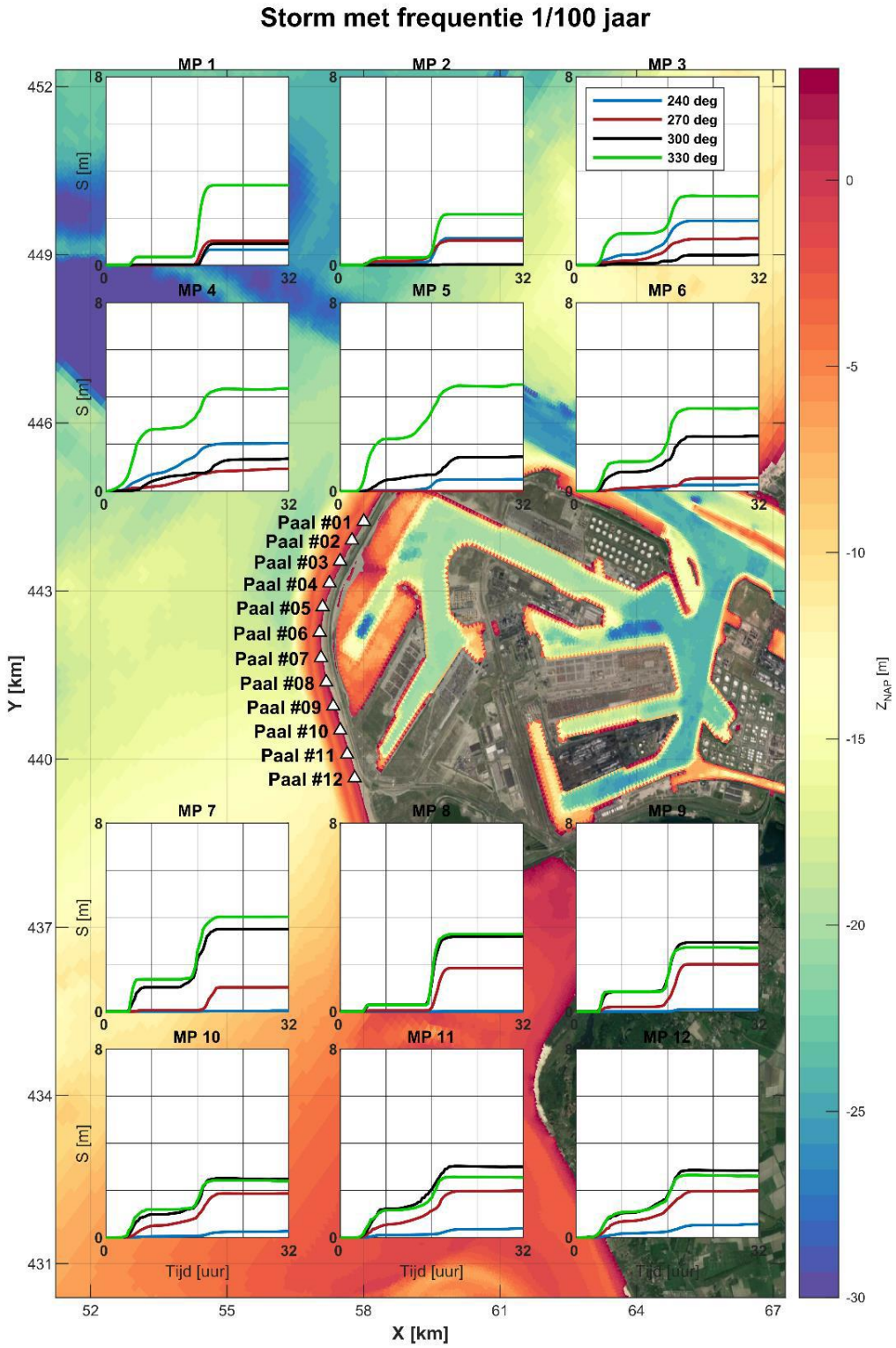
Uit de ontgrondingsvoorspellingen blijkt dat de ontgrondingskuilen voornamelijk ontstaan tijdens stormcondities waarbij de golfgedreven stroming[8] de grootste bijdrage aan de kuilvorming levert. Verder laten de resultaten zien dat de gemiddelde voorspelling voor de ontgrondingsdiepte tijdens de 1-jaars storm voor veel windturbines tussen de 0-1 m bedraagt. Voor windturbines 4, 5, 6 en 12 bedraagt de gemiddelde voorspelling 1-2 m. De maximale voorspelde ontgrondingsdiepte na een 1-jaars storm kan zelfs oplopen tot 4 m (windturbines 8 t/m 11). Hieruit kan volgens Deltares worden geconcludeerd dat voor een aantal windturbines onderhoud mogelijk al moet gebeuren na een 1-jaars storm en/of winterseizoen. Deltares merkt hierbij op dat een 1-jaars storm mogelijk meerdere keren per jaar voor kan komen. De 3-weekse tijdserie die gebruikt is voor scenario 3[9] illustreert (Figuur 5-1) het cumulatieve effect van golfcondities.

[8] *De golfgedreven stroming is een stroming langs de kustlijn, aangedreven door de op het voorland brekende golven*
[9] *Scenario 3 is een combinatie van het astronomisch getij + wind opzet + windgedreven stroming + golfgedreven stroming*



Figuur 5-1. Lokale waterdiepte (bovenste paneel), stroomsnelheid (middelste paneel) en ontgronding (onderste paneel) voor windturbine 12, met de 2019 bodem, voor scenario's 1 (blauw), 2 (rood) en 3 (zwart). De rode banden geven 4 tijdsvakken met een hogere belasting aan

De ontwikkeling van ontgrondingskuilen tijdens de 1/100 per jaar storm is geïllustreerd in Figuur 5-2. In deze figuur is te zien dat bij iedere windturbine minimaal 2 m ontgronding op kan treden in een periode van 32 uur. Deze ontgronding is het kleinst bij windturbine 2 (2 m) en het grootst bij windturbine 5 (5 m).



Figuur 5-2. Ruimtelijke weergave van het tijdsverloop van de berekende ontgronding per turbine voor de 100-jaarsstorm voor de 2019 bodem. De horizontale as beslaat 32 uur, de verticale as 8 m

(Deltares, 2020a) geeft aan dat er een grote onzekerheid zit in de voorspelling van de ontgrondingsdiepte. Deze onzekerheid zit in het tijdsverloop van de ontgronding, en de bandbreedte van de voorspelling zal kleiner worden naarmate de ontgronding dichter in de buurt van het evenwicht komt. Dit zal niet voor alle windturbines in een enkele storm gehaald worden. De uiteindelijke diepte van de ontgronding wordt dus bepaald door de tijdsduur van de storm en de tijdschaal van het optreden van de ontgronding.

De ontgrondingsdieptes tijdens de 1/10 jaarstormen variëren tussen de 0,8 en 3,3 m bij de 2019 bodem, en tussen 2,1 en 4,8 m bij de ontwerpbodem. De ontgrondingsdieptes tijdens de 1/100 jaarstormen variëren tussen de 2,2 en 4,5 m bij de 2019 bodem, en tussen 2,9 en 6,1 m bij de ontwerpbodem.
De resultaten van ontgrondingsberekeningen voor de 2019 bodem zijn samengevat in Figuur 5-3.

Turbine	Storm uit WZW			Storm uit W			Storm uit WNW			Storm uit NNW		
	1/1 jaar	1/10 jaar	1/100jaar	1/1 jaar	1/10 jaar	1/100jaar	1/1 jaar	1/10 jaar	1/100jaar	1/1 jaar	1/10 jaar	1/100jaar
1	*0-1m*											
2												
3												*3-4m*
4	*1-2m*		*2-3m*									*4-5m*
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												

wit = 0-1m, grijs = 1-2m, geel = 2-3m, oranje = 3-4m, rood = 4-5m

Figuur 5-3. Gemiddelde diepte ontgrondingskuilen bij verschillende stormen, berekend op basis van de 2019 bodem (wit = 0-1 m, lichtgrijs = 1-2 m, geel = 2-3 m, oranje = 3-4 m, rood = 4-5 m).

Hieruit blijkt dat stormen uit de zuidelijke richtingen voor minder lokale ontgronding zorgen dan de noordelijke stormen; het grootste effect van ruim 4 m is gevonden bij een NNW storm.

Resultaten van de ontgrondingsberekeningen van (Deltares, 2020a) hebben aan de ene kant een grote onzekerheidsmarge, aan de andere kant zijn behoorlijk conservatieve aannames gemaakt. Zo is het effect van opvullen door golven (backwash) genegeerd. De verwachting is daarom dat de gepresenteerde resultaten nog steeds aan de behoorlijk conservatieve kant liggen.

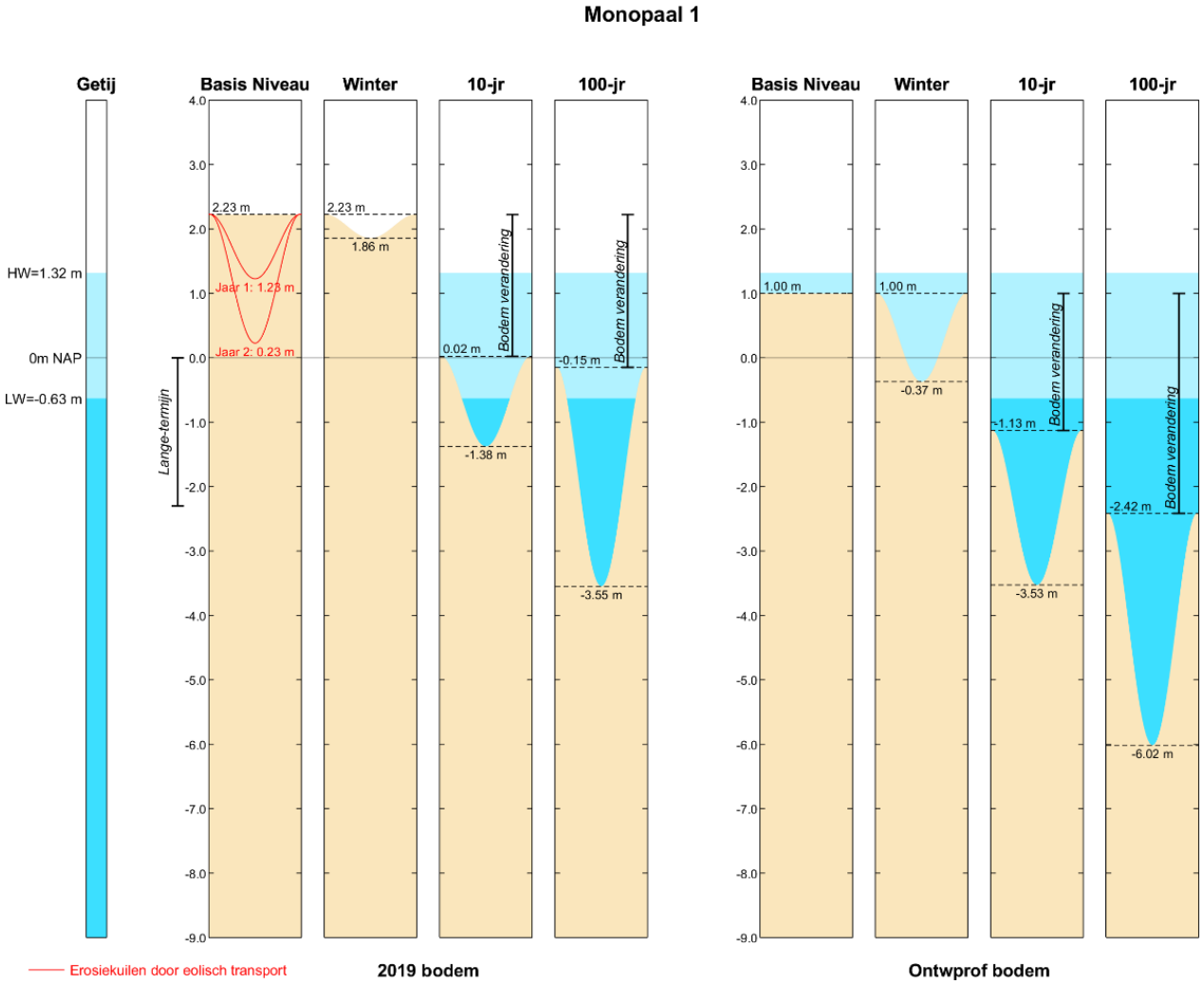
Ontgrondingskuilen ontstaan na elke storm. De reeds bestaande kuilen worden bij de volgende storm groter, deze groei bereikt echter een bepaald maximum. Deze kuilen hebben volgens Deltares een bodemhelling van 1:4. Er is onzekerheid over de vorm, (Deltares, 2020a) adviseert om (conservatief) uit te gaan van cirkelvormige ontgrondingskuilen.

Naast de bovengenoemde ontgronding door stromingen van water en golven is ook onderzocht of er erosiekuilen door eolisch (wind) transport kunnen ontstaan. Het is namelijk mogelijk dat een windturbine op een droog strand komt te staan; initieel of bijvoorbeeld na een (strand) suppletie. Voor de twee beschouwde bodems in deze studie is de verwachting dat er alleen bij windturbines 1, 7, 8 en 9 een erosiekuil door windtransport zal ontwikkelen tot een diepte van ongeveer 2 m. In geval van een windturbine met een diameter van 5m, zal de erosiekuildiepte na een 1/1 jaar storm naar verwachting met 0,5 tot 1 meter toenemen. Gedurende één jaar onder eolische invloed, zal de erosiekuildiepte naar verwachting 1 tot 1,5 meter toenemen. (Deltares, 2020a) stelt verder dat de toekomstige bodemligging nabij de windturbines sterk kan variëren in de komende 25 jaar, waardoor deze bevindingen ook voor andere windturbines relevant kunnen zijn. Opgemerkt wordt dat de voorspelde ontgrondingsdieptes die

door de eolische processen worden veroorzaakt vergelijkbaar zijn met de ontgrondingsdieptes die door stormen worden veroorzaakt. De helling van de ontgrondingskuilen die door de eolische processen ontstaan is wel steiler, 1:1,5. Dit impliceert dat de door golven en stromingen veroorzaakte ontgrondingsvormen bij de lager gelegen windturbines zullen domineren.

(Deltares, 2020a) stelt dat de lokale ontgrondingen niet los gezien kunnen worden van de bodemveranderingen op grotere tijd- en ruimtelijke schaal. Het strandniveau van MV-2 wordt sterk beïnvloed door aan de ene kant erosie en aan de andere kant onderhoudssuppleties, zoals beschreven in hoofdstuk 2. Dit resulteert in verschillende bodemliggingen in verschillende jaren. Binnen een jaar is er sprake van seizoensdynamiek – in de winter zal de bodem bij de windturbines als gevolg van strandafkalving lager liggen dan in de zomer wanneer het strand juist wordt opgebouwd. Een zware storm zorgt doorgaans voor veel erosie en een extra bodemverlaging. Al deze effecten dienen in samenhang te worden beschouwd om een realistische inschatting van de diepte van de ontgrondingskuilen te maken. Dit is geïllustreerd in een serie figuren (Figuur 5-4 op de volgende pagina als voorbeeld, en soortgelijke figuren voor alle windturbines in Bijlage A1).

De ontgrondingen zoals beschreven in dit hoofdstuk verminderen tijdelijk het volume zand in de keuringsraaien die over de windturbines lopen. Bij een erosiekuil van 4m diep gaat het om ruim 1.000 m^3 sediment. Dit zandvolume wordt echter niet aan het sedimentaire systeem van MV-2 onttrokken, het geërodeerde zand zal zich slechts lateraal verplaatsen en nog steeds binnen dezelfde keuringsschil aanwezig zijn, mogelijk verplaatst naar de naburige raaien. Bovendien zal de groei van de ontgrondings-kuilen worden gemitigeerd door een erosiebescherming rondom de turbines, zie hoofdstuk 8. Deze ontgrondingen hebben dus geen netto effect op de veiligheid van de waterkering.



Basis niveau: uitgangssituatie berekening Winter: ontgrondingskuil tijdens winter stormseizoen (zonder extreme stormen) 10-jr : ontgronding t.g.v. 1/10 per jaar storm 100-jr: ontgronding t.g.v. 1/100 per jaar storm Lange termijn: indicatie minimum bodemligging ten opzichte van NAP 2019 bodem: bodem op basis van Q2 2019 meting Ontwprof bodem: ontwerpbodem MV-2

Figuur 5-4. Samengestelde bodemontwikkeling bij windturbine ZZ-01

6 Beheer en Onderhoud

6.1 Suppletiestrategie

Analyse van de effecten van de windturbines op de veiligheid tegen overstromen in hoofdstuk 3 laat zien dat de aanwezigheid van de windturbines een beperkt negatief effect op de veiligheid heeft. Om dit te mitigeren dient over de hele lengte van de Zachte Zeewering (inclusief de overgangszone) een toeslag van 40 m^3/m aan het ontwerpprofiel in het Beheer en Instandhoudingsplan te worden toegevoegd. Hiermee wordt de standzekerheid van de waterkering geborgd. Behoudens de overgangszone leidt dit niet tot de noodzaak van een aanvullende suppletie, er ligt immers voldoende zand in de duinen over de hele lengte van de Zachte Zeewering. Bovendien wordt ruim 30.000 m^3 zand aan de zeewering toegevoegd, dit is het zand dat vrij komt van de kraanopstelplaatsen en taluds van de duinoversteken. De voorgestelde aanpassing van de methodiek keuringen is uitgewerkt in paragraf 6.3.

(Svasek Hydraulics, 2019b) geeft aan dat achter de windturbines salient-achtige patronen kunnen ontstaan. Hierdoor zal de plaatsing van de windturbines zorgen voor een netto reductie van de suppletiebehoefte, maar ontstaan er lokaal tussen de turbines ook plekken waar de erosie beperkt toeneemt. Hierdoor zou mogelijk een hogere suppletiebehoefte in de eerste jaren na aanleg kunnen ontstaan. Om deze verandering te onderhouden zou in de eerste jaren na aanleg 200.000 m^3 extra suppletie nodig zijn. (Svasek Hydraulics, 2019b) stelt vervolgens dat het onwaarschijnlijk is dat de voorspelde veranderingen in de suppletiebehoefte daadwerkelijk merkbaar of meetbaar zullen zijn. (Svasek Hydraulics, 2020a) neemt deze conclusies over, echter met een nuancering dat door een kleinere omtrek en een lagere positie van windturbines in het strandprofiel deze effecten kleiner zullen zijn. Op grond hiervan achten we deze aanvullende strandsuppletie niet nodig, mede gezien de conclusie dat deze erosie niet meetbaar zal zijn.
De aanwezigheid van de windturbines op het strand zal nauwelijks tot geen effect hebben op de suppletiestrategie en voor de uitvoering van het onderhoud (zandsuppleties), mits er rekening mee wordt gehouden bij de planning van plaatsing van de spuitmonden en persleidingen. Hiervoor zullen aanvullende afspraken worden gemaakt tussen RWS, Eneco en de aannemer die de suppleties uitvoert. Dit wordt besproken in het volgende paragraaf. In het ontwerp van de monopalen wordt rekening gehouden met de (reële) kans van een aanrijding door een bulldozer.

6.2 Beheer en Onderhoud door Eneco

6.2.1 Dagelijkse inspectie

De beheerder van de het windpark zal ervoor zorgdragen dat de strandsituatie in de directe nabijheid van de windturbines dagelijks geïnspecteerd wordt. Indien hij grote ontgrondingskuilen constateert die zich potentieel tot gevaarlijke situaties zouden kunnen ontwikkelen zal hij opdracht geven aan de gecontracteerde aannemer om die uiterlijk binnen 14 dagen op te vullen met het zand van het naast liggende strand. Er wordt een dunne zandlaag geschrapt om geen nieuwe kuilen te maken. Er wordt geen nieuw zand aangebracht, het geërodeerde zand uit de ontgrondingskuilen blijft in het systeem (op het strand of op de vooroever).

6.2.2 Inspectie eind stormseizoen

Aan het einde van het stormseizoen zal ieder jaar een inspectie van de strandligging bij de windturbines worden uitgevoerd. We stellen voor om deze inspectie gezamenlijk uit te laten voeren door de beheerders van Eneco en Rijkswaterstaat. Tijdens deze inspectie wordt bepaald welke ontgrondingskuilen opgevuld dienen te worden. Het opvullen wordt gedaan door de door Eneco gecontracteerde aannemer die deze werkzaamheden binnen 14 dagen uit gaat voeren op de wijze zoals beschreven in de vorige paragraaf. Eneco zal de procesafspraken met Rijkswaterstaat maken en deze vastleggen in het site beheer plan.

6.2.3 Strandsuppleties

De onderhoudssuppleties van MV-2 worden uitgevoerd tot een nader te bepalen straal vanaf de windturbine. Eneco is contractueel verantwoordelijk voor het strandonderhoud direct naast de windturbine. Door het loskoppelen van het onderhoud naast de windturbines van het reguliere strandonderhoud zouden naast de windturbines verschillen in de bodemhoogte ten opzichte van het naastliggende strand kunnen ontstaan, wat onwenselijk is en mogelijk tot gevaarlijke situaties kan leiden. We stellen voor dat Eneco afspraken maakt met dezelfde aannemer die de reguliere suppleties uitvoert om zijn werkzaamheden voort te zetten tot aan de windturbines. De hieruit voortvloeiende extra kosten worden door Eneco gedragen.

6.2.4 Onderhoud duinovergangen

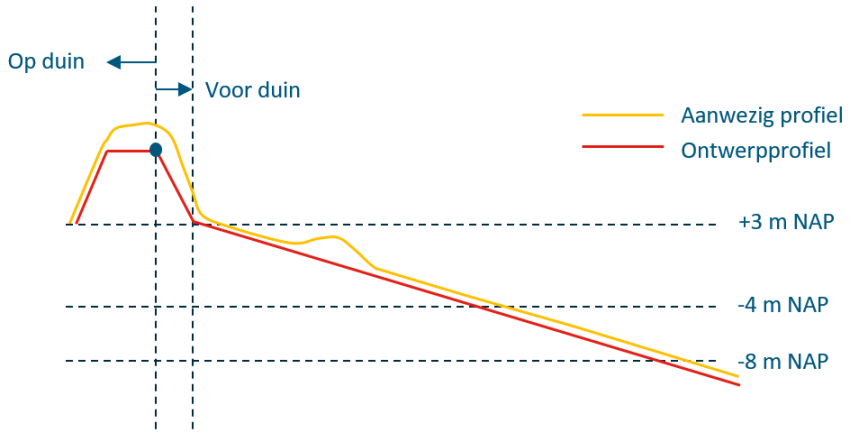
De 5 m brede duinovergangen worden door Eneco aangelegd ten behoeve van de bouwwerkzaamheden. Deze duinovergangen worden vervolgens in stand gehouden als toegangswegen voor de hulpdiensten en voor klein onderhoud aan de windturbines. De volledige breedte van 5 m is dan niet nodig en kan worden teruggebracht tot de breedte van een stelcon plaat (2,5 m). Voor het groot onderhoud van windturbines zal weer de volledige wegbreedte nodig zijn. Aangezien het moment van dit onderhoud nauwelijks ruim van tevoren te plannen is, zal de verbreding worden aangebracht wanneer dat nodig is. Daarbij wordt rekening gehouden met de uitgangspunten zoals beschreven in paragraaf 3.5.1. Eneco gaat de afspraken daartoe maken met een aannemer.

6.3 Voorstel aanpassing methodiek keuringen

6.3.1 Zachte Zeewering

Langs de gehele Zachte Zeewering dient het ontwerpvolume met 40 m^3/m vergroot te worden. De huidige en nieuwe keuringsvolumes zijn te zien in Figuur 6-2. In de huidige keuringsmethodiek wordt enkel gekeken of het volume binnen de gehele duinschil voldoende is. Aan deze methodiek dienen de volgende stappen te worden toegevoegd:

1. Er moet worden bekeken of de benodigde extra 40 m^3/m zich op het duinprofiel bevindt. Daarvoor moet dit volume zich bevinden aan de landzijde van het knikpunt in het ontwerpprofiel, zie Figuur 6-1. Wanneer dit het geval is, is de standzekerheid van de waterkering geborgd;
2. Wanneer dit niet het geval is, mag dit gecompenseerd worden met extra volume wat zich voor het duin bevindt. Wanneer hier (in de duinschil, maar zeewaarts van het knikpunt in het ontwerpprofiel) zich de extra 40 m^3/m bevindt, is het volume in de duinschil groot genoeg, Echter, in dit geval verschuift het gehele ontwerpprofiel naar voren (zie ook Figuur 3-2) en moeten de ontwerpvolumes in de strandschil en vooroeverschil ook vergroot worden.



Figuur 6-1: Schematisatie van de ligging van het knikpunt in het ontwerpprofiel.

	Ontwerpvolume duinschil [m3/m]	
Raai (BC)	*Huidig*	*Nieuw*
3495	612	652
3600	625	665
3800	567	607
4000	472	512
4200	430	470
4400	430	470
4600	441	481
4800	441	481
5000	441	481
5200	441	481
5400	441	481
5600	429	469
5800	429	469
6000	429	469
6200	409	449
6400	409	449
6600	423	463
6800	380	420
7000	339	379
7200	339	379
7400	339	379
7600	330	370
7800	330	370
8000	330	370
8200	304	344
8400	304	344
8600	218	258
8800	212	252
9000	207	247
9200	207	247
9400	207	247
9600	204	244
9800	204	244
10000	204	244
10200_250	208	248
10200_228	220	260
10200_205	208	248
10400	208	248
10590	208	248

Figuur 6-2: Huidige en nieuwe ontwerpvolumes van de duinschil.

6.3.2 Overgangszone

Voor de overgangszone wordt eveneens een toeslag van 40m³/m aangehouden om het effect van de windmolens te compenseren. In de keuringsmethodiek dient naast de reeds bestaande toeslagen een extra toeslag van 40 m³/m tussen NAP en kruin van het duin te worden opgenomen.

7 Effecten op veiligheid strandbezoekers

De lokale ontgrondingen bij de windturbines zijn in hoofdstuk 5 beschreven. Tijdens het winterseizoen met regelmatige maar niet extreme stormen kunnen ontgrondingskuilen ontstaan met een diepte tussen 0,5 en zelfs 3 m (uitgaande van de recente bodemhoogte). Bij meer extreme stormen kunnen nog diepere ontgrondingskuilen ontstaan. Bij lagere bodemniveaus (meer erosie bij de waterlijn die nog niet door suppletie gecompenseerd hoeft te worden) kunnen deze ontgrondingskuilen dieper worden. Voor de bodemhelling van de kuilen wordt uitgegaan van een helling van 1:4.
Alleen windturbines 1, 7, 8 en 9 staan boven de hoogwaterlijn, op het droge strand. De overige windturbines staan lager in het profiel, in de intergetijde zone. Bij de hoger gelegen windturbines zullen de ontgrondingskuilen goed zichtbaar zijn voor de strandbezoekers en vormen daarmee geen gevaar, de 1:4 helling is niet als gevaarlijk te beschouwen en redelijk te beklimmen. Dit geldt echter niet voor de ontgrondingskuilen die onder water staan en niet vanaf het strand te zien zijn. Vanwege een relatief flauwe bodemhelling is er geen acuut verdrinkingsgevaar voor de strandbezoekers – vooral windsurfers. Bovendien zal de aanwezigheid van de windturbines op het strand de aantrekkelijkheid van dit strand voor gezinnen met kinderen niet bevorderen, wat het risico voor incidenten zal doen afnemen. Het deel van het strand waar de windturbines komen te staan is bovendien geen recreatiestrand, dat bevindt zich meer naar het zuiden. Momenteel wordt al gewaarschuwd voor gevaarlijke stromingen. De windsurfers zullen bij voorkeur ver bij de windturbines wegblijven om het risico van botsing met de harde constructie te vermijden. Ook vliegeraars en kitesurfers zullen naar verwachting bij de windturbines wegblijven.

We achten het aanbrengen van duidelijk zichtbare waarschuwingsborden (zulke borden zijn al op MV-2 aanwezig, zie Figuur 7-1) een voldoende mitigerende maatregel. Dit geldt vooral voor het winterseizoen wanneer toch al niet wordt gezwommen; in de zomer zullen de ontgrondingskuilen zich van nature gedeeltelijk opvullen. Om dit proces te versnellen wordt als een mitigerende maatregel opgenomen het opvullen van de ontgrondingskuilen die boven de laagwaterlijn liggen met het strandsediment rondom de windturbine m.b.v. een bulldozer. Dit wordt gedaan na het einde van het stormseizoen, in maart-april, zodat in het recreatieseizoen geen diepe erosiekuilen op het strand aanwezig zijn.

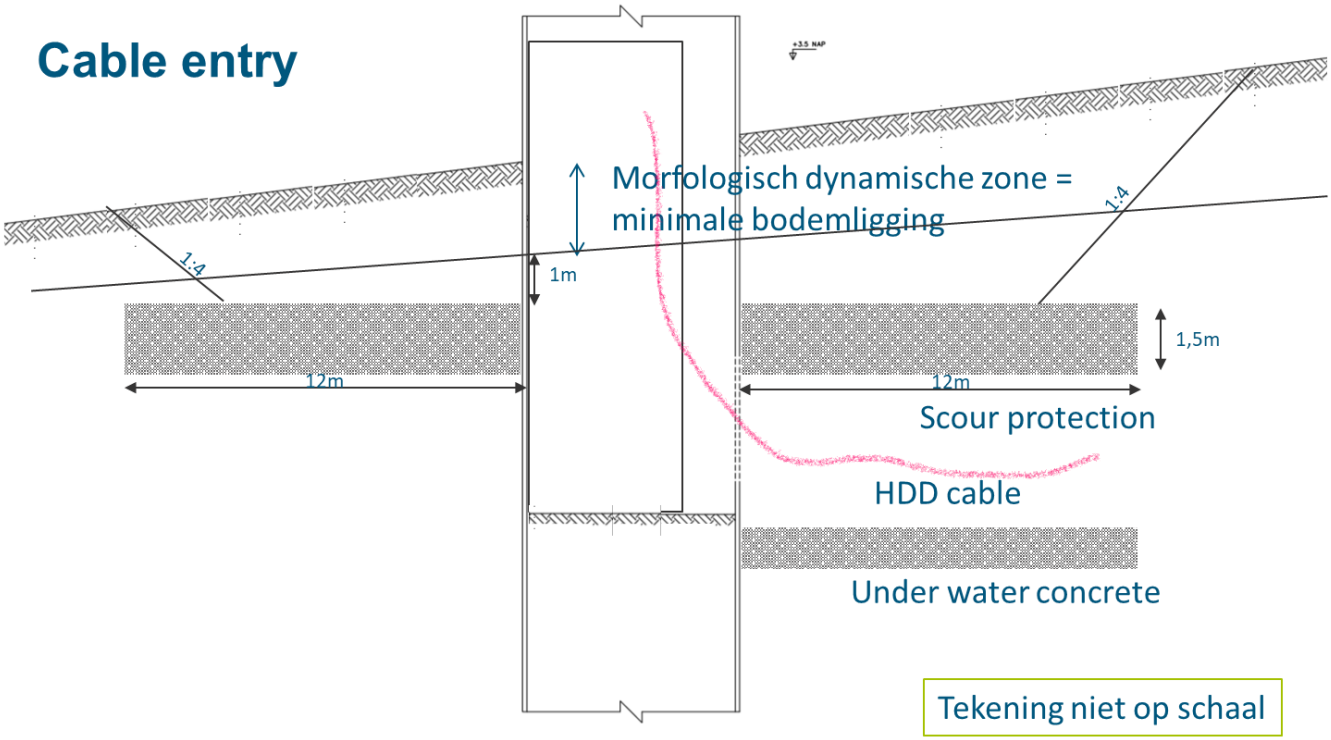
Figuur 7-1. Waarschuwingsbord op MV-2

8 Dekking kabels en leidingen

De HDD kabelbundel wordt geplaatst tussen de windturbine en de duin, beneden de laagste bodemligging die in deze studie is gevonden (zie hoofdstuk 4), waarbij een dekking van 1,5 m wordt aangehouden om het risico van blootlegging te allen tijde te voorkomen. Voor het ontwerp wordt gebruik gemaakt van de vigerende normen, dit is in detail beschreven in het rapport BG8375-RHD-ZZ-XX-RP-D-0001- WP MV2 VO ontwerp parkbekabeling windturbines op zachte zeewering.

Het onderzoek naar lokale ontgrondingen in hoofdstuk 5 heeft laten zien dat er rondom een aantal windturbines diepe ontgrondingskuilen kunnen ontstaan. Grote, diepe ontgrondingen rondom de windturbines zijn ongewenst, zowel vanuit het oogpunt van de veiligheid van de zeewering als de constructie(kosten) en stabiliteit van de windturbine. Zonder aanvullende erosiebescherming zou de aansluiting van de kabelbundel op de windturbine op een diepte van meer dan 10 m beneden NAP aangebracht moeten worden.

De lokale ontgrondingen zullen daarom worden gemitigeerd door een erosiebescherming rondom alle windturbines aan te brengen. Deze bescherming wordt aangebracht op 1 m beneden de minimum bodemligging bij elke windturbine zodat er te allen tijde ruime zanddekking aanwezig is (Figuur 8-1). De details van de erosiebescherming zijn te vinden in BG8375-RHD-ZZ-XX-RP-S-0001 WP MV2 Monopile Concept Design Report.



Figuur 8-1. Schets erosiebescherming

De maximale diepte van de ontgrondingskuilen wordt daarmee aanzienlijk beperkt wat de standzekerheid van de waterkering ten goede komt en tegelijkertijd de risico's voor de constructie (inclusief risico dat de HDD kabels bloot komen te liggen) reduceert.

De mogelijke invloed van deze harde erosie bescherming op de veiligheid van de waterkering is beoordeeld aan de hand van XBeach berekeningen van (Svasek Hydraulics, 2020c). De uitgangspunten van deze berekeningen zijn hetzelfde als bij de bepaling effecten van de windturbines, zie paragraaf 3.2. In de berekeningen zijn de maximale erosiekuilen bij de ontwerpbodem opgenomen uit de analyse van (Deltares, 2020a), en vervolgens de erosiebescherming zoals in deze paragraaf beschreven toegevoegd. De berekening laat zien dat de invloed van deze bescherming op de afslagvolumes nihil is. Daarmee is bevestigd dat deze erosiebescherming op geen enkele manier de veiligheid van de waterkering negatief zal beïnvloeden, deze erosiebescherming ligt immers op een zodanige diepte dat deze geen invloed heeft op het zandtransport langs en dwars op de kust.

Het aanbrengen van erosiebescherming is niet in strijd met de eis uit RWS memo 46.4 Watervergunning Zachte Zeewering Windpark MV2 d.d. 23 mei 2019: “Behoudens de windturbinefundaties mogen er geen andere permanente harde elementen zoals steenzettingen en verhardingen op het strand zijn”. Deze eis beoogt het risico van ontgronding door de harde elementen op het strand (anders dat de windturbines zelf) uit te sluiten. De erosiebescherming wordt niet op het strand maar diep onder het afslagprofiel aangebracht. Er is aangetoond dat er geen negatieve effecten op morfologische processen en geen extra erosie zijn te verwachten indien deze erosiebescherming tijdens een storm ontbloot komt te liggen. De aanwezigheid van de bescherming vermindert substantieel het zandverlies door lokale erosie (scour) rondom de windturbines.

9 Bibliografie

Arcadis. (2020). *Beschouwing omtrent standzekerheid en suppletie ten behoeve van windmolens in de Zachte Zeewering van Maasvlakte 2, C06041.000040me01, juli 2020.*

Deltares. (2015). *Achtergronddocument toetsschema duinafslag, Filterregels bij toepassing van de gedetailleerde toets duinafslag WTI2017, 1220085-006-HYE-0007.*

Deltares. (2020a). *Ontgronding rondom windturbines van windpark Maasvlakte 2, 11205329-000-HYE-0003, mei 2020.*

Lako, A. (2019). *Morphodynamic behaviour of coastal hard-soft transitions - A case study of Maasvlakte 2.*

PONDERA. (2020). *Wind conditions report Wind Farm Maasvlakte 2, 14 May 2020.*

PUMA. (2018). *Samenvatting keuringen en ervaringen Instelperiode: Volume morfologische schillen.*

PUMA. (2019a). *Keuringsformulier PUMA-KF-ZZ-2019-04 Volume in morfologische schillen.*

PUMA. (2019b). *Zachte zeewering: Keuringsmethodiek voor Zachte Zeewering ten noorden van Kp3.700.*

PUMA. (2019c). *Werk- en Keurplan Beheer- en instandhouding in de Onderhoudsperiode, PUMA-B&O-WP-BIP.*

PUMA. (2019d). *Zachte Zeewering: Keuringsmethodiek voor Zachte Zeewering ten noorden van Kp3.700, puma-p-mon-mi06.*

Rijkswaterstaat. (2013). *Kenmerkende waarden - Getijgebied 2011.0.*

Rijkswaterstaat. (2019a). *Memo Watervergunning Zachte Zeewering Windpark MV2 – 23 april 2019.*

Rijkswaterstaat. (2019b). *Duiding bij 2 documenten over beheer & onderhoud van zeewering.*

Rijkwaterstaat. (1994). *Tienjarig Overzicht 1981-1990.*

Svasek Hydraulics. (2019a). *Aanleg windturbines MV2; Verslag Expertmeeting; 1966/U19140/D/AKR.*

Svasek Hydraulics. (2019b). *Effecten Windturbines op MV2 op stormafslag, lange termijn morfologie en eolisch transport.*

Svasek Hydraulics. (2019c). *Morfologische inpassing windturbines zachte zeewering MV2 - Interactie met transportprocessen en effect op waterveiligheid, definitief.*

Svasek Hydraulics. (2020a). *Morfologische effecten van windturbines op MV2 configuratie Eneco April 2020, 2034/U20125/C/LSpa.*

Svasek Hydraulics. (2020b). *Memo: minimum bodem na afslag 1:10000 storm. Referentie 2034/U20140/B/BvL.*

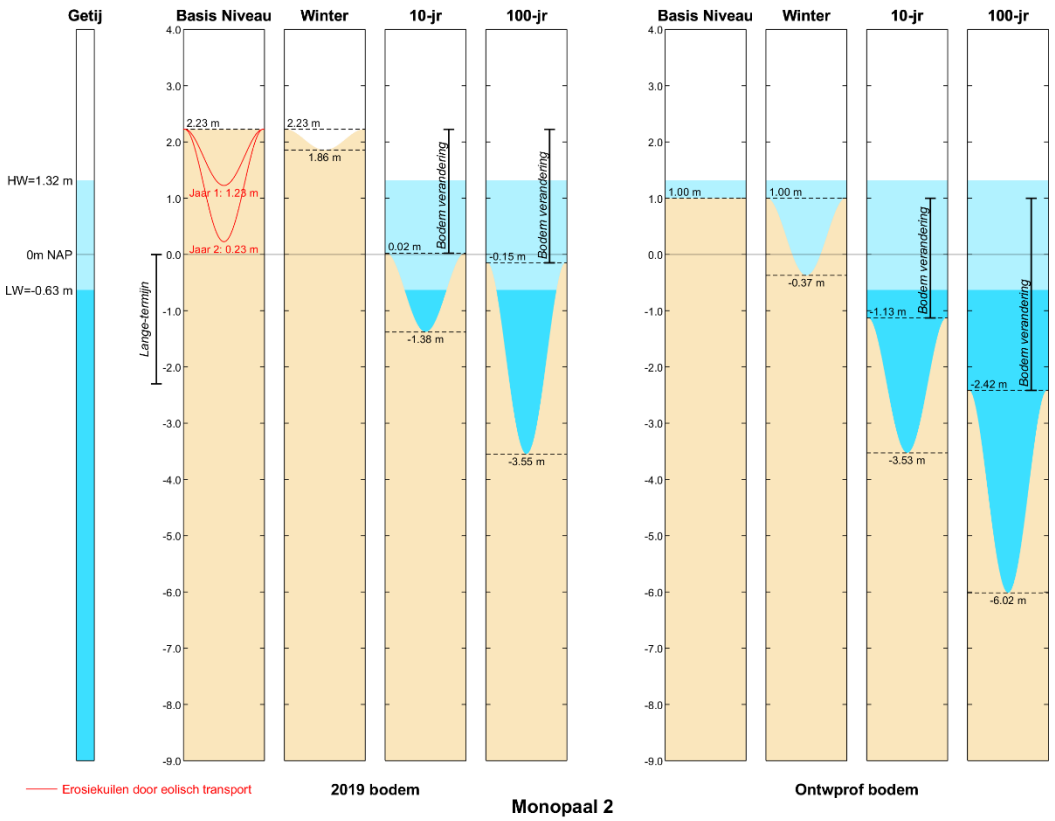
Svasek Hydraulics. (2020c). *Memo: Morfologische effecten erosiebescherming rond windturbines in XBeach simulaties MV2, 2034/U20177/LSpa, juni 2020.*

Svasek Hydraulics. (2020d). *Memo: Morfologische effecten van windturbines en bouwplatformen op MV2 configuratie Eneco april 2020.*

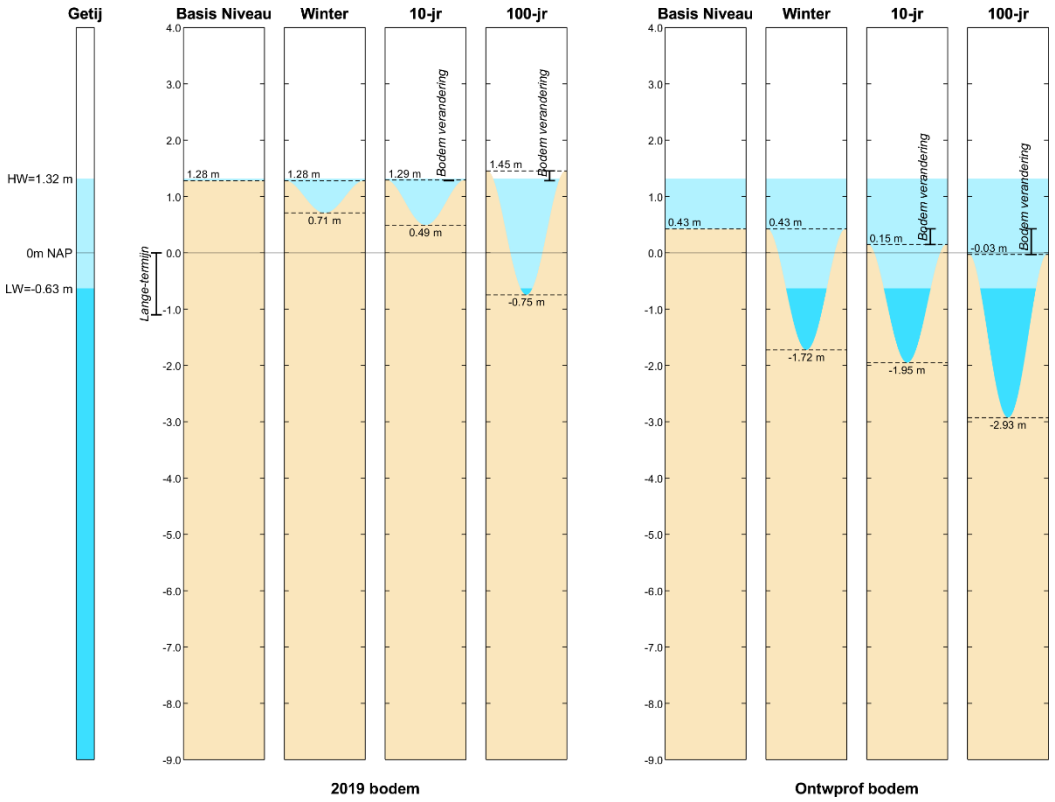
A1 Samengestelde bodemontwikkeling bij windturbines

Grafische weergave van morfologische bijdragen aan de lokale bodemligging voor de afzonderlijke windturbines.

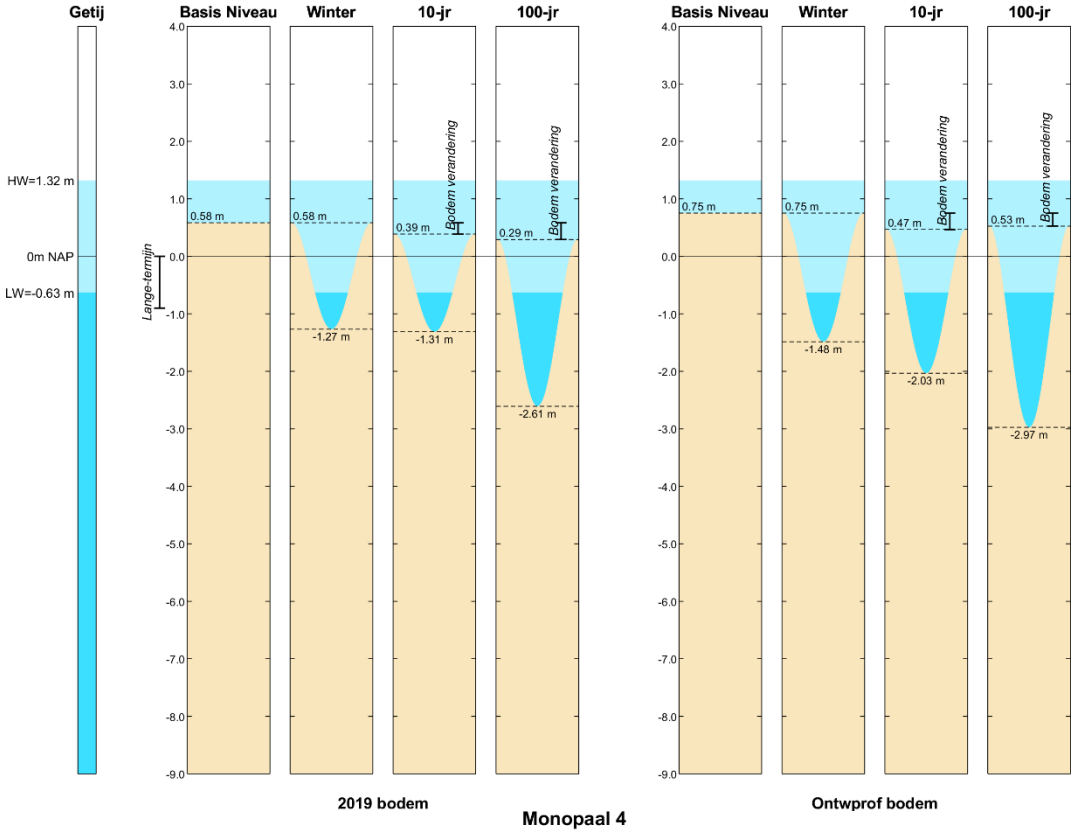
Monopaal 1



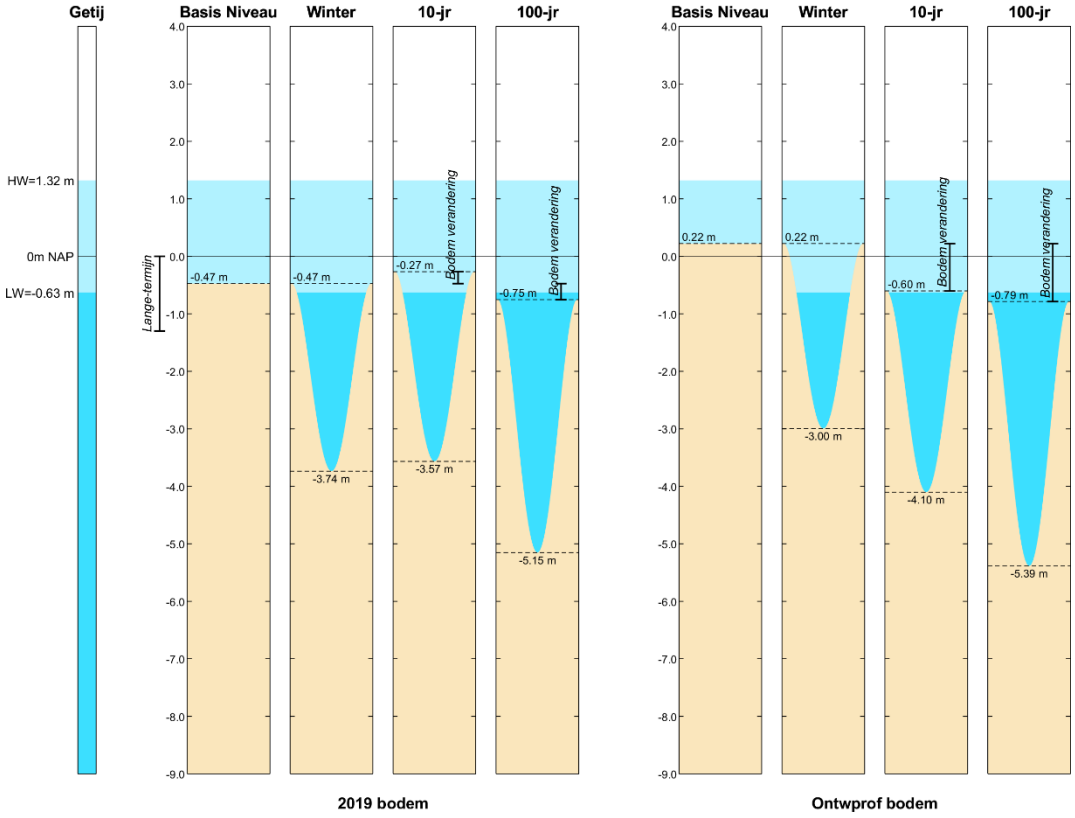
Monopaal 2



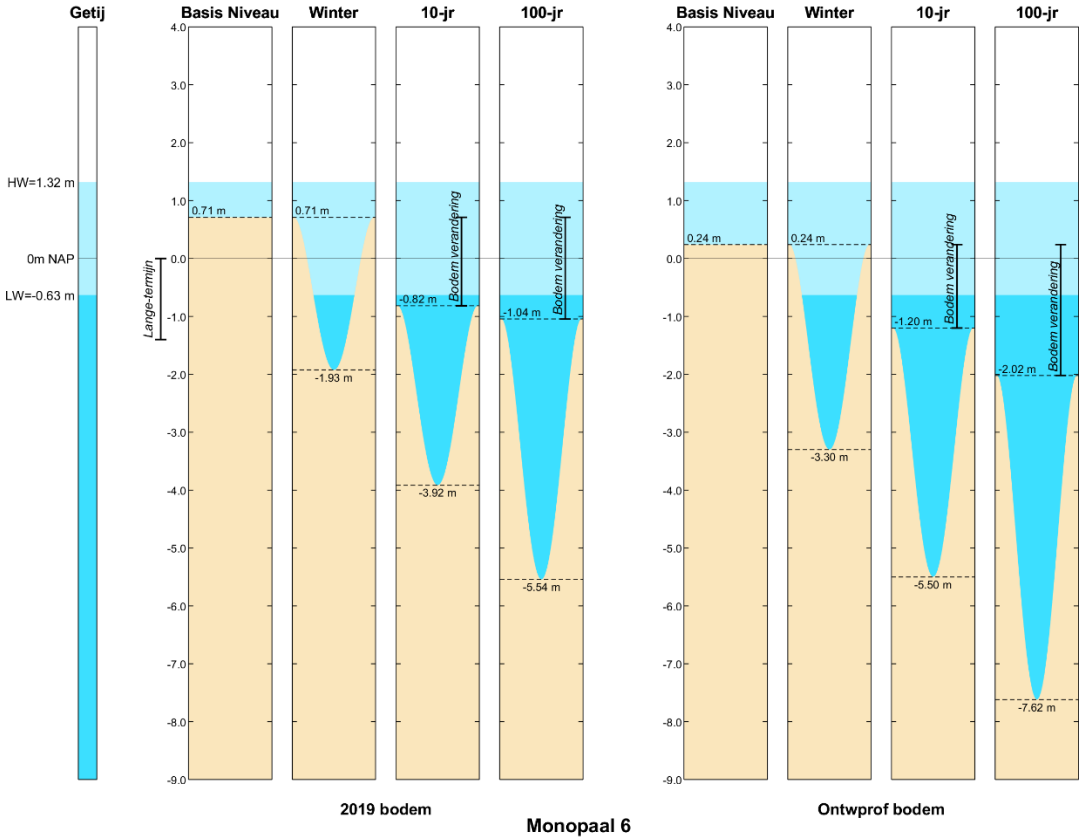
Monopaal 3



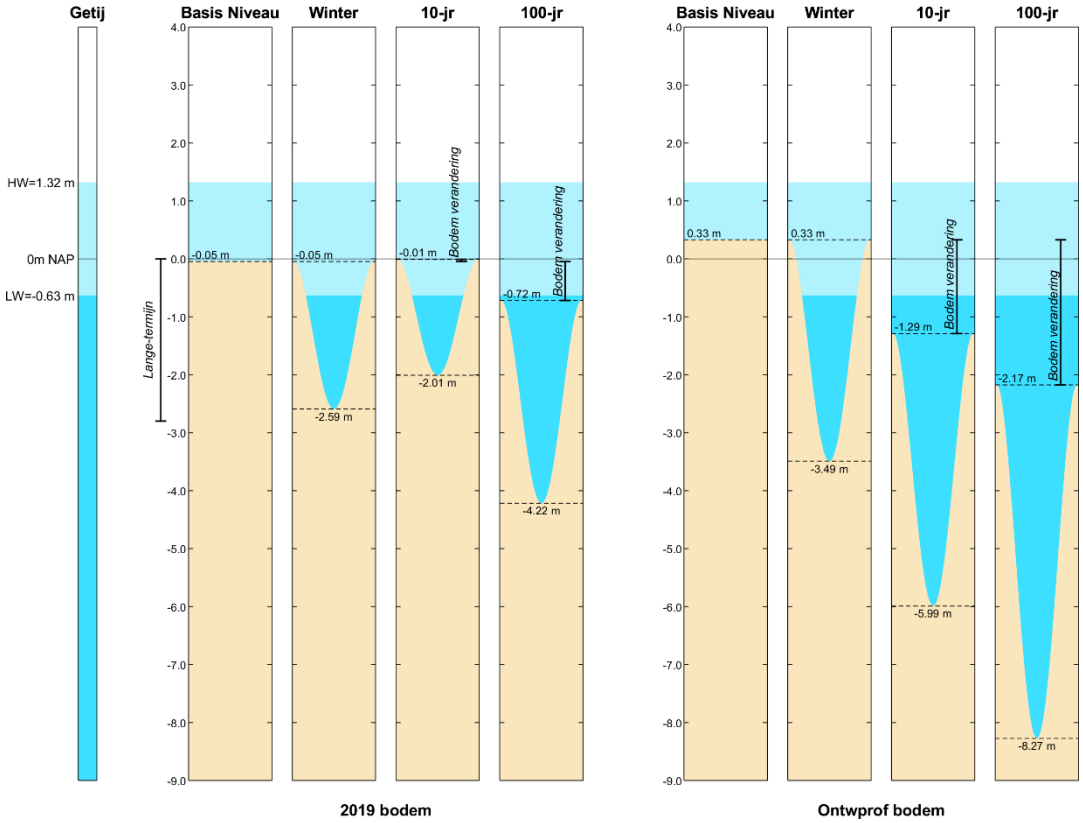
Monopaal 4



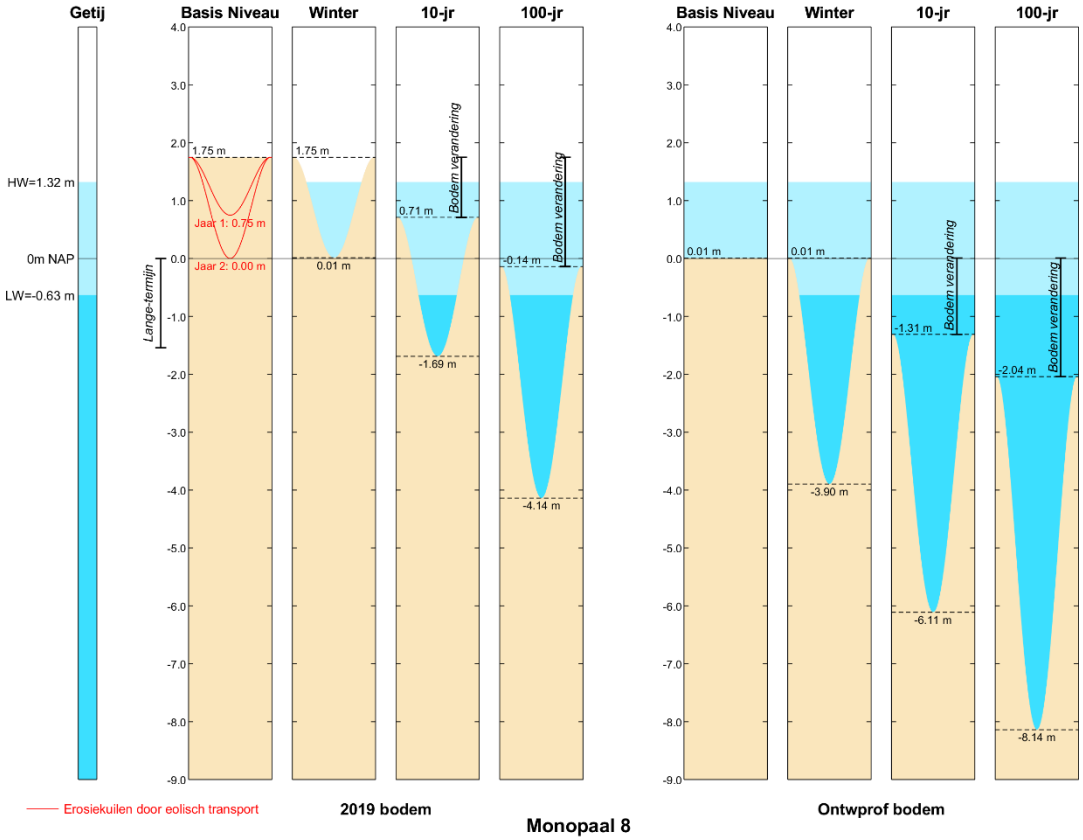
Monopaal 5



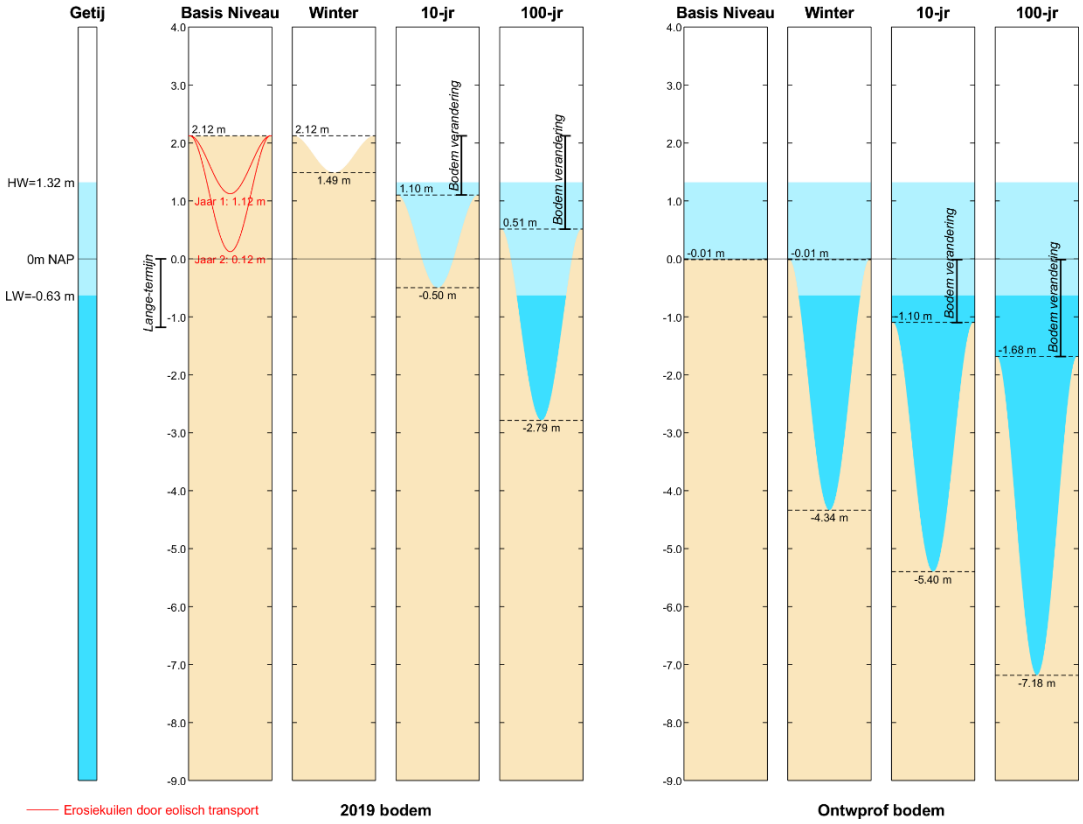
Monopaal 6



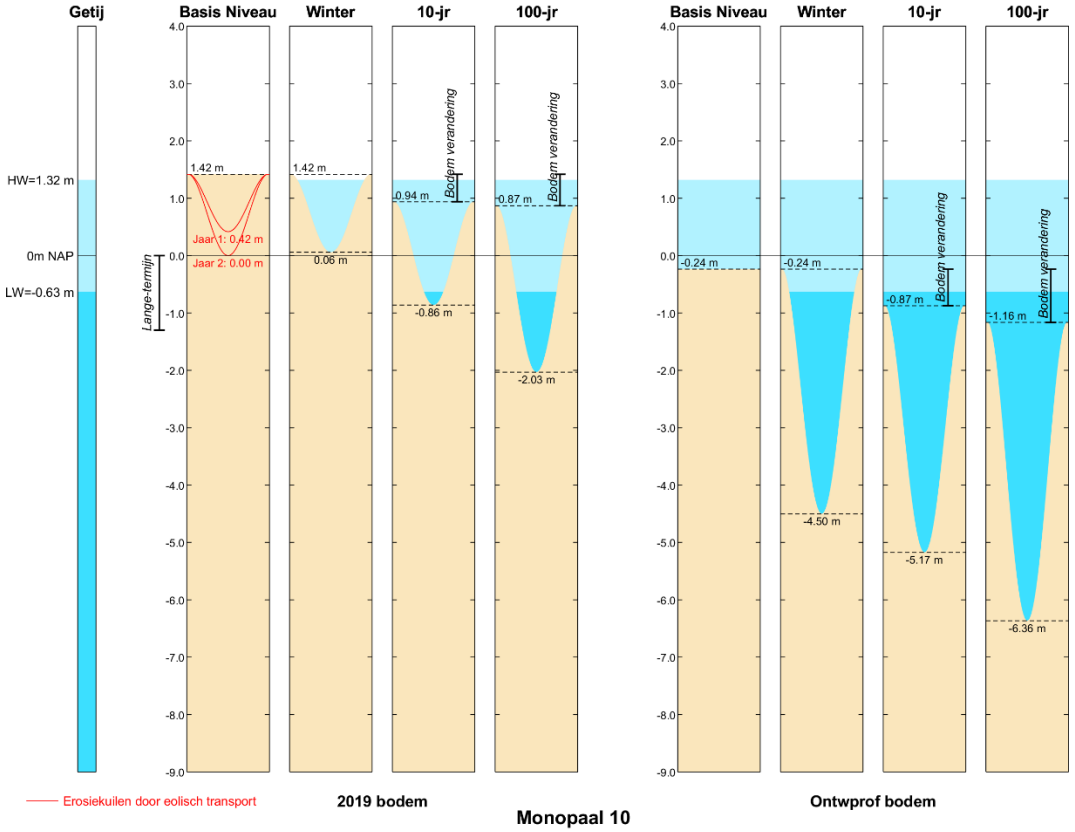
Monopaal 7



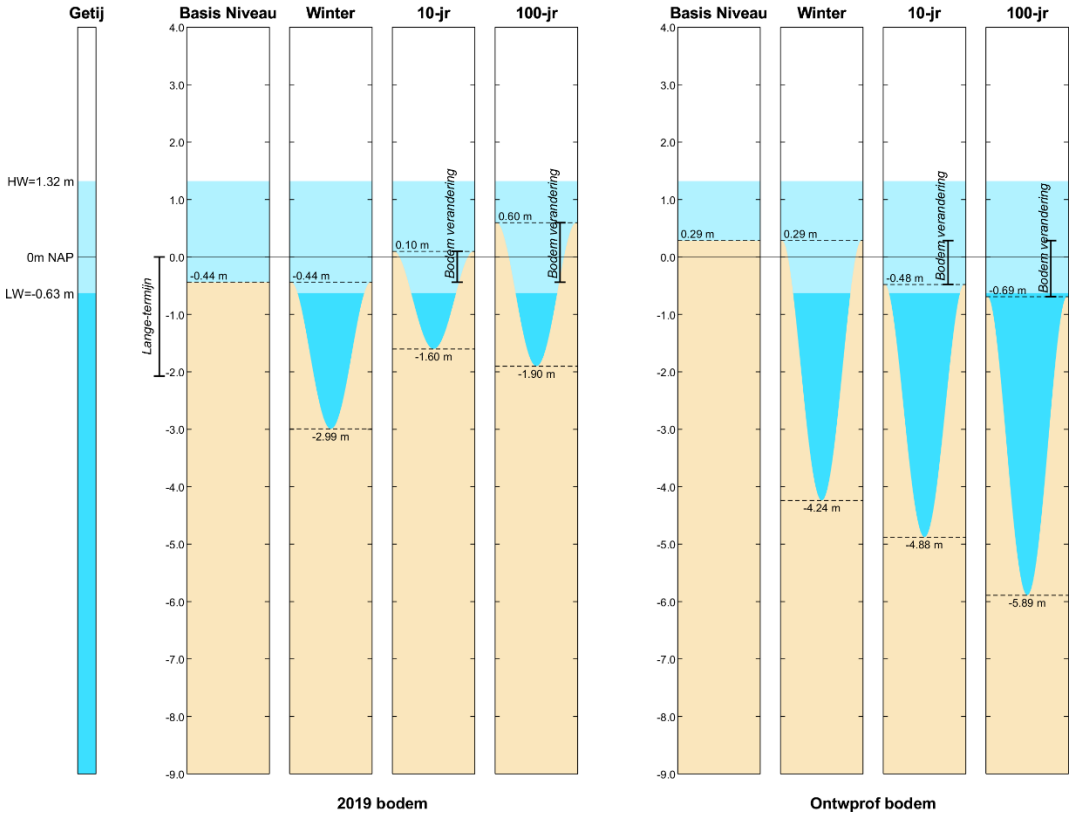
Monopaal 8



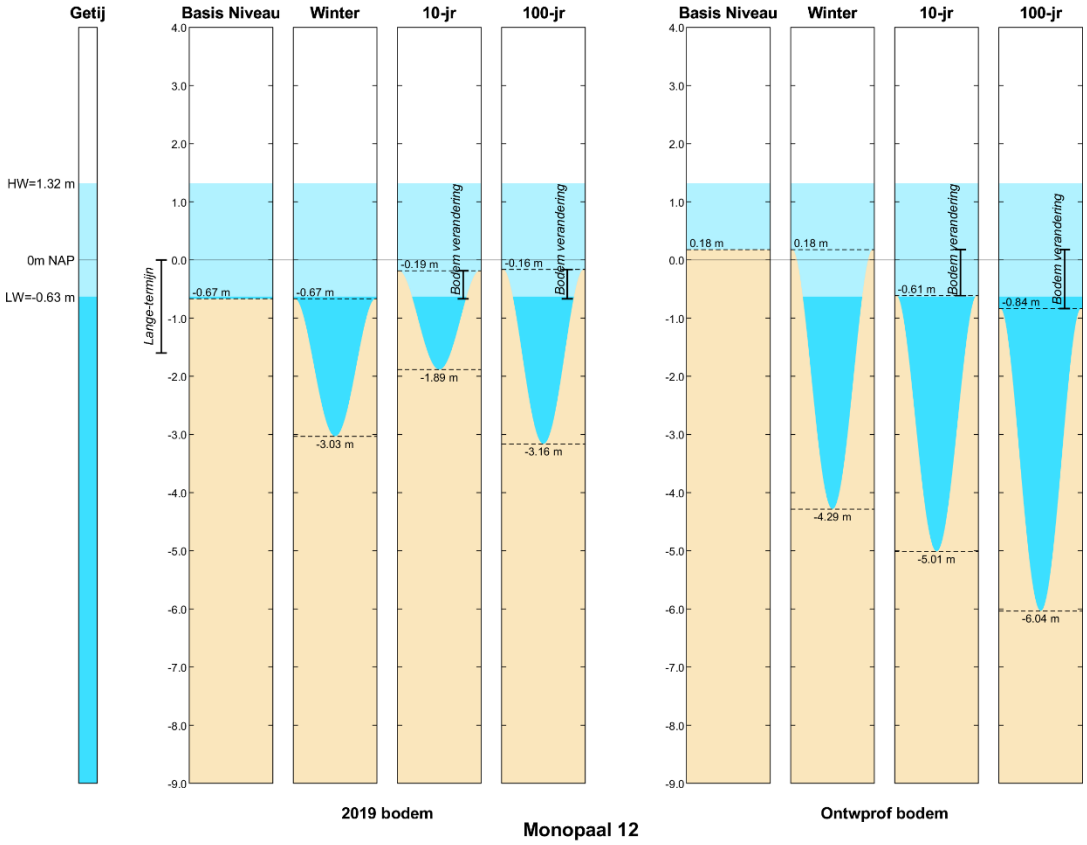
Monopaal 9



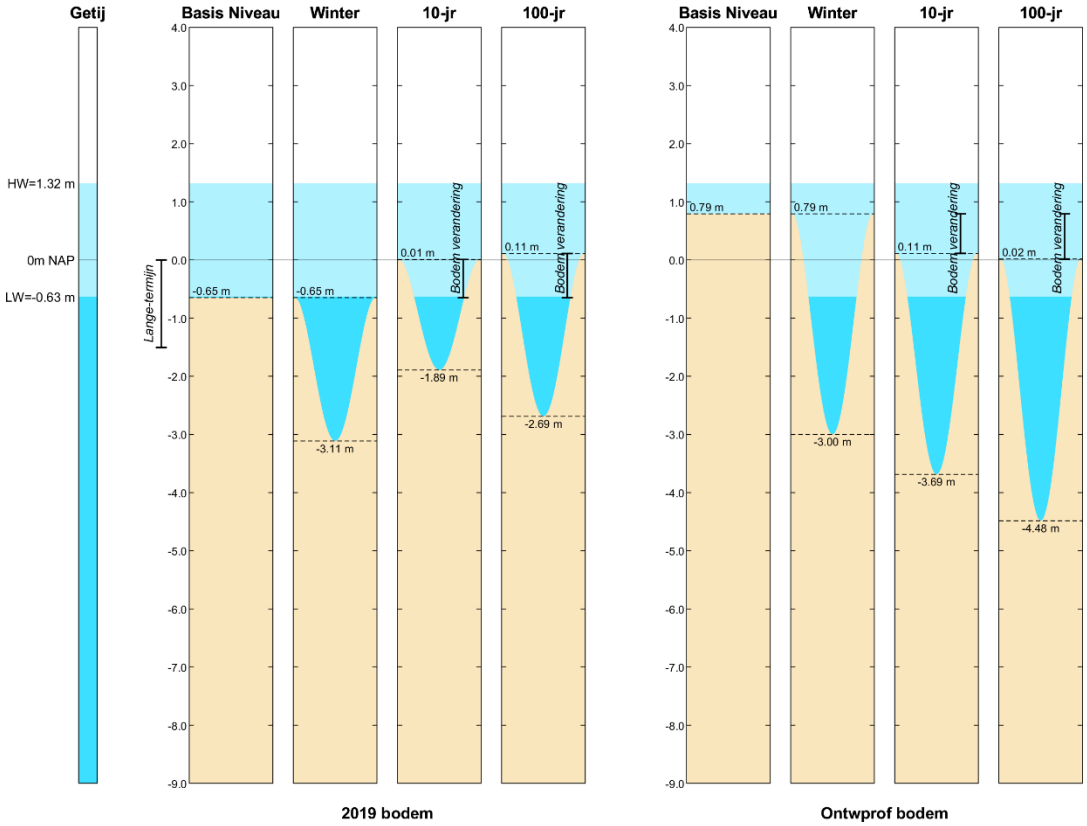
Monopaal 10



Monopaal 11



Monopaal 12



DELTARES 2020A 11205329-000-HYE-0003

Ontgronding rondom windturbines van windpark Maasvlakte 2

Royal HaskoningDHV

Deltares

Ontgronding rondom windturbines van windpark Maasvlakte 2

Ontgronding rondom windturbines van windpark Maasvlakte 2

Ontgronding rondom windturbines van windpark Maasvlakte 2

Opdrachtgever	Royal HaskoningDHV
Contactpersoon	[redacted]
Referenties	
Trefwoorden	Maasvlakte 2, Scour, Morfologie, windturbines

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	27-05-2020
Projectnummer	11205329-000
Document ID	11205329-000-HYE-0003
Pagina's	134
Status	definitief

Auteur(s)

[redacted]		

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	[redacted]			24 april 2020
0.2				14 mei 2020
1.0				27 mei 2020

Samenvatting

Het windpark Maasvlakte 2 is gelegen op het deel van Maasvlakte 2 dat een waterkerende functie heeft. Ongeveer 7,5 km van de zeewering van Maasvlakte 2 is bestemd voor de plaatsing van windturbines. Van deze toegewezen zeewering is 2,5 km lange 'harde' verdediging bestaande uit een zeedijk, beschermd tegen golfbelasting met een bekleding en stortsteen. De resterende 5 km is een zogenaamde 'zachte' verdediging, bestaande uit een zandstrand en duinen.

Bij de zachte zeewering komen de turbines rond de hoog- of laagwaterlijn te staan. De exacte waterdiepte is niet bekend aangezien deze afhangt van de lokale bodem ten tijde van de aanleg. De bodemligging ter plaatse van de windturbines (monopalen met een diameter van ongeveer 5 m) zal variëren in de tijd. Deze veranderingen in de bodemligging zijn het gevolg van grootschalige morfologische veranderingen van de zeebodem en van lokale ontgronding (scour) die door de aanwezigheid van de monopaal zelf wordt veroorzaakt. Met deze twee processen moet rekening worden gehouden bij het ontwerp van de monopaal. Daarnaast kan de ontgronding rondom de monopalen van belang zijn voor het beheer en onderhoud van de monopalen en voor de veiligheid van strandbezoekers.

Het doel van deze studie is het bepalen van de omvang en frequentie van ontstaan van de mogelijke erosiekuilen rond de monopalen op de Zachte Zeewering. De lokale ontgronding rondom een windturbine wordt bepaald door de lokale stroming en golven. Uit een desk studie (Deltares, 2020) is naar voren gekomen dat ontgronding veroorzaakt door stromingen aanzienlijk groter kan zijn dan ontgronding door golfwerking. Dat heeft er toe geleid dat deze studie zich richt op ontgronding door stromingen.

In deze studie zijn diverse numerieke modellen ontwikkeld met hoge resolutie rondom het Maasvlakte 2 strand. Hiermee zijn tijdseries van hydrodynamische condities (o.a. waterdieptes, stromingen) afgeleid per windturbine voor twee beschouwde grootschalige bodemliggingen. Er zijn 6 scenario’s opgesteld variërend van 3-weekse golfcondities tijdens een typisch winter seizoen als individuele stormen met herhalingsfrequenties van 1, 10 en 100 jaar. De hydrodynamische tijdseries zijn als invoer gebruikt voor een ontgrondingsvoorspelling met een empirisch model.

Uit de ontgrondingsvoorspellingen blijkt dat ontgrondingskuilen voornamelijk ontstaan tijdens stormcondities. Verder laten deze resultaten zien dat de gemiddelde voorspelling voor de ontgrondingsdiepte voor veel monopalen tussen de 0-1 m bedraagt in de 1-jaars storm. Voor 4 monopalen is de gemiddelde voorspelling echter 1-2 m, namelijk monopalen 4, 5, 6 en 12. De maximale voorspelling van de ontgrondingsdiepte na een 1-jaars storm kan zelfs oplopen tot 4 m.

Hieruit kan worden geconcludeerd dat voor een aantal palen onderhoud mogelijk al moet gebeuren na een 1-jaars storm en/of winterseizoen. Hierbij willen we opmerken dat een 1-jaars storm, mogelijk meerdere keren per jaar voor kan komen. De 3-weekse tijdserie die gebruikt is voor scenario 3 illustreert het cumulatieve effect van golfcondities resulterend in een maximale ontgrondingsdiepte bij één van de monopalen van 3.2 m, bij de 2019 bodem, en 4.5 m bij de ontwerpbodem.

De ontgrondingsdieptes tijdens de 1/10 jaarstormen variëren tussen de 0.8 en 3.3 m, bij de 2019 bodem, tussen en 2.1 en 4.8 m bij de ontwerpbodem. De ontgrondingsdieptes tijdens de 1/100 jaarstormen variëren tussen de 2.2 en 4.5 m, bij de 2019 bodem, tussen en 2.9 en 6.1 m bij de ontwerpbodem.

Naast de bovengenoemde ontgronding door stromingen van water en golven is ook onderzocht of er erosiekuilen door eolisch (wind) transport kunnen ontstaan. Het is namelijk mogelijk dat een windturbine op een droog strand komt te staan; initieel of bijvoorbeeld na een (strand) suppletie. Voor de twee beschouwde bodems in deze studie is het de verwachting dat er alleen bij monopalen #1, 7, 8 en 9 een erosiekuil door windtransport zal ontwikkelen tot een diepte van ongeveer 2 m. In geval van een monopaal met een diameter van D=5 meter, zal de erosiekuildiepte na een 1/1 jaar storm naar verwachting 0.5 tot 1 meter toenemen. Gedurende één jaar onder eolische invloed, zal de erosiekuildiepte naar verwachting 1 tot 1.5 meter toenemen. Echter, de toekomstige bodemligging nabij de windturbines kan sterk variëren in de komende 25 jaar, waardoor deze bevindingen ook voor andere palen relevant kunnen zijn.

Inhoud

	Samenvatting	**4**
1	**Inleiding**	**7**
1.1	Achtergrond	7
1.2	Desk studie	8
1.3	Doelstelling	8
1.4	Leeswijzer	8
2	**Aanpak**	**9**
2.1	Algemeen	9
2.2	Introductie van gebruikte modellen	10
2.2.1	Hydro- en morfologische modellen	10
2.2.2	Voorspellingsmodel voor ontgronding	10
2.3	Definitie van scenario's	11
3	**Modelleren van condities nabij windturbines**	**12**
3.1	Model opzet	12
3.1.1	Delft3D Flexible Mesh model	12
3.1.2	XBeach model	14
3.1.3	Hydraulische randvoorwaarden	16
3.2	Hydrodynamische modelresultaten	17
3.3	Morfologische model resultaten	19
3.3.1	2019 bodem	19
3.3.2	Ontwerpbodem	21
3.3.3	Bodemveranderingen per monopaal	23
4	**Ontgrondingsvoorspellingen**	**24**
4.1	Dynamic Scour Prediction Model	24
4.2	Toepassing DSPM voor MV2 windpark	26
4.2.1	Ontgronding in brekende golven	26
4.2.2	Ontgronding door stroming in relatief ondiep water	26
4.3	Resultaten ontgrondingsberekeningen	28
4.3.1	Ontgronding voor scenario's 1-3	28
4.3.1.1	Bodemligging 2019	28
4.3.1.2	Minimale ontwerpbodem	30
4.3.2	Ontgronding voor scenario's 4-6	32
4.3.2.1	Bodemligging 2019	32
4.3.2.2	Minimale ontwerpbodem	37
4.4	Analyse van de ontgrondingsvoorspelling	40
4.4.1	Ontgronding per paal	40
4.4.1.1	Bodemligging 2019	40
4.4.1.2	Minimale ontwerpbodem	43
4.4.2	Frequentie van het ontstaan van ontgrondingskuilen	46
4.5	Vorm van de ontgrondingskuil	46
4.6	Conclusies en discussie	47
4.6.1	Conclusies	47
4.6.2	Discussie	47

5	**Erosiekuilen door eolisch transport**	**48**
5.1	Model beschrijving	48
5.1.1	Eolisch sediment transport	48
5.1.2	Eolische transport gradiënten	49
5.1.3	Morfologische interactie	50
5.1.4	Grondwaterstand	51
5.1.5	*Supply-limiting* condities	51
5.2	Modelconfiguraties en resultaten	52
5.2.1	Windtunnel experiment	52
5.2.2	Container op de zandmotor	53
5.2.3	Monopalen Maasvlakte 2 strand	55
5.3	Conclusies en discussie	56
6	**Overzicht van morfologische bijdragen aan de lokale bodemligging per paal**	**57**
7	**Conclusies**	**65**
7.1	Conclusies	65
7.2	Aanbevelingen	66
	Referenties	**68**
A	**Hydrodynamische condities per windturbine**	**69**
A.1	2019 bodem	70
A.1.1	Scenario's 1, 2 en 3	70
A.1.2	Scenario's 4, 5 en 6	76
A.2	Ontwerpbodem	82
A.2.1	Scenario's 1, 2 en 3	82
A.2.2	Scenario's 4, 5 en 6	88
B	**Ontgrondingsgrafieken per windturbine**	**94**
B.1	Ontgrondingen per turbine voor scenario's 1-3	95
B.1.1.1.	Bodemligging 2019	95
B.1.1.2.	Ontwerpbodem	107
B.2	Ruimtelijk beeld van de ontgrondingen voor scenario's 4-6	119
B.2.1	Bodemligging 2019	119
B.2.2	Ontwerpbodem	122
B.3	Ontgronding per turbine voor scenario's 4-6 (bodem 2019)	125
B.4	Ontgrondingen per turbine voor scenario's 4-6 (ontwerpbodem)	129

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Het windpark Maasvlakte 2 is gelegen op het deel van Maasvlakte 2 dat een waterkerende functie heeft. Ongeveer 7,5 km van de zeewering van Maasvlakte 2 is bestemd voor de plaatsing van windturbines (zie Figuur 1.1). Van deze toegewezen zeewering is 2,5 km een 'harde' verdediging bestaande uit een zeedijk, beschermd tegen golfbelasting met een bekleding en stortsteen. De resterende 5 km is een zogenaamde 'zachte' verdediging, bestaande uit een zandstrand en duinen.

Bij het 'harde' deel van de zeewering staan de windturbines aan de binnenkant van de dijk (aangegeven met groene stippen), terwijl ze bij het 'zachte' deel van de zeewering op het zandstrand komen te staan (aangegeven met blauwe stippen).

Figuur 1.1 Overzicht van het windpark Maasvlakte 2. De groene stippen geven de locaties weer van de windturbines op de 'harde' zeewering, terwijl de blauwe stippen de windturbines op de zachte zeewering weergeven. Bron: Turbinelocaties.kml, 26-11-2019.

Bij de zachte zeewering komen de turbines rond de hoog- of laagwaterlijn te staan. De exacte waterdiepte is niet bekend aangezien deze afhangt van de lokale bodem ten tijde van de aanleg. De bodemligging ter plaatse van de windturbines (monopalen met een diameter van ongeveer 5 m) zal variëren in de tijd. Deze veranderingen in de bodemligging zijn het gevolg van grootschalige morfologische veranderingen van de zeebodem en van lokale ontgronding (scour) die door de monopaal zelf wordt geïntroduceerd. Met deze twee processen moet rekening worden gehouden bij het ontwerp van de monopaal. Daarnaast kan de ontgronding rondom de monopalen van belang zijn voor het beheer en onderhoud van de monopalen en voor de veiligheid van bezoekers van het strand.

1.2 Desk studie

Uit een desk studie (Deltares, 2020) is naar voren gekomen dat ontgronding veroorzaakt door stromingen aanzienlijk groter kan zijn dan ontgronding door golfwerking. De ontgronding door golfgedreven langstroming werd ingeschat in de orde van 0,6D-1D te liggen. Ontgronding door golfwerking ter plaatse van de windturbines (rekening houdend met golfbrekingseffecten) werd ingeschat op ongeveer 0,2D. Dat heeft er toe geleid dat deze studie zich enkel richt op ontgronding door stromingen.

1.3 Doelstelling

Het doel van deze studie is het bepalen van de omvang en frequentie van ontstaan van de mogelijke erosiekuilen rond de monopalen op de Zachte Zeewering. Het resultaat van deze studie is een kwantitatieve procesbeschrijving van de omvang en ontwikkeling van de erosiekuilen zowel in het natte als op het droge gedeelte van het strand.

Deze informatie zal door Royal HaskoningDHV gebruikt worden om een inschatting te maken van de veiligheid van strandbezoekers en ten behoeve van het ontwerp en beheer en onderhoud van de windturbines.

1.4 Leeswijzer

De studie aanpak en de gebruikte modellen worden geïntroduceerd in hoofdstuk 2. De opzet van de verschillende modellen en de resultaten van de numerieke modellen worden beschreven in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 beschrijft de ontgrondingsvoorspellingen voor elke windturbine, terwijl hoofdstuk 5 ingaat op de mogelijke erosie rondom windturbines op het droge strand door eolische transporten. In hoofdstuk 6 worden de verschillende bijdragen samengebracht in overzichtsfiguren per paal. De conclusies en aanbevelingen worden gedeeld in hoofdstuk 7.

2 Aanpak

2.1 Algemeen

De Tweede Maasvlakte (MV2) is in 2013 aangelegd als grote zeewaartse uitbouw van de Rotterdamse haven. De zeerand van de MV2 bestaat deels uit een harde en zachte zeewering. De zachte zeewering is over het algemeen een erosief systeem, wat inhoudt dat de kustlijn geleidelijk landinwaarts verplaatst. Om dat tegen te gaan wordt het systeem onderhouden door suppleties.

De bodemligging laat veel dynamiek zien in de tijd en is zeer variabel langs de zachte zeewering. Dit komt mede door de kromming van het Maasvlakte 2 strand waardoor de golven onder verschillende hoeken invallen en gradiënten introduceren in zandtransport. Een ander belangrijk proces is de getijstroming. Door de uitbouw van MV2 vindt er een sterke getijcontractie plaats wat leidt tot hoge stromingen wat veel zand kan verplaatsen.

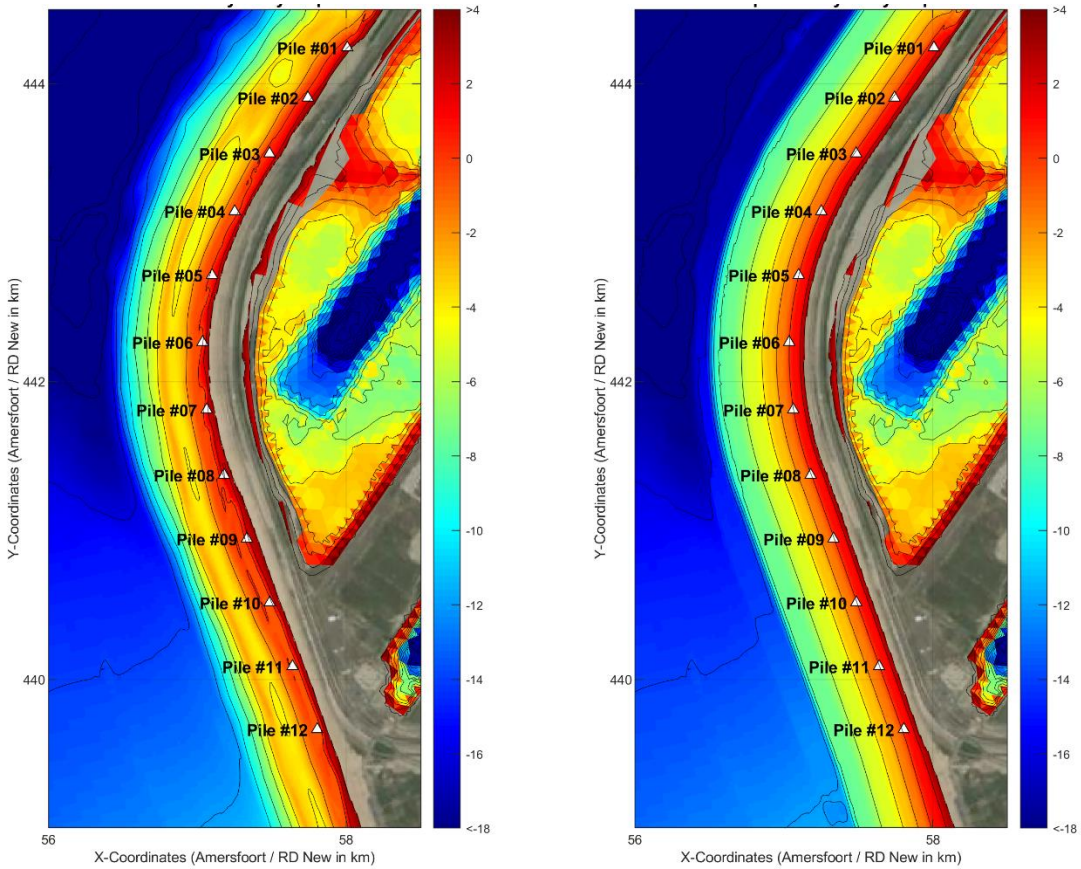
Om een inschatting te geven van de ontgronding bij de windturbines is het van belang om de lokale variabiliteit van stromingscondities, water dieptes en golven te kwantificeren. Door de combinatie van processen van scheef invallende golven, getijcontractie, zeer variabele en dynamische bodem, grootschalig erosief karakter en menselijke ingrepen (suppleties) is besloten om de hydrodynamische condities ter plaatse van de windturbines af te leiden met behulp van numerieke modellen.

De hydrodynamische condities zijn berekend voor 6 verschillende hydrodynamische scenario's (beschreven in paragraaf 2.3) en voor twee verschillende bodemliggingen, namelijk de 2019 gemeten bodem en de ontwerpbodem (*ontwprof*). De introductie van de modellen wordt in paragraaf 2.2 kort toegelicht. De berekende stromingscondities door getij, wind en golven zijn vervolgens voor elke windturbine afgeleid (hoofdstuk 3) voor beide bodemliggingen.

De berekende condities per windturbine zijn vervolgens gebruikt in een empirisch ontgrondingsmodel. Het toepassen van het ontgrondingsmodel levert ontgrondingsgrafieken op per windturbine voor de 6 verschillende hydrodynamische scenario's (hoofdstuk 4). Deze resultaten bieden informatie over de omvang en frequentie van de ontgronding rondom de windturbines en de maatgevende condities.

Naast de bovengenoemde ontgronding door stromingen van water en golven is ook onderzocht of er erosiekuilen door eolisch (wind) transport kunnen ontstaan. Het is namelijk mogelijk dat een windturbine op een droog strand komt te staan; initieel of bijvoorbeeld na een (strand) suppletie. Hiervoor zijn eerst de relevante processen in kaart gebracht die lokale eolische erosie rondom een windturbine op het strand kunnen veroorzaken. Aan de hand van deze relevante processen is een methode toegepast om tot een initiële, kwantitatieve schatting te komen van de ruimtelijk-temporele ontwikkeling van de erosiekuilen door eolisch transport (hoofdstuk 5).

De verschillende morfologische bijdragen zijn grafisch samengebracht in overzichtsfiguren voor de lokale bodemligging per paal (hoofdstuk 6). Hierin wordt ook de meerjarige ('lange-termijn') dynamiek weergegeven (aangeleverd door Royal HaskoningDHV) gebaseerd op jaarlijkse metingen tussen 2013 en 2019.



Figuur 2.1 Bodemliggingen van de twee beschouwde bodems in deze studie: de gemeten 2019 bodem (links) en de ontwerpbodem (rechts).

2.2 Introductie van gebruikte modellen

2.2.1 Hydro- en morfologische modellen

Voor deze studie is een toegewijd Delft3D-Flexible Mesh model opgezet waarbij het Maasvlakte 2 strand met hoge resolutie is gerepresenteerd. Dit model berekent zowel de variatie van de waterstanden door getij, wind en golven als de getij-, wind- en golfgedreven stromingen in het gebied van interesse. Het golfmodel SWAN is gebruikt om offshore tijdseries van golven en synthetische stormen door te rekenen naar de kust.

Voor de extreme storm, met een frequentie van 100 jaar, is het model XBeach opgezet om ook de morfologische effecten van duinerosie en de eventuele aanzanding in het intergetijde gebied en de vooroever mee te kunnen nemen.

2.2.2 Voorspellingsmodel voor ontgronding

De ontwikkeling van ontgronding in de tijd wordt uitgerekend met het empirisch ontgrondingsmodel DSPM (Dynamic Scour Prediction Model), ontwikkeld door Deltares op basis van een database aan model- en veldmetingen. De invoerparameters voor dit model bestaan uit grond- en water condities, monopaal afmetingen en tijdseries van de hydrodynamica condities (waterstand, golven en stroming). In het model is de tijdserie van hydrodynamica condities gediscretiseerd in individuele gebeurtenissen, elke met een eigen evenwichtsdiepte en tijdschaal.

2.3 Definitie van scenario's

Om de omvang en frequentie van ontstaan van de ontgrondingskuilen goed in te kunnen schatten zijn de volgende scenario's onderzocht:

Tijdserie van 3 weken in winter periode

1. Scenario 1: enkel astronomisch getij
2. Scenario 2: astronomisch getij + wind opzet + windgedreven stroming
3. Scenario 3: astronomisch getij + wind opzet + windgedreven stroming + golfgedreven stroming

Individuele stormen

4. Scenario 4: 1 per 1 jaar storm conditie uit richtingen 240°N, 270°N, 300°N, en 330°N
5. Scenario 5: 1 per 10 jaar storm conditie uit richtingen 240°N, 270°N, 300°N, en 330°N
6. Scenario 6: 1 per 100 jaar storm conditie uit richtingen 240°N, 270°N, 300°N, en 330°N

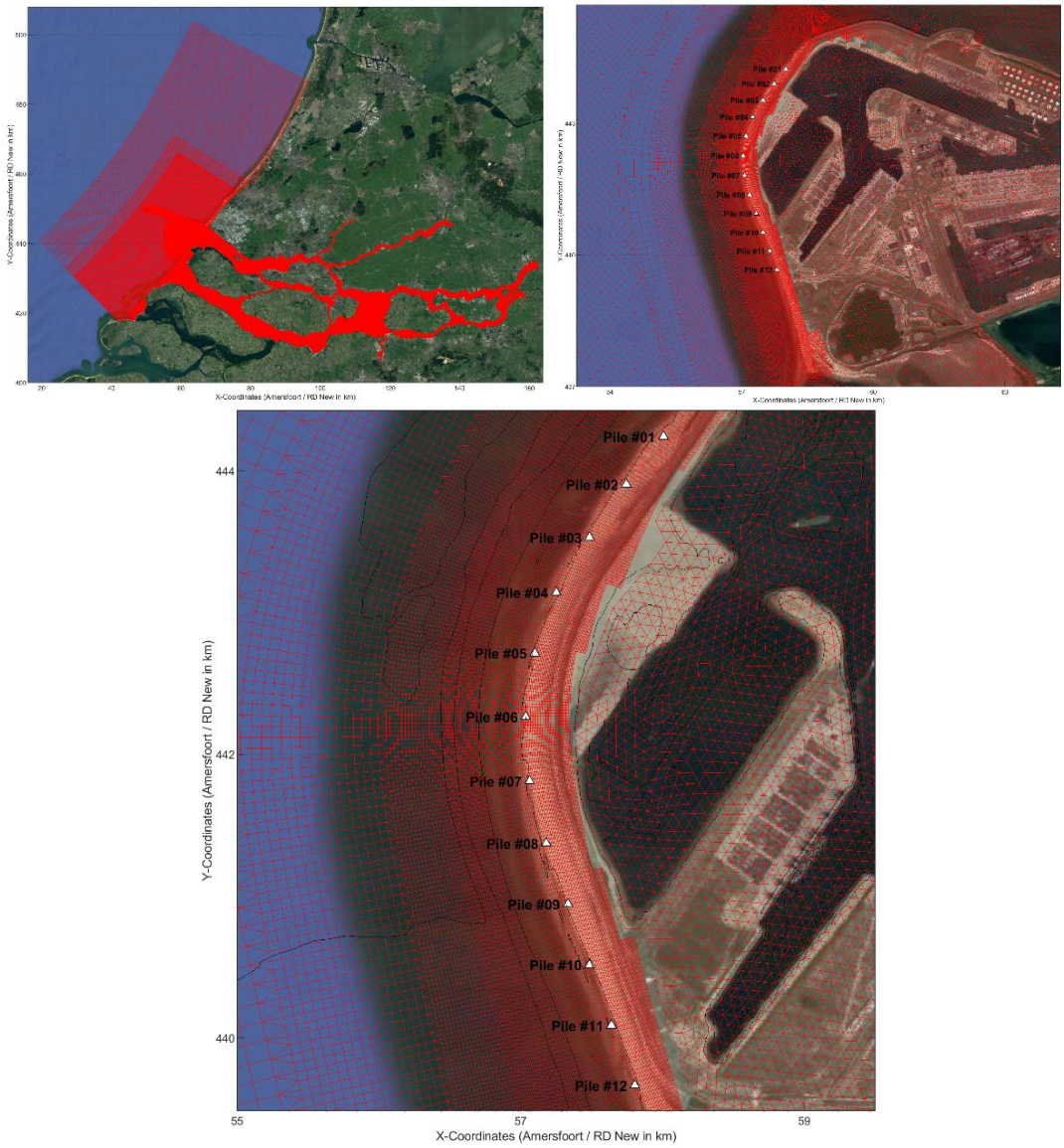
3 Modelleren van condities nabij windturbines

3.1 Model opzet

In deze paragraaf wordt de opzet van de Delft3D Flexible Mesh en XBeach modellen kort beschreven.

3.1.1 Delft3D Flexible Mesh model

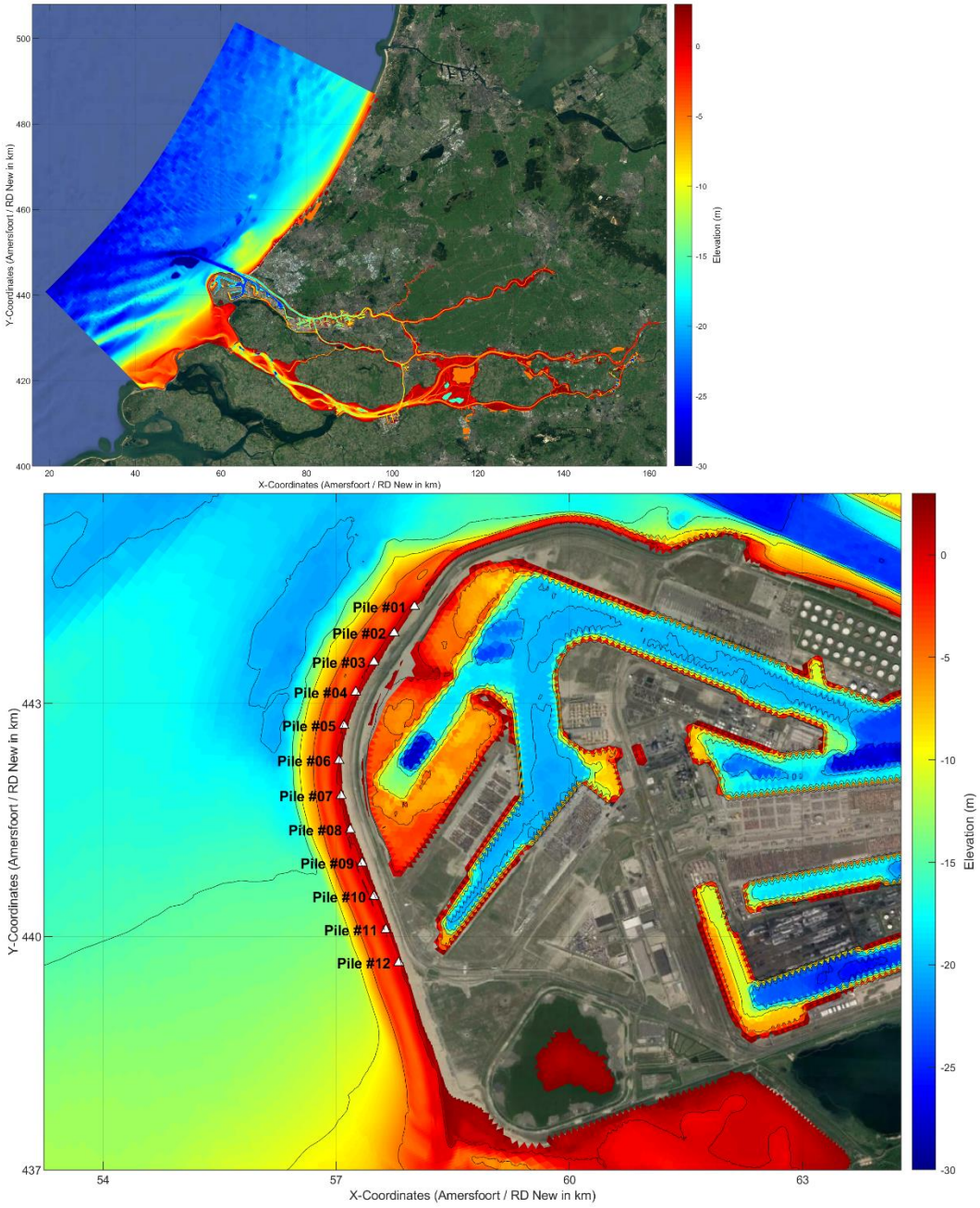
Om de waterstanden en stromingen nabij de windturbines in windpark Maasvlakte 2 goed te kunnen berekenen is er een nieuw Delft3D Flexible Mesh model gemaakt. Bestaande modellen voor het gebied op de Noordzee en in de rivieren zijn hiervoor als basis gebruikt. Voor het Maasvlakte 2 strand is een sterke verfijning toegepast om tot een resolutie van ~10 m te komen ter plaatse van de windturbines (zie Figuur 3.1). De bodemligging in de modellen is afkomstig van bestaande modellen en RWS Baseline gegevens, lokaal aangevuld met een in 2019 gemeten bathymetrie ter plaatse van het Maasvlakte 2 strand (zie Figuur 3.2).



Figuur 3.1 Rekenrooster van het Delft3D Flexible Mesh model voor het windpark Maasvlakte 2

Om de effecten van golven uit te kunnen rekenen is er een SWAN model opgezet. De zeerand loopt in dit golfmodel tot aan de twee offshore meetlocaties van Europlatform en IJmuiden Munitiestortplaats. Voor scenario's 1 t/m 3 zijn de golven tijdens een periode van 3 weken in het winter seizoen van 2011 uitgerekend gebruikmakend van de offshore gemeten golven en wind. Voor scenario's 4 t/m 6 zijn 32 uur tijdseries van golven van de individuele storm condities opgelegd.

Het Delft3D-FM model is geforceerd met getij en rivierafvoer randvoorwaarden. Voor scenario's 2 en 3 is de gemeten wind opzet bij Hoek van Holland gecorrigeerd opgelegd op de zeerand om zodoende de waterstandsvariatie tijdens deze 3-weekse periode zo goed mogelijk mee te nemen.

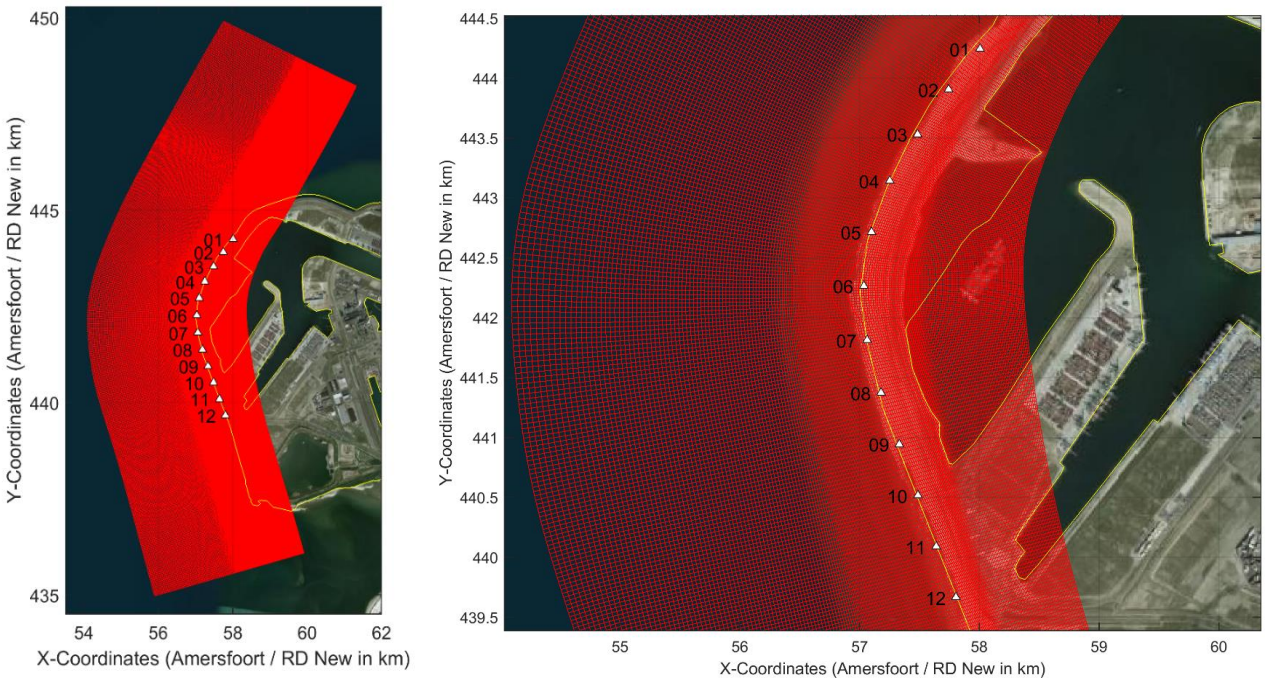


Figuur 3.2 Bodemliggingen in het model en de windturbine locaties in het windpark Maasvlakte 2

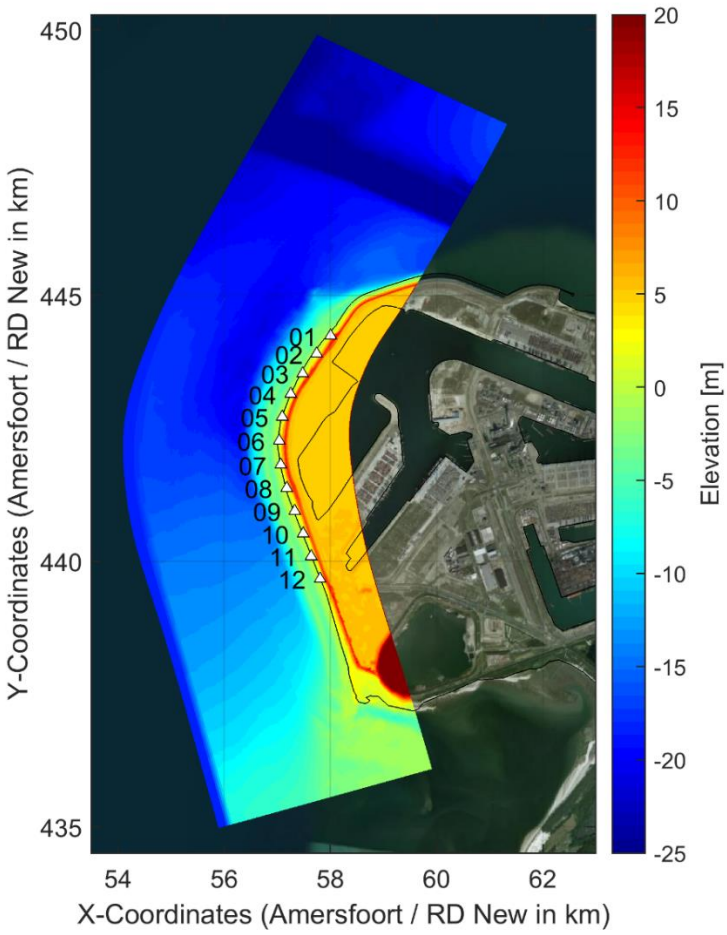
3.1.2 XBeach model

Voor de Xbeach simulaties is een 2DH kromlijnige modelschematisering geconstrueerd. Het rooster (zie Figuur 3.3) beslaat meer dan 15 km in kustlangs en 4 km in kustdwarsrichting en is gekromd om zodoende de lokale oriëntatie van de kustlijn te volgen. De resolutie in kustlangs richting varieert tussen 12 m (in het midden) en 50 m (nabij de randen). De resolutie in kustdwarsriching neemt toe van offshore tot nearshore, met een minimale roostercel afmeting van 10 meter in de brandingszone en 8 meter in het duingebied.

De bodemgegevens van 2019 (aangeleverd door Royal HaskoningDHV) worden gebruikt om de modelbodem te schematiseren (zie Figuur 3.4). Langs de offshore-grens wordt een diepte van 18 meter of groter aangehouden, om een realistische schematisering van lange golven vanaf de modelrand mogelijk te maken. Daarnaast wordt het maaiveld van het gebied achter de duinen inclusief de Maasvlakte 2-bekkens boven het waterpeil gebracht. Een groot deel van het domein, inclusief de 2,5 km lange 'harde' zeewering in het noorden en het gebied achter de duinen, wordt als niet-erodeerbaar meegenomen in de morfologische simulaties.



Figuur 3.3: Overzicht van het rekenrooster van het XBeach model (links) en ingezoomd (rechts). De locaties van de windturbines zijn weergegeven met driehoekjes.



Figuur 3.4: De geschematiseerde bodemligging in het XBeach model. De zwarte lijn geeft de landgrens weer en de driehoekjes de locaties van de windturbines.

In XBeach is de surfbeat-modus geselecteerd, waarbij de korte golfvariaties op de schaal van de golfgroepen en de daarmee geassocieerde lange golven worden opgelost. Golfrefractie wordt gesimuleerd aan de hand van de efficiënte Snellius methode. Naast de golfmodule worden de stromings-, sediment- en morfologiemodules geactiveerd. De WTI-instellingen, een aantal hydrodynamische en morfodynamische parameters met waarden geoptimaliseerd voor de Nederlandse kust (Van Geer, Den Bieman, Hoonhout, & Boers, 2015) worden geïmplementeerd. Voor de zanddiameter wordt een D50-waarde van 300 mµ gebruikt, terwijl alle andere parameters worden gebruikt met standaardwaarden.

Op 17 locaties langs de offshore modelrand worden temporeel en ruimtelijk variërende golfspectra opgelegd. Deze spectra zijn afkomstig uit Delft3D-FM simulaties die de golfvoortplanting, getij en golfslag simuleren voor dezelfde serie aan stormcondities in een veel groter domein. Daarnaast worden tijdsvariërende en ruimtelijk variërende waterstanden opgelegd op de modelranden. De tijdreeksen van waterstanden omvatten het effect van getij en stormvloed en worden geëxtraheerd uit de overeenkomstige Delft3D-FM simulaties ter plaatse van de vier hoekpunten van het XBeach rooster.

3.1.3 Hydraulische randvoorwaarden

De Delft3D-FM en XBeach modellen zijn geforceerd met verschillende hydraulische randvoorwaarden. Zoals beschreven in paragraaf 3.1.1 zijn voor scenario's 1 t/m 3 tijdseries van gemeten offshore golven en wind tijdens een periode van 3 weken in het winter seizoen van 2011 opgelegd.

Voor de stormen in scenario's 4 t/m 6 zijn simulaties uitgevoerd voor storm condities met een terugkeerperiode van 1, 10 en 100 jaar voor vier verschillende invalshoeken van golven (240°N, 270°N, 300°N, 330°N). De randvoorwaarden zijn geschematiseerd volgens Vellinga (1986). Met deze methode zijn 32 uur tijdseries van golven en waterstanden van de individuele storm condities afgeleid (zie Figuur 3.5 voor een voorbeeld) gebruikmakend van de hydraulische randvoorwaarden voor Maasvlakte 2 (Delft Hydraulics, 2006). Tabel 3.1 geeft een overzicht van de hydraulische randvoorwaarden voor de 12 verschillende stormen.

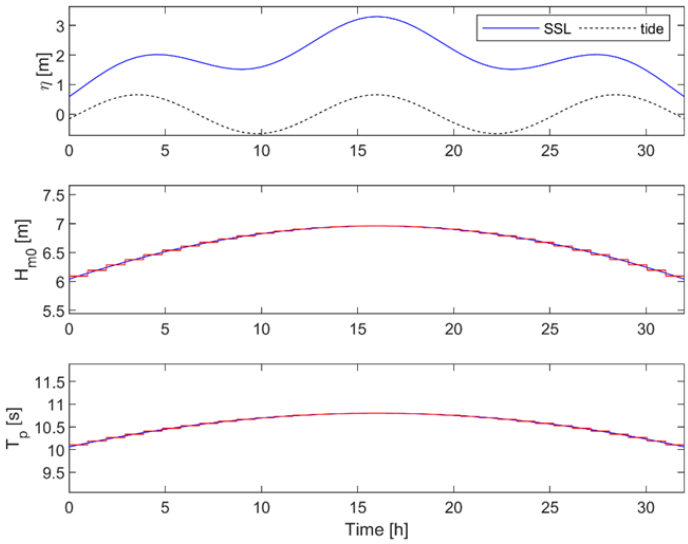
Tabel 3.1 Overzicht van de hydraulische randvoorwaarden bij Europlatform (golven) en Hoek van Holland (wind en waterstanden) afgeleid uit Delft Hydraulics (2006).

Golfrichting 240 °N	overschrijdings-frequentie (jaar)		
	1	10	100
Waterstanden (m tov NAP)	1,88	2,23	2,57
Golfhoogte (H_{m0} in m)	4,34	4,97	5,81
Golf piekperiode (T_p in s)	8,40	9,03	9,82
Windsnelheid (m/s)	21,0	24,2	28,5

Golfrichting 300 °N	overschrijdings-frequentie (jaar)		
	1	10	100
Waterstanden (m tov NAP)	2,06	2,76	3,41
Golfhoogte (H_{m0} in m)	4,54	5,23	6,15
Golf piekperiode (T_p in s)	8,76	9,49	10,43
Windsnelheid (m/s)	19,2	21,6	26,5

Golfrichting 270 °N	overschrijdings-frequentie (jaar)		
	1	10	100
Waterstanden (m tov NAP)	2,09	2,62	3,12
Golfhoogte (H_{m0} in m)	4,56	5,22	6,09
Golf piekperiode (T_p in s)	8,43	9,06	9,85
Windsnelheid (m/s)	20,9	24,5	29,1

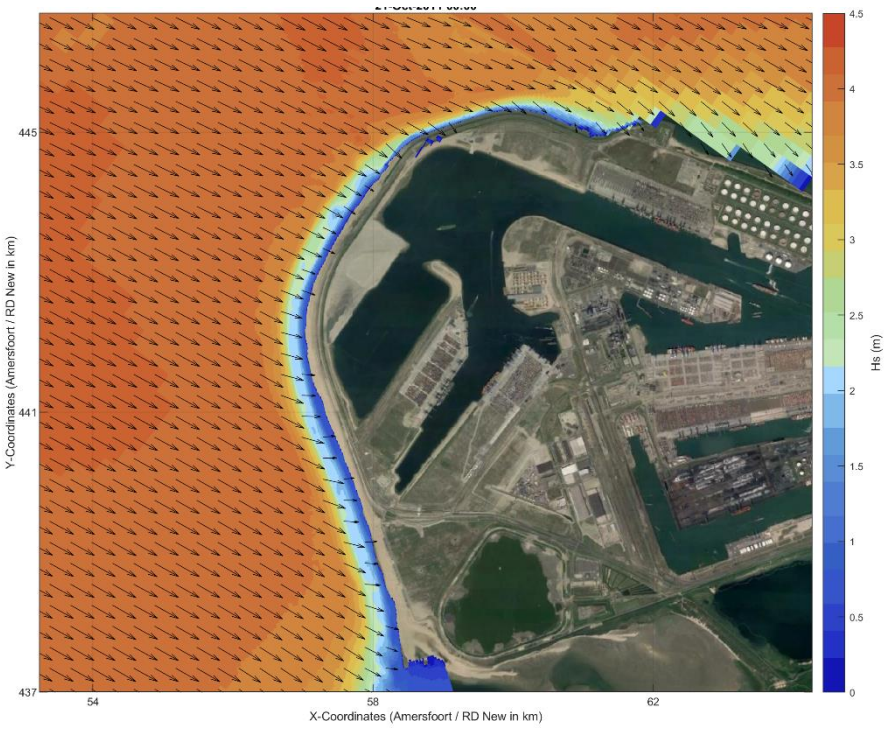
Golfrichting 330 °N	overschrijdings-frequentie (jaar)		
	1	10	100
Waterstanden (m tov NAP)	1,92	2,68	3,39
Golfhoogte (H_{m0} in m)	4,53	5,29	6,33
Golf piekperiode (T_p in s)	9,05	9,83	10,85
Windsnelheid (m/s)	17,1	20,1	24,0



Figuur 3.5 Schematiseerde randvoorwaarden voor de stormen. Bovenste paneel geeft de waterstanden weer waarbij de stormopzet overeenkomt met hoog water. Middelste paneel geeft de golfhoogte weer terwijl het onderste paneel de golf piekperiode weergeeft.

3.2 Hydrodynamische modelresultaten

Hieronder is een voorbeeld gepresenteerd van de golfhoogten en richtingen tijdens een Hs = 4 m golfconditie uit ongeveer 300°N berekend met SWAN voor de 2019 bodem. In het noordelijke gebied van de zachte zeewering leidt dit tot ongeveer loodrecht invallende golven maar in het zuidelijke gebied van het windpark leidt dit tot sterk scheef invallende golven (zie Figuur 3.6). De grote hoek van inval van de golven leidt tot een grootschalige langsstroming met (in dit geval) snelheden boven de 1.5 m/s berekend met Delft3D-FM (zie Figuur 3.7).



Figuur 3.6 Voorbeeld van golfhoogtes en golfrichtingen berekend met SWAN voor de 2019 bodem.

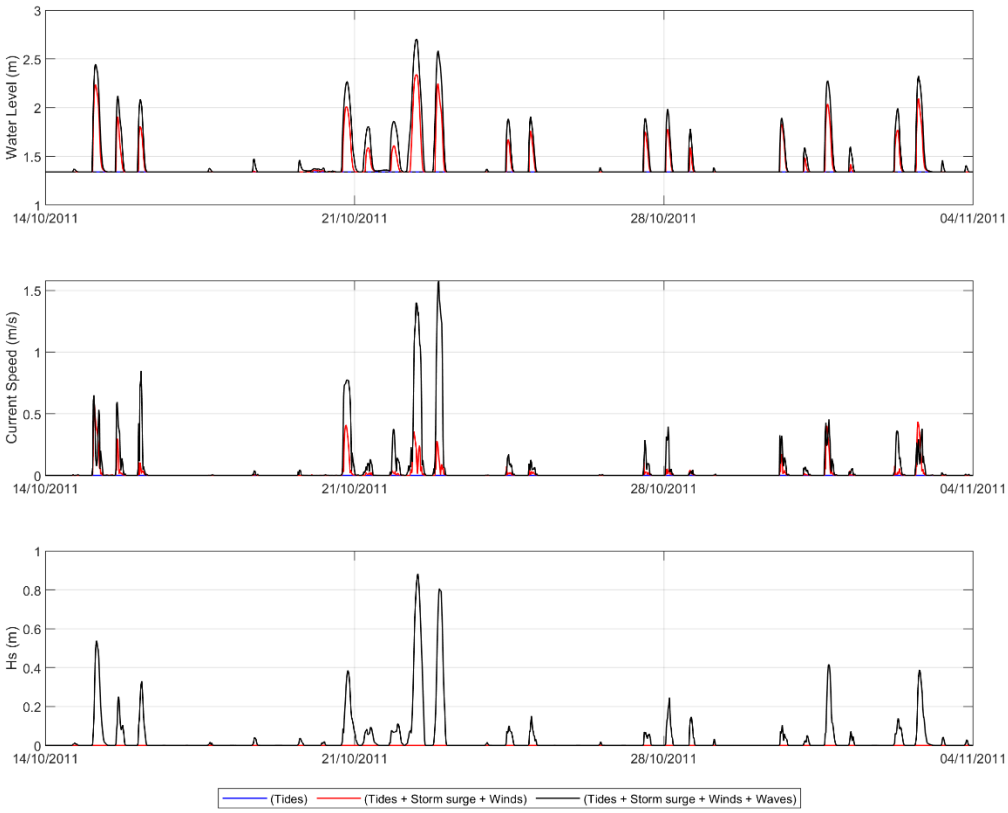
Figuur 3.7 Voorbeeld van de golfgedreven langstromingen berekend met Delft3D-FM voor de 2019 bodem.

De modelberekeningen voor de 6 scenario's (zie paragraaf 2.3) bieden nu de mogelijkheid om de voorspelde condities per windturbine te extraheren die relevant zijn voor het ontgrondingsmodel zoals de waterdieptes, stroomsnelheden, en lokale golfhoogtes. Als voorbeeld zijn in deze paragraaf tijdseries gepresenteerd van windturbine #1 en #10; tijdseries van alle windturbines staan in Bijlage A.

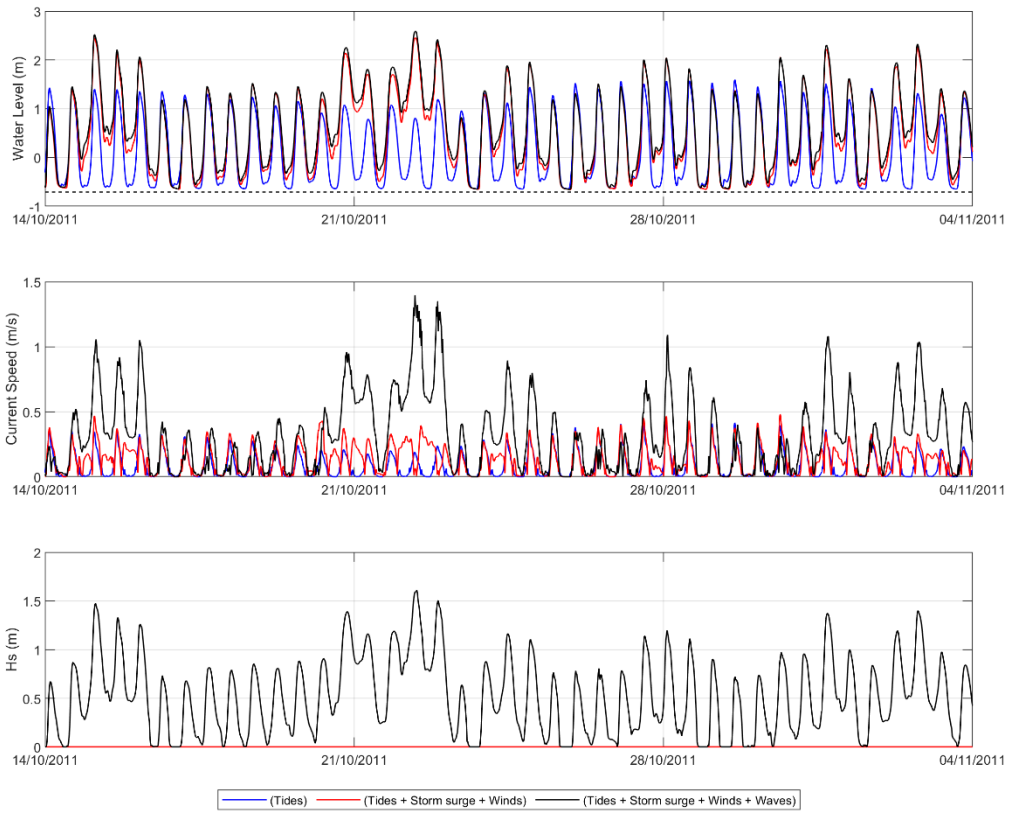
Bij windturbine #1 is bijvoorbeeld te zien dat deze boven de HW lijn ligt (o.b.v. de 2019 gemeten bodem) en enkel tijdens condities met windopzet onderwater komt te staan (zie Figuur 3.8). In dit geval vindt er ook (golfgedreven) stroming plaats aangezien de condities met windopzet ook gepaard gaan met hogere golven.

Windturbine #10 staat echter permanent in het water (NAP -1.1 m o.b.v. de 2019 gemeten bodem), waardoor er voortdurend stromingen plaatsvinden rondom de turbine. De stroomsnelheden in deze 3 weken bereiken waarden tot ongeveer 1.4 m/s (zie Figuur 3.9) tijdens een 4.5 m offshore golfconditie. Ter plaatse van de windturbine #10 zijn deze golven aan het breken wat leidt tot diepte-gelimiteerde golven ter plaatse van windturbine #10 tijdens deze specifieke conditie.

Golfgedreven brandingsstromingen door scheef invallende golven leiden in dit gebied tot de meest dominante stromingscondities en zijn daardoor bepalend voor de ontgronding rondom de windturbines. Daarom zijn voor alle windturbines tijdseries bepaald en aangeleverd ter invoer van het ontgrondingsmodel, wat verder wordt besproken in hoofdstuk 4.



Figuur 3.8 Berekende waterstanden t.o.v. NAP, stromingen en golven ter plaatse van windturbine #1 met de 2019 bodem.



Figuur 3.9 Berekende waterstanden, stromingen en golven ter plaatse van windturbine #10 met de 2019 bodem.

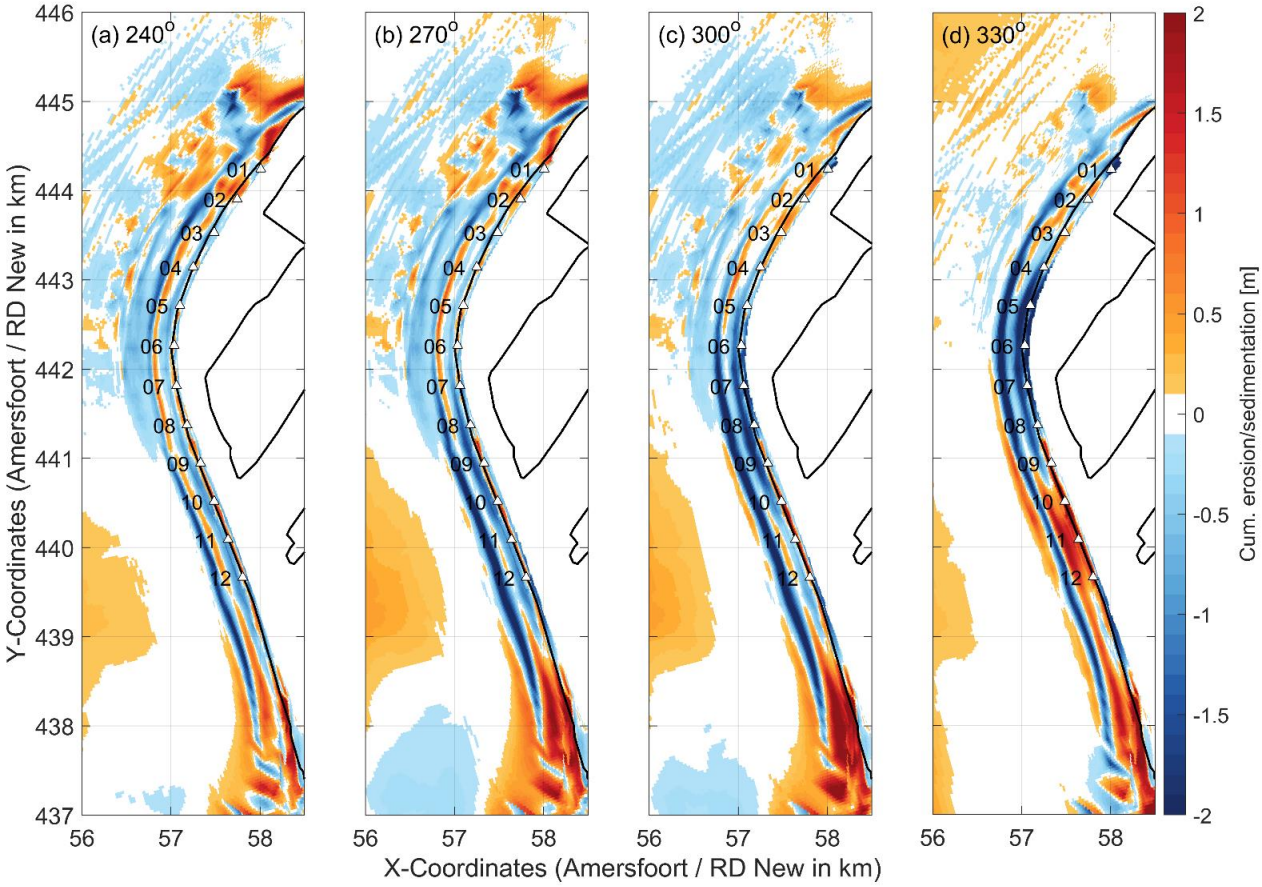
3.3 Morfologische model resultaten

3.3.1 2019 bodem

Voor scenario's 5 en 6 (1/10 en 1/100 jaar stormen met 4 golfrichtingen) zijn er ook morfologische berekeningen uitgevoerd – in dit geval met XBeach – om de effecten van mogelijke depositie ter plaatse van de monopalen tijdens deze stormen mee te kunnen nemen in de ontgrondingsanalyse. De model berekeningen tonen een herverdeling van zand tijdens de storm als gevolg van transportgradiënten in dwars- en langsrichting. Tijdens de piek van de storm worden waterstanden tot 3,5 m en stroomsnelheden tot 3 m/s berekend op de locaties van de windturbines.

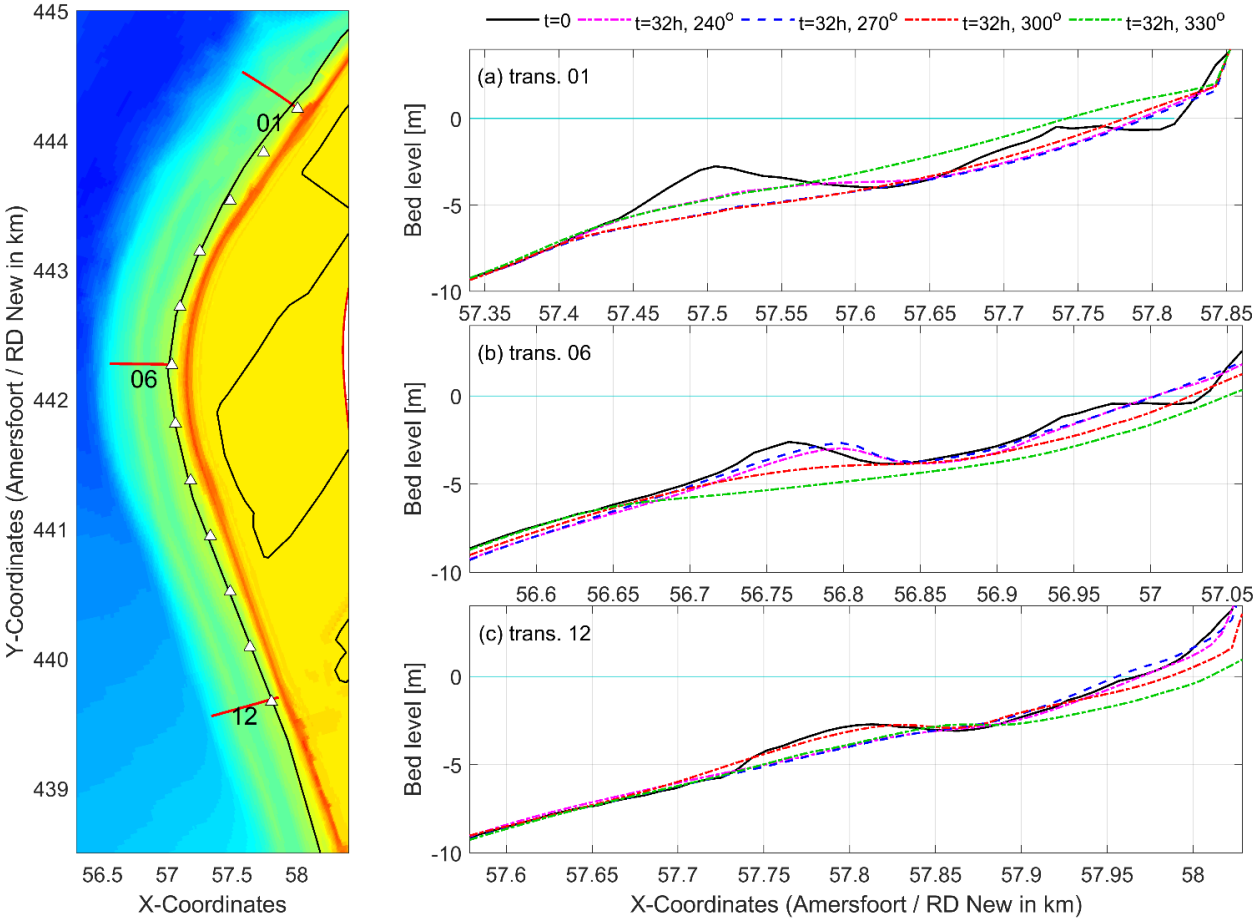
Wat opvalt is dat alle 1/100 jaar stormberekeningen erosie van zand in de ondiepe vooroever (tot 7 m diepte) voorspellen. Het zand wordt getransporteerd langs de kust en afgezet in de ondieper gelegen gebieden, ten zuiden van windturbine #12. Wat tevens opvalt is dat bij sommige windturbines er aanzanding optreedt tijdens de storm en bij andere juist een verlaging van de bodemligging. Figuur 3.10 toont aangroei op de locatie van windturbines # 9-12 onder alle invalshoeken van golven. De locaties van windturbines # 4-8 laten toenemende erosiepatronen met toenemende invalshoeken zien. Voor de locaties van windturbines # 1-3 zijn de resulterende erosie- / aanzandingspatronen zowel ruimtelijk als onder de verschillende scenario's zeer variabel.

Tijdens de storm treden er bodemveranderingen op tot ongeveer 4 m nabij de monopalen. Uitzondering hierop is nabij de locatie van windturbine # 1 waar een erosie tot 8 m wordt berekend na de 330°N storm.



Figuur 3.10: Erosie en sedimentatie patronen na de 1/100 jaar storm, met de 2019 bodem, voor de verschillende invalsrichtingen: (a) 240ºN, (b) 270ºN, (c) 300ºN, en (d) 330ºN. Erosie is aangegeven met de koude (blauwe) kleuren terwijl de warme kleuren sedimentatie weergeven.

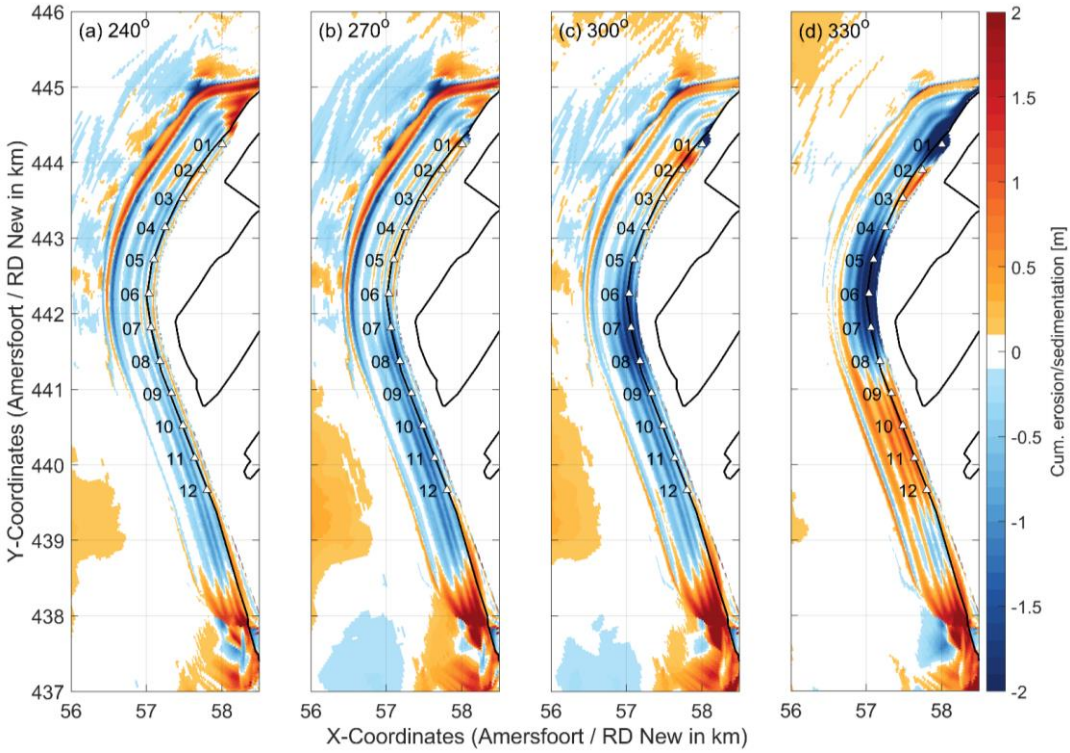
Post-storm dwarsprofielen hebben over het algemeen kleinere hellingen in het natte ondiepe deel en steilere hellingen boven de waterlijn aan de voet van de duinen. Onder de hydrodynamische condities is de zandbank die evenwijdig aan de kust ligt (op NAP -3 m), op verschillende locaties afgevlakt (zie bijvoorbeeld Figuur 3.11a, Figuur 3.10c bij windturbines # 6-7 en Figuur 3.10d bij windturbines # 5-7) terwijl in andere (zie Figuur 3.11b) de zandbank landwaarts is gemigreerd. Daarnaast wordt zand afgevoerd naar de diepere delen van het profiel waar het afgezet wordt (zie het aanzandingsgebied ten zuidwesten in het domein in alle panelen van Figuur 3.10).



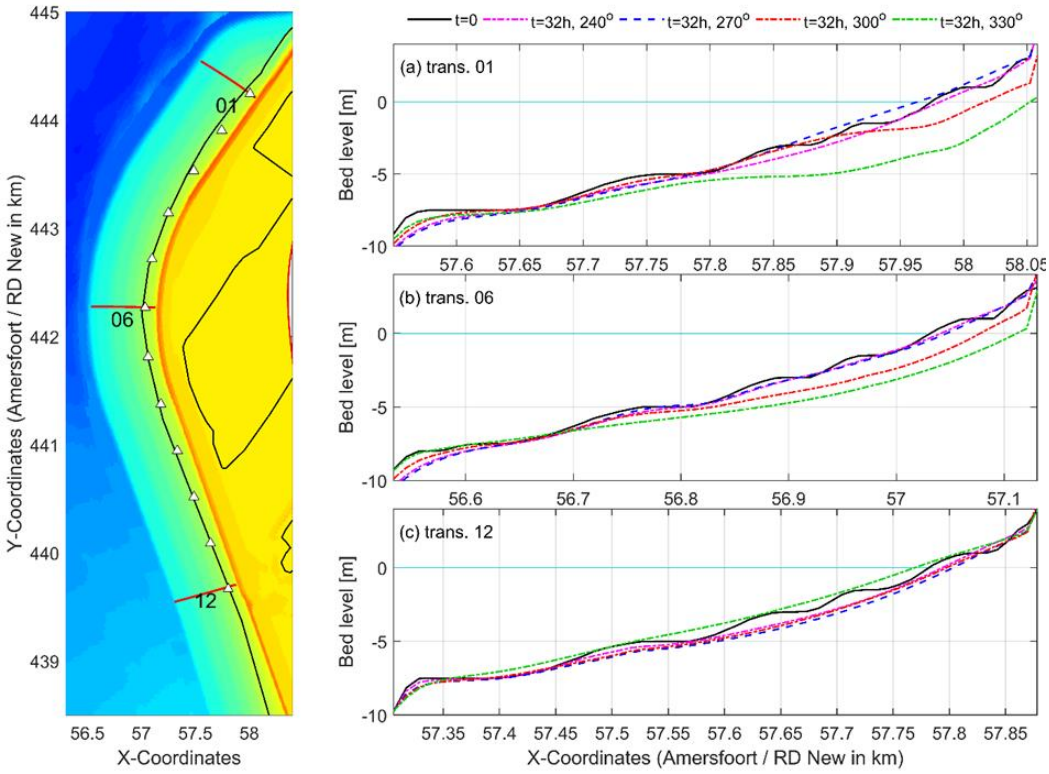
Figuur 3.11: Berekende bodemprofielen voor en na de 1/100 jaar stormen met de 2019 bodem, voor 3 verschillende dwarsdoorsneden. Links zijn de locaties van drie raaien met rood aangegeven: raai 01, raai 06 en raai 12. De locatie van de windturbines is gemarkeerd met kleine driehoekjes. Op de rechter panelen worden het initiële bodemprofiel (zwarte lijnen) en de bodemprofielen na de verschillende stormen (stippellijnen) voor elke raai weergegeven.

3.3.2 Ontwerpbodem

De morfologische veranderingen van de 1/100 jaar stormen gebaseerd op de ontwerpbodem zijn weergegeven in Figuur 3.12. De ontwerpbodem laat meer uitgevlakte dwarsprofielen zien vergeleken met de 2019 bodem. Tijdens de doorgerekende stormen, worden de kleine zandbanken verder uitgevlakt en wordt het zand gedeeltelijk boven de waterlijn en op grotere waterdieptes afgezet. Bij de meer noordelijke stormen verdwijnt er veel zand in het noordelijk gebied waardoor er grote bodemverlagingen optreedt. Het zand wordt grotendeels in het zuidelijke gedeelte van het windpark afgezet (zie Figuur 3.12 en Figuur 3.13).



Figuur 3.12: Erosie en sedimentatie patronen na de 1/100 jaar stormen met de ontwerpbodem, voor de verschillende invalsrichtingen: (a) 240°N, (b) 270°N, (c) 300°N, en (d) 330°N. Erosie is aangegeven met de koude (blauwe) kleuren terwijl de warme kleuren sedimentatie weergeven.

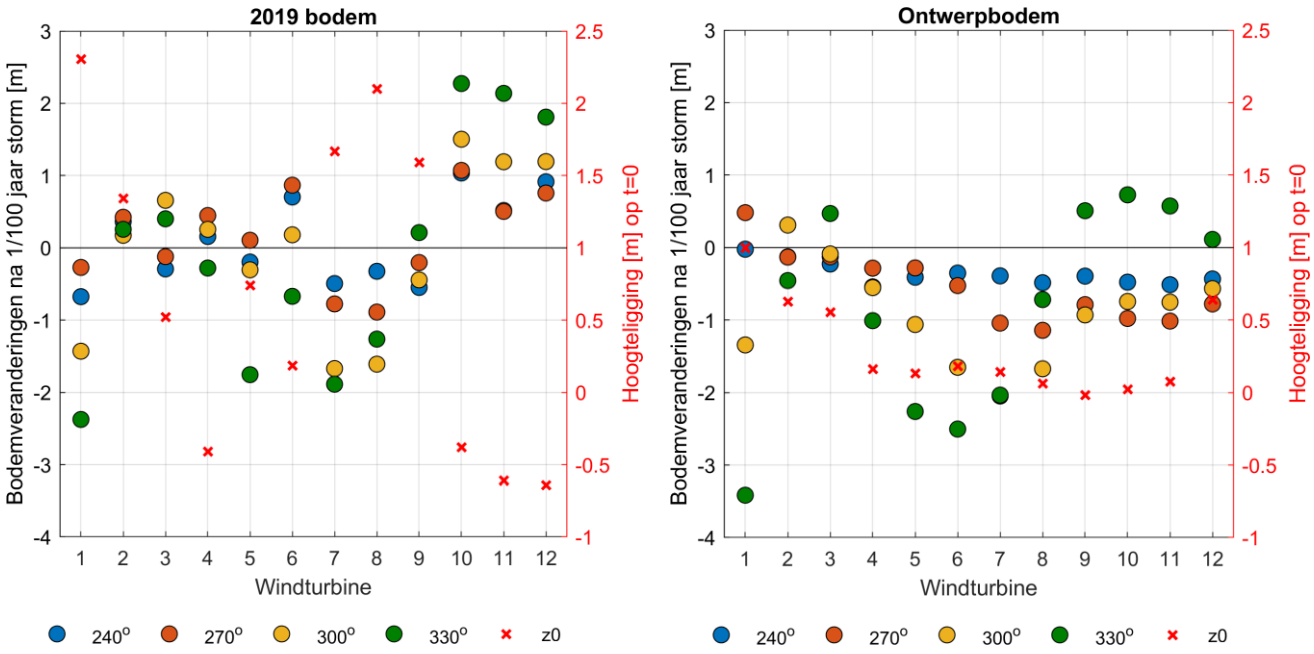


Figuur 3.13: Berekende bodemprofielen voor en na de 1/100 jaar stormen met de ontwerpbodem, voor 3 verschillende dwarsdoorsneden. Links zijn de locaties van drie raaien met rood aangegeven: raai 01, raai 06 en raai 12. De locatie van de windturbines is gemarkeerd met kleine driehoekjes. Op de rechter panelen worden het initiële bodemprofiel (zwarte lijnen) en de bodemprofielen na de verschillende stormen (stippellijnen) voor elke raai weergegeven.

3.3.3 Bodemveranderingen per monopaal

De berekende bodemveranderingen per monopalen zijn weergegeven in Figuur 3.14 voor de vier 1/100 jaarstormen en de twee beschouwde bodems. Hier is duidelijk te zien dat, voor de 2019 bodem, er erosie tot ongeveer 2,5 m op kan treden tijdens deze events maar bij sommige monopalen ook aanzanding van ruim 2 m. Voor monopalen #3-9 zijn de erosie en aanzanding zeer variabel in de ruimte en tussen de stormen met verschillende invalshoeken. Voor die locaties kunnen erosie en sedimentatie waarden oplopen tot 2 m en 1 m respectievelijk.

De berekeningen met ontwerpbodem laten erosie op grotere schaal zien voor de vier stormen. Erosie is ongeveer 2,5 m (bij monopalen #5-7) terwijl er beperkte aanzanding optreedt bij de vier monopalen in het zuiden. Monopaal 1 laat een bodemverlaging van 3,4 m zien tijdens de 330ºN storm.



Figuur 3.14: Berekende bodemveranderingen per windturbine tijdens de 1/100 jaar stormen met verschillende golfrichtingen voor a) de 2019 bodem en b) de ontwerpbodem. De rode kruisjes geven de initiële bodemligging (t.o.v. NAP) per windturbine weer langs de rechter y-as.

4 Ontgrondingsvoorspellingen

In dit hoofdstuk worden de omvang en frequentie van de te verwachte ontgronding rondom de windturbines besproken. In paragraaf 4.1 wordt het model waarmee ontgronding wordt gesimuleerd toegelicht. De specifieke toepassing van dit model voor het MV2 windpark wordt verder besproken in paragraaf 4.2. De resultaten worden kort besproken aan de hand van een paar voorbeelden in paragraaf 4.3. Voor een volledig overzicht van de resultaten wordt verwezen naar Bijlage B. Voor de analyse van de resultaten, waarbij vergelijkingen worden gemaakt tussen de verschillende palen en de verschillende hydrodynamische condities wordt verwezen naar paragraaf 4.4. De paragraaf kan worden gezien als een samenvatting van de resultaten van de ontgrondingsvoorspelling. In paragrafen 4.5 en 4.6 wordt afsluitend ingegaan op de vorm van de ontgrondingskuil en de discussie.

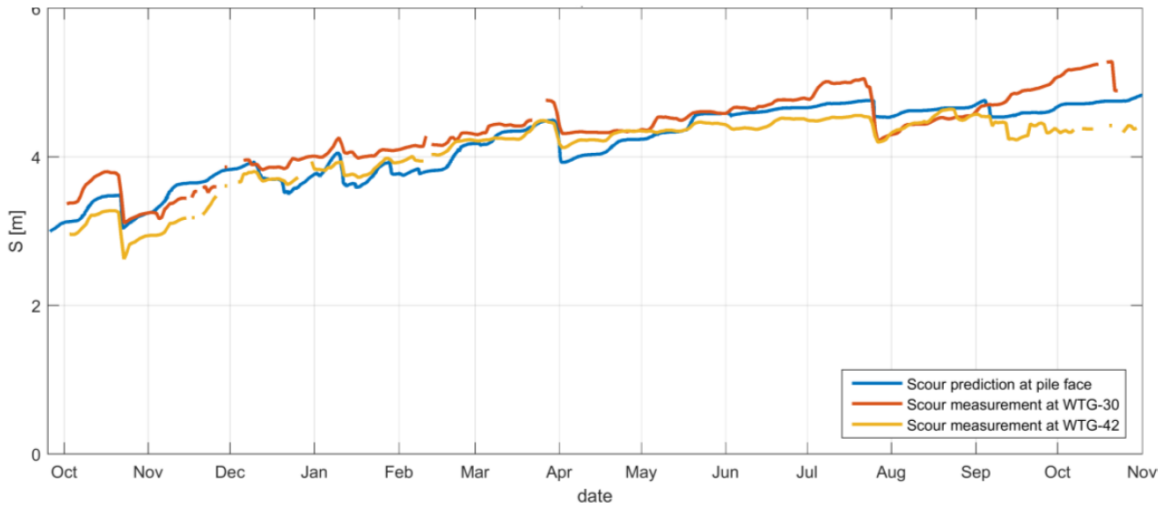
4.1 Dynamic Scour Prediction Model

De ontwikkeling van ontgronding in de tijd is gesimuleerd met het 'Dynamic Scour Prediction Model' (DSPM), ontwikkeld door Deltares op basis van een database aan model- en veldmetingen. De invoerparameters voor dit model bestaan uit grond- en water condities, monopaal afmetingen en tijdseries van de hydrodynamica condities (waterstand, golven en stroming). In het model is de tijdserie van hydrodynamica condities gediscretiseerd in individuele gebeurtenissen, elke met een eigen evenwichtsdiepte (S_{eq}) en tijdschaal (T). Binnen elke gediscretiseerde tijdstap (n) ontwikkelt de ontgrondingsdiepte (S) zich richting de nieuwe evenwichtsdiepte in de tijdsduur van de tijdstap (dt). In de volgende tijdstap (n+1) treedt een andere gebeurtenis op en ontwikkelt de ontgronding zich richting een nieuwe evenwichtsdiepte. Als we dit proces doorzetten voor een lange tijdserie ontwikkelt de ontgrondingsdiepte zich naar een dynamische evenwichtssituatie. Dit proces kan worden beschreven door de volgende formulering:

$$S_{n+1} = S_{eq,n+1} + \left(S_n - S_{eq,n+1}\right) exp\left(-\frac{dt}{T}\right)$$

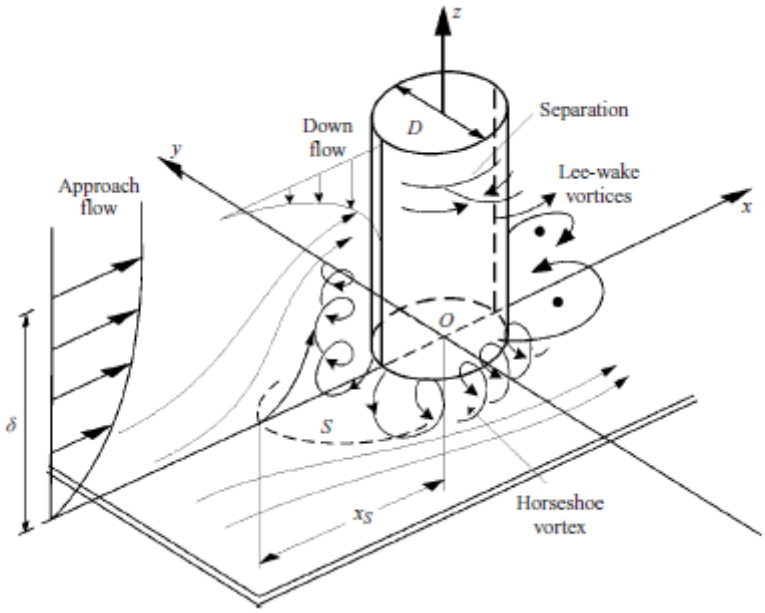
In deze formulering worden zowel de evenwichtsdiepte (S_{eq}) als de tijdschaal (T) bepaald voor elke tijdstap. Beide parameters worden bepaald op basis van empirische formuleringen. De achtergrond van deze formuleringen is verder beschreven in de volgende paragraaf.

Het model is gevalideerd door middel van veldmetingen. Deze metingen zijn uitgevoerd in het Luchterduinen offshore windpark, gelegen 23 km uit de kust bij Noordwijk aan Zee. In Figuur 4.1 is de gemeten en voorspelde ontgrondingsontwikkeling weergegeven. Deze figuur laat zien dat de dynamische ontgrondingsontwikkeling goed wordt voorspeld.



Figuur 4.1 Ontgrondingsontwikkeling zoals gemeten in Luchterduinen offshore windpark rondom WTG-30 (rood) en WTG-42 (geel) en zoals voorspeld met het DSPM (blauw).

Figuur 4.1 laat verder zien dat er situaties zijn waarbij de kuil verder verdiept, maar ook situaties waarbij de kuil gedeeltelijk opvult. In het algemeen treedt verdere verdieping op in stromings-gedomineerde situaties (getij) en kan opvulling optreden onder golf-gedomineerde condities (storm). Ontgronding ontstaat namelijk vooral doordat in een continue uniforme stromingssituatie bepaalde karakteristieke stromingspatronen ontstaan, zie Figuur 4.2. In golven worden deze patronen echter voortdurend afgebroken, omdat de stroming (telkens) van richting verandert (orbitaalbeweging). Natuurlijk is het bovenstaande afhankelijk van de stroomsnelheid, golfhoogte en -periode en de waterdiepte.



Figuur 4.2 In een continue uniforme stroming ontwikkelt aan de voorkant van een paal een neerwaartse stroming ('down flow'). Deze rolt op bij de bodem en vormt een werveling die wordt meegevoerd rondom de paal ('horseshoe vortex'). Aan de achterzijde van de paal vindt loslating plaats en ontstaan ook wervelingen ('lee-wake vortices'). Figuur uit Roulund et al. (2005).

4.2 Toepassing DSPM voor MV2 windpark

Het DSPM is oorspronkelijk ontwikkeld en gevalideerd voor dieper water dan zal optreden bij de windturbines in het MV2 windpark. Hierbij zijn er twee belangrijke verschillen op te merken:

1. Rondom de palen in het MV2 windpark is sprake van brekende golven, die een directe impact hebben op de zandbodem.
2. De ratio tussen de waterdiepte en de paaldiameter is relatief klein in het MV2 windpark, waardoor de stromingspatronen zoals geïllustreerd in Figuur 4.2 zich mogelijk minder goed kan ontwikkelen.

Beide aspecten worden apart beschreven in de onderstaande paragrafen.

4.2.1 Ontgronding in brekende golven

In een vooronderzoek heeft Deltares een literatuuronderzoek uitgevoerd waarbij de ontgronding door brekende golven is vergeleken met de ontgronding door stromingen (Deltares, 2020). Hieruit bleek dat de ontgronding die verwacht wordt in stromingen groter is dan de ontgronding in brekende golven.

Hierbij wordt wel opgemerkt dat naast getijstroming ook rekening is gehouden met stromingen geïntroduceerd door brekende golven. Voor dit laatste geldt namelijk dat de verwachte stroomsnelheid, maar ook de waterdiepte ter plaatse van de palen groter is dan in getijstroming. Beide zal leiden tot een grotere ontgrondingsdiepte. Door de golfgedreven stroming te beschouwen zonder de effecten van de golven (bijv. opvullen) zelf mee te nemen, verwachten we een conservatieve voorspelling van de ontgronding te doen.

In de huidige studie wordt daarom enkel de ontgronding door stroming, door getij, wind en golven, beschouwd.

4.2.2 Ontgronding door stroming in relatief ondiep water

Het ontgrondingsmodel (DSPM) wordt normaal gesproken toegepast in offshore condities, waar de waterdiepte over het algemeen tenminste één (en vaak meerdere) paaldiameter(s) bedraagt. Voor de windturbines op de tweede Maasvlakte geldt dat de waterdiepte significant kleiner is, gegeven de positie van de windturbines op de vooroever van het strand. Voor toepassing van het DSPM bij de tweede Maasvlakte wordt daarom bepaald hoe de invloed van de relatief beperkte waterdiepte in beschouwing kan worden genomen in het ontgrondingsmodel. Voor deze analyse worden twee formuleringen voor de evenwichtsdiepte van de ontgronding beschouwd, namelijk de formulering van Sheppard & Miller (2006) en een aangepaste formulering van Chen & Wei (2019).

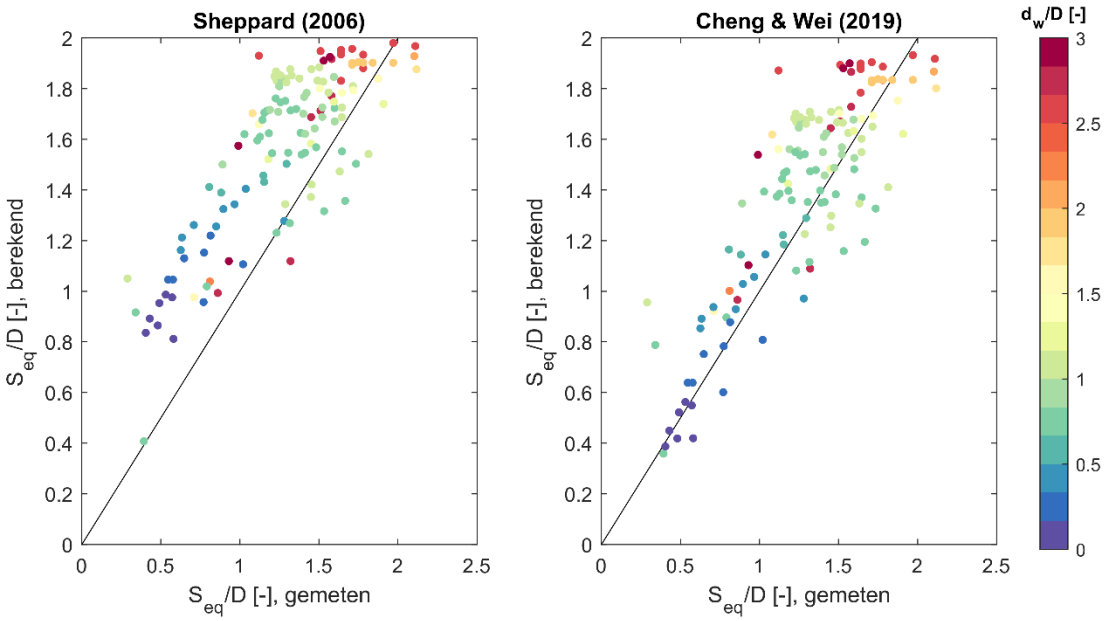
In de formuleringen van Sheppard & Miller (2006) wordt de relatie tussen waterdiepte en evenwichtsdiepte van de ontgronding op de volgende manier meegenomen:

$$\frac{S_{eq}}{D} \propto 2.2 \cdot \tanh\left(\left[\frac{d_w}{D}\right]^{0.4}\right),$$

waar S_{eq} de evenwichtsdiepte van de ontgronding, D de paaldiameter en d_w de lokale waterdiepte is. Dat de relatie tussen evenwichtsdiepte en waterdiepte een tangens-hyperbolicus is heeft geen fysische achtergrond; het werd opgemerkt door Breusers (1977) dat deze vorm de beste benadering bood voor de evenwichtsdiepte op basis van zijn observaties. In een recente analyse naar de waterdiepte-afhankelijkheid van de ontgrondingsdiepte kwamen Chen & Wei (2019) op een relatie die gebaseerd is op de typische lengteschaal van wervelbewegingen rond de paal. Op basis van deze informatie is de volgende formulering opgesteld voor deze studie:

$$\frac{S_{eq}}{D} \propto 4.6 \frac{d_w \ / \ D}{1 + 2d_w \ / \ D}$$

In Figuur 4.3 zijn beide formuleringen vergeleken met een experimentele dataset gevonden in een uitgebreide literatuurstudie uitgevoerd binnen het huidig onderzoek. Deze dataset bevat ontgrondingsmetingen met d_w/D tussen 0.1 en 3. Voor relatief grote waterdieptes (geel en rood) ontlopen de formuleringen elkaar niet veel; beide laten een goede overeenkomst met de metingen zien. Maar voor de kleinere waterdieptes (blauw en paars) is duidelijk te zien dat de formulering van Sheppard & Miller (2006) een relatief grote evenwichtsdiepte voorspelt ten opzichte van de metingen, terwijl de formulering opgesteld op basis van Cheng & Wei (2019) de metingen goed volgt.



Figuur 4.3 Gemeten ontgrondingsdiepte (horizontaal) tegen berekende ontgrondingsdiepte (verticaal) met de Sheppard-formulering uit 2006 (links) en met de in deze studie ontwikkelde formulering op basis van Cheng &Wei (2019) (rechts). De kleuren van de meetpunten geven de waarde voor de ratio tussen waterdiepte en paaldiameter, d_w/D, weer.

Voor de andere invoer van het DSPM, de tijdschaal (T), kan een soortgelijke analyse als hierboven is uitgevoerd voor de evenwichtsdiepte (S_{eq}) niet worden uitgevoerd door het gebrek aan data. Er wordt echter niet een groot effect van de waterdiepte op de tijdschaal verwacht. Daarom zullen we voor deze parameter de formulering toepassen die ook wordt gebruikt voor dieper water (Raaijmakers & Rudolph, 2008):

$$T_c = \frac{1000D^2}{U^3}\left(1 + \frac{10}{MOB^2}\right),$$

Waar *D* de paaldiameter is, *U* de lokale stroomsnelheid is en *MOB* de relatieve mobiliteit van het zand is, ofwel de Shields parameter gedeeld door de kritische Shields parameter. Om de onzekerheid in de tijdschaal mee te nemen wordt deze vermenigvuldigd met een factor die varieert tussen 1 en 20.

Door de formulering te gebruiken die is opgesteld op basis van Cheng & Wei (2019) voor de evenwichtsdiepte en een onzekerheidsband mee te nemen voor de tijdschaal, hebben we er vertrouwen in dat we het DSPM kunnen toepassen voor waterdieptes die slechts 10% van de

paaldiameter bedragen. Voor het MV2 windpark betekent dit dat we het DSPM model met vertrouwen toepassen voor stromings-gedomineerde situaties in waterdieptes vanaf 0.5 m gegeven een paaldiameter van 5 m.

4.3 Resultaten ontgrondingsberekeningen

In deze paragraaf worden de berekende ontgrondingen op basis van de verkregen input vanuit de hydrodynamische modelsimulaties gepresenteerd. Er wordt onderscheid gemaakt tussen resultaten verkregen met de gemeten bodemligging uit 2019, en resultaten verkregen met het minimale ontwerpprofiel. De resultaten worden besproken aan de hand van een aantal representatieve locaties. Voor de resultaten voor de overige windturbine locaties wordt verwezen naar Bijlage B. Voor de analyse van de resultaten wordt verwezen naar de volgende paragraaf.

Allereerst zullen resultaten voor scenario's 1-3 (tijdserie van drie weken in 2011) worden gepresenteerd. Deze scenario's bevatten respectievelijk (1) het astronomisch getij, (2) het astronomische getij + wind opzet + windgedreven stroming en (3) het astronomisch getij + wind opzet + windgedreven stroming + golfgedreven stroming.

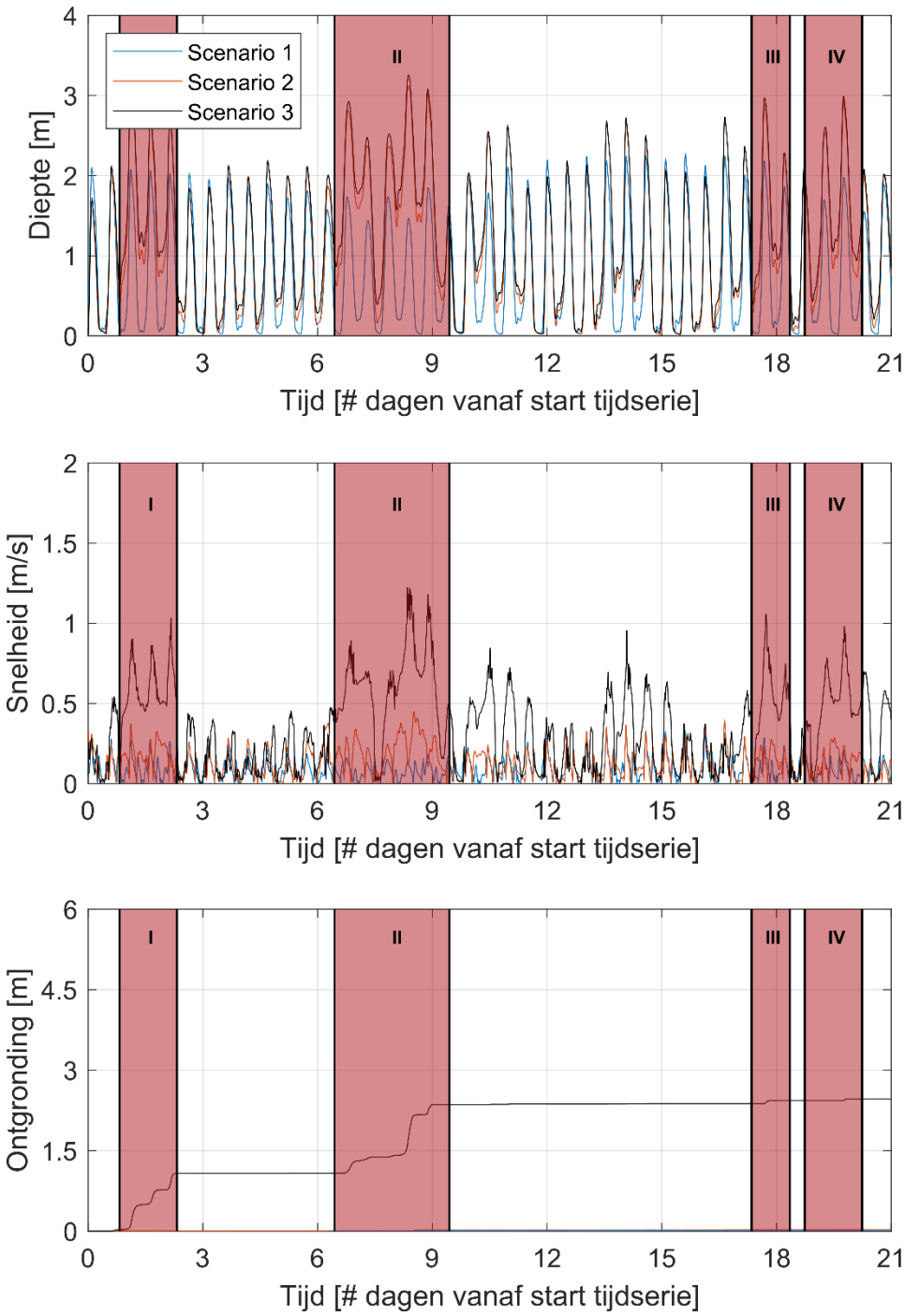
Deze resultaten vormen de motivatie voor het verder beschouwen van de te verwachten ontgronding voor individuele stormen (scenario's 4 -6) met een bepaalde kans van voorkomen zoals geschetst in hoofdstuk 2.

4.3.1 Ontgronding voor scenario's 1-3

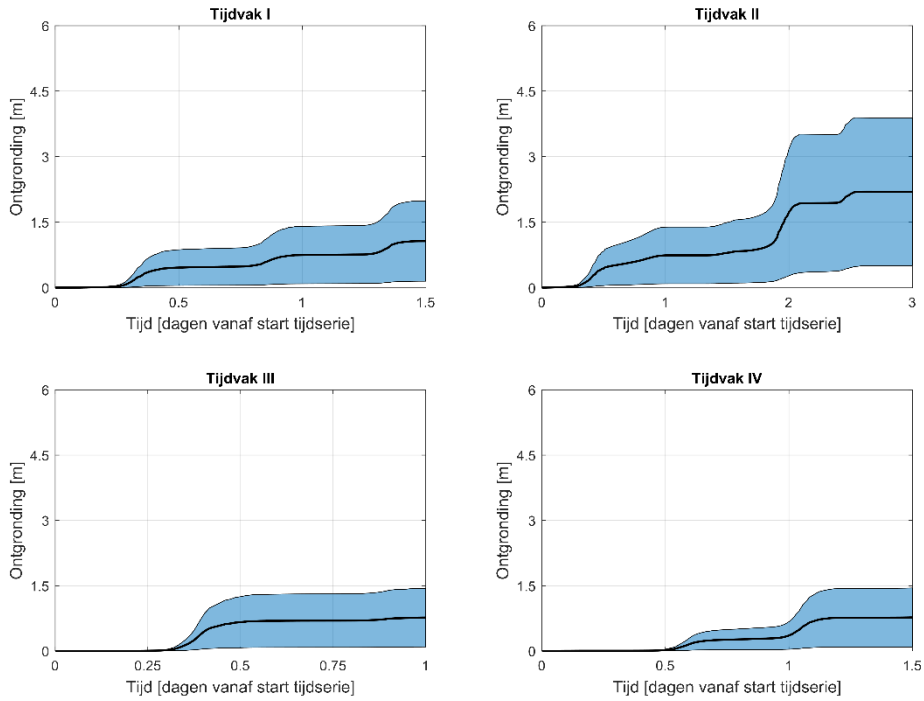
4.3.1.1 Bodemligging 2019

Figuur 4.4 presenteert de waterdiepte, stroomsnelheid en verwachte ontgronding ter plaatse van windturbine 12, welke representatief is voor het gedrag bij de overige locaties. Let wel: in dit figuur is voor een overzichtelijke weergave niet de onzekerheidsband behorende bij het ontgrondingsverloop weergegeven. Figuur 4.4 laat duidelijk zien dat de ontgronding bij deze windturbine verwaarloosbaar klein is voor scenario's 1 en 2. In scenario 3 wordt de golfgedreven stroming meegenomen, waardoor ontgronding ontwikkelt. De lokale ontgronding verloopt in sprongen. Deze sprongen zijn gerelateerd aan het voorkomen van zowel hogere waterstand als hogere stroomsnelheid gedurende een storm op die locatie. In de figuur zijn 4 tijdsvakken gedefinieerd die dit verder illustreren. De ontgronding kan in een relatief kort tijdsbestek (ordegrootte 1 storm) fors toenemen. Hierbij moet ook worden opgemerkt dat de sprong in tijdsvakken III en IV niet heel groot is in deze simulatie. Dit komt doordat voorafgaand aan deze tijdsvakken al een significante ontgrondingdiepte is bereikt. Wanneer de ontgrondingkuil artificieel zou zijn opgevuld voorafgaand aan tijdsvakken II en IV, zal de sprong veel groter zijn, zie Figuur 4.5. In dit figuur wordt voor de 4 losse tijdvakken de berekende ontgronding weergegeven, waarbij de zwarte lijn de gemiddelde voorspelling weergeeft en het blauwe gebied de onzekerheidsband. Voor deze analyse is er vanuit gegaan dat na ieder tijdvak besloten is om de ontgrondingskuil op te vullen, zodat aan het begin van ieder tijdvak er geen ontgronding aanwezig is bij de paal. Figuur 4.5 laat zien dat individuele stormen significante ontgronding kunnen veroorzaken.

Ondanks dat er verschillen zijn in de gesimuleerde ontgrondingsdiepte voor de verschillende turbine locaties, geldt voor alle locaties dat er zeer beperkte ontgronding wordt berekend in scenario 1 en 2 voor de opgelegde tijdserie. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de ontgronding (diepte en frequentie) bepaalt wordt door hogere golfcondities en stormen. De focus van de beschrijving van de resultaten en van de analyse ligt daarmee op scenario's 4-6, waarin respectievelijk een 1 per 1, 10 en 100 jaar storm is gesimuleerd.



Figuur 4.4 Lokale waterdiepte (bovenste paneel), stroomsnelheid (middelste paneel) en ontgronding (onderste paneel) voor windturbine 12, met de 2019 bodem, voor scenario's 1 (blauw), 2 (rood) en 3 (zwart). De rode banden geven 4 tijdsvakken met een hogere belasting aan.

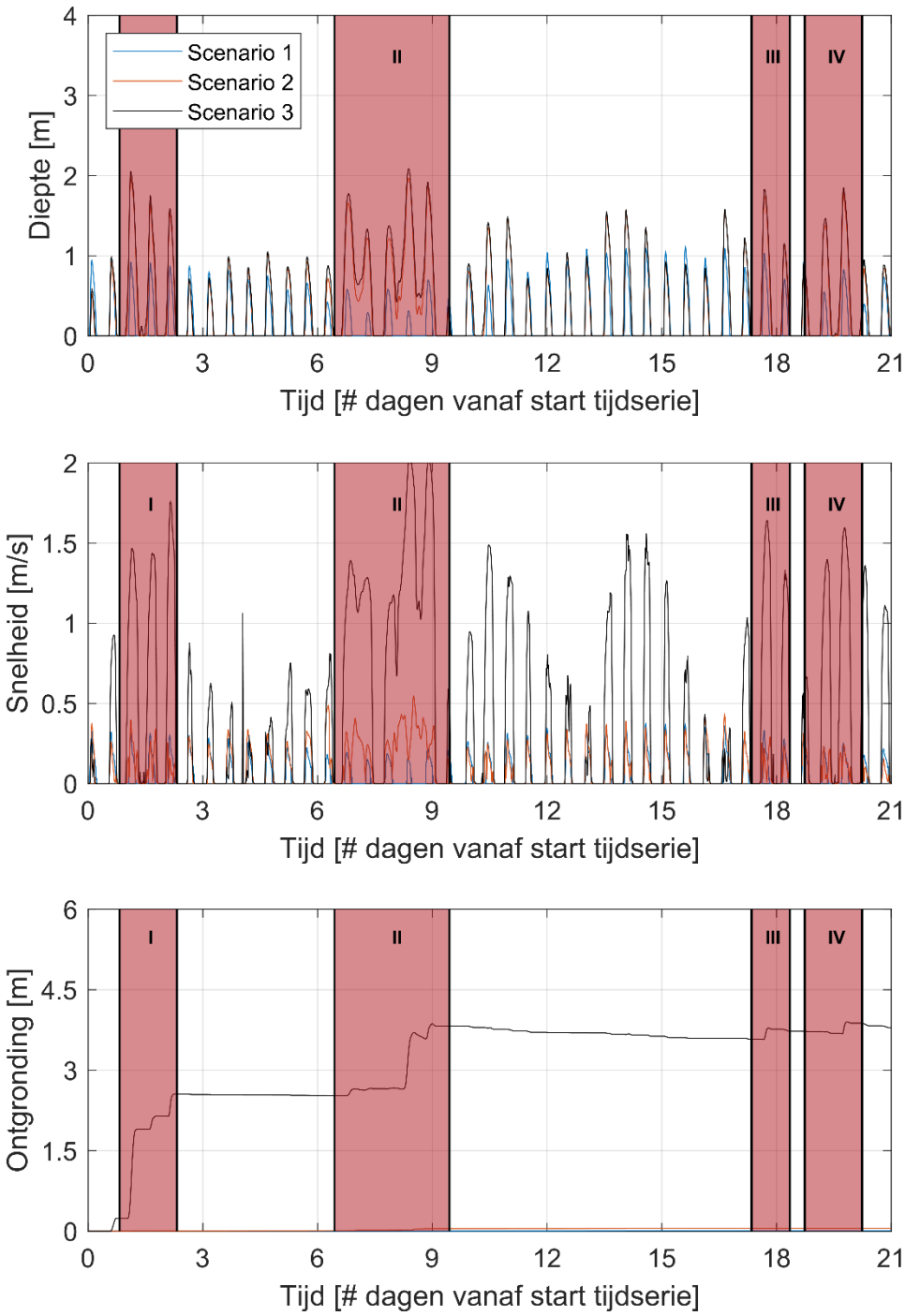


Figuur 4.5 Ontgrondingsvoorspelling voor de 2019 bodem voor de individuele tijdsvakken gepresenteerd in Figuur 4.4, waarbij is aangenomen dat voorafgaand aan het tijdsvak de ontgrondingskuil is opgevuld.

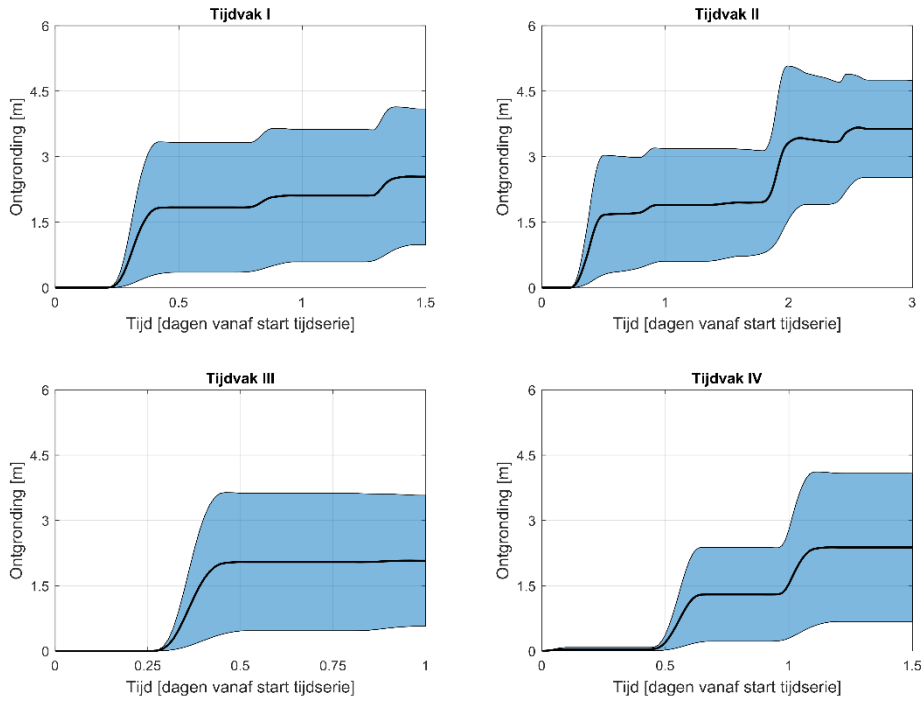
4.3.1.2 Minimale ontwerpbodem

Figuur 4.6 presenteert de waterdiepte, stroomsnelheid en verwachte ontgronding ter plaatse van windturbine 12, welke representatief is voor de overige turbines. Net als in paragraaf 4.3.1.1 zijn de bijbehorende onzekerheidsbanden in dit figuur niet geplot voor een overzichtelijke weergave. Het verloop van de ontgronding is vergelijkbaar met de simulaties waar gebruik is gemaakt van de bodemligging zoals gemeten in 2019, maar de uiteindelijke ontgrondingsdiepte is groter wanneer gerekend wordt met de ontwerpbodem. Dit is een algemeen beeld wat voor alle turbines geldt, en dit is te relateren aan de hogere optredende waterstanden en stroomsnelheden bij de palen in deze situatie (zie ook Appendix B). Een aantal palen is in deze situatie ook gevoeliger voor ontgronding tijdens normale getij-condities (palen 5-8).

Zoals ook in Figuur 4.4 te zien was, verloopt de ontgronding wederom in sprongen die te relateren zijn aan tijdelijk hevigere condities binnen de tijdserie. In Figuur 4.7 is de ontgronding voor 4 van die tijdsvakken geplot, onder de aanname dat de ontgrondingskuil na ieder tijdvak direct opgevuld zou worden. Wat opvalt is dat, in vergelijking met de berekeningen gebaseerd op de gemeten bodemligging van 2019, de onzekerheidsband kleiner is aan het einde van tijdvak 2 voor de berekeningen met de ontwerpbodem. Door de zwaardere condities ontwikkelt de ontgronding zich tot dichter bij een evenwicht, waarbij de tijdsafhankelijkheid minder belangrijk wordt. Aangezien de onzekerheid zoals gepresenteerd in de ontgrondingsberekeningen zijn oorsprong vindt in de tijdsschaal waarin de ontgrondingen optreden (en niet zozeer in de uiteindelijke diepte), zal deze onzekerheid dus afnemen als de ontgronding dichter in de buurt van het uiteindelijke evenwicht komt.



Figuur 4.6 Lokale waterdiepte (bovenste paneel), stroomsnelheid (middelste paneel) en ontgronding (onderste paneel) voor windturbine 12, met de minimale ontwerpbodem, voor scenario's 1 (blauw), 2 (rood) en 3 (zwart). De rode banden geven 4 tijdsvakken met een hogere belasting aan.



Figuur 4.7 Ontgrondingsvoorspelling voor de minimale ontwerpbodem voor de individuele tijdsvakken gepresenteerd in Figuur 4.4, waarbij is aangenomen dat voorafgaand aan het tijdsvak de ontgrondingskuil is opgevuld.

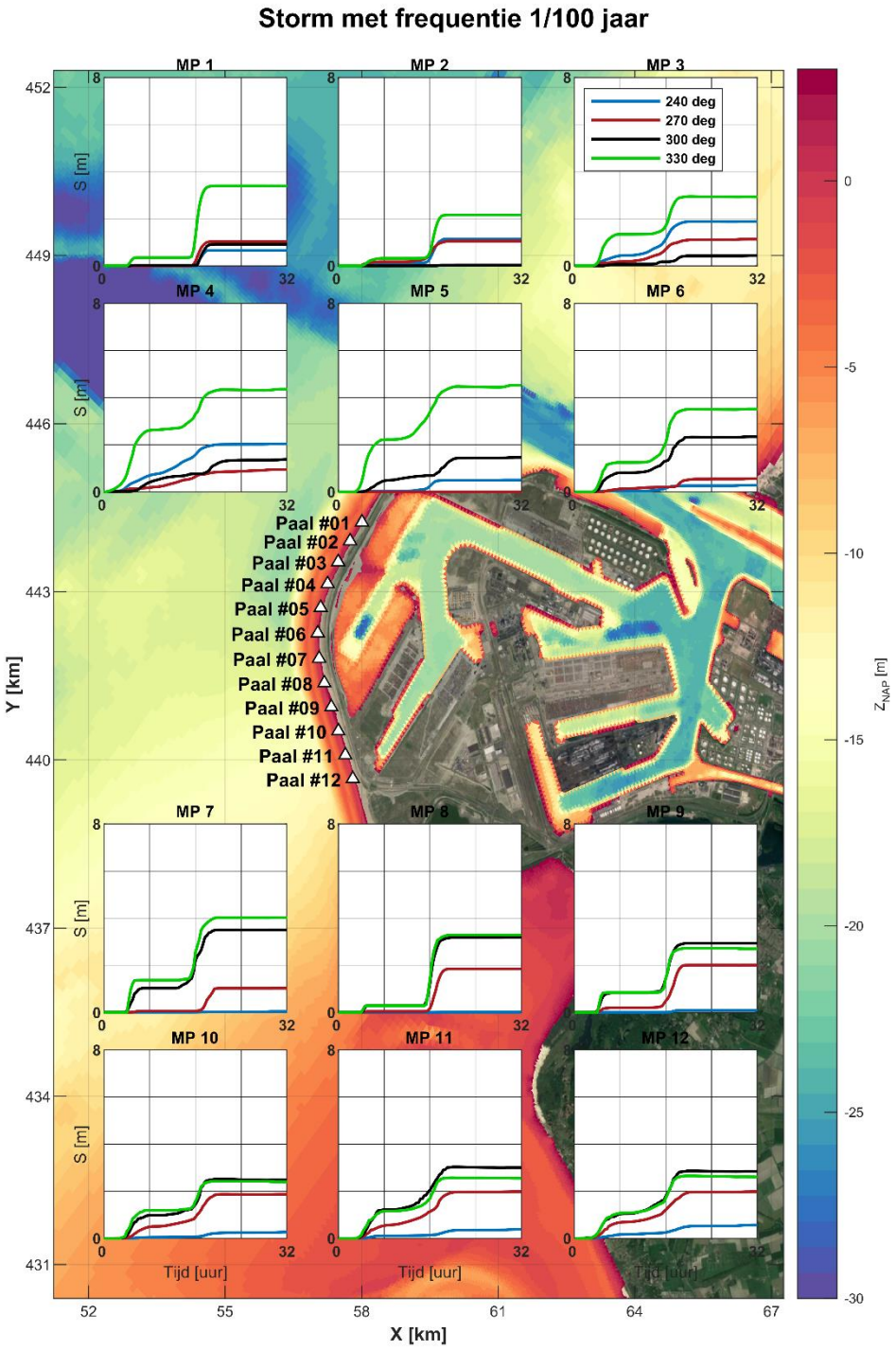
4.3.2 Ontgronding voor scenario's 4-6

4.3.2.1 Bodemligging 2019

In scenario's 4-6 wordt gerekend met stormen met een frequentie van voorkomen eens per jaar (scenario 4), eens per 10 jaar (scenario 5) en eens per 100 jaar (scenario 6), met een invalshoek van 240, 270, 300, en 330 graden t.o.v. het noorden.

In Figuur 4.8 is een ruimtelijk overzicht van het berekende tijdsverloop van de ontgronding weergegeven voor de 100-jaarsstorm, voor alle 4 de richtingen. Let wel: om het figuur overzichtelijk te houden zijn de bijbehorende onzekerheidsbanden niet weergegeven. Voor de 1-jaars en de 10-jaars storm zijn soortgelijke figuren gepresenteerd in Bijlage B. De resultaten van de 10-jaar storm en 1-jaars storm zijn qua verloop van de ontgronding vergelijkbaar, maar verschillen in de maximale voorspelde ontgrondingsdiepte (minder diep).

Het overzicht in Figuur 4.8 laat zien dat voor een 100-jaars storm bij iedere windturbine minimaal 2 m ontgronding op kan treden in een periode van 32 uur. Deze ontgronding is het kleinste bij paal 2 (2 m), en het grootste bij paal 5 (5 m). De figuur laat verder duidelijk zien dat een invalshoek van 330 graden bij de meeste palen (palen 1-7) tot de diepste ontgronding leidt. Echter bij palen 9-12 is de ontgronding voor een storm met een invalshoek van 300 graden het diepst, hoewel vergelijkbaar met de 330 graden storm. Voor een gedetailleerdere blik in het vervolg van deze paragraaf zal de 330 graden storm die eens in de 100 jaar voorkomt gebruikt worden, omdat die als representatief beschouwd kan worden voor de optredende fenomenen.

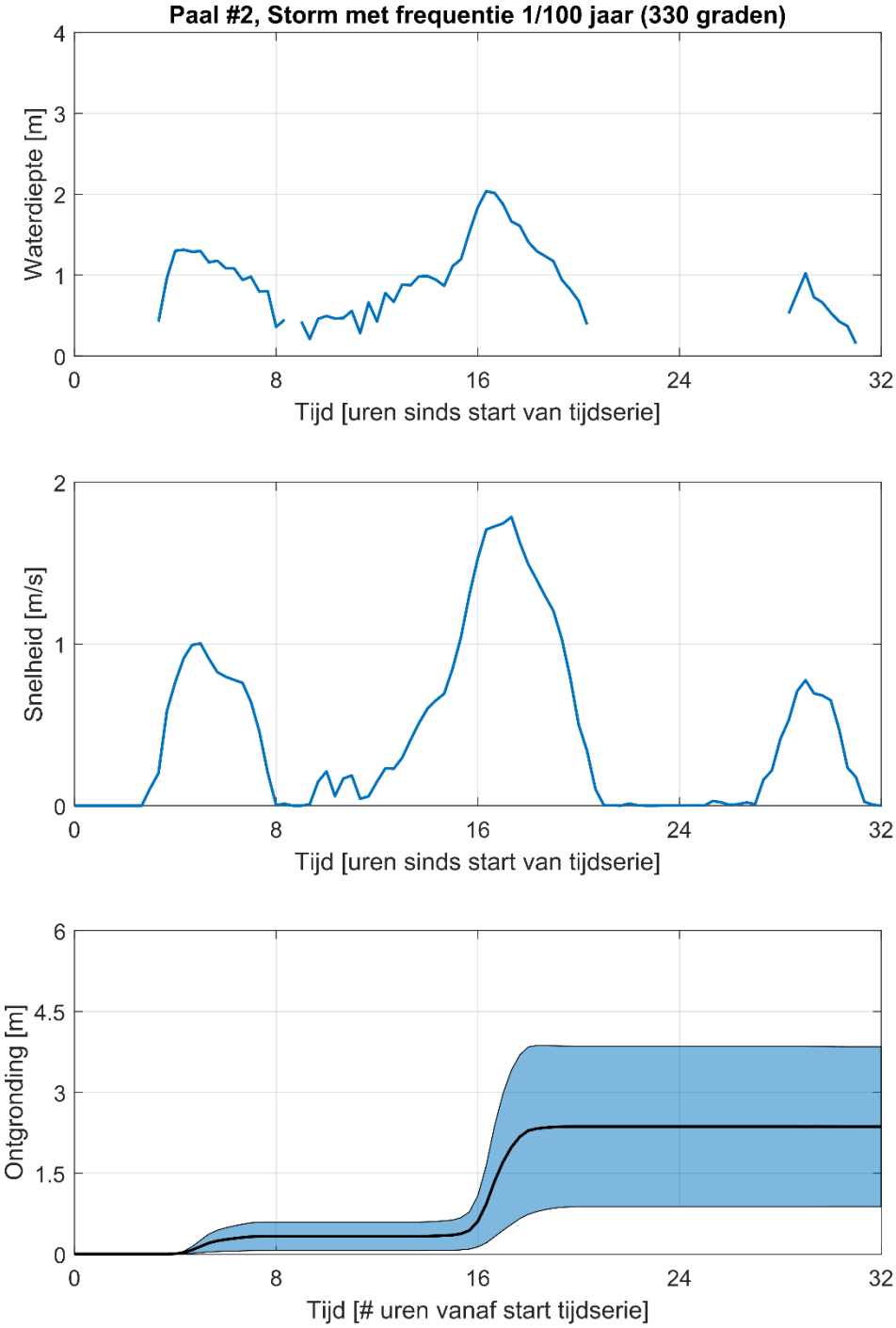


Figuur 4.8 Ruimtelijke weergave van het tijdsverloop van de berekende ontgronding per turbine voor de 100-jaarsstorm voor de 2019 bodem. De horizontale as beslaat 32 uur, de verticale as 8 m.

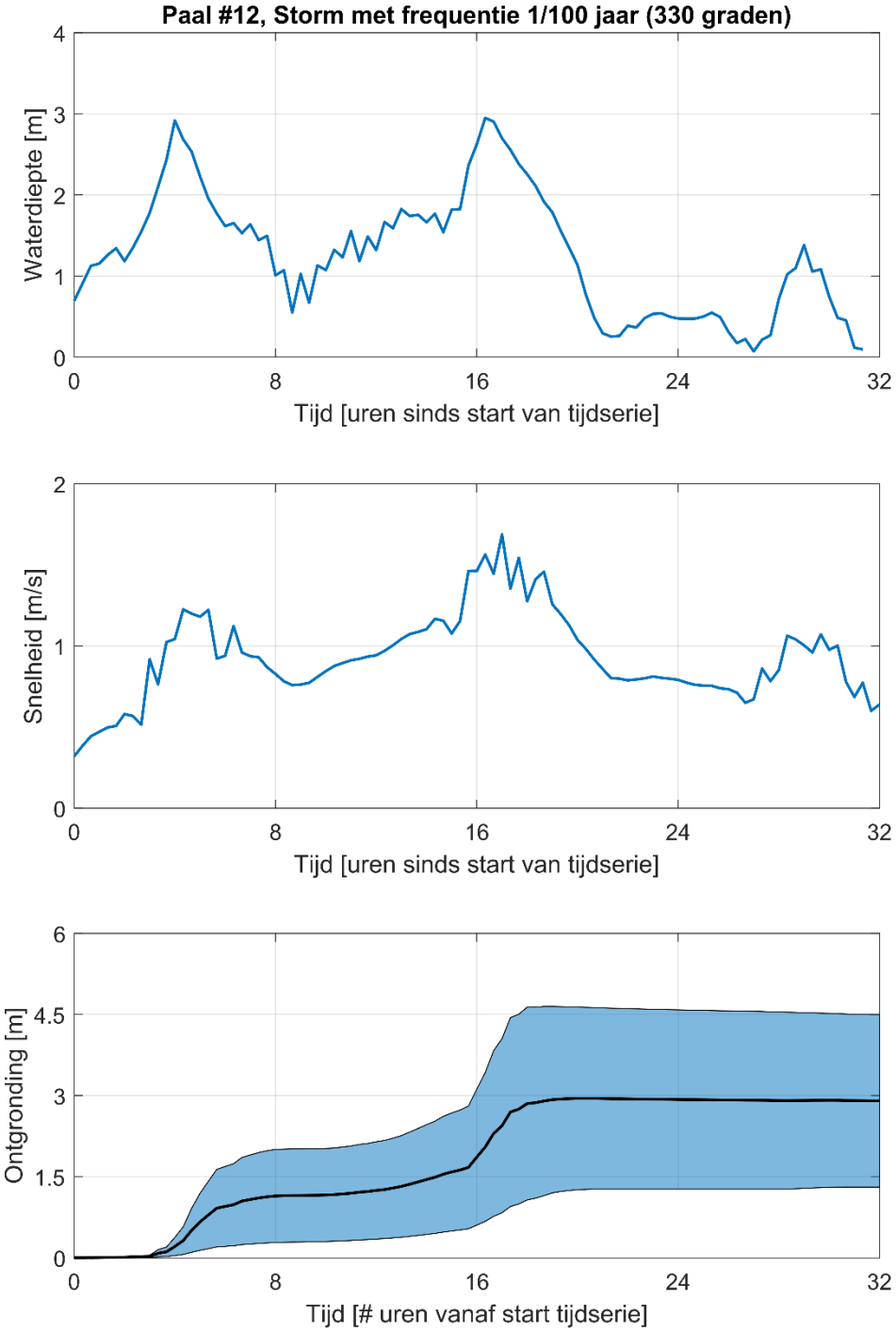
Figuur 4.9 en Figuur 4.10 laten het tijdsverloop van de ontgronding zien voor turbine 2 en turbine 12 voor een 100-jaars storm, inclusief de bijbehorende onzekerheidsband. De dikgedrukte zwarte lijn is de ontgronding zoals geplot in Figuur 4.8. Deze figuren tonen dat de onzekerheid in de

tijdschaal een groot effect heeft op de verwachte ontgronding. In paragraaf 4.3.1 werd al genoemd dat deze onzekerheid enkel in het tijdsverloop van de ontgronding zit, en dat de bandbreedte van de voorspelling dus kleiner zal worden naarmate de ontgronding dichter in de buurt van het evenwicht komt. Dit zal niet voor alle palen in een enkele storm gehaald worden. De uiteindelijke diepte van de ontgronding wordt dus bepaald door de tijdsduur van de storm en de tijdschaal van het optreden van de ontgronding.

Verder laten de figuren zien dat turbine 2 vaker droogvalt tijdens de storm, en dat de waterstand rond de turbine flink lager is dan bij turbine 12. De maximale lokale stroomsnelheid rond beide turbines is echter ongeveer gelijk. Deze bevinding toont het belang van de locatie van de fundering op het strand t.o.v. de waterlijn aan. In de analyse (paragraaf 4.4) wordt hier verder op ingegaan.



Figuur 4.9 Waterstand (bovenste paneel), stroomsnelheid (middelste paneel) en ontgronding (onderste paneel) gedurende 32 uur tijdens een 100-jaarsstorm met invalshoek van 330 graden bij de monopaal van windturbine 2 met de 2019 bodem. De blauwe band in het onderste paneel geeft de onzekerheid weer die het gevolg is van de daadwerkelijke snelheid van het optreden van de ontgronding.

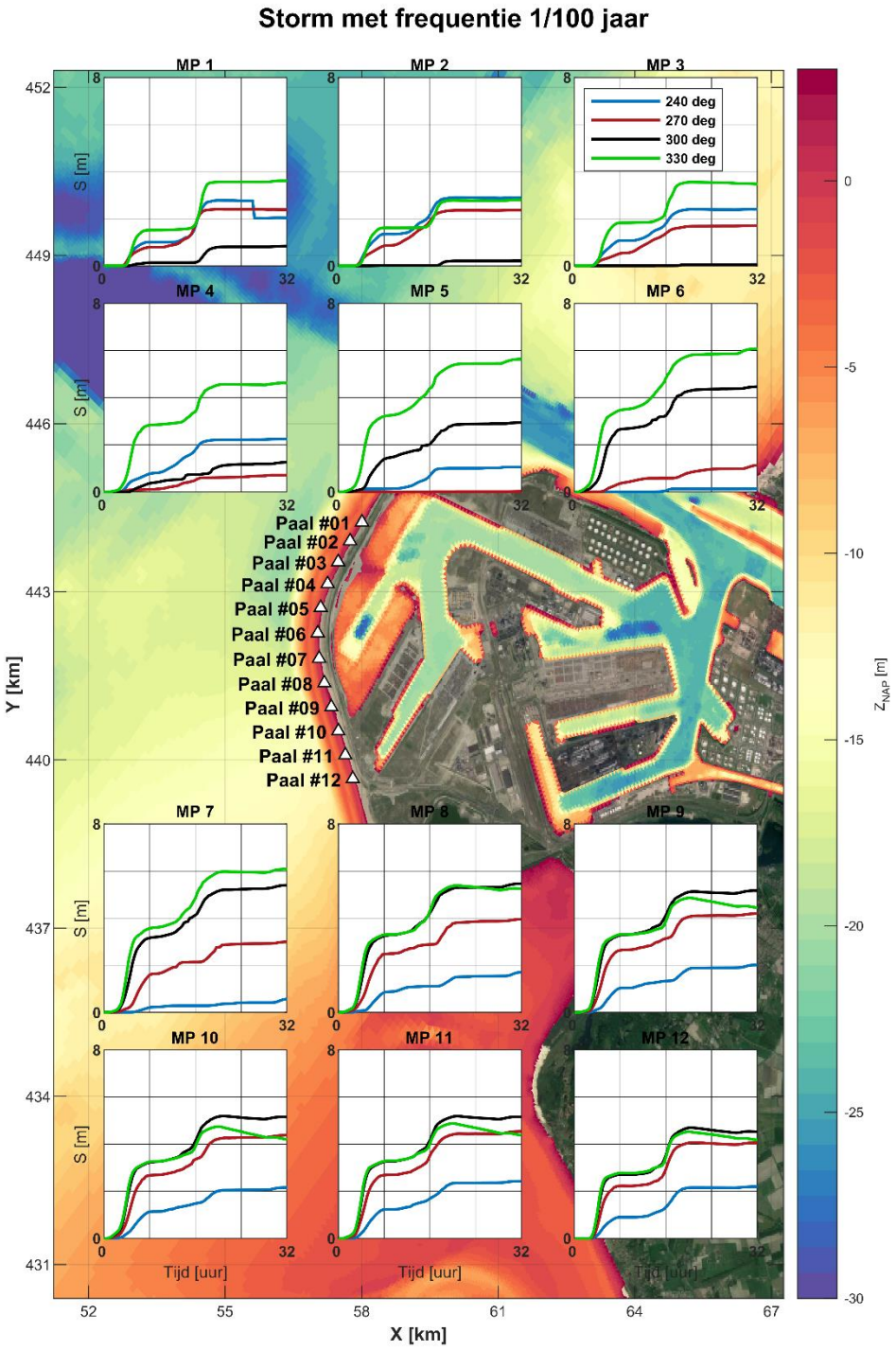


Figuur 4.10 Waterstand (bovenste paneel), stroomsnelheid (middelste paneel) en ontgronding (onderste paneel) gedurende 32 uur tijdens een 100-jaarsstorm met invalshoek van 330 graden bij de monopaal van windturbine 12 met de 2019 bodem. De blauwe band in het onderste paneel geeft de onzekerheid weer die het gevolg is van de daadwerkelijke snelheid van het optreden van de ontgronding.

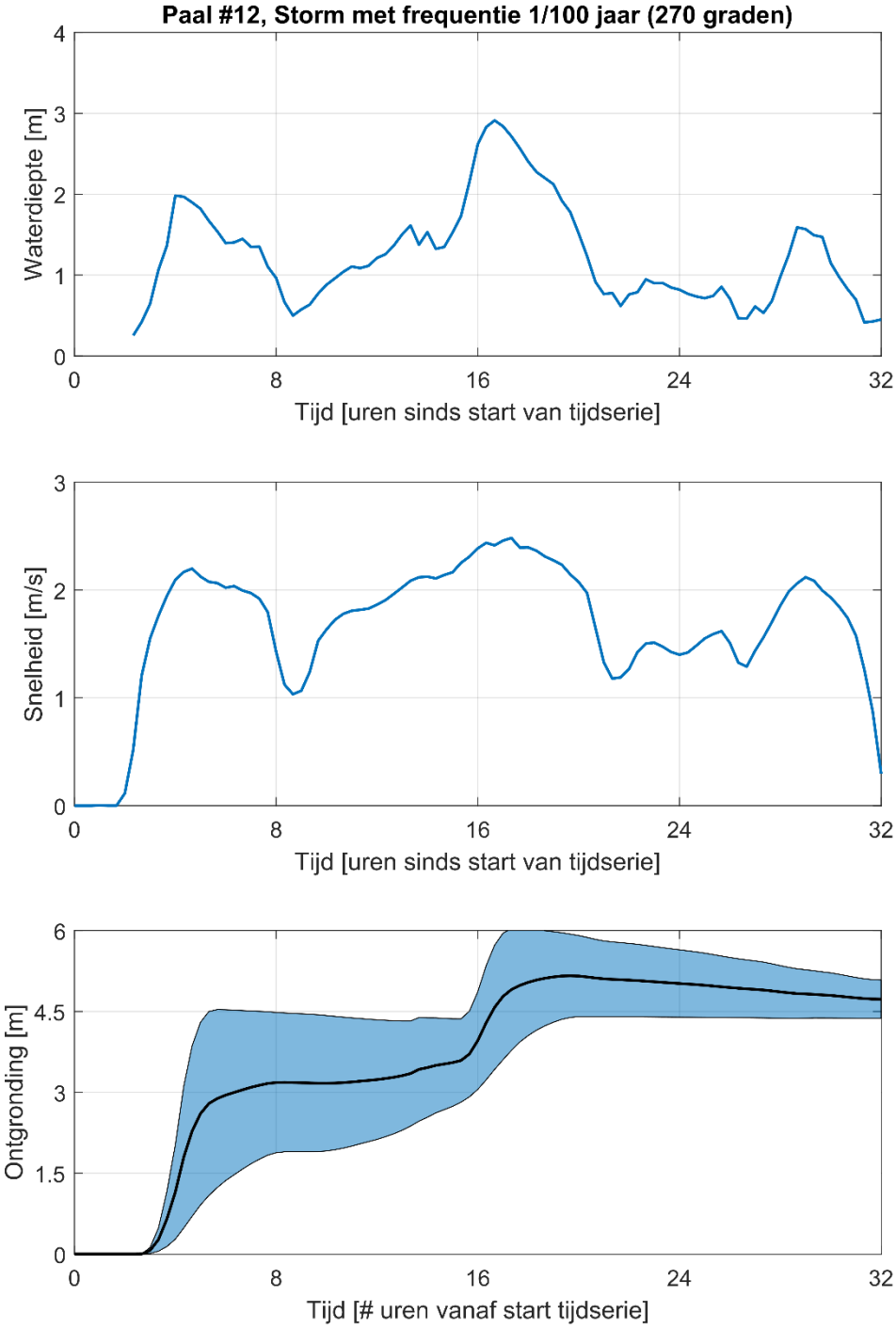
4.3.2.2 Minimale ontwerpbodem

In Figuur 4.11 is een ruimtelijk overzicht van de berekende ontgronding voor een eens per 100 jaar storm die vanuit verschillende richtingen invalt weergegeven voor de ontwerpbodem. Dit beeld is vergelijkbaar met Figuur 4.8, alleen is de berekende ontgronding voor de ontwerpbodem dieper. De minimale ontgronding van 2.7 m vindt plaats bij turbine 2. Bij de meeste turbines treedt een ontgronding van meer dan 4 m op in een tijdsinterval van 32 uur. Bij turbines 4-12 ligt de ontgronding zelfs tussen de 5 en 6 m na een tijdsinterval van 32 uur. Dezelfde trends gerelateerd aan de invalshoek van de storm gelden voor zowel de ontwerpbodem als voor de bodemligging zoals gemeten in 2019.

Figuur 4.12 laat de ontgronding voor turbine 12 zien zoals voorspeld met de ontwerpbodem. Omdat de berekende ontgronding bij deze locatie dichter bij het uiteindelijke evenwicht ligt, is de onzekerheid in de voorspelling minder dan het geval was voor de bodem uit 2019 (zie Figuur 4.9). Een analyse van de ontgrondingen (en de bijbehorende onzekerheid in de voorspelling) wordt gepresenteerd in paragraaf 4.4.



Figuur 4.11 Ruimtelijke weergave van het tijdsverloop van de berekende ontgronding per turbine voor de 100-jaarsstorm voor de minimale ontwerpbodem. De horizontale as beslaat 32 uur, de verticale as 8 m.



Figuur 4.12 Waterstand (bovenste paneel), stroomsnelheid (middelste paneel) en ontgronding (onderste paneel) gedurende 32 uur tijdens een 100-jaarsstorm met invalshoek van 330 graden bij de monopaal van windturbine 12 met de minimale ontwerpbodem. De blauwe band in het onderste paneel geeft de onzekerheid weer die het gevolg is van de daadwerkelijke snelheid van het optreden van de ontgronding

4.4 Analyse van de ontgrondingsvoorspelling

4.4.1 Ontgronding per paal

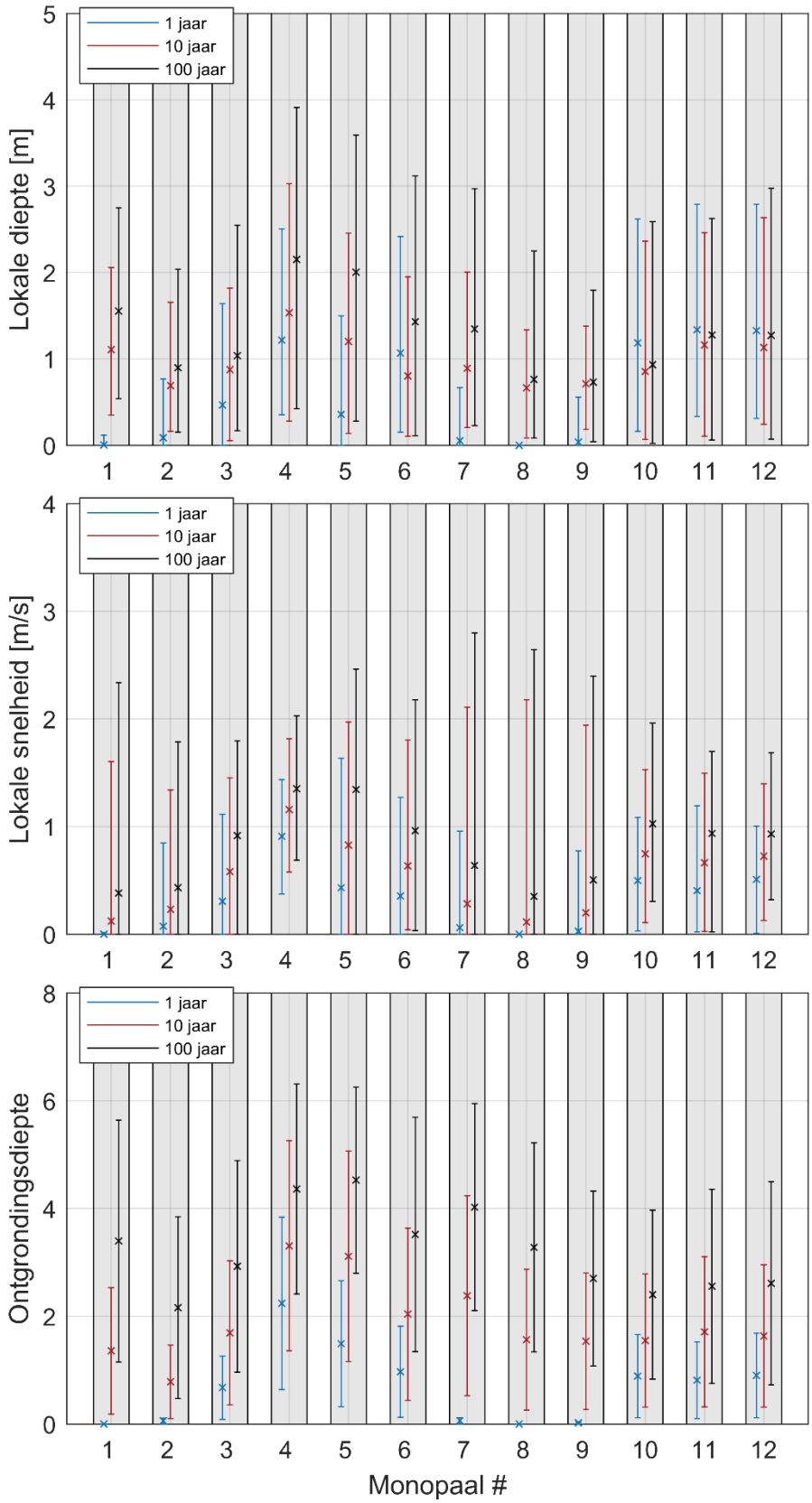
4.4.1.1 Bodemligging 2019

In Figuur 4.13 zijn per paal de lokale (maximale) waterdiepte, lokale stroomsnelheid en ontgrondingsdiepte weergegeven voor de 1, 10 en 100-jaars storm met een invalshoek van 330 graden. Voor de andere beschouwde invalshoeken zijn soortgelijke figuren gepresenteerd in Bijlage B. In de figuren zijn zowel de gemiddelden (markers) als de spreiding (lijnen) in de berekende waardes weergegeven.

De weergegeven ontgrondingsdieptes zijn de dieptes aan het einde van de 32 uur durende storm. De spreiding in de berekende diepte vindt zijn oorsprong in de onzekerheid in de daadwerkelijke snelheid van de ontwikkeling van de ontgronding. In het boven- en middenpaneel wordt ook een gemiddelde en een spreiding weergegeven. Voor de weergegeven grootheden in deze panelen betreft de middeling een tijdsmiddeling over de tijdserie, terwijl de spreiding de minimaal en maximaal optredende waarden gedurende de tijdserie weergeeft.

Uit deze figuren blijkt een duidelijke correlatie tussen de lokale waterdiepte en de optredende ontgronding. Echter, een beperkte waterstand rondom de paalfundering is geen garantie voor het uitblijven van ontgronding. Als voorbeeld wordt Paal 7 aangehaald. Bij deze paal is de waterdiepte relatief beperkt; tijdens normale getij-condities staat deze droog, en bij een 100-jaarsstorm is de gemiddelde waterdiepte 1.5 m, met uitschieters naar 3 m. De ontgronding bij deze paal tijdens een 100-jaarsstorm is ruim 4 m. Dit valt te verklaren door de stroomsnelheid ook in acht te nemen: bij Paal 7 is de pieksnelheid tijdens de storm (van ~2.5 m/s) veruit het hoogste van alle palen. Op een vergelijkbare manier valt te verklaren waarom de ontgronding bij Paal 5 het grootste is van alle palen. Hoewel deze paal niet gekenmerkt wordt door de meest extreme waarden in stroomsnelheid, is de gemiddelde stroomsnelheid bij deze paal wel het hoogste van alle palen; de waterdiepten rond deze paal zijn de op-een-na hoogste. Deze combinatie leidt tot forse ontgronding gedurende de storm. Een algemeen beeld wat geschetst kan worden is dat de palen 4-9 onderhevig zijn aan relatief sterke (maximale) stroming van boven de 2 m/s, wat verklaard kan worden door hun positie op de kop van de tweede Maasvlakte. Bij de turbines die blootgesteld worden aan relatief sterke stroming, in combinatie met een relatief grote waterdiepte, is de spreiding in de berekende ontgronding kleiner. Dit kan een indicatie zijn dat bij deze turbines de ontgronding dicht in de buurt is van evenwicht. Bij positionering van de windturbines kan hier waar mogelijk rekening mee gehouden worden.

In Tabel 4.1, Tabel 4.2 en Tabel 4.3 is voor alle palen grafisch weergegeven hoe respectievelijk de gemiddelde, minimale en maximale ontgronding na 32 uur storm afhankelijk is van de invalshoek van de storm, en de hevigheid van de storm. Met deze informatie kan voor voorspelde (storm) condities een inschatting gemaakt worden bij welke paal onderhoud gepleegd zou moeten worden. Verder kan inzicht worden verkregen over de frequentie waarbij ontgrondingskuilen zich kunnen ontwikkelen. Dit wordt beschouwd in de volgende paragraaf.



Figuur 4.13 Waterdiepte (boven), stroomsnelheid (midden) en ontgronding (onder) per monopaal, inclusief onzekerheid, voor de 1-jaars, 10-jaars en 100-jaarsstorm met een invalshoek van 330 graden voor de 2019 bodem.

Tabel 4.1 – Discreet grafisch overzicht van de gemiddelde ontgronding per paal binnen de berekende spreiding na 32 uur storm met de 2019 bodem, vanuit de richtingen aangegeven in de bovenste rij, en de frequentie van voorkomen in de tweede rij. De kleuren in de tabel geven de range aan waarin de ontgronding zich bevind (wit = 0-1 m, groen = 1-2 m, geel = 2-3 m, oranje = 3-4 m, rood = 4-5 m, paars = 5-6 m en zwart > 6 m).

Turbine	**240 graden**			**270 graden**			**300 graden**			**330 graden**		
	1	10	100	1	10	100	1	10	100	1	10	100
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												

Tabel 4.2 - Discreet grafisch overzicht van de minimale ontgronding binnen de berekende spreiding per paal na 32 uur storm met de 2019 bodem, vanuit de richtingen aangegeven in de bovenste rij, en de frequentie van voorkomen in de tweede rij. De kleuren in de tabel geven de range aan waarin de ontgronding zich bevind (wit = 0-1 m, groen = 1-2 m, geel = 2-3 m, oranje = 3-4 m, rood = 4-5 m, paars = 5-6 m en zwart > 6 m).

Turbine	**240 graden**			**270 graden**			**300 graden**			**330 graden**		
	1	10	100	1	10	100	1	10	100	1	10	100
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												

Tabel 4.3 - Discreet grafisch overzicht van de maximale ontgronding binnen de berekende spreiding per paal na 32 uur storm met de 2019 bodem, vanuit de richtingen aangegeven in de bovenste rij, en de frequentie van voorkomen in de tweede rij. De kleuren in de tabel geven de range aan waarin de ontgronding zich bevind (wit = 0-1 m, groen = 1-2 m, geel = 2-3 m, oranje = 3-4 m, rood = 4-5 m, paars = 5-6 m en zwart > 6 m).

Turbine	240 graden			270 graden			300 graden			330 graden		
	1	10	100	1	10	100	1	10	100	1	10	100
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												

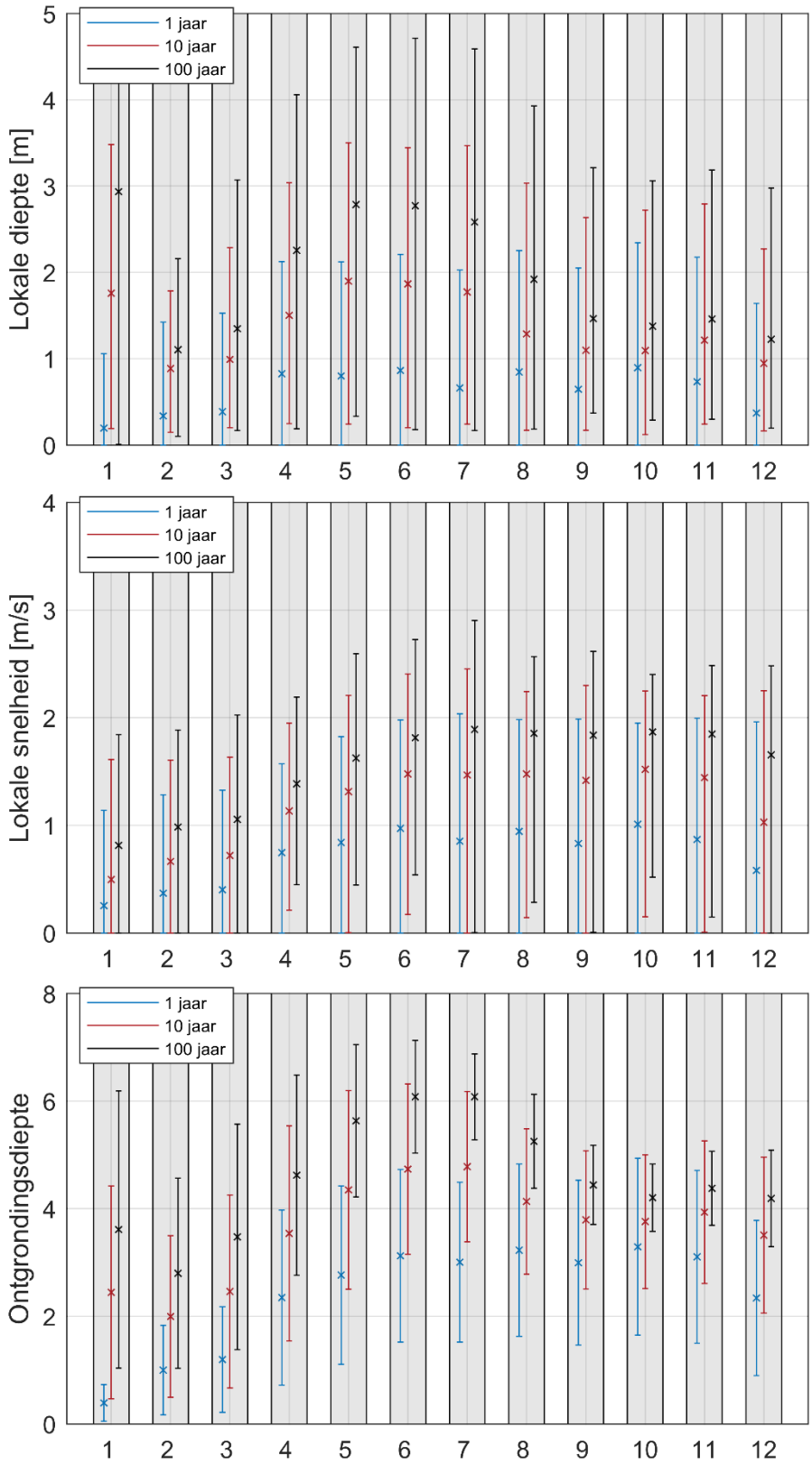
4.4.1.2 Minimale ontwerpbodem

In Figuur 4.14 zijn per paal de lokale waterdiepte, lokale stroomsnelheid en ontgrondingsdiepte weergegeven voor de 1, 10 en 100-jaars storm met een invalshoek van 330 graden voor de berekeningen met de ontwerpbodem. Voor de andere beschouwde invalshoeken zijn soortgelijke figuren gepresenteerd in Bijlage B. In de figuren zijn zowel de gemiddelden (markers) als de spreiding (lijnen) in de berekende waardes weergegeven.

De weergegeven ontgrondingsdieptes zijn de dieptes aan het einde van de 32 uur durende storm. De spreiding in de berekende diepte vindt zijn oorsprong in de onzekerheid in de daadwerkelijke snelheid van de ontwikkeling van de ontgronding. In het boven- en middenpaneel wordt ook een gemiddelde en een spreiding weergegeven. Voor de weergegeven grootheden in deze panelen betreft de middeling een tijdsmiddeling over de tijdserie, terwijl de spreiding de minimaal en maximaal optredende waarden gedurende de tijdserie weergeeft.

Zoals in de voorgaande paragrafen al genoemd is, kan voor de minimale ontwerpbodem een diepere ontgronding optreden dan voor de bodemligging zoals gemeten in 2019. Figuur 4.14 laat zien dat dit te wijten is aan het optreden van zowel hogere waterstanden als hogere stroomsnelheden rondom de turbines. Daar waar zowel de waterstanden als de stroomsnelheden het hoogst zijn, neemt de bandbreedte van de voorspelling af. De ontgronding nadert binnen het tijdsbestek van de storm zijn evenwichtsdiepte en de onzekerheid in het tijdsverloop speelt hierdoor een minder grote rol.

In Tabel 4.4, Tabel 4.5 en Tabel 4.6 is voor alle palen grafisch weergegeven hoe respectievelijk de gemiddelde, minimale en maximale ontgronding na 32 uur storm afhankelijk is van de invalshoek van de storm, en de hevigheid van de storm.



Figuur 4.14 Waterdiepte (boven), stroomsnelheid (midden) en ontgronding (onder) per monopaal, inclusief onzekerheid, voor de 1-jaars, 10-jaars en 100-jaarsstorm met een invalshoek van 330 graden voor de ontwerpbodem.

Tabel 4.4 – Discreet grafisch overzicht van de gemiddelde ontgronding per paal binnen de berekende spreiding na 32 uur storm met de ontwerpbodem, vanuit de richtingen aangegeven in de bovenste rij, en de frequentie van voorkomen in de tweede rij. De kleuren in de tabel geven de range aan waarin de ontgronding zich bevind (wit = 0-1 m, groen = 1-2 m, geel = 2-3 m, oranje = 3-4 m, rood = 4-5 m, paars = 5-6 m en zwart > 6 m).

Turbine	**240 graden**			**270 graden**			**300 graden**			**330 graden**		
	1	10	100	1	10	100	1	10	100	1	10	100
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												

Tabel 4.5 - Discreet grafisch overzicht van de minimale ontgronding binnen de berekende spreiding per paal na 32 uur storm met de ontwerpbodem, vanuit de richtingen aangegeven in de bovenste rij, en de frequentie van voorkomen in de tweede rij. De kleuren in de tabel geven de range aan waarin de ontgronding zich bevind (wit = 0-1 m, groen = 1-2 m, geel = 2-3 m, oranje = 3-4 m, rood = 4-5 m, paars = 5-6 m en zwart > 6 m).

Turbine	**240 graden**			**270 graden**			**300 graden**			**330 graden**		
	1	10	100	1	10	100	1	10	100	1	10	100
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												

Tabel 4.6 - Discreet grafisch overzicht van de maximale ontgronding binnen de berekende spreiding per paal na 32 uur storm met de ontwerpbodem, vanuit de richtingen aangegeven in de bovenste rij, en de frequentie van voorkomen in de tweede rij. De kleuren in de tabel geven de range aan waarin de ontgronding zich bevind (wit = 0-1 m, groen = 1-2 m, geel = 2-3 m, oranje = 3-4 m, rood = 4-5 m, paars = 5-6 m en zwart > 6 m).

Turbine	240 graden			270 graden			300 graden			330 graden		
	1	10	100	1	10	100	1	10	100	1	10	100
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												

4.4.2 Frequentie van het ontstaan van ontgrondingskuilen

Uit de ontgrondingsvoorspellingen, zie paragraaf 4.3, bleek dat ontgrondingskuilen voornamelijk ontstaan in stormcondities. Verder laten deze resultaten zien dat de gemiddelde voorspelling voor de ontgronding voor veel palen tussen de 0-1 m bedraagt in de 1-jaars storm voor de bodemligging van 2019. Voor 4 palen is de gemiddelde voorspelling echter 1-2 m, namelijk palen 4, 5, 6 en 12, zie paragraaf 4.4.1. De maximale voorspelling van de ontgronding na een 1-jaar storm kan zelfs oplopen tot 4 m. Voor de ontwerpbodem is de gemiddelde ontgronding na een 1-jaars storm over het algemeen dieper.

Hieruit kan worden geconcludeerd dat voor een aantal palen onderhoud mogelijk al moet gebeuren na een 1-jaars storm. Hierbij willen we opmerken dat een 1-jaars storm, mogelijk meerdere keren per jaar voor kan komen. De tijdserie die gebruikt is voor scenario's 1-3 (3 weken in de winter van 2011) illustreert dit; binnen deze tijdserie komen meerdere stormen voor die vergelijkbaar of zelfs groter zijn (i.e. resulteren in een grotere stroomsnelheid en/of waterstand ter plaatste van de palen) dan de 1-jaars storm.

4.5 Vorm van de ontgrondingskuil

De meest recente veldmetingen die we tot onze beschikking hebben van andere sites (merendeel offshore sites), laten zien dat hellingen van ontgrondingskuilen rondom monopalen variëren tussen 1:2 en 1:4 in zandige grond. In een stroming die continue uit dezelfde richting komt (zoals bij golfgedreven stroming) kan worden verwacht dat aan de bovenstroomse kant een steilere helling ontstaat dan aan de benedenstroomse kant. Dit zou resulteren in een ovale ontgrondingskuil, uitgerekt in de richting van de stroming. Het is onzeker of deze observatie voor offshore situaties 1 op 1 kan worden overgenomen voor het MV2 windpark. Monitoring na de eerste storm moet uitsluitsel geven over de vorm van de ontgrondingskuilen voor dit specifieke wind park. In deze fase raden we aan uit te gaan van hellingen gelijk aan 1:4 in alle richtingen.

4.6 Conclusies en discussie

4.6.1 Conclusies

- Ontgronding rondom de windturbines treedt voornamelijk op tijdens stormcondities. Optredende ontgrondingen ontwikkelen zich daardoor in een relatief kort tijdsbestek, en kunnen (afhankelijk van de locatie van de turbine) oplopen tot 1 paaldiameter in een enkel event.
- Er is een positieve correlatie tussen de te verwachten ontgrondingsdiepte en de bodemhoogte ter plaatse van de windturbine. Dit is echter geen exclusieve relatie, aangezien de stroomsnelheid mede een bepalende factor is voor de daadwerkelijk optredende ontgrondingsdiepte. Turbines op de kop van de Tweede Maasvlakte (turbines 4-7) worden blootgesteld aan de hoogste snelheden.
- Ontgrondingen zoals berekend met de minimale ontwerpbodem zijn fors groter dan ontgrondingen berekend met de bodemligging van 2019. De ondergrens van de berekende bandbreedte van de ontgrondingen ligt hoger voor de ontwerpbodem, terwijl de spreiding in de berekende waarden afneemt. De ontgronding nadert binnen het tijdsbestek van de storm zijn evenwichtsdiepte en de onzekerheid in het tijdsverloop speelt hierdoor een minder grote rol.

4.6.2 Discussie

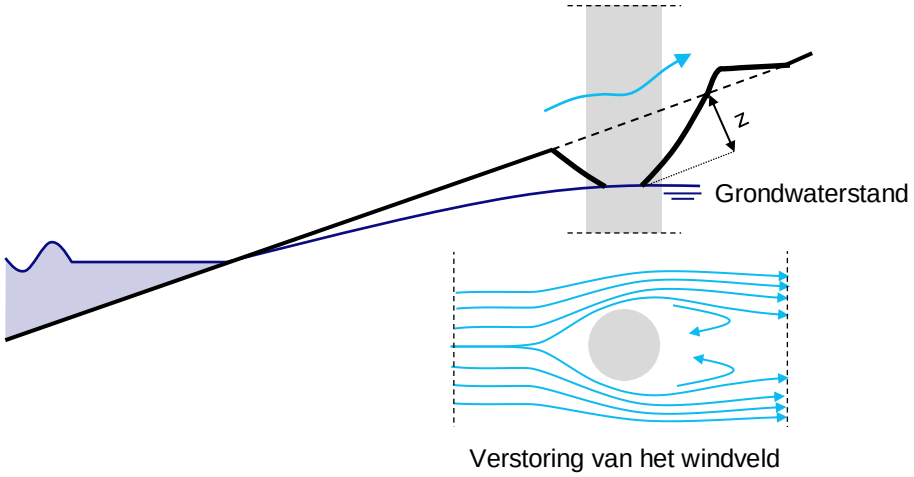
In paragraaf 4.2 is genoemd dat er een aantal beperkingen zitten aan de toepassing van het ontgrondingsmodel bij de Tweede Maasvlakte. Omdat er op dit moment nog geen betrouwbare ontgrondingsformules zijn die de ontgronding ten gevolge van (brekende) golven in ondiep water beschrijven, is er voor gekozen om enkel de ontgronding gerelateerd aan stroming te beschouwen. In offshore condities zorgen golven veelal voor een reductie in de (evenwichts-)ontgrondingsdiepte, omdat zij zorgen voor opvullen van de ontgrondingskuil ('backfilling'). Het opvullen van de ontgronding door golven, als dat überhaupt nog optreedt in ondiepe condities, is niet meegenomen in de huidige berekening. Zeker omdat in paragraaf 4.3.1 is aangetoond dat golfgedreven stroming de bepalende factor is voor de ontwikkeling van ontgronding, zijn de gepresenteerde waarden waarschijnlijk conservatief.

Opvulling van de ontgronding door stroming is beperkt waargenomen in de ontgrondingsberekeningen. Dit komt omdat er vaak maar een zeer korte tijd is waarin de stroming hoog genoeg is om sediment te mobiliseren in combinatie met een evenwichtsdiepte die lager is dan de daadwerkelijke ontgronding. Dit leidt tot relatief beperkte opvulling van de ontgrondingskuilen tijdens de gesimuleerde tijdseries.

De gepresenteerde resultaten zijn verder sterk afhankelijk van de gekozen bodemligging. Kleine verschillen in waterstand rondom de palen kunnen leiden tot een andere belasting op de bodem rondom de turbines, en dus een andere ontgronding. Deze onzekerheid is deels afgevangen door de opgelegde variatie in tijdschaal van de ontgronding, maar is uiteindelijk meer een functie van de grootschalige morfologische ontwikkeling. Het is daarom ook aan te raden dat de ontwikkeling van de ontgrondingskuilen, zeker in het eerste stormseizoen, goed gemonitord wordt om de huidige bevindingen in context te plaatsen. Deze monitoring kan ook helpen bij het vaststellen van de typische ontgrondingspatronen rondom de wind turbines en de (maximale) hellingshoeken.

5 Erosiekuilen door eolisch transport

Naast de bovengenoemde ontgronding door stromingen van water en golven is ook onderzocht of er erosiekuilen door eolisch (wind) transport kunnen ontstaan. Het is namelijk mogelijk dat een windturbine op een droog strand komt te staan; initieel of bijvoorbeeld na een (strand) suppletie. In dit hoofdstuk zal de ontwikkeling van erosiekuilen door windtransport op het strand rondom de palen worden onderzocht.
Enkele processen die deze lokale eolische erosie veroorzaken en beïnvloeden zullen worden beschreven en hierop aansluitend zal een methode worden ontwikkeld om tot een initiële, kwantitatieve schatting te komen van de ruimtelijk-temporele ontwikkeling van de erosiekuilen. Een globale schets van deze processen is getoond in Figuur 5.1.



Figuur 5.1 Schematisatie van de ontwikkeling van eolische erosiekuilen rondom monopaal

5.1 Model beschrijving

5.1.1 Eolisch sediment transport

Eolisch sediment transport is het transport van sediment als gevolg van kracht uitoefening door de wind. Bagnold (1941) beschreef het eolisch sediment transport q (kg/m/s) als volgt:

$$q = C\frac{\rho_a}{g}\sqrt{\frac{d}{D}}(u_* - u_{th})^3$$

In deze uitdrukking is C (-) een dimensieloze constante (=1.5), ρ_a (kg/m^3) de dichtheid van lucht, g (m/s^2) de zwaartekrachtversnelling, d (m) de referentie korrelgrootte en D (m) de originele korrelgrootte (=250 µm) gebruikt in Bagnold (1941).

De schuifspanningssnelheid u_* (m/s) is een representatie van de schuifspanning τ (kg/m/s^2) ($u_* = \sqrt{\tau/\rho_a}$), herschreven naar snelheid. De snelheidsdrempel u_{th} (m/s) is de minimaal benodigde snelheid om het sediment te kunnen transporteren. De schuifspanningssnelheid kan worden berekend vanuit de windsnelheid met een logaritmisch windprofiel:

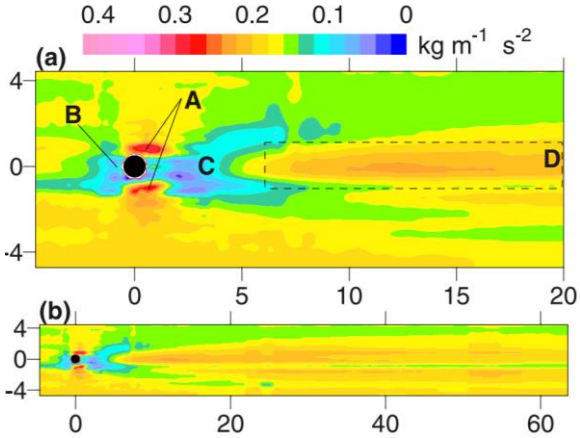
$$u_* = u_z \frac{\kappa}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

In deze uitdrukking is u_z (m/s) de windsnelheid op hoogte z (m), κ (-) de Von Kármán constante (= 0.41) en z_0 (m) de ruwheidshoogte.

5.1.2 Eolische transport gradiënten

Op het Maasvlakte 2 strand zal de aanwezigheid van monopalen het lokale windveld verstoren. Aan de windwaartse zijde van de monopaal zullen stroomlijnen divergeren, buigen rondom de monopaal en vervolgens weer convergeren. Deze verstoringen veroorzaken gradiënten in het eolisch sediment transport, wat zal resulteren in erosie en sedimentatie rondom de monopaal. Uiteindelijk zal er sediment aan de windwaartse zijde en langszijdes van de monopalen eroderen, wat vervolgens weer zal sedimenteren aan de achterzijde.

Om een inschatting te kunnen maken van deze gradiënten, zullen we de ruimtelijke verdeling van schuifspanning rondom een cilinder toepassen, welke is gemeten tijdens windtunnel experimenten uitgevoerd door Sutton & McKenna-Neuman (2008). Een impressie van deze metingen is getoond in Figuur 5.2.



Figuur 5.2 Ruimtelijke verdeling van schuifspanningen rondom één cilinder. Verkregen uit Sutton & McKenna-Neuman (2008)

De verdeling in de bovenstaande figuur zal dusdanig versimpeld worden, dat deze kan worden toegepast. Met een schuifspanning over een vlakke bodem τ_0 van 0.2 kg/m/s^2, is de schuifspanning aan de windwaartse zijde afgenomen tot 0.1 kg/m/s^2 en langszij toegenomen tot 0.32 kg/m/s^2. Er zullen verschillende aannames worden gedaan om deze resultaten meer generiek toe te kunnen passen:

- De onderlinge verhoudingen van de ruimtelijke verdeling van de schuifspanning zijn lineair afhankelijk van de windsnelheid, dusdanig dat een constante factor gebruikt kan worden om de invloed van de monopalen op het windveld te beschrijven.
- Schaaleffecten zijn verwaarloosbaar en daarom is de ruimtelijk verdeling van de schuifspanning onafhankelijk van de ruimtelijke schaal.
- De hoogte van de gebruikte cilinder in de experimenten is relatief laag (Sutton & McKenna-Neuman, 2008), wat in contrast staat tot de hoge monopalen in deze studie. Het is aangenomen dat dit een verwaarloosbaar effect heeft op de ruimtelijke verdeling van de schuifspanning.

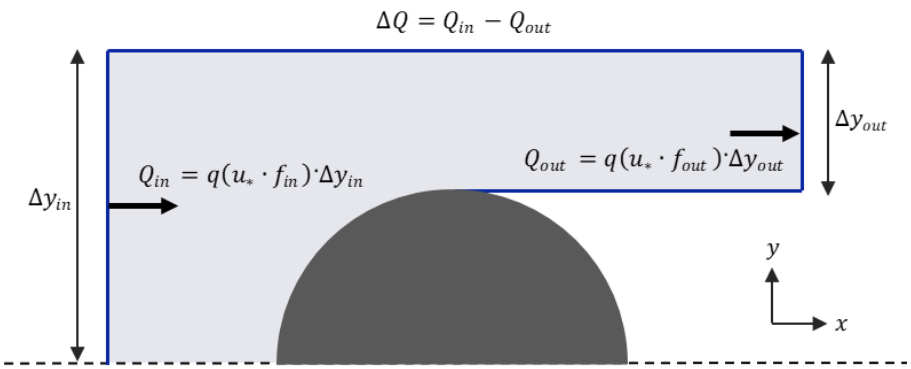
Het is nu mogelijk om een factor f (-) te bepalen, welke de ruimtelijke variatie in schuifspannings-snelheid beschrijft, zie Tabel 5.1.

.

Tabel 5.1 Versimpelde ruimtelijke verdeling van de schuifspanningssnelheid

Locatie (-)	Subscript (-)	Schuifspanning τ (kg/m/s²)	Schuifspannings-snelheid u_* (m/s)	Relatieve schuifspannings-snelheid (=u_*/u_{*0}) f (-)
Vlakke bodem	0	0.20	0.40	1
In (B)	in	0.10	0.28	0.71
Uit (A)	uit	0.32	0.51	1.26

In deze studie zijn we met name geïnteresseerd in het daadwerkelijke uitdiepen van de erosiekuilen rondom de monopalen. Om deze morfologische veranderingen te kwantificeren is een simpele sedimentbalans is opgezet, welke is getoond in Figuur 5.3.



Figuur 5.3 Sedimentbalans om de morfologische ontwikkeling van de eolische erosiekuilen rondom de monopalen te bepalen.

Met behulp van een Exner benadering, kan de bodemverandering Δz (m) als volgt worden bepaald:

$$\Delta z = \frac{1}{1-n} \cdot \frac{\Delta Q}{A} \cdot \Delta t$$

In deze uitdrukking is Δt (s) de gekozen tijdstap en A (m²) een representatief oppervlak, welke nodig is om de vertaalslag te kunnen maken van volume- naar bodemveranderingen. Dit oppervlak is niet per definitie gelijk aan het oppervlak van de rekencel uit Figuur 5.3.

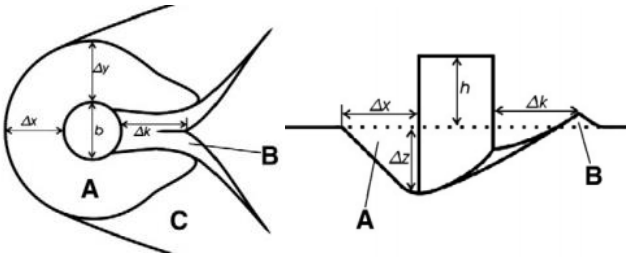
5.1.3 Morfologische interactie

Wanneer een eolische erosiekuil zich ontwikkelt, zal de aangepaste morfologie gaan interacteren met het windveld. Waar de monopalen convergentie van de stroomlijnen veroorzaken in het horizontale vlak, zullen de stroomlijnen gaan divergeren in het verticale vlak. Als gevolg zullen de erosieve processen afnemen naarmate de tijd vordert, totdat er een nieuwe evenwichtssituatie ontstaat.

De benodigde tijd om een dergelijke evenwichtssituatie te bereiken is ook onderzocht in windtunnel experimenten (McKenna-Neuman & Sanderson, 2013). De resultaten van het experiment zijn samengevat in Tabel 5.2. Deze resultaten zullen worden gebruikt om de bovenstaande vergelijking uit te breiden met een maximale diepte welke gelijk is aan de evenwichtsdiepte Δz_{eq} en om de afmetingen van de rekencel te bepalen. Het wordt aangenomen dat de vorm van de erosiekuil, en dus ook de evenwichtsdiepte, onafhankelijk is van de windsnelheid.

Tabel 5.2 Evenwichtssituatie rondom één cilinder met eindige hoogte (McKenna-Neuman & Sanderson, 2013)

	Evenwicht	
b	2.5 cm	1·D
h	2.5 cm	1·D
Δx_{eq}	3.6 cm	1.44·D
Δy_{eq}	3.3 cm	1.32·D
Δz_{eq}	2.5 cm	1.00·D
Δk_{eq}	4.2 cm	1.68·D
Δt_{eq}	20 min	n.v.t.



Het model uit paragraaf 5.1.2 houdt dus geen rekening met deze morfologische interactie of een evenwichtsdiepte. Hiervoor wordt de vergelijking als volgt uitgebreid:

$$z_i = z_{i-1} + \frac{1}{1-n} \cdot \frac{\Delta Q}{A} \cdot \Delta t \cdot \frac{z_{eq} - z_{i-1}}{z_{eq}}$$

In deze uitdrukking, z_{eq} (m) is de evenwichtsdiepte van de erosiekuil en de index i (-) geeft de huidige tijdstap aan. De erosiekuil zal nu asymptotisch groeien tot aan de opgegeven evenwichtsdiepte.

5.1.4 Grondwaterstand

De aanwezigheid van grondwater op het strand zal fungeren als een niet-erodeerbare laag en daarmee de maximale diepte van de erosiekuil limiteren. In de bovenstaande omschrijving is er uitgegaan van een volledig droog strand, zonder de invloed van het grondwater. Gebaseerd op een beschrijving van de grondwaterstand door getijdewerking van Nielsen (1990), wordt er conservatief aangenomen dat de grondwaterstand rondom de monopalen gelijk is aan MSL (0 m+NAP). Dit niveau wordt aangenomen als maximale diepte van de eolische erosiekuilen.

5.1.5 *Supply-limiting* condities

Het bovenstaande model gaat uit van een theoretische transport capaciteit. In werkelijkheid kunnen verschillende processen de aanvoer van sediment beperken en daarmee het eolisch sediment transport verminderen. Over het algemeen wordt het daadwerkelijke sediment transport overschat door modellen die enkel zijn gebaseerd op windcapaciteit, zoals de gebruikte Bagnold vergelijking (Sherman & Li, 2012).

Voorbeeld van een dergelijke *supply-limiting* conditie is de aanrijking van grof materiaal. Fijne zandkorrels zijn lichter en worden daarom sneller getransporteerd dan grove korrels. Vanwege deze sortering van het sediment zal de toplaag van een zandbed een steeds grovere samenstelling krijgen. Als gevolg reduceert het totale eolisch transport, totdat het strand volledig gestabiliseerd is.

Een ander voorbeeld is een verhoogd bodemvochtgehalte, als gevolg van regen of capillaire werking. Het bodemvocht verhoogt de snelheidsdrempel en reduceert daarmee het eolische transport.

Aangezien de huidige modelbeschrijving geen rekening houdt met *supply-limiting* condities, is het aannemelijk dat het eolisch sediment transport, en daarmee de ontwikkeling van erosiekuilen, wordt overschat.

5.2 Modelconfiguraties en resultaten

Gebaseerd op de bovenstaande modelbeschrijving, zijn er drie verschillende modelconfiguraties opgezet. Het doel van de eerste twee toepassingen was het valideren van de modelresultaten op bestaande metingen en/of observaties en van de derde toepassing voor het voorspellen van erosiekuilen rondom de monopalen op het Maasvlakte 2 strand.

5.2.1 Windtunnel experiment

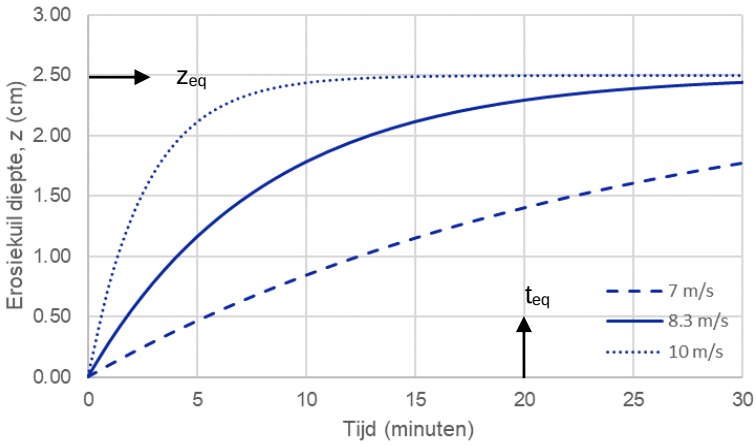
De eerste toepassing is gebaseerd op de eerder genoemde windtunnel experimenten uitgevoerd door McKenna-Neuman & Sanderson (2013). De modelconfiguratie is getoond in Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Overzicht van de modelconfiguratie ter validatie van het windtunnel experiment.

Schuifspanningssnelheid				
Windsnelheid	u_z	8.3	m/s	
Hoogte windsnelheid	z	0.35	m	
Korrelgrootte	d	277	µm	
Ruwheidshoogte	z_0	13.9	µm	$= d/20$
Von Kármán constante	κ	0.41	-	
Eolisch sediment transport				
Snelheidsdrempel	u_{th}	0.20	m/s	$= A_a\sqrt{\frac{\rho_s-\rho_a}{\rho_a}gd}$
Schuifspanningsfactor ruimtelijke verdeling	f_{in}	0.71	-	
	f_{uit}	1.26	-	
Breedte van de dwarsdoorsnede	Δy_{in}	4.55	cm	$= 0.5 \cdot b + \Delta y_{eq}$ (Tabel 5.2)
	Δy_{uit}	3.30	cm	$= \Delta y_{eq}$ (Tabel 5.2)
Morfodynamica				
Representatief oppervlak	A	9.1	cm^2	$= 0.25 \cdot A_{cell}$ [1]
Porositeit	n	0.4	-	
Evenwichtsdiepte	z_{eq}	2.5 (1D)	cm	Tabel 5.2

[1] *Het representatieve oppervlak A is niet gelijk aan het oppervlak van de rekencel A_{cel}, omdat niet het gehele oppervlak zal eroderen. A_{cel} is vermenigvuldigd met een factor 0.25, wat het erodeerbare gedeelte van het oppervlak representeert en rekening houdt met het feit dat de erosie-oppervlakte verandert over tijd.*

De modelresultaten zijn getoond in Figuur 5.4, welke in goede overeenstemming zijn met de meetresultaten uit het windtunnel experiment. De waargenomen evenwichtsdiepte van 2.5 cm en de benodigde tijd om tot deze diepte te komen (t_{eq} = 20 minuten) zijn ook getoond in Figuur 5.4.



Figuur 5.4 Modelresultaten van het windtunnel experiment door McKenna-Neuman & Sanderson (2013) voor drie windsnelheden

Bovendien zijn de resultaten ook getoond voor iets afwijkende windsnelheiden (7 m/s en 10 m/s, ten opzichte van 8.3 m/s) om de gevoeligheid van het model aan te tonen. Relatief kleine veranderingen in windsnelheid kunnen grote gevolgen hebben voor de tijd die nodig is om de evenwichtsdiepte te bereiken, wat dus aantoont dat het model zeer gevoelig is voor kleine afwijkingen in de invoer.

5.2.2 Container op de zandmotor

Vlak voor de februaristorm Ciara (2020) is er een container geplaatst op de Zandmotor. Tijdens de storm heeft er zich een erosiekuil gevormd rondom de container, zie Figuur 5.5. Deze situatie zal gebruikt worden ter referentie om de betrouwbaarheid van het gepresenteerde model te controleren.

Figuur 5.5 Eolische erosiekuil rondom container op de Zandmotor na storm Ciara (februari 2020)

Vanwege het gebrek aan gegevens, zullen alle geometrische parameters vanuit de windtunnel-modelconfiguratie vermenigvuldigd worden met een schaalfactor n_s. Het moet worden opgemerkt dat de vorm van de container volledig anders is dan die van een cilinder en daarom zal deze modelconfiguratie niet volledige valide zijn. Echter is het doel om een eerste indruk te krijgen van de toepasbaarheid van het model en daarom wordt gesteld dat deze aanname acceptabel is. Met een gekozen schaalfactor van n_s=100 zal de representatieve diameter van de container D gelijk zijn aan 2 meter.

Voor deze simulatie is er een tijdserie op Hoek van Holland gebruikt voor de invoer van de windsnelheid en -richting van 1 tot 14 februari 2020 (RWS Waterinfo, 2020). Om rekening te houden met de temporale variatie in windrichting zijn er twee versimpelingen doorgevoerd:

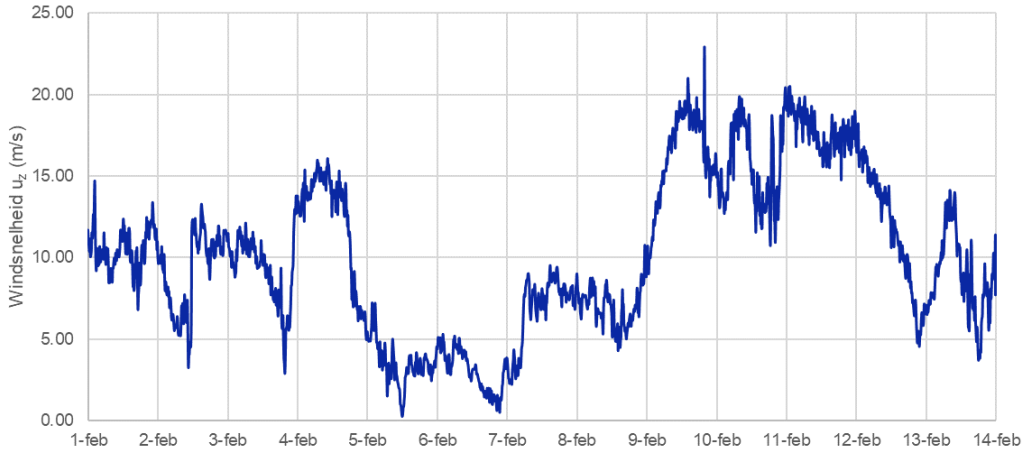
- Het wordt aangenomen dat alle windrichtingen in zeewaartse richting een verwaarloosbaar effect hebben op het eolische sediment transport. De oriëntatie van de duinen in acht nemend, zal al het sediment transport gelijk worden gesteld aan 0 zodra de wind komt uit 0° tot 180°N.

- Het wordt aangenomen dat de hoofdwindrichting gelijk is aan 270°. Het eolisch sediment transport is genormaliseerd ten opzichte van deze hoofdrichting ($q' = q \cdot \cos(u_{dir} - 270)$), zodat de morfologische veranderingen kunnen worden opgeteld.

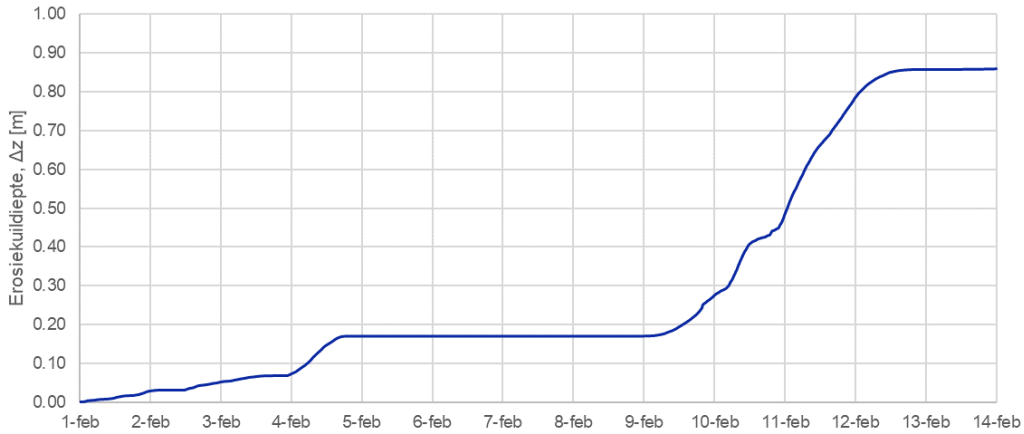
De modelconfiguratie is getoond in Tabel 5.4, de tijdserie van de windsnelheid in Figuur 5.6 en de berekende ontwikkeling van de erosiekuildiepte in Figuur 5.7.

Tabel 5.4 Overzicht van de modelconfiguratie ter validatie van de Zandmotor.

Schuifspanningssnelheid				
Windsnelheid	u_z	serie	m/s	RWS, Waterinfo (2020)
Hoogte windsnelheid	z	10	m	
Korrelgrootte	d	250	µm	
Ruwheidshoogte	z_0	12.5	µm	$= d/20$
Von Kármán constante	κ	0.41	-	
Eolisch sediment transport				
Snelheidsdrempel	u_{th}	0.19	m/s	$= A_a\sqrt{\frac{\rho_s-\rho_a}{\rho_a}gd}$
Schuifspanningsfactor ruimtelijke verdeling	f_{in}	0.71	-	
	f_{uit}	1.26	-	
Breedte van de dwarsdoorsnede	Δy_{in}	4.55	m	$= n_s \cdot (0.5 \cdot b + \Delta y_{eq})$ (Tabel 5.2)
	Δy_{uit}	3.30	m	$= n_s \cdot (\Delta y_{eq})$ (Tabel 5.2)
Morfodynamica				
Representatief oppervlak	A	9.1	m^2	$= n_s \cdot 0.25 \cdot A_{cell}$
Porositeit	n	0.4	-	
Evenwichtsdiepte	z_{eq}	2 (1D)	m	Tabel 5.2



Figuur 5.6 Windsnelheid bij Hoek van Holland (RWS Waterinfo, 2020) begin februari 2020



Figuur 5.7 Ontwikkeling van de erosiekuil rondom een container op de Zandmotor, voor en na storm Ciara

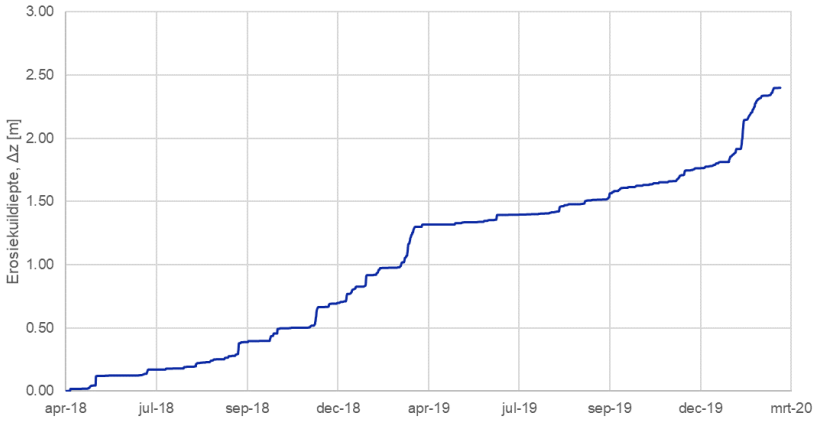
Volgens de modelresultaten zou er na de periode van twee weken een erosiekuil zijn ontstaan van ongeveer 80-90 cm diep. Op basis van een visuele vergelijking met Figuur 5.5 lijkt deze erosiekuil in dezelfde orde grootte als de daadwerkelijk opgetreden diepte.

5.2.3 Monopalen Maasvlakte 2 strand

Deze derde toepassing van het model dient ter voorspelling van de erosiekuilen rondom de monopalen op het strand van de Maasvlakte 2. Dezelfde aanpak als voor de container op de Zandmotor wordt gebruikt, alleen voor een langere periode en met een hogere schaalfactor. De morfologische ontwikkeling zal worden berekend voor een periode van twee jaar (1 april 2018 tot 1 april 2020) en de gekozen schaalfactor n_s=200, zodat de diameter van de monopaal D=5 meter.

Tabel 5.5 Overzicht van de modelconfiguratie ter validatie van de erosiekuilen op het MV2 strand.

Schuifspanningssnelheid				
Windsnelheid	u_z	serie	m/s	RWS, Waterinfo (2020)
Hoogte windsnelheid	z	10	m	
Korrelgrootte	d	250	µm	
Ruwheidshoogte	z_0	12.5	µm	$= d/20$
Von Kármán constante	κ	0.41	-	
Eolisch sediment transport				
Snelheidsdrempel	u_{th}	0.19	m/s	$= A_a\sqrt{\frac{\rho_s-\rho_a}{\rho_a}gd}$
Schuifspanningsfactor ruimtelijke verdeling	f_{in}	0.71	-	
	f_{uit}	1.26	-	
Breedte van de dwarsdoorsnede	Δy_{in}	9.10	m	$= n_s \cdot (0.5 \cdot b + \Delta y_{eq})$ (Tabel 5.2)
	Δy_{uit}	6.6	m	$= n_s \cdot (\Delta y_{eq})$ (Tabel 5.2)
Morfodynamica				
Representatief oppervlak	A	36.51	m^2	$= n_s \cdot 0.25 \cdot A_{cell}$
Porositeit	n	0.4	-	
Evenwichtsdiepte	z_{eq}	5 (1D)	m	Tabel 5.2



Figuur 5.8 Ontwikkeling van een erosiekuil rondom een monopaal op het Maasvlakte 2 strand (2018-2020)

Uit Figuur 5.8 kan worden opgemaakt dat de erosiekuildiepte toeneemt met 1 tot 1.5 meter per jaar. Deze erosiesnelheid zal afnemen naarmate de evenwichtsdiepte van 5 meter (=1D) wordt benaderd.
De meeste erosie vindt plaats tijdens het stormseizoen, vanwege de hoge windsnelheden. Rondom storm Ciara (februari 2020) is een sterke toename van de erosiekuildiepte (50 tot 70 cm) te zien. Gedurende het gehele zomerseizoen (maart-september) is vrijwel geen erosie waar te nemen (20 tot 50 cm).

5.3 Conclusies en discussie

Conclusies
De volgende conclusies kunnen worden getrokken uit de gepresenteerde resultaten:

- De evenwichtsdiepte van een door eolisch transport veroorzaakte erosiekuil rondom een monopaal op permanent droog zandstrand zal naar verwachting gelijk zijn aan ~1D en de horizontale afmetingen aan ~1.4D (Tabel 5.2). Echter, de ontwikkeling van erosiekuilen wordt echter beperkt door de lokale grondwaterstand, dus de maximale erosiekuildiepte is gelijk aan het verschil tussen de grondwaterstand (~MSL) en het bodemniveau.

- Voor de twee beschouwde bodems in deze studie is het de verwachting dat er alleen bij monopalen #1, 7, 8 en 9 een erosiekuil door windtransport zal ontwikkelen tot een diepte van ongeveer 2 m. In geval van een monopaal met een diameter van D=5 meter, zal de erosiekuildiepte na een 1/1 jaar storm naar verwachting 0.5 tot 1 meter toenemen. Gedurende één jaar onder eolische invloed, zal de erosiekuildiepte naar verwachting 1 tot 1.5 meter toenemen (Figuur 5.8).

De toekomstige bodemligging nabij de windturbines in de komende 25 jaar kan sterk variëren. Na bijvoorbeeld een strandsuppletie zou een gedeelte van de windturbines voor een bepaalde periode op droog strand kunnen staan, waardoor bovenstaande bevindingen ook voor andere palen relevant kunnen zijn.

Discussie
Als gevolg van de vele aannames die zijn gedaan, is het hoogst waarschijnlijk dat het model de ontwikkeling van de erosiekuilen overschat. Naast de vochtigheid van het zand (grondwaterstand) worden hieronder de meest relevante overige aannames en diens gevolgen samengevat:

- Het model houdt geen rekening met de gevolgen van aanrijking van grof materiaal in de toplaag (armouring). Wanneer de erosiekuil zich begint te ontwikkelen, zal het fijnere materiaal als eerst worden getransporteerd. Als gevolg zal het materiaal in de toplaag steeds grover worden en zal het transport afnemen. De snelheid van dit proces is volledig afhankelijk van de samenstelling van het originele sediment en of er hydrodynamische evenementen plaatsvinden die de toplaag weer omwoelen.

- Er is aangenomen dat de invloed van wind in zeewaartse richting verwaarloosbaar is en dat de wind genormaliseerd kan worden rondom de hoofdrichting. Bij een grotere variatie in windrichting, kan wind de erosiekuil weer opvullen, waarmee de morfologische ontwikkeling wordt gereduceerd.

Om de invloed van deze processen aan te tonen, is de Argusmast op de Zandmotor gebruikt als voorbeeld (zie Figuur 5.9). Rondom de Argusmast is de erosie beperkt. Dit is het gevolg van het hoge bodemniveau van de Zandmotor, waardoor er geen hydrodynamische omwoeling is en daarmee er veel grof materiaal aanwezig is in de toplaag. Bovendien zorgt het gebrek aan een beschermende duinenrij ervoor dat de wind in alle richtingen onverstoord invloed kan uitoefenen, waardoor de vorm van de erosiekuil symmetrisch is.

Figuur 5.9 Argusmast op de Zandmotor (http://argus.deltares.nl/?p=description/zandmotor)

6 Overzicht van morfologische bijdragen aan de lokale bodemligging per paal

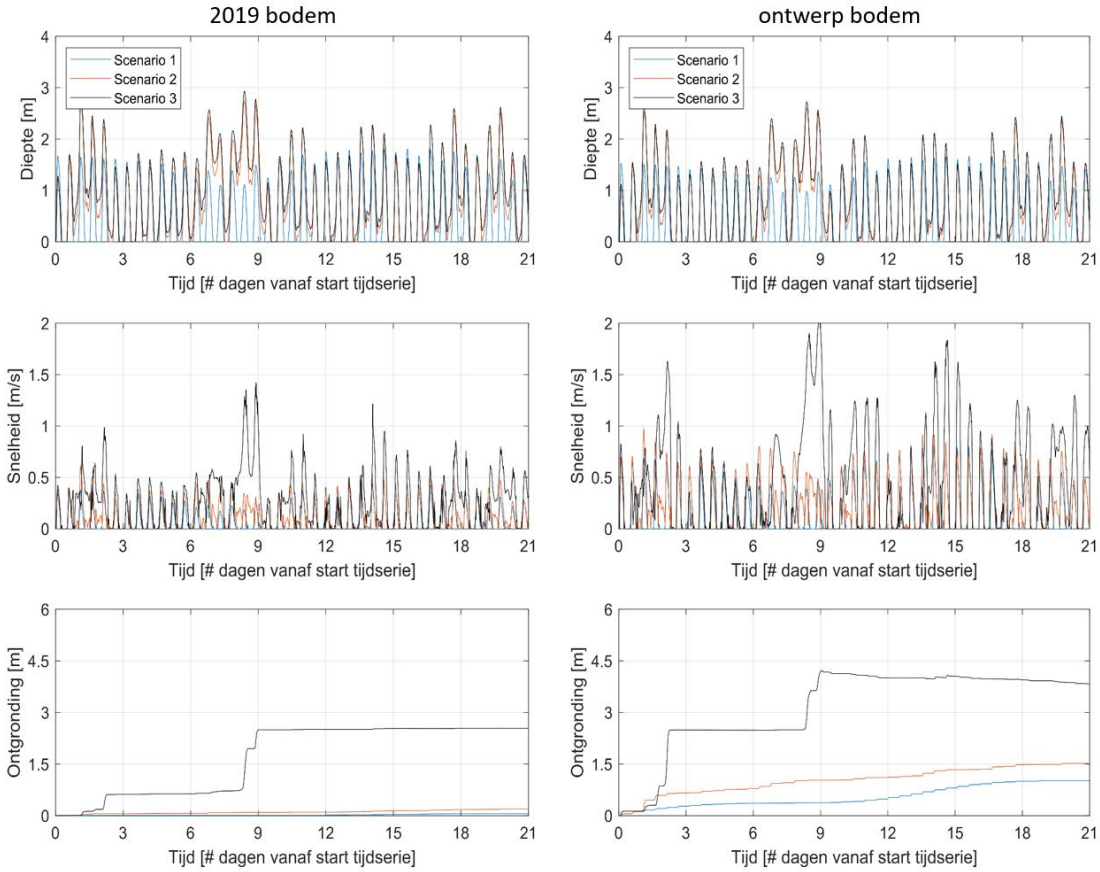
In de vorige hoofdstukken (3, 4 en 5) zijn de te verwachte bodemveranderingen per paal gepresenteerd. De (grootschalige) bodemveranderingen tijdens extreme stormen zijn gepresenteerd in hoofdstuk 3 en dit levert een bodemverandering per paal op voor elke doorgerekende storm. De ontgronding door stromingen tijdens hogere golfcondities zijn berekend en besproken in hoofdstuk 4 voor zes verschillende scenario's. De ontgronding door windtransporten op het droge strand zijn bepaald per paal in hoofdstuk 5.

Royal HaskoningDHV heeft informatie aangeleverd over de lange-termijn dynamiek van de bodem gebaseerd op de metingen tussen 2013 en 2019. Daarnaast speelt de seizoensdynamiek (zomer / winter profiel) nog een relevante rol maar hiervoor is geen informatie aangeleverd waardoor de seizoensdynamiek niet is meegenomen als bodemveranderingsbijdrage.

In figuren 6.2 – 6.7 worden de verschillende bijdragen in bodemverandering samengebracht in een figuur per monopaal voor de twee beschouwde bodems; de 2019 gemeten bodem en de ontwerpbodem. De bodem ten tijde van aanleg kan overigens sterk afwijken van deze twee bodems zoals is weergegeven in de lange-termijn dynamiek variatie (verticale staaf) naast de 'basis niveau' subplot. Voor bijna alle palen geldt dat de lange-termijn bodemligging significant lager zou kunnen liggen dan de twee bodems die in deze assessment zijn beschouwd. Het verdient dan ook aandacht om meer bodemliggingen te beschouwen in de ontwerpfase van de windturbines.

De stromingscondities tijdens het winter seizoen en de individuele stormen laten op sommige locaties al relatief grote verschillen zien tussen de berekeningen met de ontwerpbodem en de 2019 bodem. Dit is met name veroorzaakt door een verschillen in golfbreking (zandbanken en variatie in bodemligging zijn uitgevlakt in de ontwerpbodem) en dat resulteert in andere (vaak hogere) stromingscondities per paal. Figuur 6.1 geeft als voorbeeld de verschillen weer voor monopaal 6 tijdens scenario's 1, 2 en met name 3. Over het algemeen resulteert de afgevlakte bodem in hogere golfgedreven stroomsnelheden, doordat er geen golfdissipatie op de banken plaatsvindt, en dat leidt bij sommige monopalen tot significant grotere ontgrondingsdieptes.

Naast de ontgronding door stromingen is ook de bodemverandering door grootschalige bodemdynamiek tijdens de 10- en 100-jaarsstormen meegenomen in de figuren, berekend met XBeach. Berekeningen laten zien dat bodemverlagingen kunnen oplopen tot ongeveer 2.4 m (2019 bodem) en 3.4 m (ontwerpbodem) tijdens de 100-jaarstormen en tot ongeveer 2.2 m tijdens de 10-jaarstormen. De morfologische stormberekeningen laten een grote variatie zien in bodemdynamiek tijdens en na de stormen. Figuren 6.2 – 6.7 laten alleen de bodemligging na afloop van de berekening zien maar tijdens de storm varieert de bodemligging bij de monopalen uiteraard ook. Tijdseries van deze dynamische bodemliggingen zijn gebruikt in het empirisch ontgrondingsmodel om zodoende een realistische ontgrondingsdiepte uit te rekenen.

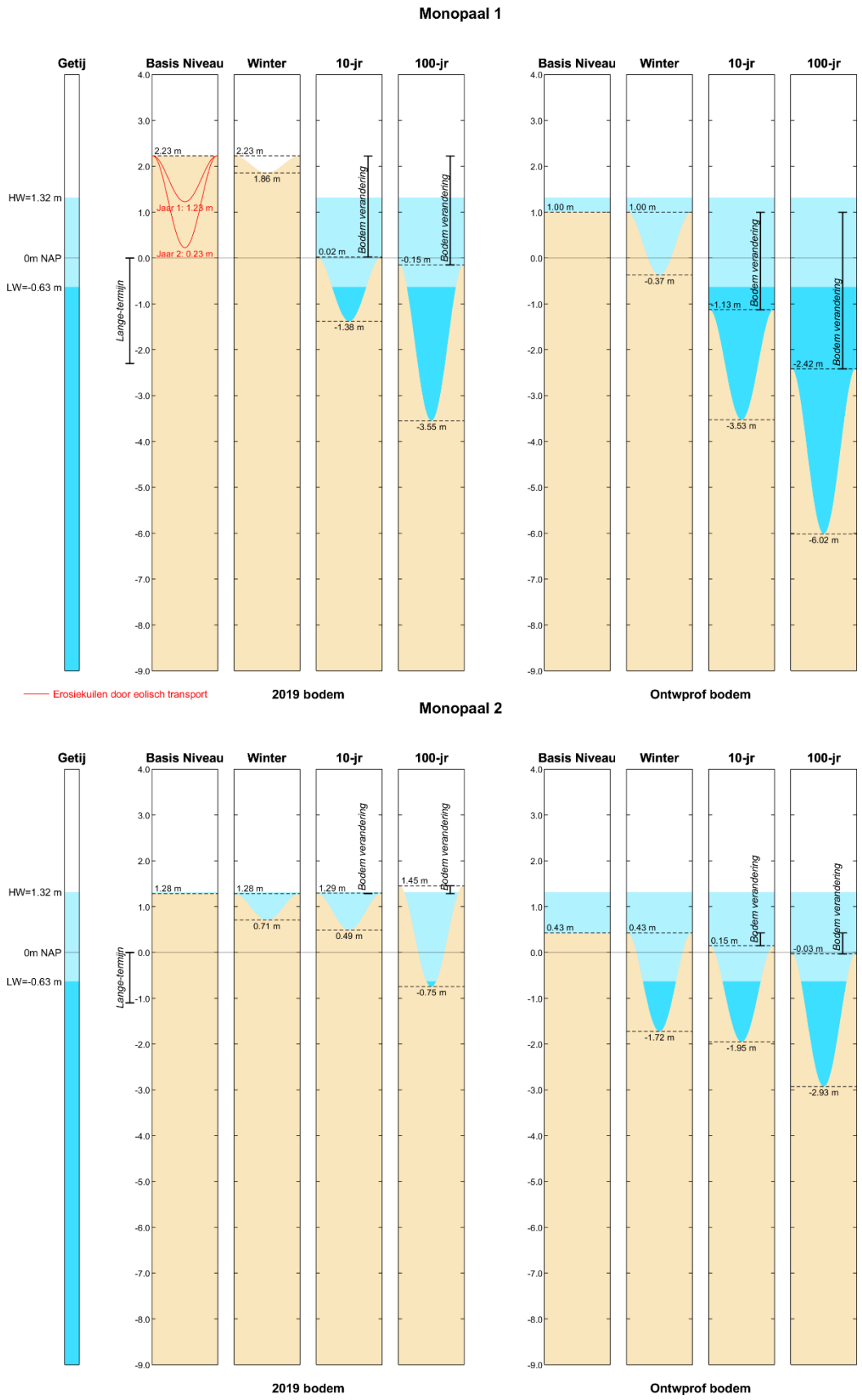


Figuur 6.1 Berekende water dieptes en stroomsnelheden bij monopaal 6 voor de situatie met de gemeten 2019 bodem (links) en de ontwerpbodem (rechts). Figuren afkomstig uit Appendix B.1.

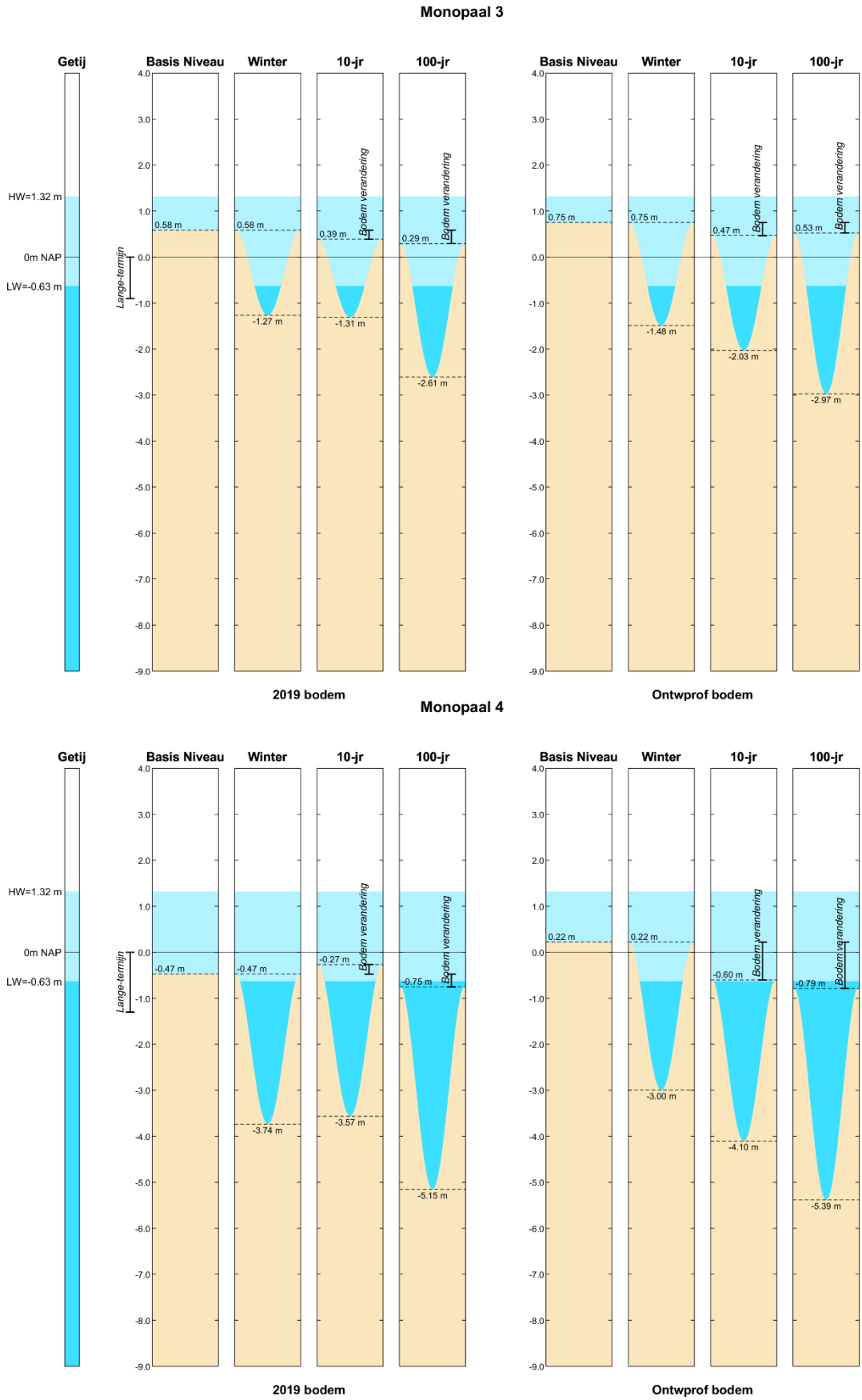
De verwachte erosie door windtransporten is weergegeven in het 'basis niveau' plaatje voor de palen die zich boven hoog water bevinden. Tijdens de piek van een storm is het waarschijnlijk dat er water aanwezig is ter plaatse van de windturbine waardoor er lokaal geen windtransport op zal treden. Echter, het is de verwachting dat de verhoogde windsnelheden voor en na de piek (wanneer er nog geen opzet aanwezig is) voldoende hoog zijn om toch erosie rondom de monopalen te veroorzaken, al is het de vraag hoe de golven de ontgrondingskuil door wind uitvlakken tijdens de piek van de storm door de golven. Dit betreft een complexe interactie tussen de verschillende processen en is tevens afhankelijk van de karakteristieken van een storm (timing van stormopzet t.o.v. hoog water en getijstroming, piek van de golfhoogte, etc.).

Naast de mogelijke uitvlakking van de kuilen door golven, is dus het verloop en de interactie tussen wind- en stromingsgerelateerde ontgronding ook onzeker en sterk afhankelijk van de intensiteit en timing van de (golf) condities tijdens bijv. het winterseizoen. Een rustig seizoen met beperkte hoge windopzet (surge) maakt de wind gedreven invloed waarschijnlijk groter in het eerste jaar. Daarnaast hoeven hogere windsnelheden niet altijd gepaard te gaan met hoge windopzet (bijv. tijdens een kort durend event). Aan de andere kant, wanneer er in het winterseizoen wel veel hoge windopzetten voorkomen zal naar verwachting de windbijdrage beperkter zijn. Vandaar dat we de 1 m indicatief hebben weergegeven in de figuren per monopaal.

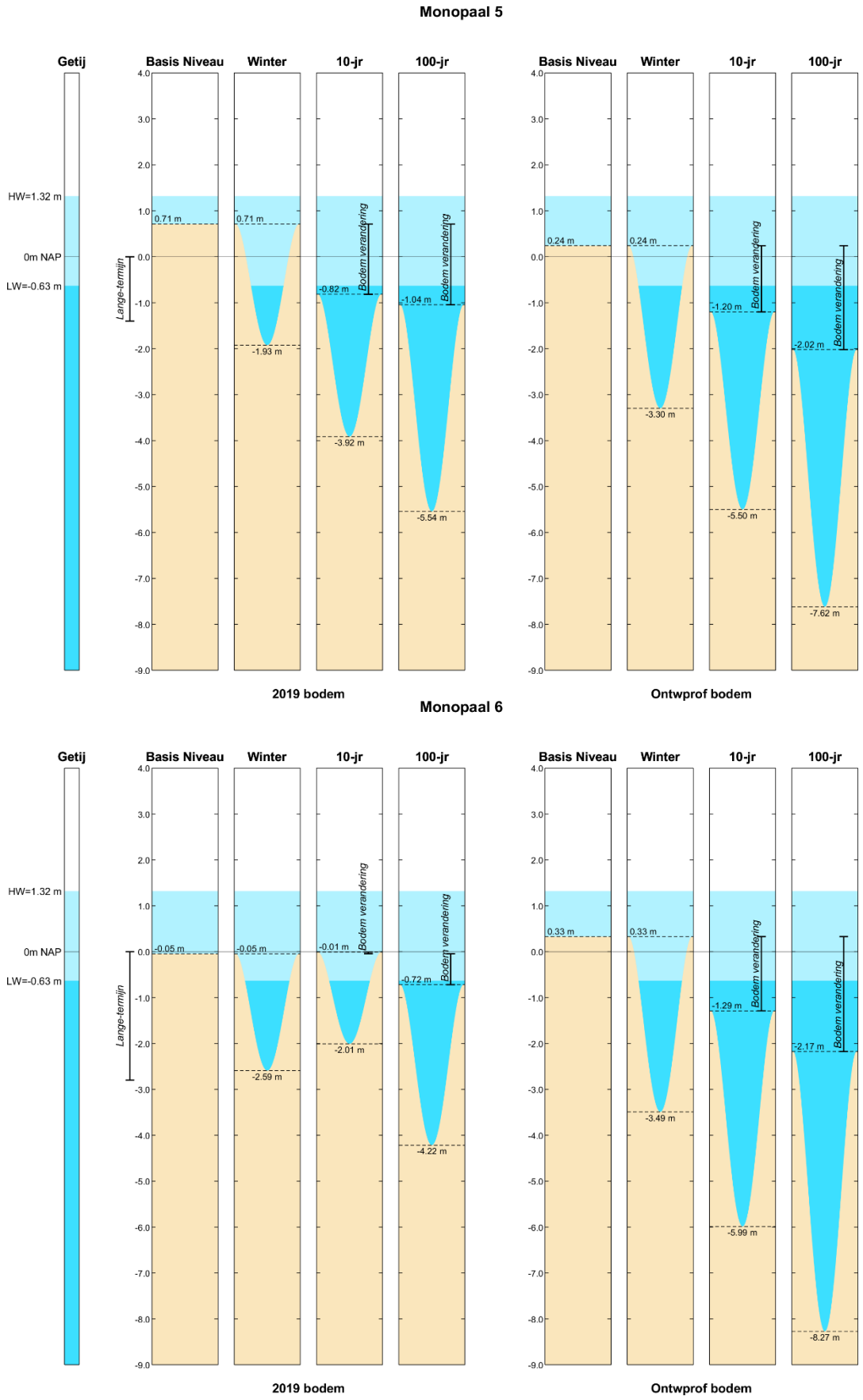
Tot slot, de twee beschouwde bodems representeren slechts 2 situaties terwijl in de toekomst het ook mogelijk kan zijn dat door bijv. strandsuppleties meerdere palen op het droge strand komen te staan. Monitoren van het gedrag van de eerste stormen na aanleg kan waardevolle inzichten verschaffen over de interactie van de relevante processen voor dit specifieke wind park.



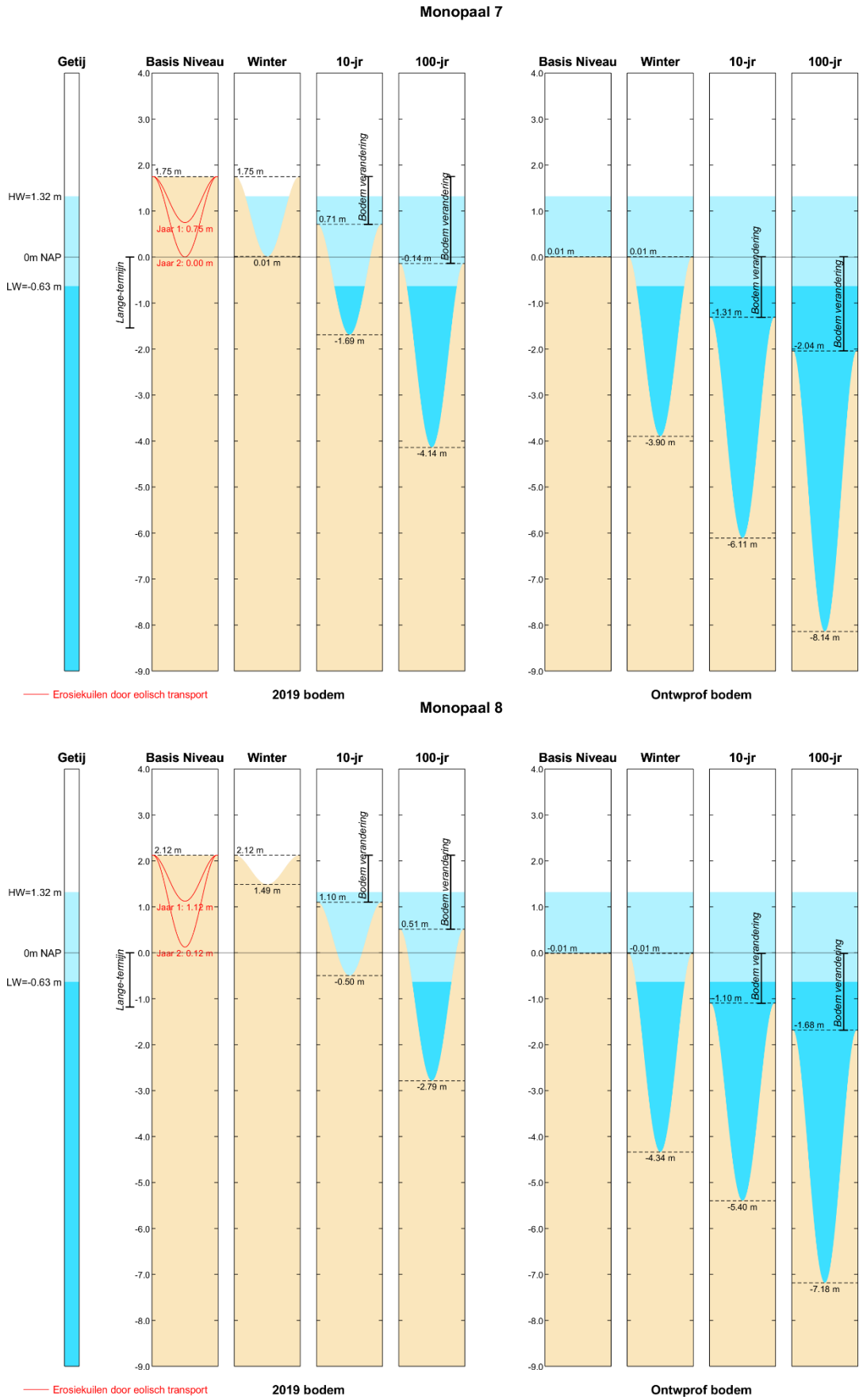
Figuur 6.2 Grafische weergave van morfologische bijdragen aan de lokale bodemligging voor paal 1 en 2.



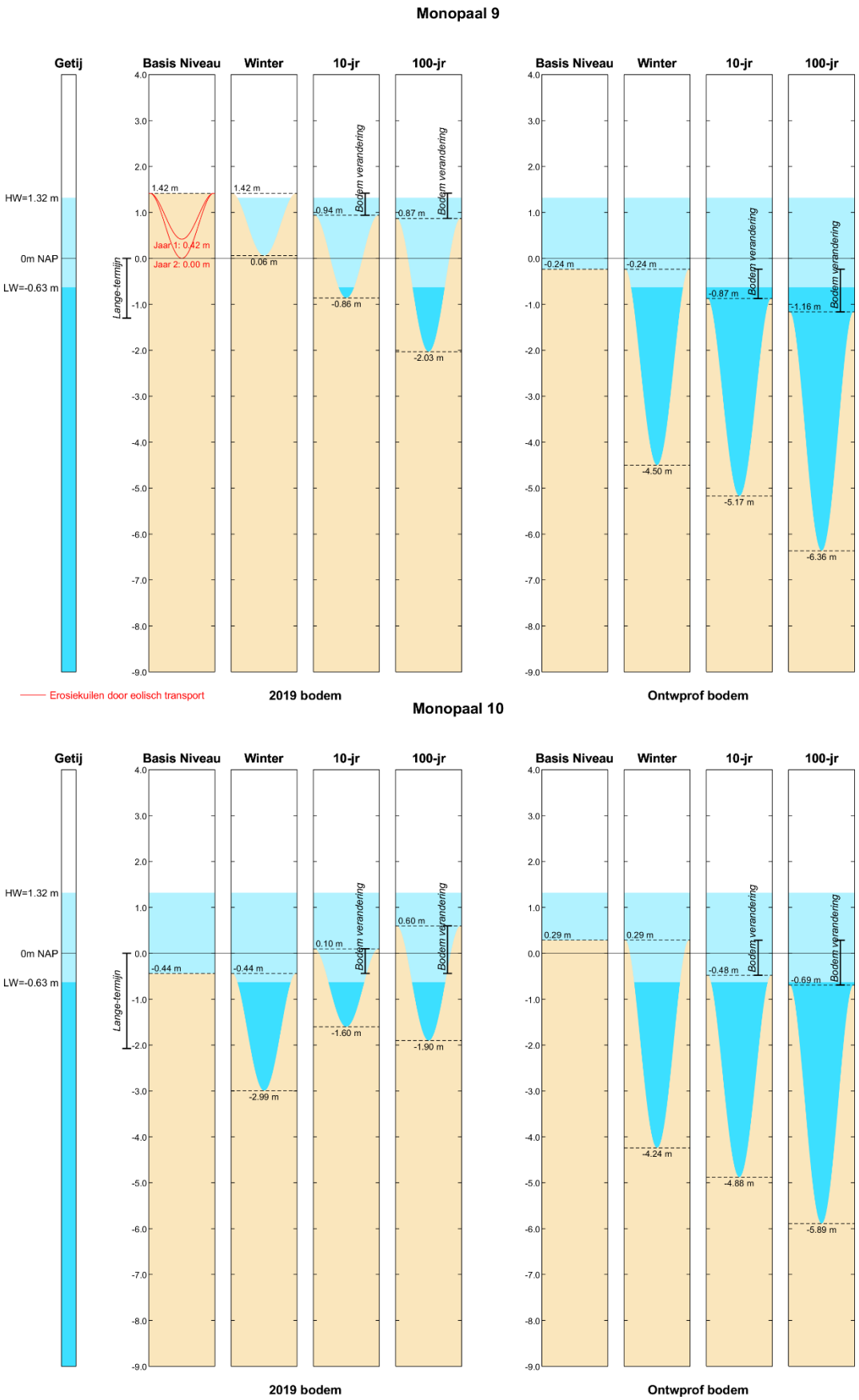
Figuur 6.3 Grafische weergave van morfologische bijdragen aan de lokale bodemligging voor paal 3 en 4.



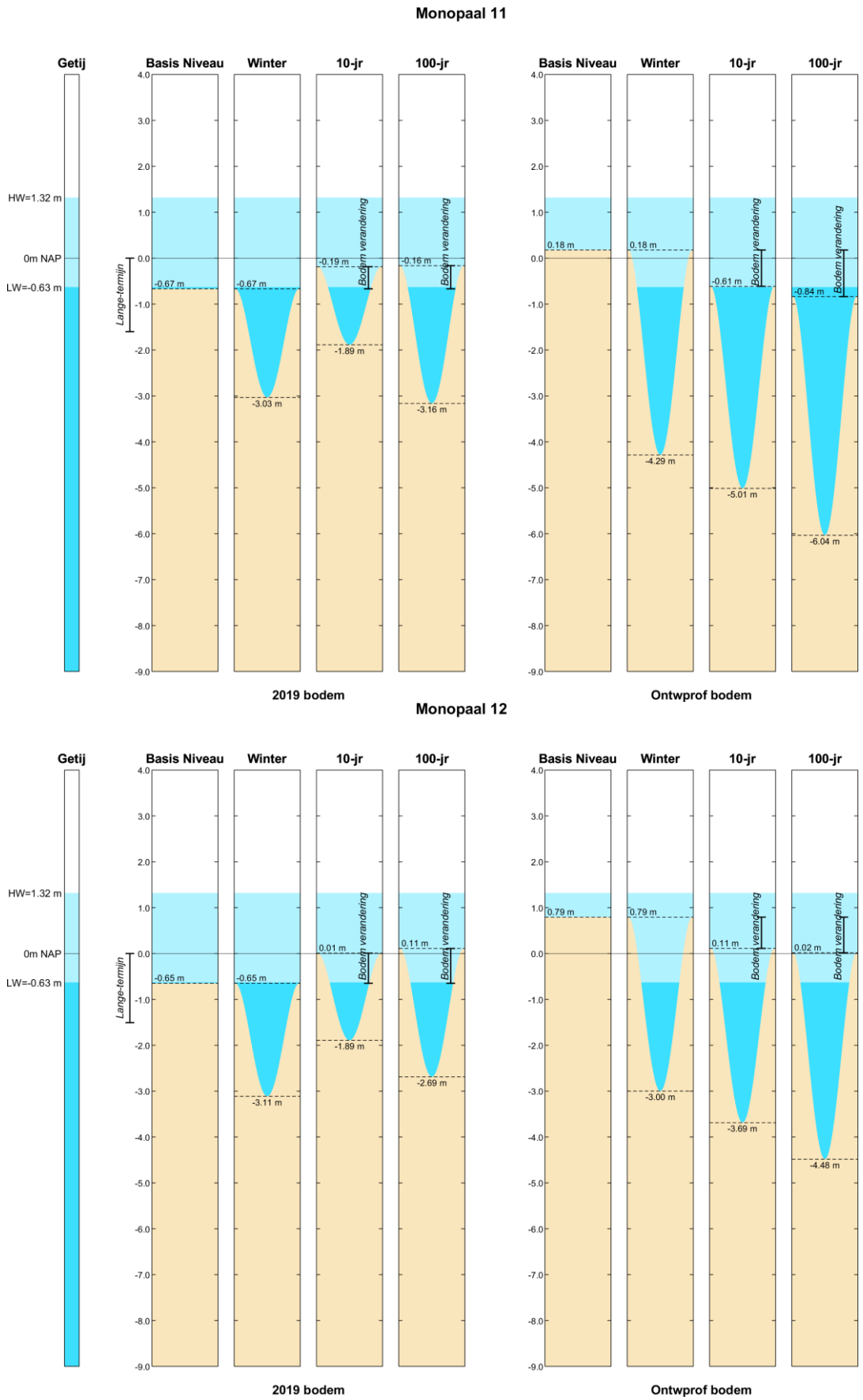
Figuur 6.4 Grafische weergave van morfologische bijdragen aan de lokale bodemligging voor paal 5 en 6.



Figuur 6.5 Grafische weergave van morfologische bijdragen aan de lokale bodemligging voor paal 7 en 8.



Figuur 6.6 Grafische weergave van morfologische bijdragen aan de lokale bodemligging voor paal 9 en 10.



Figuur 6.7 Grafische weergave van morfologische bijdragen aan de lokale bodemligging voor paal 11 en 12.

7 Conclusies

7.1 Conclusies

Het doel van deze studie is het bepalen van de omvang en frequentie van ontstaan van de mogelijke erosiekuilen rond de geplande monopalen op de Zachte Zeewering van Maasvlakte 2. De ontgronding rondom een windturbine wordt bepaald door de lokale stroming en golven. Uit een desk studie (Deltares, 2020) is naar voren gekomen dat ontgronding veroorzaakt door stromingen aanzienlijk groter kan zijn dan ontgronding door golfwerking. Dat heeft tot de beslissing geleid dat deze studie zich enkel richt op ontgronding door stromingen.

In deze studie zijn diverse numerieke modellen ontwikkeld met hoge resolutie rondom het Maasvlakte 2 strand. Hiermee zijn tijdseries van hydrodynamische condities (o.a. waterdieptes, stromingen) afgeleid per windturbine voor twee verschillende grootschalige bodemliggingen. Er zijn 6 scenario's opgesteld variërend van 3-weekse golfcondities tijdens een typisch winter seizoen tot individuele stormen met herhalingsfrequenties van 1, 10 en 100 jaar. De hydrodynamische tijdseries voor deze scenario's zijn als invoer gebruikt voor een ontgrondingsvoorspelling met een empirisch 1D model.

Ontgrondingsvoorspelling

Ontgronding rondom de windturbines treedt voornamelijk op tijdens stormcondities. Optredende ontgrondingen ontwikkelen zich daardoor in een relatief kort tijdsbestek, en kunnen (afhankelijk van de locatie van de turbine) oplopen tot 1 paaldiameter in een enkele storm. Daarnaast is er een positieve correlatie tussen de te verwachten ontgrondingsdiepte en de bodemhoogte ter plaatse van de windturbine. Dit is echter geen exclusieve relatie, aangezien de stroomsnelheid mede een bepalende factor is voor de daadwerkelijk optredende ontgrondingsdiepte. Turbines op de kop van de Tweede Maasvlakte (windturbines #4-7) worden blootgesteld aan de hoogste stroomsnelheden.

Verder laten de resultaten zien dat de gemiddelde voorspelling voor de ontgronding voor veel monopalen tussen de 0-1 m bedraagt in de 1-jaars storm. Voor 4 monopalen is de gemiddelde voorspelling 1-2 m, namelijk monopalen 4, 5, 6 en 12. De maximale voorspelling van de ontgronding na een 1-jaarstorm kan zelfs oplopen tot meer dan 3 m. Hieruit kan worden geconcludeerd dat voor een aantal palen onderhoud mogelijk al moet gebeuren na een 1-jaars storm. Hierbij willen we opmerken dat vergelijkbare condities als de 1-jaars storm, mogelijk meerdere keren per jaar voor kan komen. De 3-weekse tijdserie die gebruikt is voor scenario 3 illustreert dit; binnen deze tijdserie komen meerdere stormen voor die vergelijkbaar of zelfs groter zijn (i.e. resulteren in een grotere stroomsnelheid en/of waterstand ter plaatste van de palen) dan de 1-jaars storm. Dit cumulatieve effect leidt tot een maximale ontgrondingsdiepte bij een van de monopalen tot 3.2 m, bij de 2019 bodem, en tot 4.5 m bij de ontwerpbodem.

De ontgrondingsdieptes tijdens de 1/10 jaarstormen variëren tussen de 0.8 en 3.3 m, bij de 2019 bodem, tussen en 2.1 en 4.8 m bij de ontwerpbodem. De ontgrondingsdieptes tijdens de 1/100 jaarstormen variëren tussen de 2.2 en 4.5 m, bij de 2019 bodem, tussen en 2.9 en 6.1 m bij de ontwerpbodem.

Het opvullen of afvlakken van de ontgronding door golven, als dat überhaupt nog optreedt in ondiepe condities, is niet meegenomen in de huidige berekening. Zeker omdat is aangetoond dat golfgedreven stroming de bepalende factor is voor de ontwikkeling van ontgronding, zijn de gepresenteerde waarden waarschijnlijk conservatief.

De meest recente veldmetingen die we tot onze beschikking hebben van andere sites (merendeel offshore sites), laten zien dat hellingen van ontgrondingskuilen rondom monopalen over het algemeen variëren tussen 1:2 en 1:4 in zandige grond. In een stroming die continue uit dezelfde richting komt (zoals bij golfgedreven stroming) kan worden verwacht dat aan de bovenstroomse kant een steilere helling ontstaat dan aan de benedenstroomse kant. Dit zou resulteren in een ovale ontgrondingskuil, uitgerekt in de richting van de stroming. Het is onzeker of deze observatie voor offshore situaties 1 op 1 kan worden overgenomen voor het MV2 windpark. Monitoring na de eerste storm moet uitsluitsel geven over de vorm van de ontgrondingskuilen voor dit specifieke wind park. In deze fase raden we aan uit te gaan van hellingen gelijk aan 1:4 in alle richtingen.

Erosiekuilen door eolisch transport
Naast de bovengenoemde ontgronding door stromingen van water en golven is ook onderzocht of er erosiekuilen door eolisch (wind) transport kunnen ontstaan. Het is namelijk mogelijk dat een windturbine op een droog strand komt te staan; initieel of bijvoorbeeld na een (strand) suppletie.

Voor de twee beschouwde bodems in deze studie is het de verwachting dat er alleen bij monopalen #1, 7, 8 en 9 een erosiekuil door windtransport zal ontwikkelen tot een diepte van ongeveer 2 m. In geval van een monopaal met een diameter van D=5 meter, zal de erosiekuildiepte na een 1/1 jaar storm naar verwachting 0.5 tot 1 meter toenemen. Gedurende één jaar onder eolische invloed, zal de erosiekuildiepte naar verwachting 1 tot 1.5 meter toenemen.

De toekomstige bodemligging nabij de windturbines kan sterk variëren in de komende 25 jaar. Na bijvoorbeeld een strandsuppletie zou een gedeelte van de windturbines voor een bepaalde periode op droog strand kunnen staan, waardoor bovenstaande bevindingen ook voor andere palen relevant kunnen zijn.

7.2 Aanbevelingen

Ontgrondingsvoorspelling
In paragraaf 4.2 is genoemd dat er een aantal beperkingen zit aan de toepassing van het ontgrondingsmodel bij de tweede Maasvlakte. Omdat er op dit moment nog geen betrouwbare ontgrondingsformules zijn die de ontgronding ten gevolge van (brekende) golven in ondiep water beschrijven, is er voor gekozen om enkel de ontgronding gerelateerd aan stroming te beschouwen. In offshore condities zorgen golven veelal voor een reductie in de ontgrondingsdiepte, omdat zij zorgen voor opvullen van de ontgrondingskuil. Het opvullen van de ontgronding door golven, als dat überhaupt nog optreedt in ondiepe condities, is niet meegenomen in de huidige berekening. Zeker omdat in paragraaf 4.3.1 is aangetoond dat golfgedreven stroming de bepalende factor is voor de ontwikkeling van ontgronding, zijn de gepresenteerde waarden waarschijnlijk conservatief.

De gepresenteerde resultaten zijn verder sterk afhankelijk van de gekozen bodemligging. Kleine verschillen in waterstand rondom de palen kunnen leiden tot een andere belasting op de bodem rondom de turbines, en dus een andere ontgronding. Deze onzekerheid is deels afgevangen door de opgelegde variatie in tijdschaal van de ontgronding, maar is uiteindelijk meer een functie van de grootschalige morfologische ontwikkeling.

Voor bijna alle palen geldt dat de lange-termijn bodemligging significant lager zou kunnen liggen dan de twee bodems die in deze assessment zijn beschouwd. Het verdient dan ook aandacht om meer bodemliggingen te beschouwen in de ontwerpfase van de windturbines.

Daarnaast wordt aangeraden om de ontwikkeling van de ontgrondingskuilen, zeker in het eerste stormseizoen, goed te monitoren om de huidige bevindingen in context te plaatsen.

Erosiekuilen door windtransport
Om met meer zekerheid voorspellingen te kunnen doen, is er een uitgebreidere validatie nodig van de gepresenteerde aanpak. Daarnaast zijn er een aantal aspecten van de gepresenteerde aanpak die verbeterd kunnen worden, om zo het aantal gedane aannames te beperken. Twee aspecten zullen hieronder worden toegelicht.

- *Eolisch sediment transport*
  Gerelateerd aan het sediment transport zijn er veel versimpelingen en aannames gedaan:
  - Sedimentbalans met één rekencel;
  - Normaliseren op basis van de windrichtingen;
  - Filteren van de zeewaartse windrichtingen;
  - Eén sedimentfactie en dus geen aanrijking van grof materiaal in de toplaag;
  - Droog strand;

  AeoLiS is een proces-gebaseerd model voor het simuleren van eolisch sediment transport in situaties met *supply-limiting* condities. Wanneer er een uitgebreidere analyse zou worden uitgevoerd met een dergelijk model, worden bovenstaande aannames overbodig gemaakt en kan de morfologische ontwikkeling nauwkeuriger in kaart worden gebracht.

- *Ruimtelijke verdeling schuifspanning*
  Zowel de aanwezigheid van de monopalen, als de aangepaste morfologie, veroorzaken verstoringen in het windveld. Binnen de huidige aanpak zijn resultaten uit een windtunnel experiment vertaald om deze invloed te beschrijven in het model. Hierbij zijn de temporale ontwikkelingen van de morfologie, windsnelheid en schaaleffecten niet mee genomen.

  Het bovengenoemde model AeoLiS is in staat om de morfologische invloed op het windveld te berekenen en in geval van een uitgebreide analyse zou de invloed van een monopaal op het windveld kunnen worden geanalyseerd met behulp van een CFD (Computational Fluid Dynamics) model.

Referenties

Bagnold, R. (1941). Physics of blown sand and sand dunes. *William Morrow and Co., New York*.

Baykal, C., Sumer, B.M., Fuhrman, D.R., Jacobsen, N.G., Fredsøe, J. 2017. Numerical simulation of scour and backfilling processes around a circular pile in waves, *Coastal Engineering*, 122, 87-107.

Breusers, H.N.C., Nicollet, G. & Shen, H.W., (1977) Local Scour Around Cylindrical Piers, Journal of Hydraulic Research, 15:3, 211-252, DOI: 10.1080/00221687709499645

Cheng, N.S., Wei, M. 2019. Scaling of scour depth at bridge pier based on characteristic dimension of large-scale vortex, *Water*, 11, 2458.

Delft Hydraulics, 2006. Review Ontwerprandvoorwaarden Maasvlakte 2. Report H4837.

Deltares, 2020. Desk study – Comparison wave- and current-induced scour in windpark MV2_final. Referentienummer: 11205329-002-HYE-0001_v1.2.

McKenna-Neuman, C., & Sanderson, R. S. (2013). Vortex shedding and morphodynamicresponse of bed surfaces containing non-erodible roughness elements. *Geomorphology*, 45-56.

Nielsen, P. (1990). Tidal Dynamics of the Water Table in Beaches. *Water Resources Research*, 2127-2134

Nielsen, A.W., Sumer, B.M., Ebbe, S.S., Fredsøe, J. 2012. Experimental study on the scour around a monopile in breaking waves, *Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering*, 138(6), 501-506.

Raaijmakers, T.C., Rudolph, D. 2008. Time-dependent scour development under combined current and waves conditions – laboratory experiments with online monitoring technique, *proceedings of the 4th International Conference on Scour and Erosion ICSE2008*.

Roelvink, D. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 1133-1152.

Roulund, A., Sumer, B.M., Fredsøe, J., Michelsen, J. 2005. Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile, *Journal of Fluid Mechanics*, 534, 351-401.

RWS Waterinfo. (2020). Opgehaald van http://waterinfo.rws.nl

Sheppard, D.M., Miller Jr., W. 2006. Live-bed local pier scour experiments, *Journal of hydraulic engineering*, 132(7), 635-642.

Van Geer, P., Den Bieman, J., Hoonhout, B. & Boers, M., 2015. XBeach 1D–Probabilistic model: ADIS, Settings, Model uncertainty and Graphical User Interface. Tech report.

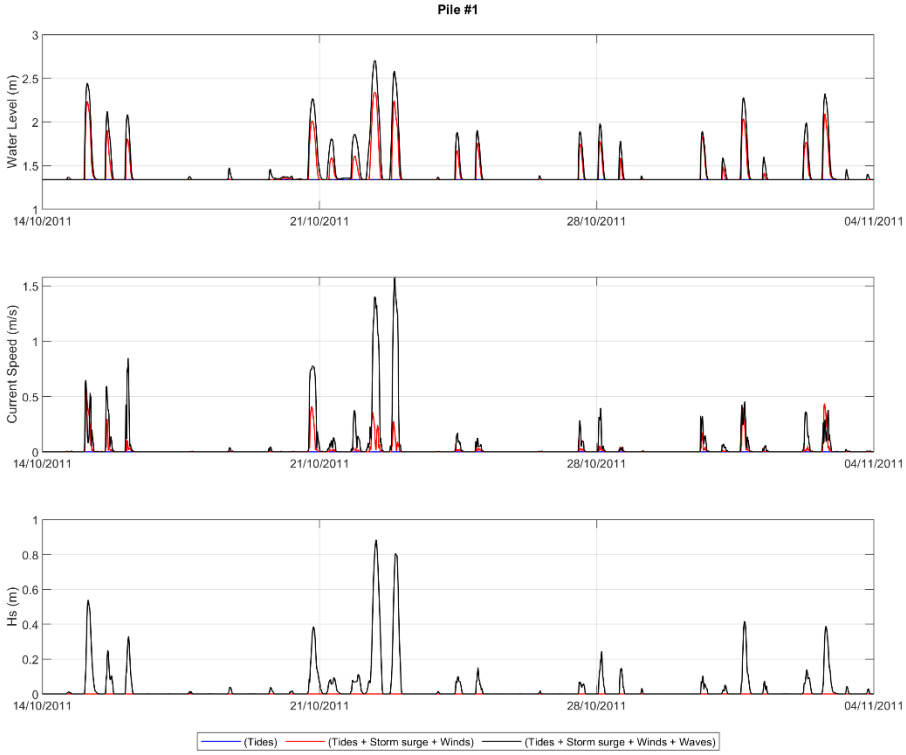
Vellinga, P. (1986). Beach and dune erosion during storm surges. PhD Thesis, *Delft University of Technology.*

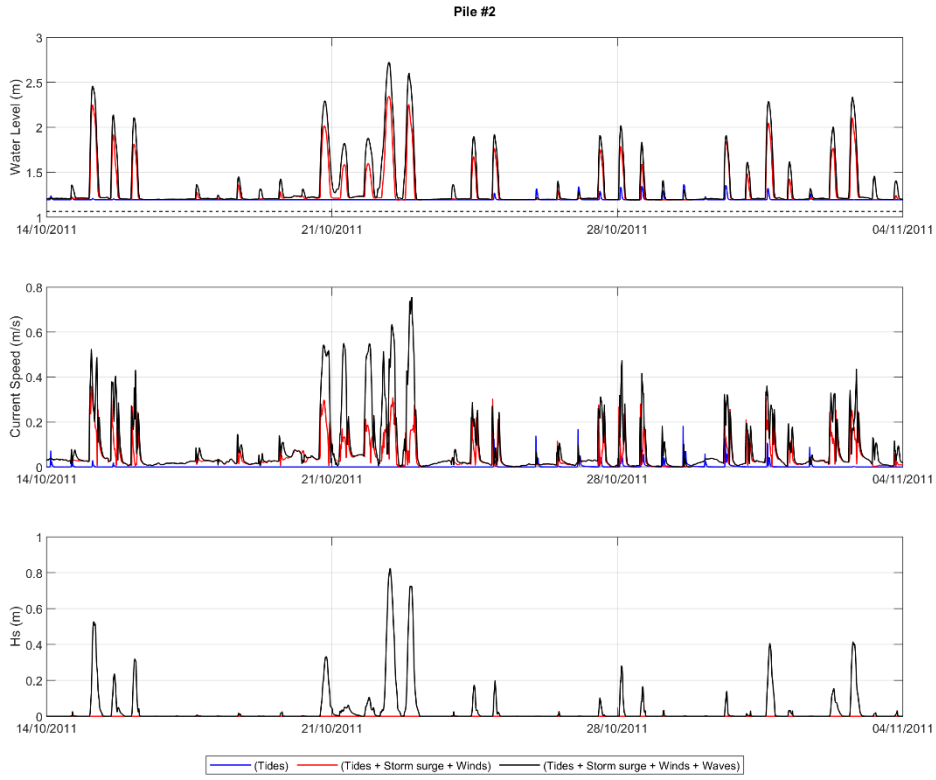
A Hydrodynamische condities per windturbine

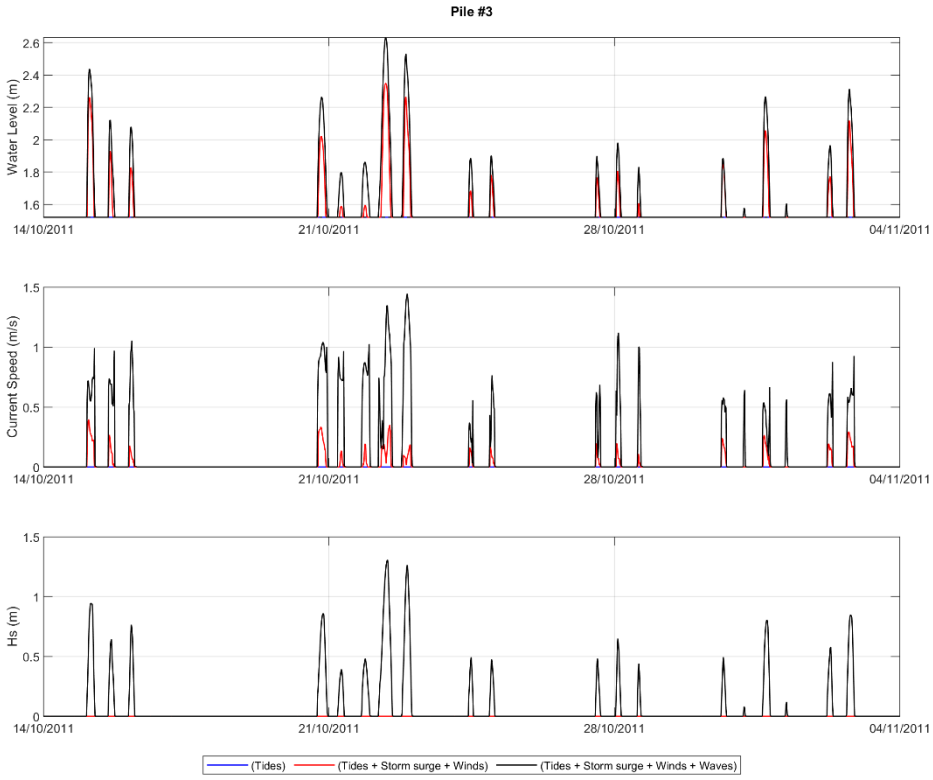
In deze bijlage worden de tijdseries van waterstanden, stromingen, en lokale golfhoogtes per windturbine gepresenteerd voor de scenario's 1-3 en 4-6.

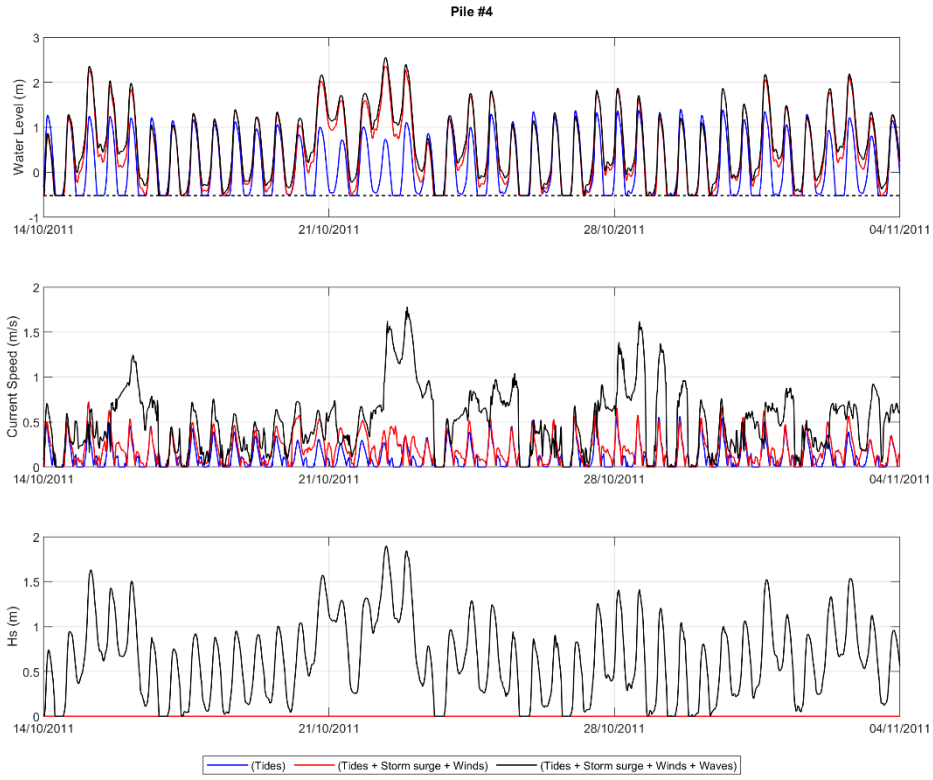
A.1 2019 bodem

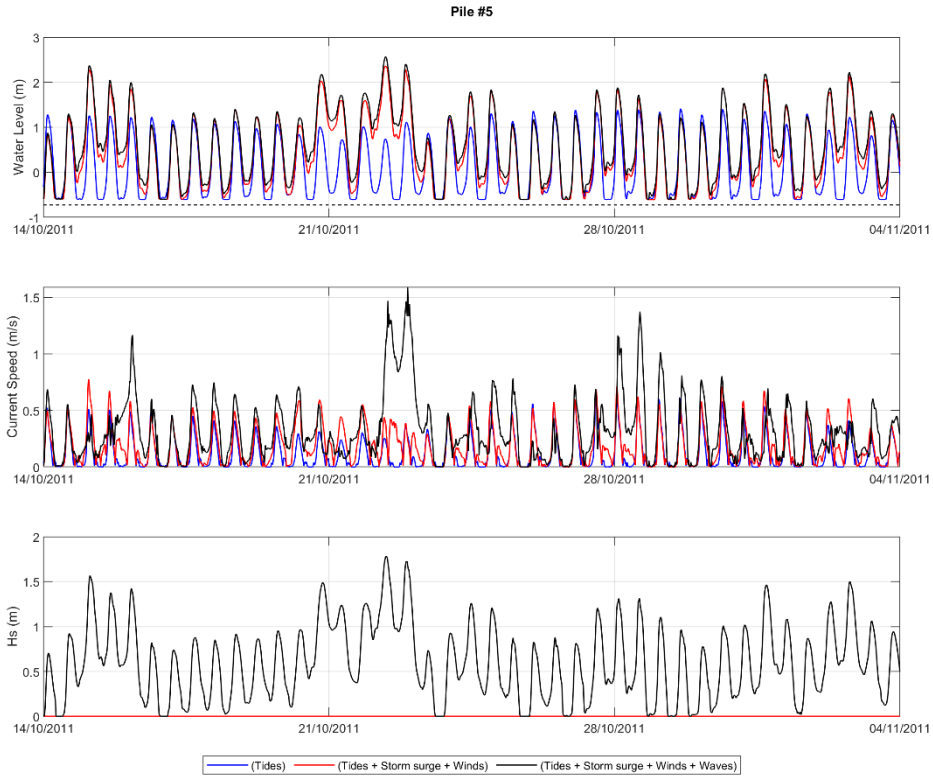
A.1.1 Scenario's 1, 2 en 3

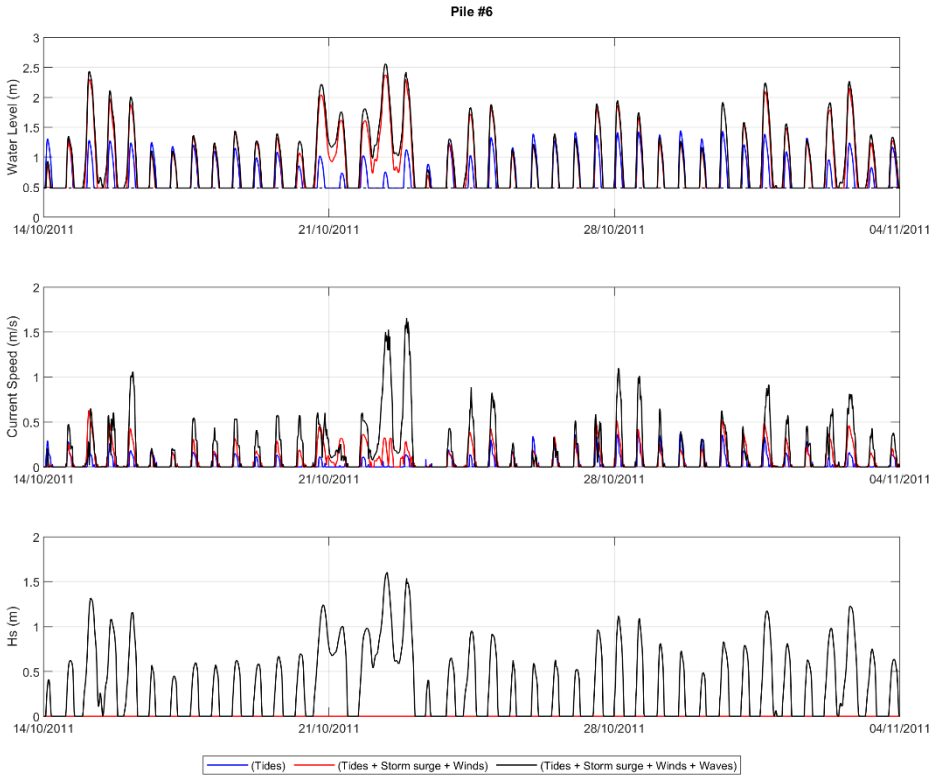


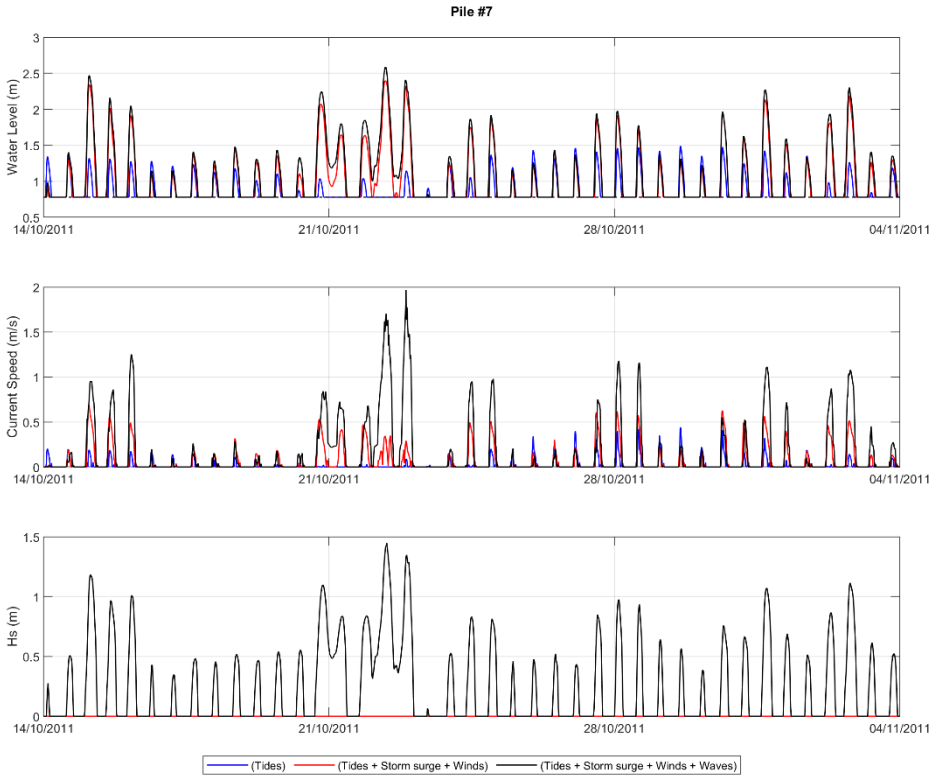


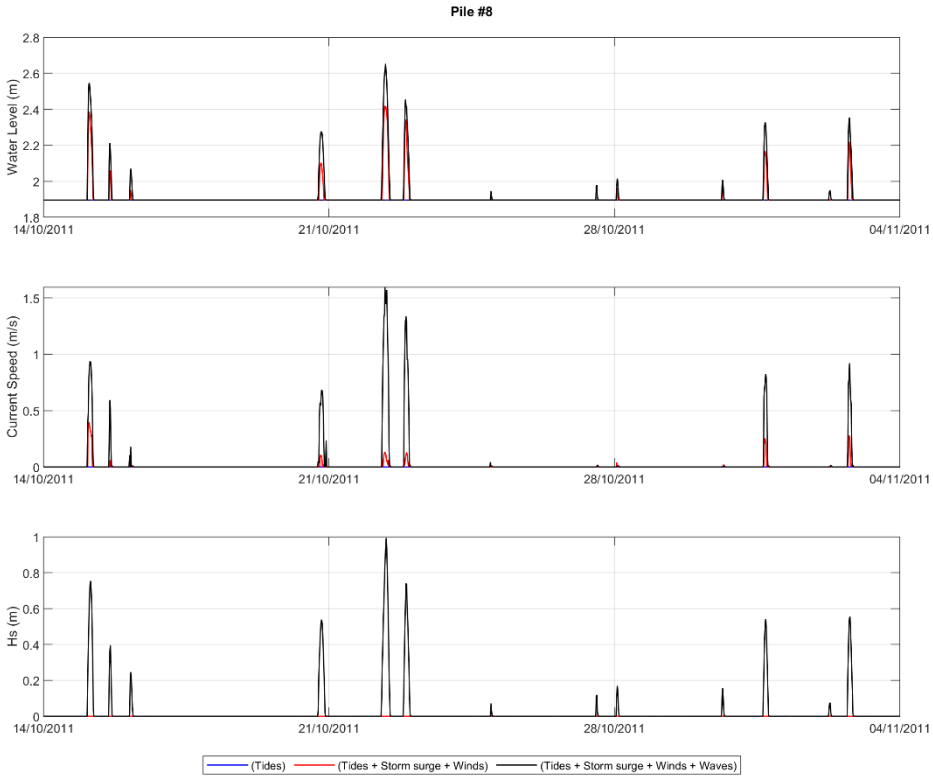

Pile #3
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Hs (m)
14/10/2011
21/10/2011
28/10/2011
04/11/2011
(Tides)
(Tides + Storm surge + Winds)
(Tides + Storm surge + Winds + Waves)

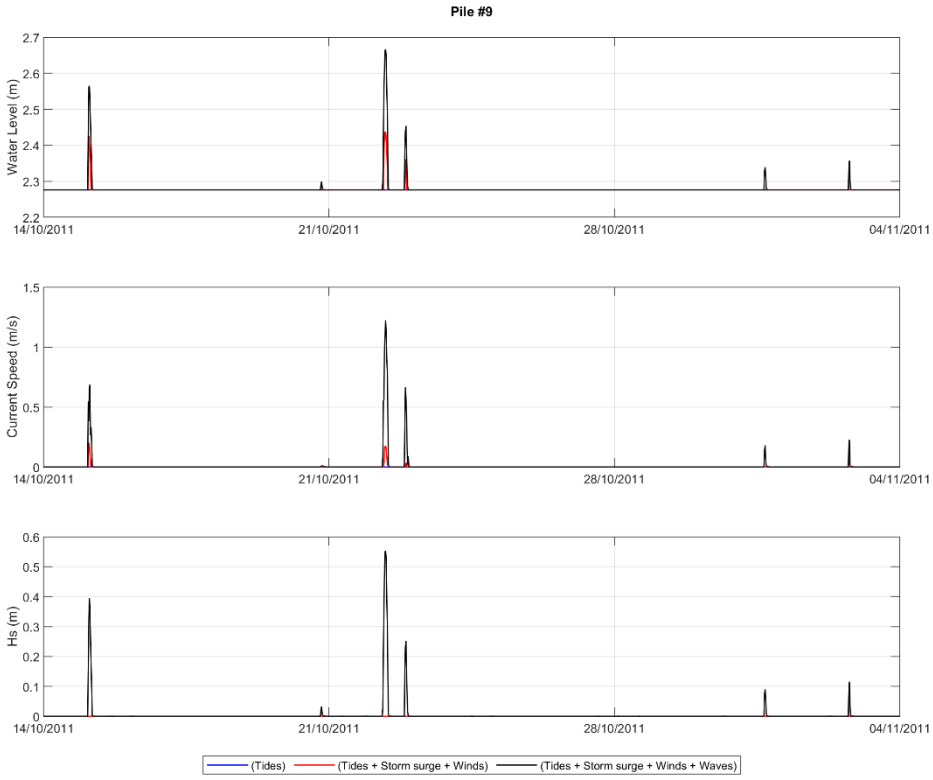

Pile #4
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Hs (m)
14/10/2011
21/10/2011
28/10/2011
04/11/2011
(Tides)
(Tides + Storm surge + Winds)
(Tides + Storm surge + Winds + Waves)

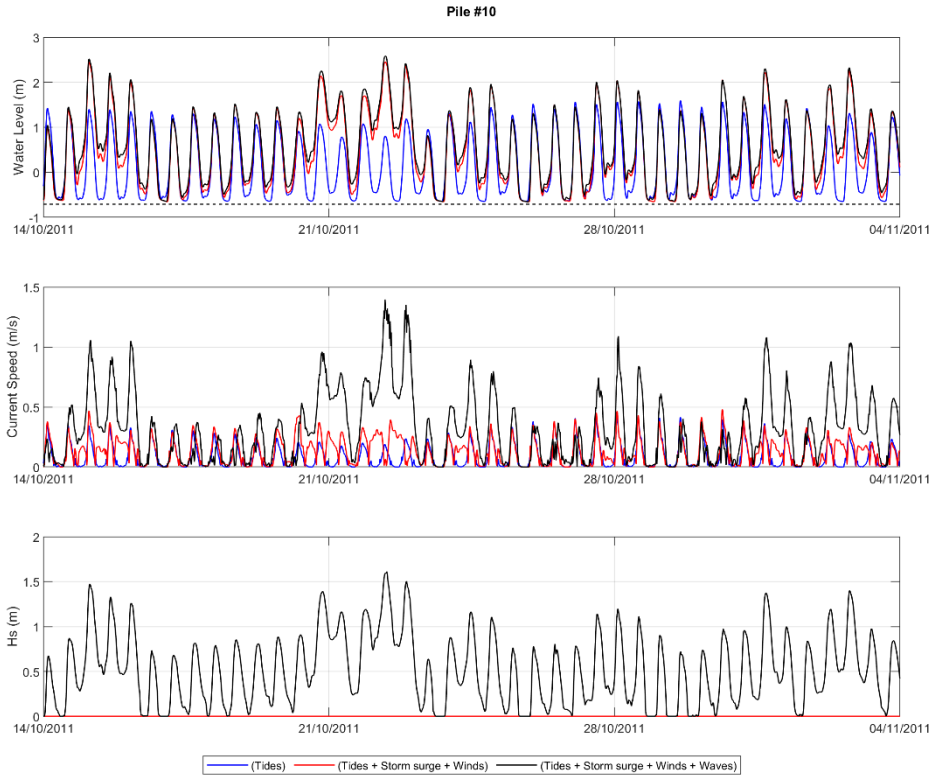

Pile #5
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Hs (m)
14/10/2011
21/10/2011
28/10/2011
04/11/2011
(Tides)
(Tides + Storm surge + Winds)
(Tides + Storm surge + Winds + Waves)

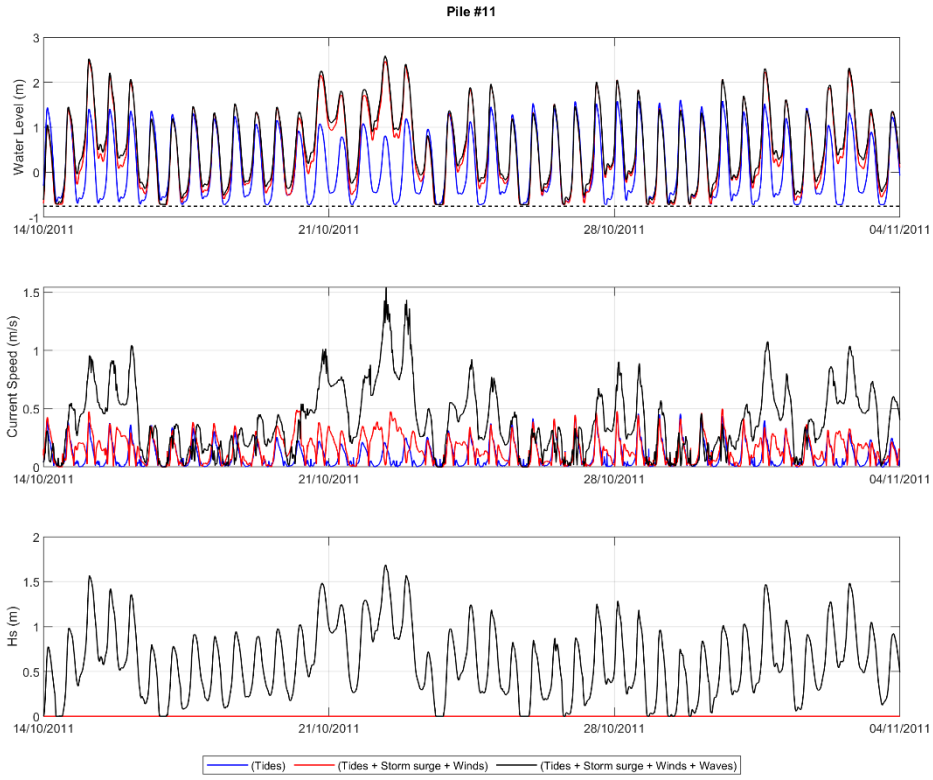

Pile #6
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Hs (m)
14/10/2011
21/10/2011
28/10/2011
04/11/2011
(Tides)
(Tides + Storm surge + Winds)
(Tides + Storm surge + Winds + Waves)

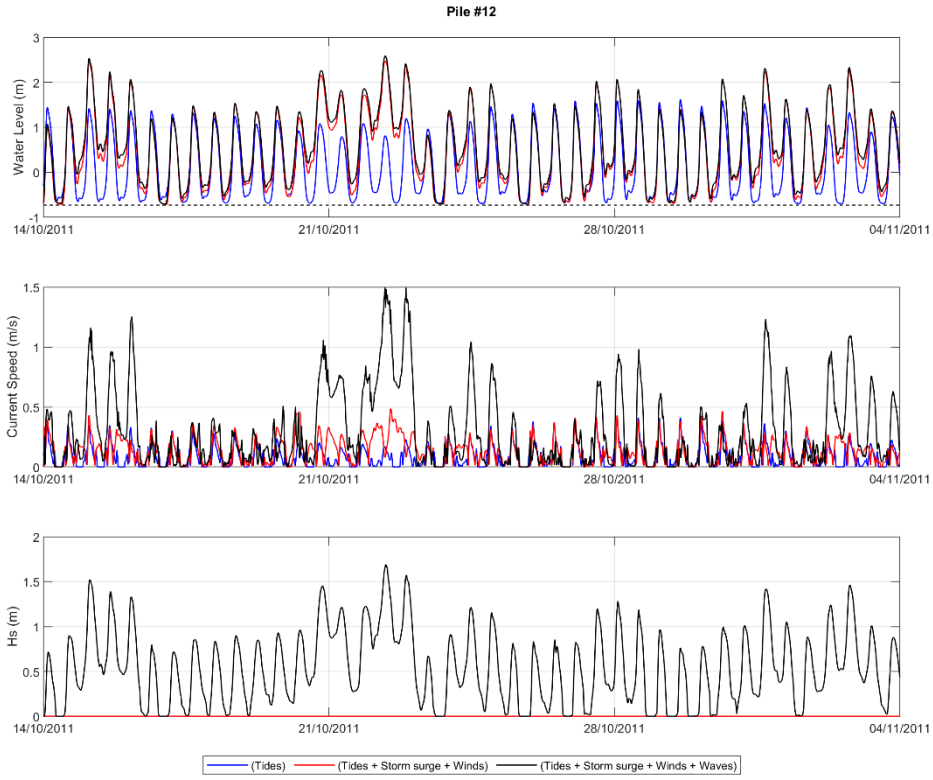

Pile #7
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Hs (m)
14/10/2011
21/10/2011
28/10/2011
04/11/2011
(Tides)
(Tides + Storm surge + Winds)
(Tides + Storm surge + Winds + Waves)


Pile #8
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Hs (m)
14/10/2011
21/10/2011
28/10/2011
04/11/2011
(Tides)
(Tides + Storm surge + Winds)
(Tides + Storm surge + Winds + Waves)

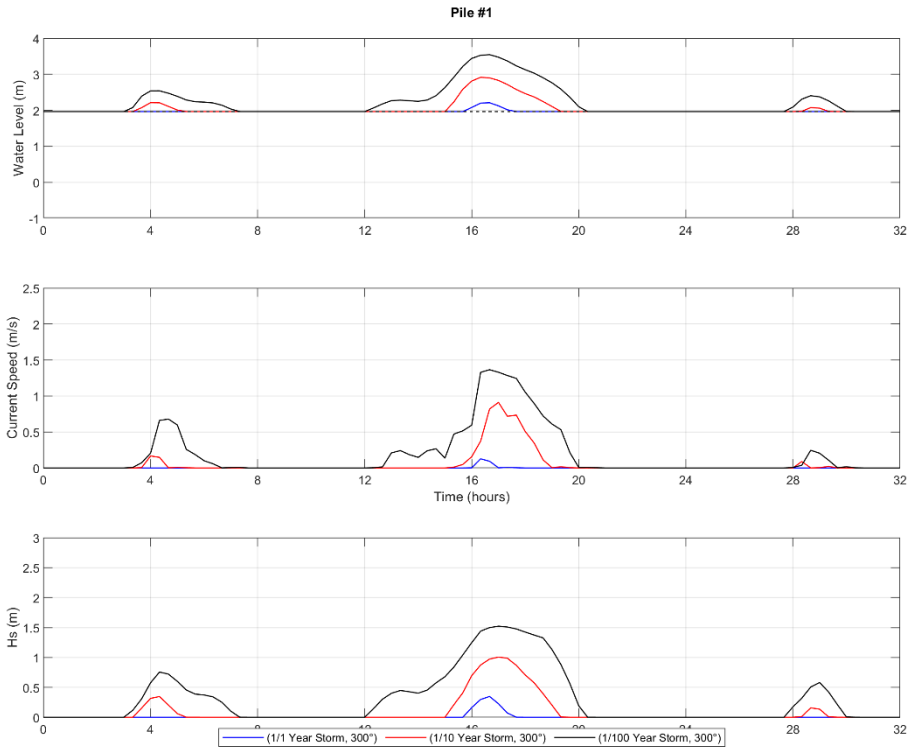

Pile #9
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Hs (m)
14/10/2011
21/10/2011
28/10/2011
04/11/2011
(Tides)
(Tides + Storm surge + Winds)
(Tides + Storm surge + Winds + Waves)

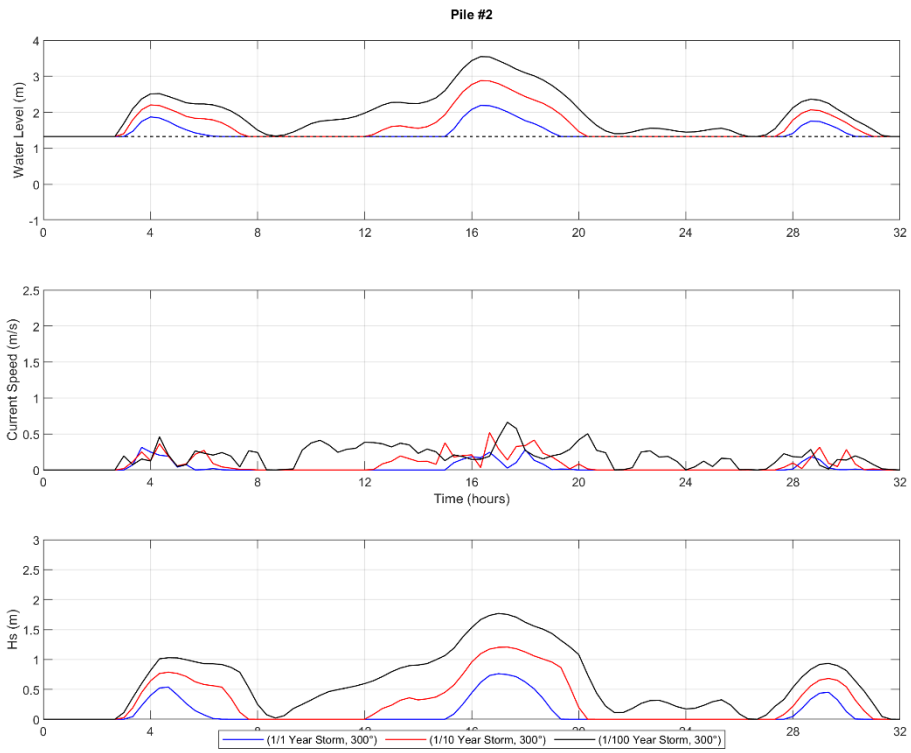

Pile #10
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Hs (m)
14/10/2011
21/10/2011
28/10/2011
04/11/2011
(Tides)
(Tides + Storm surge + Winds)
(Tides + Storm surge + Winds + Waves)

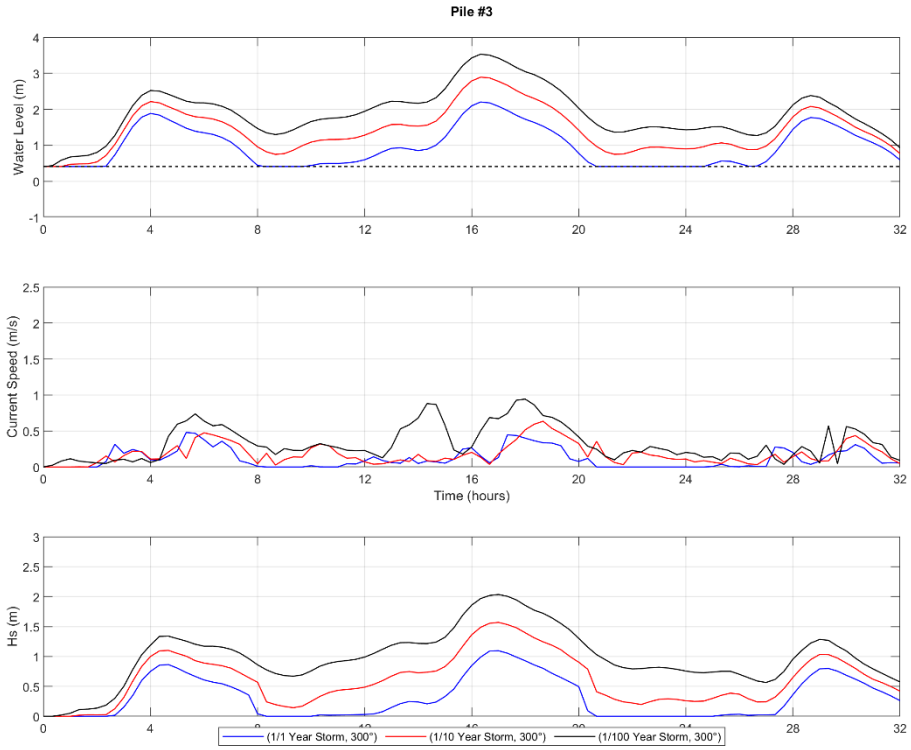

Pile #11
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Hs (m)
14/10/2011
21/10/2011
28/10/2011
04/11/2011
(Tides)
(Tides + Storm surge + Winds)
(Tides + Storm surge + Winds + Waves)

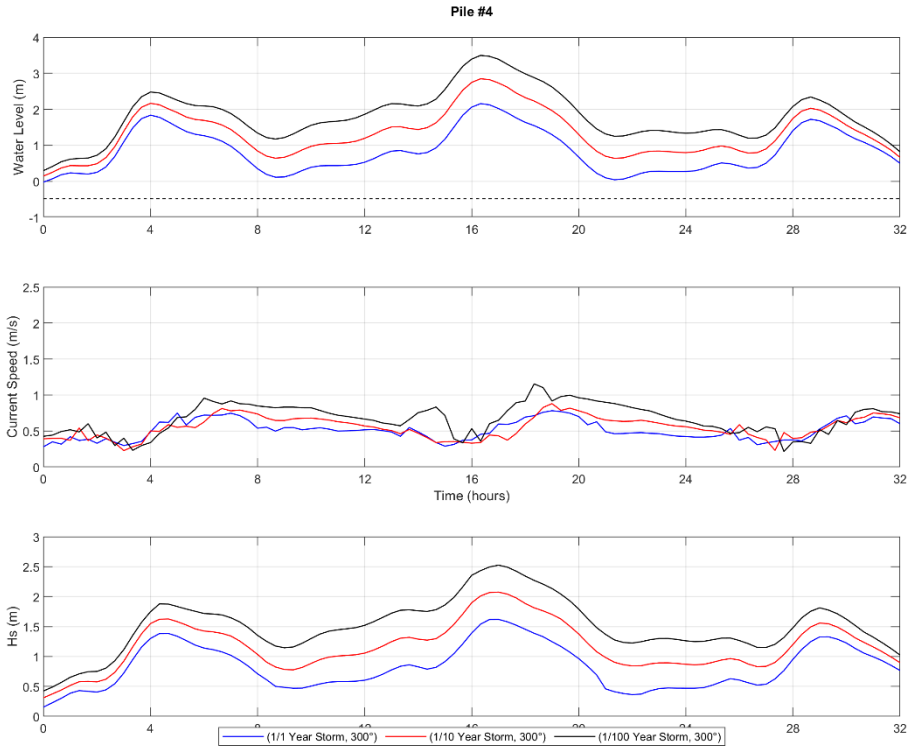

Pile #12
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Hs (m)
14/10/2011
21/10/2011
28/10/2011
04/11/2011
(Tides)
(Tides + Storm surge + Winds)
(Tides + Storm surge + Winds + Waves)

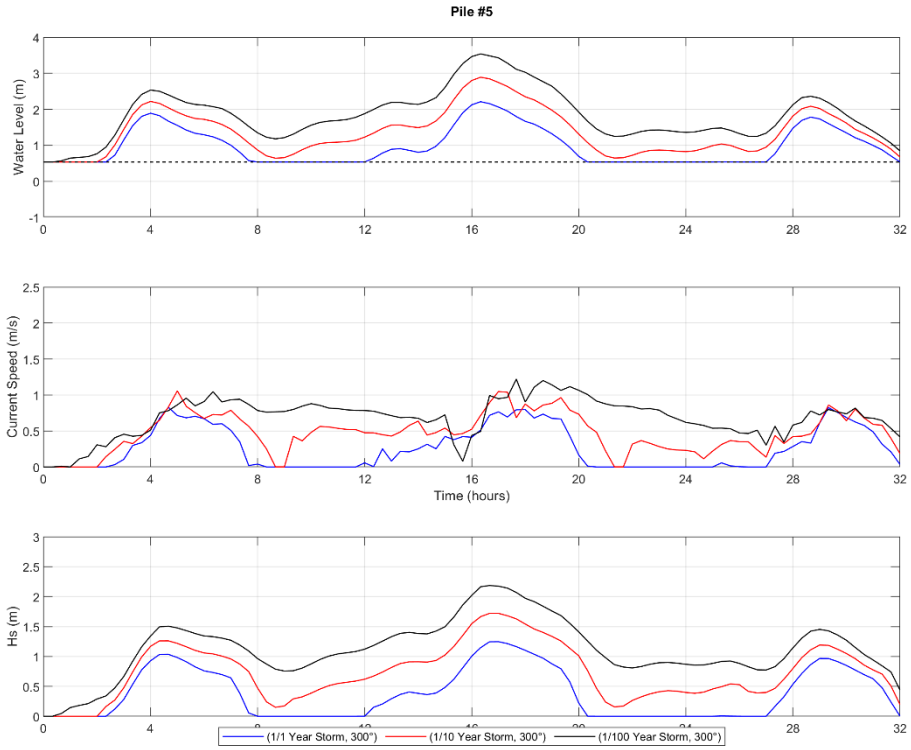
A.1.2 Scenario's 4, 5 en 6

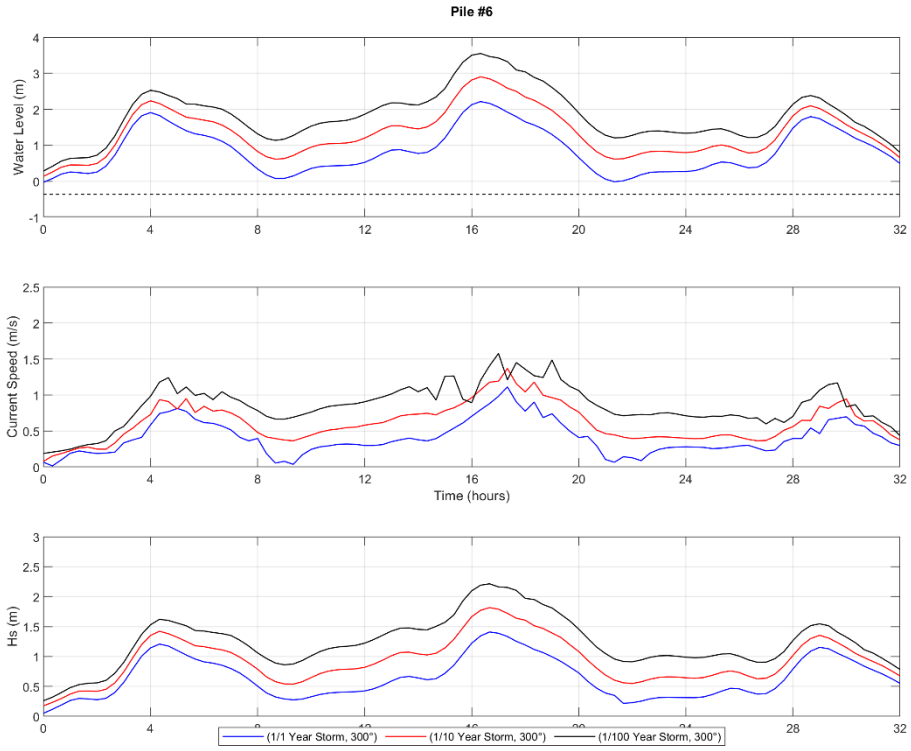


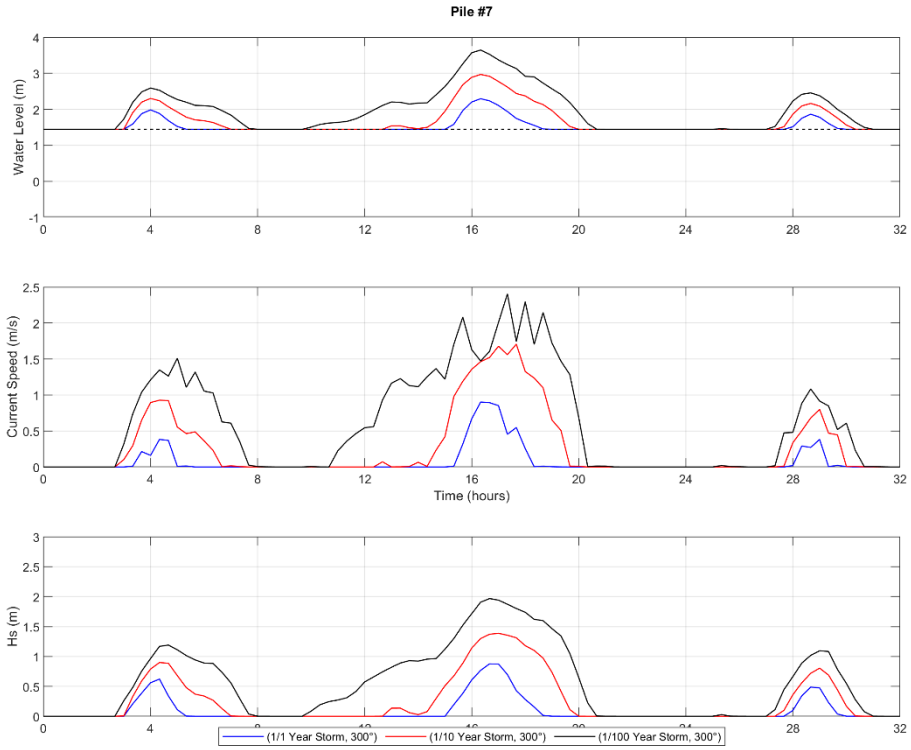


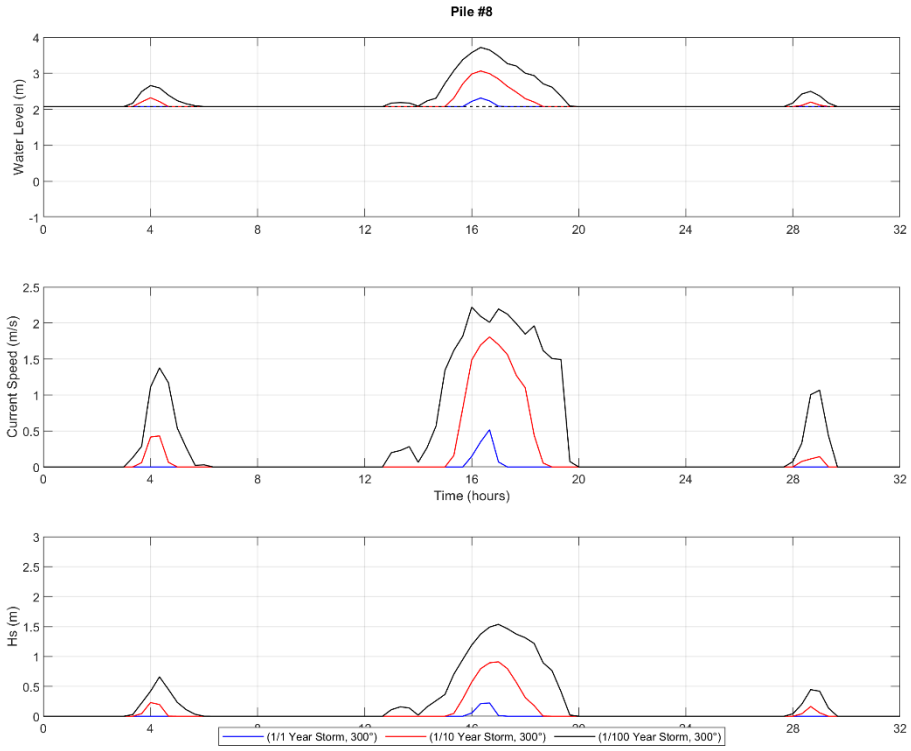

Pile #3
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Time (hours)
Hs (m)
(1/1 Year Storm, 300°)
(1/10 Year Storm, 300°)
(1/100 Year Storm, 300°)

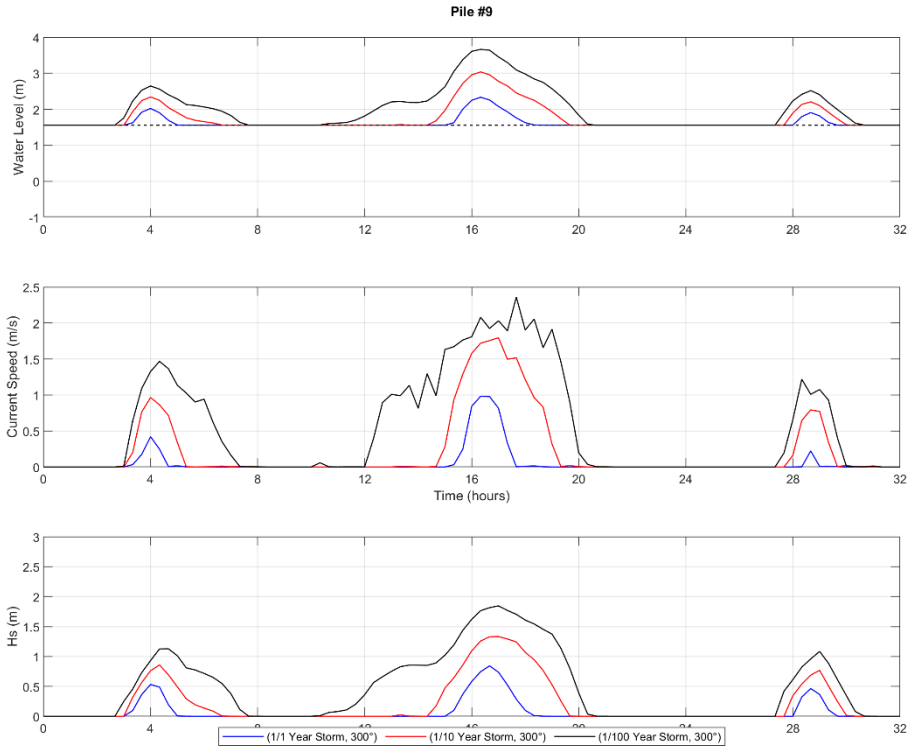

Pile #4
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Time (hours)
Hs (m)
(1/1 Year Storm, 300°)
(1/10 Year Storm, 300°)
(1/100 Year Storm, 300°)

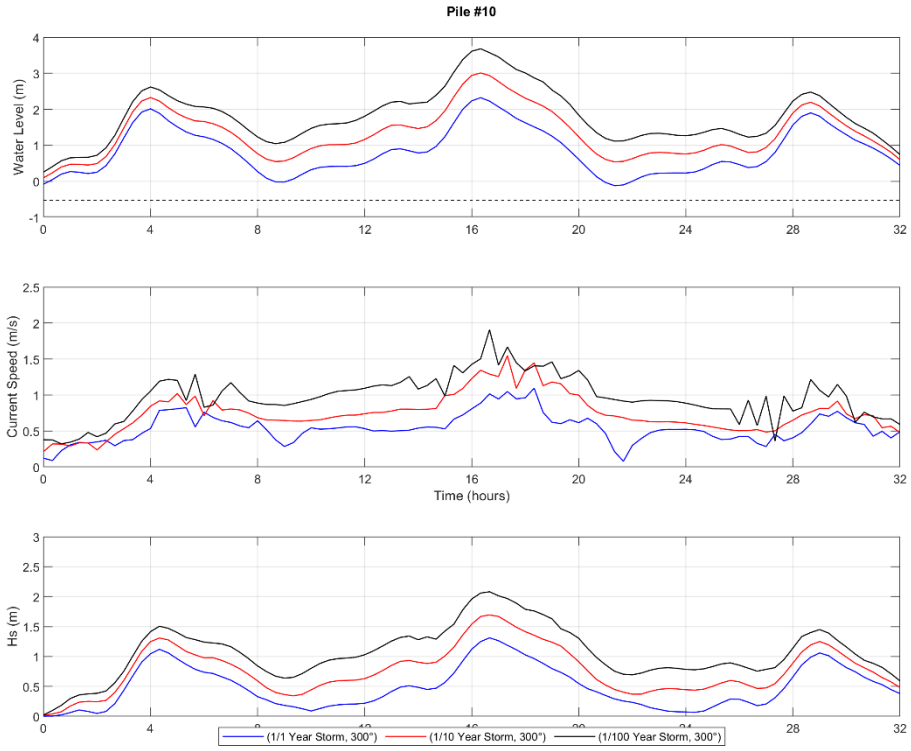

Pile #5
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Time (hours)
Hs (m)
(1/1 Year Storm, 300°)
(1/10 Year Storm, 300°)
(1/100 Year Storm, 300°)

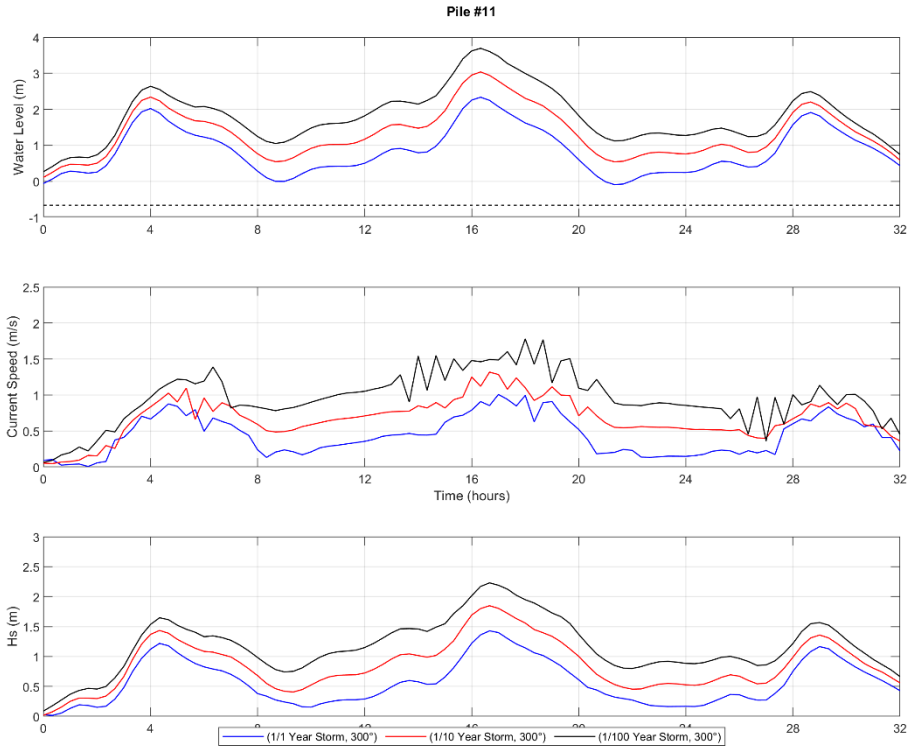

Pile #6
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Time (hours)
Hs (m)
(1/1 Year Storm, 300°)
(1/10 Year Storm, 300°)
(1/100 Year Storm, 300°)

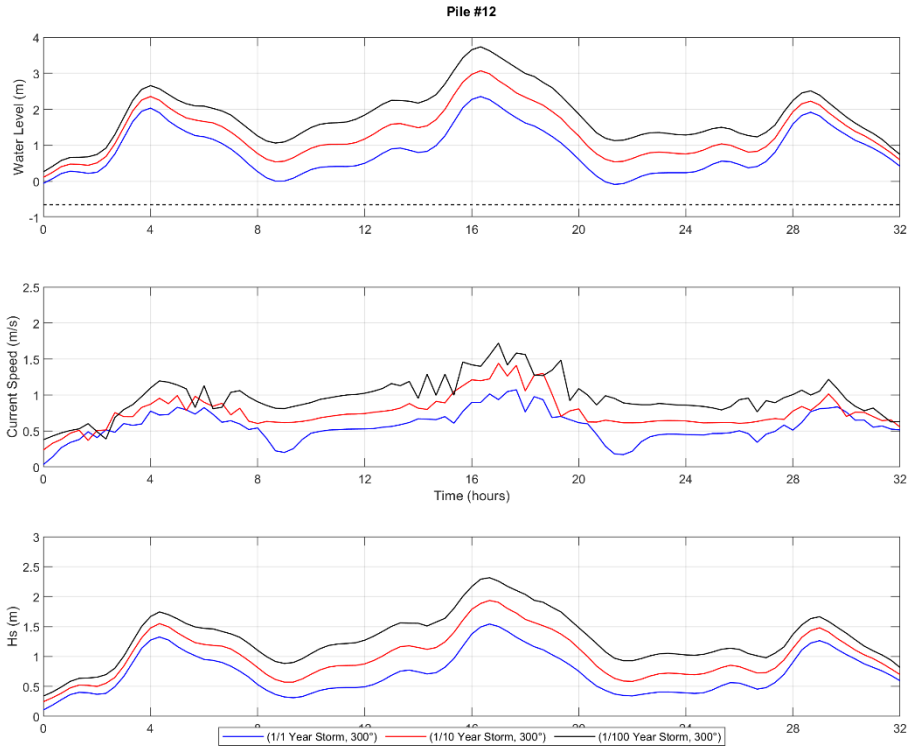

Pile #7
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Time (hours)
Hs (m)
(1/1 Year Storm, 300°)
(1/10 Year Storm, 300°)
(1/100 Year Storm, 300°)


Pile #8
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Time (hours)
Hs (m)
(1/1 Year Storm, 300°)
(1/10 Year Storm, 300°)
(1/100 Year Storm, 300°)


Pile #9
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Time (hours)
Hs (m)
(1/1 Year Storm, 300°)
(1/10 Year Storm, 300°)
(1/100 Year Storm, 300°)

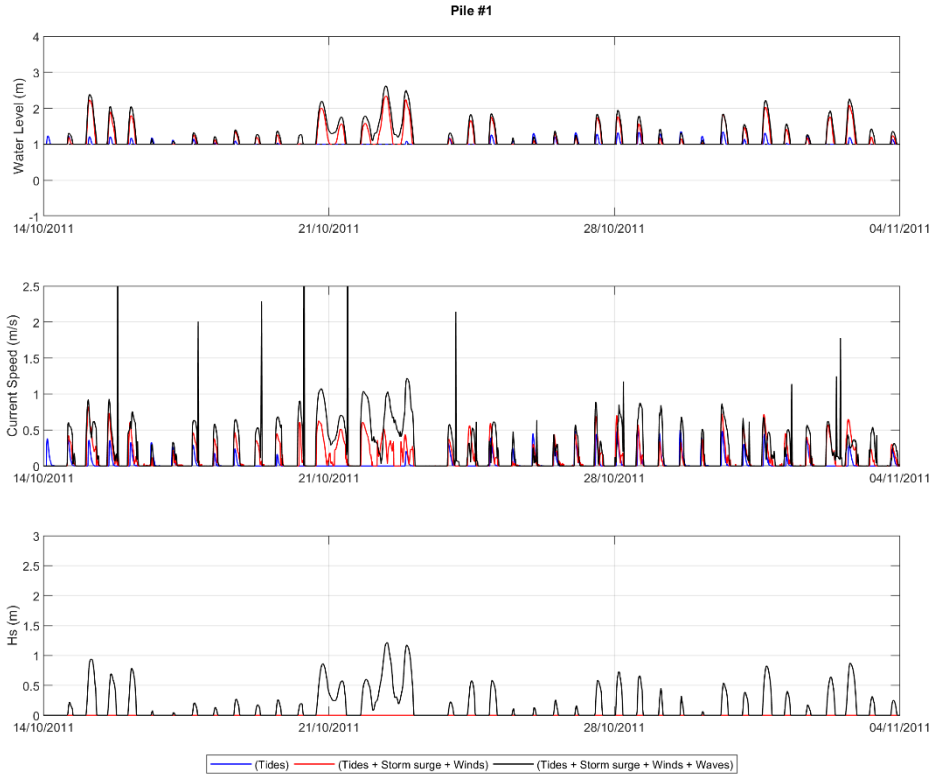

Pile #10
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Time (hours)
Hs (m)
(1/1 Year Storm, 300°)
(1/10 Year Storm, 300°)
(1/100 Year Storm, 300°)

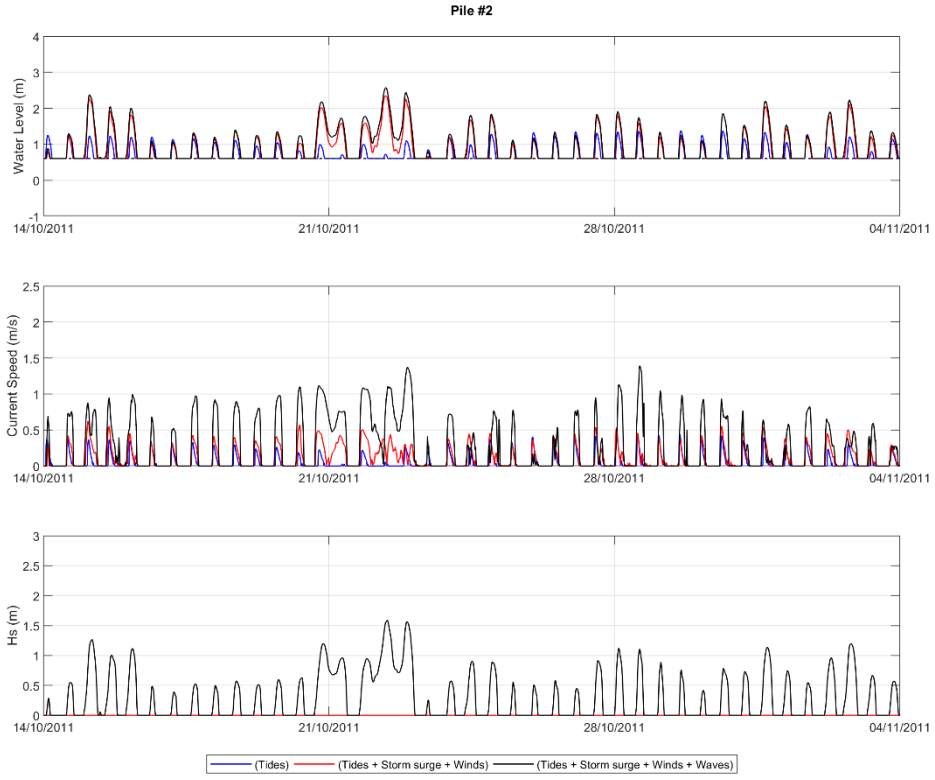

Pile #11
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Time (hours)
Hs (m)
(1/1 Year Storm, 300°)
(1/10 Year Storm, 300°)
(1/100 Year Storm, 300°)

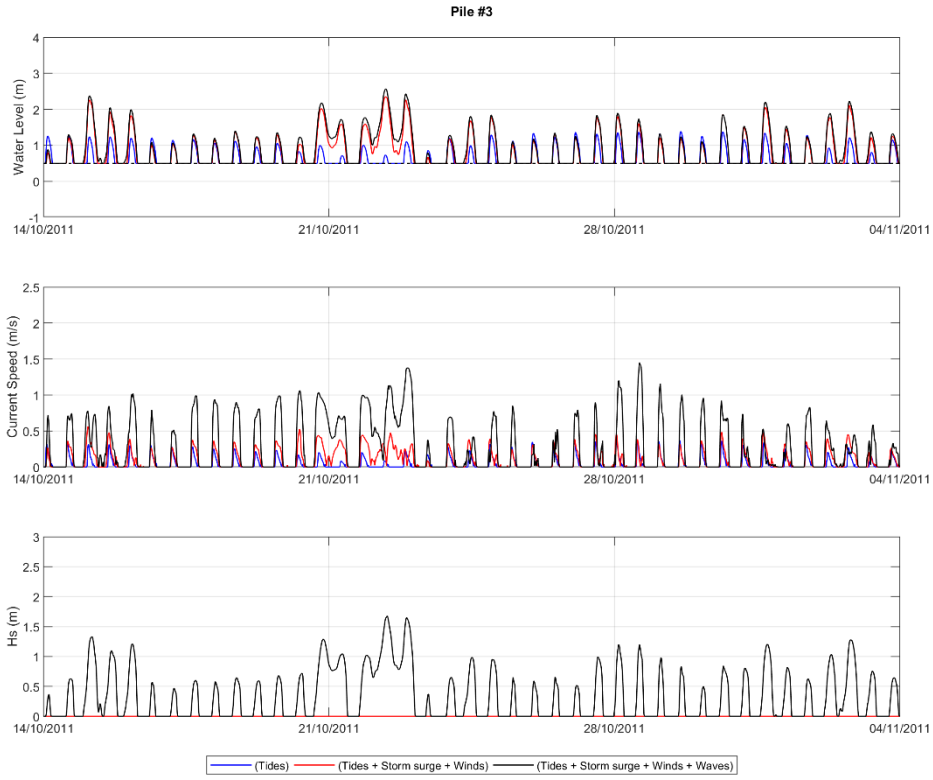

Pile #12
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Time (hours)
Hs (m)
(1/1 Year Storm, 300°)
(1/10 Year Storm, 300°)
(1/100 Year Storm, 300°)

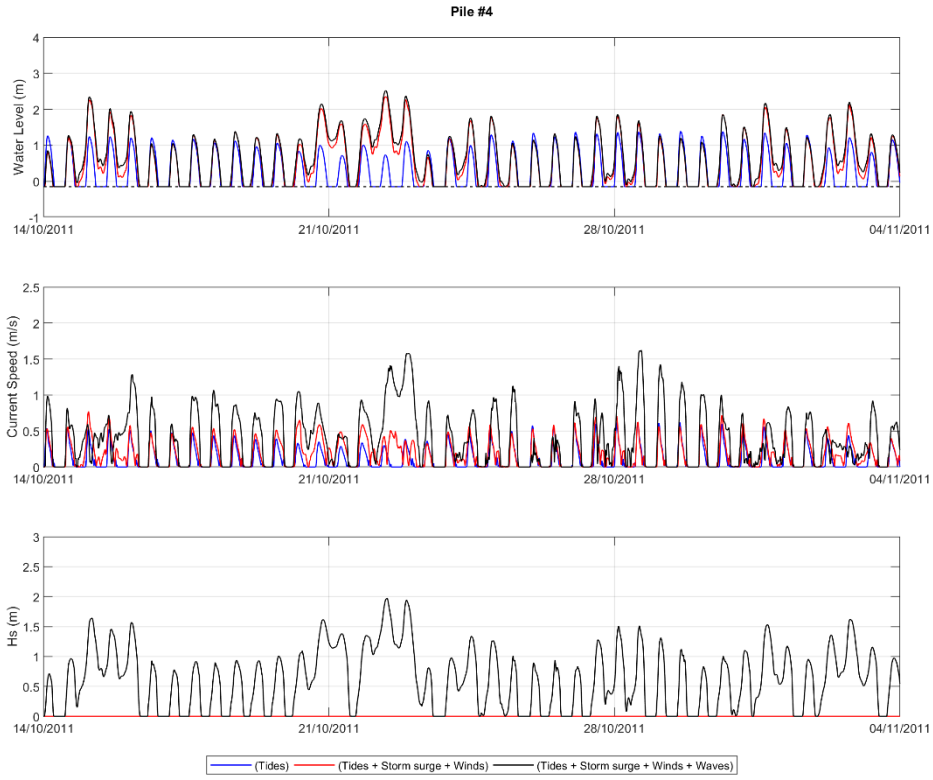
A.2 Ontwerpbodem

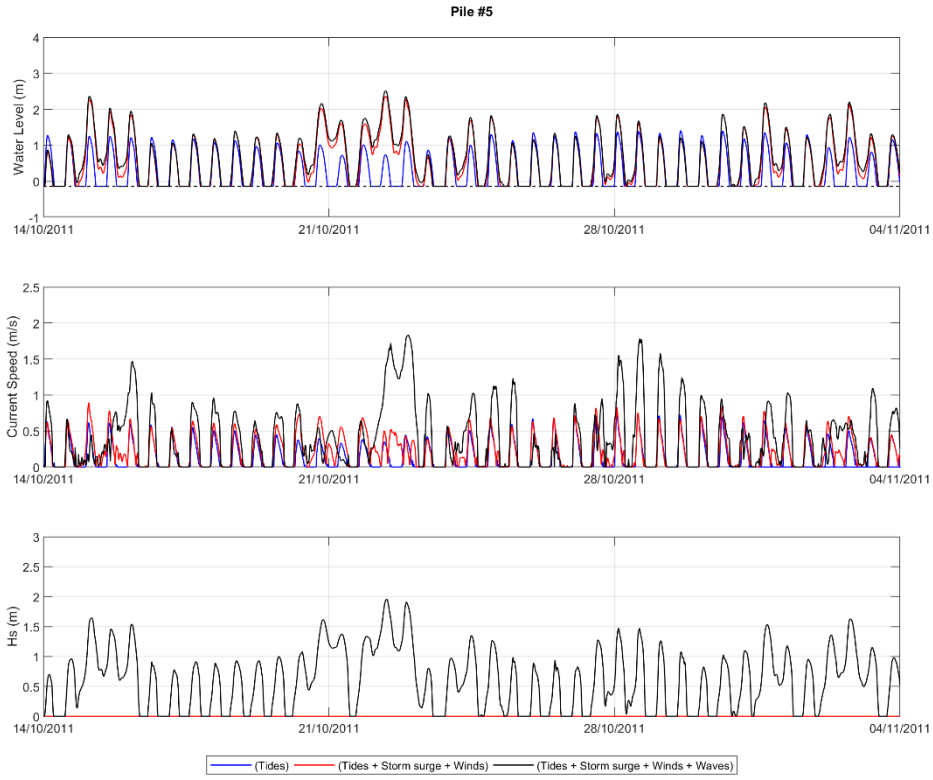
A.2.1 Scenario's 1, 2 en 3

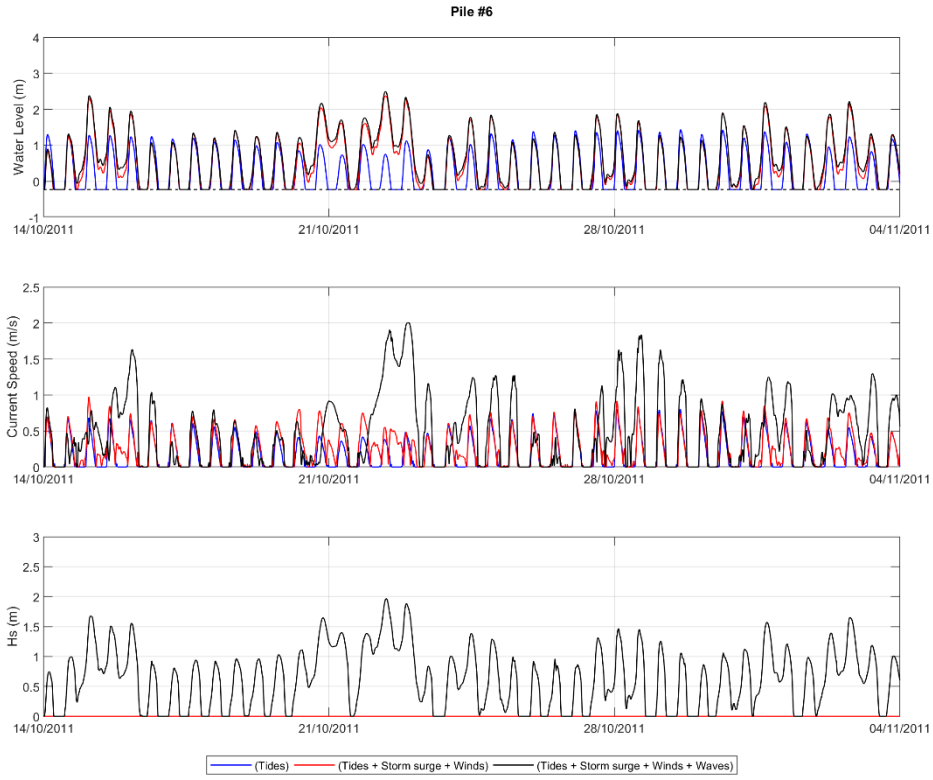


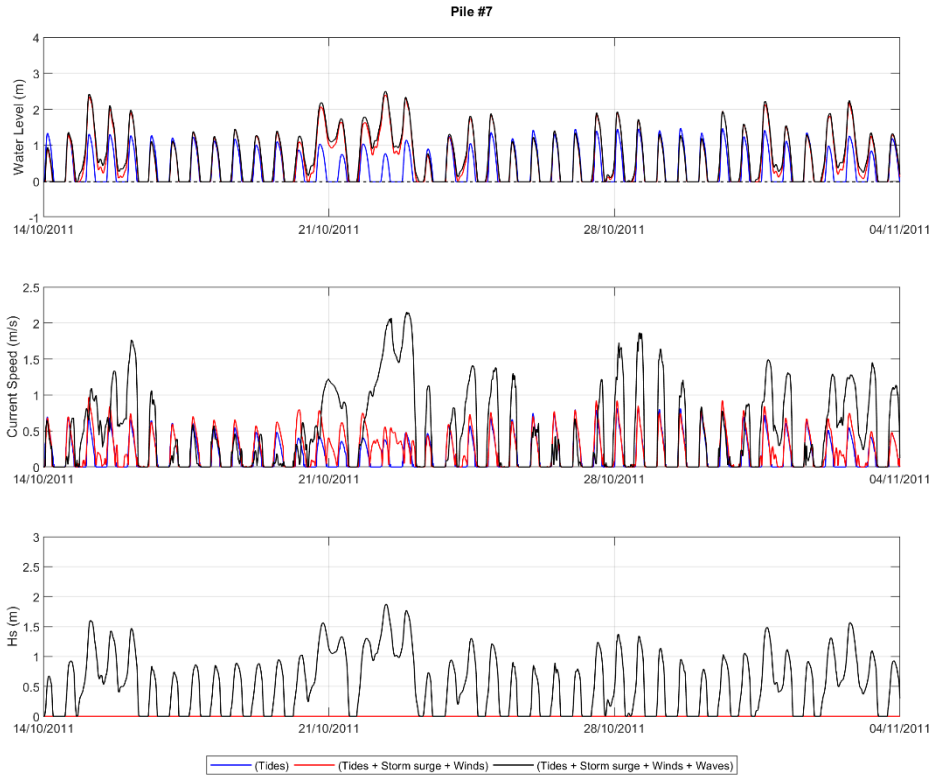


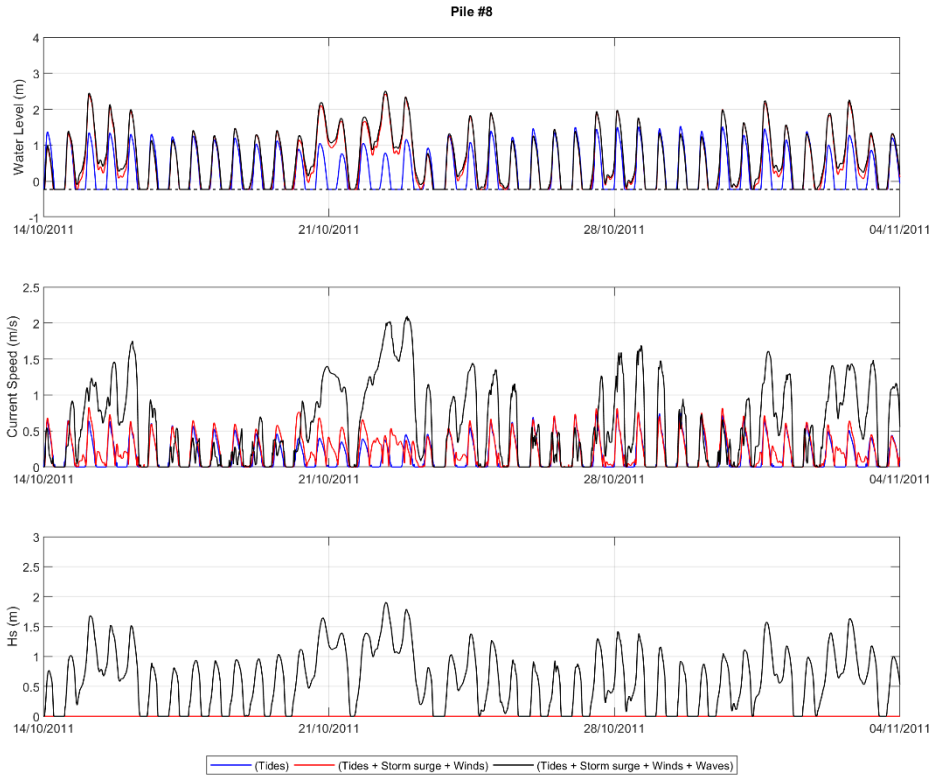

Pile #3
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Hs (m)
14/10/2011
21/10/2011
28/10/2011
04/11/2011
(Tides)
(Tides + Storm surge + Winds)
(Tides + Storm surge + Winds + Waves)

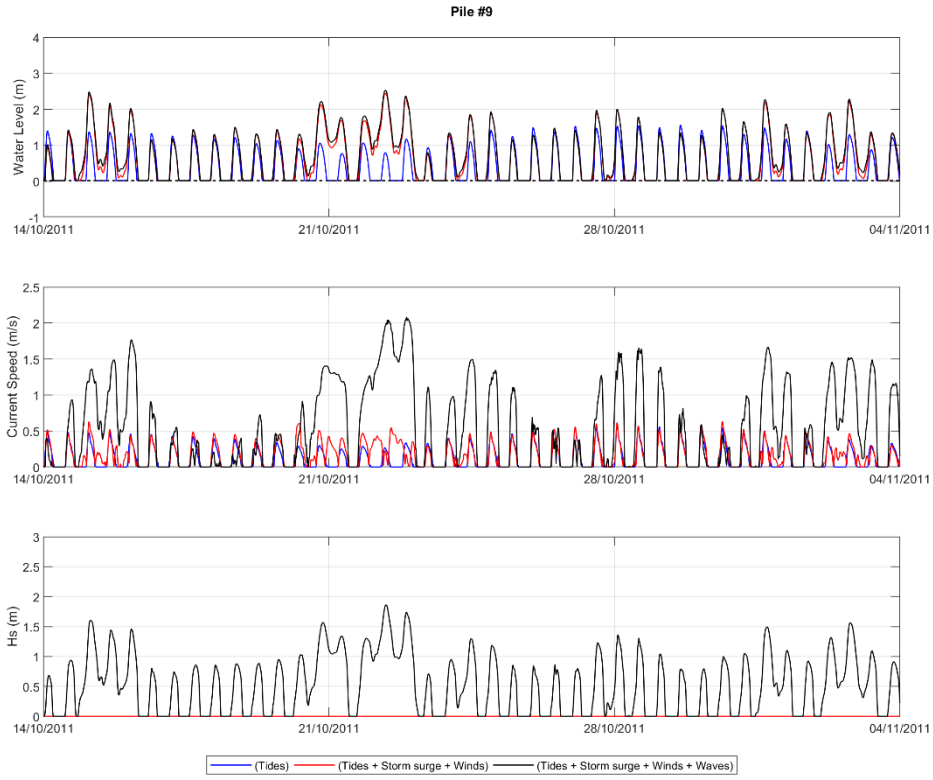

Pile #4
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Hs (m)
14/10/2011
21/10/2011
28/10/2011
04/11/2011
(Tides)
(Tides + Storm surge + Winds)
(Tides + Storm surge + Winds + Waves)

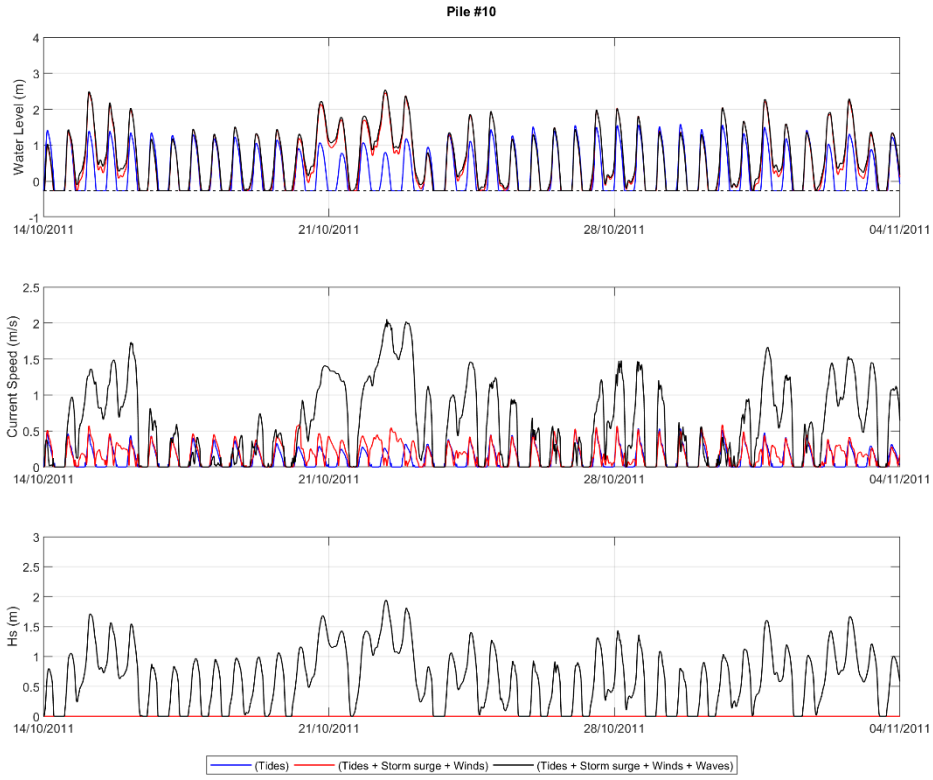

Pile #5
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Hs (m)
14/10/2011
21/10/2011
28/10/2011
04/11/2011
(Tides)
(Tides + Storm surge + Winds)
(Tides + Storm surge + Winds + Waves)

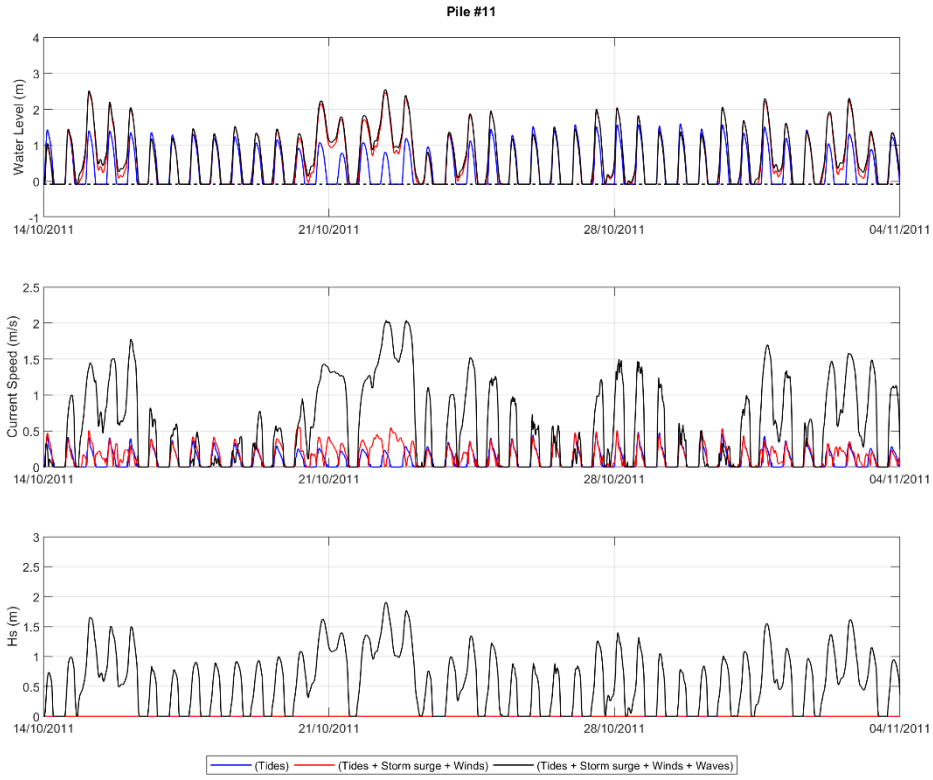

Pile #6
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Hs (m)
14/10/2011
21/10/2011
28/10/2011
04/11/2011
(Tides)
(Tides + Storm surge + Winds)
(Tides + Storm surge + Winds + Waves)

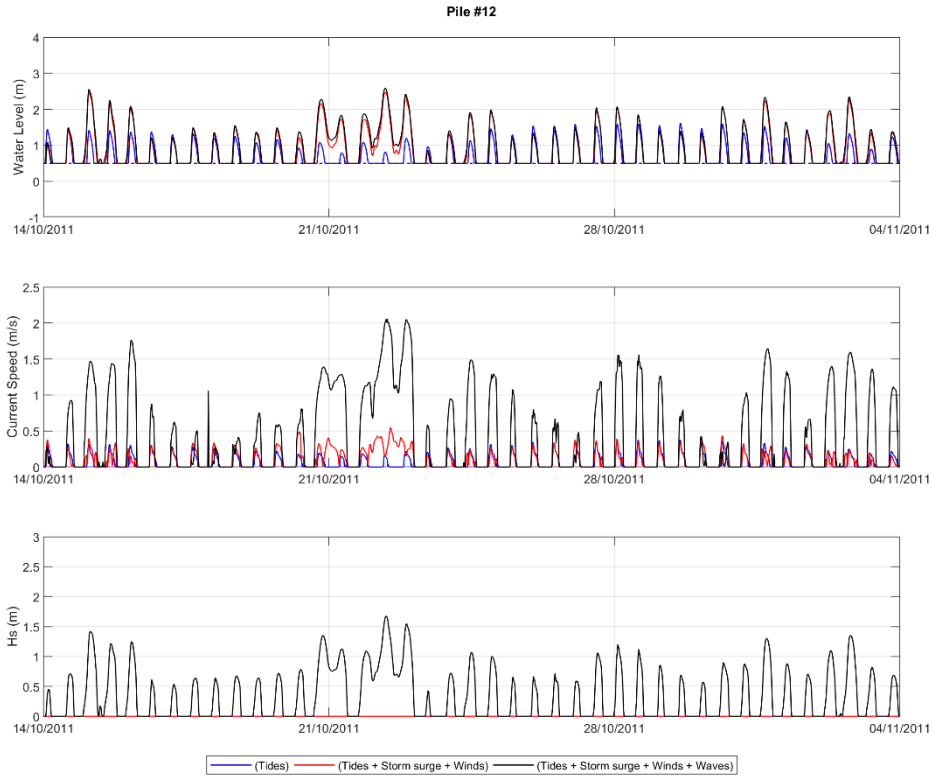

Pile #7
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Hs (m)
14/10/2011
21/10/2011
28/10/2011
04/11/2011
(Tides)
(Tides + Storm surge + Winds)
(Tides + Storm surge + Winds + Waves)


Pile #8
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Hs (m)
14/10/2011
21/10/2011
28/10/2011
04/11/2011
(Tides)
(Tides + Storm surge + Winds)
(Tides + Storm surge + Winds + Waves)

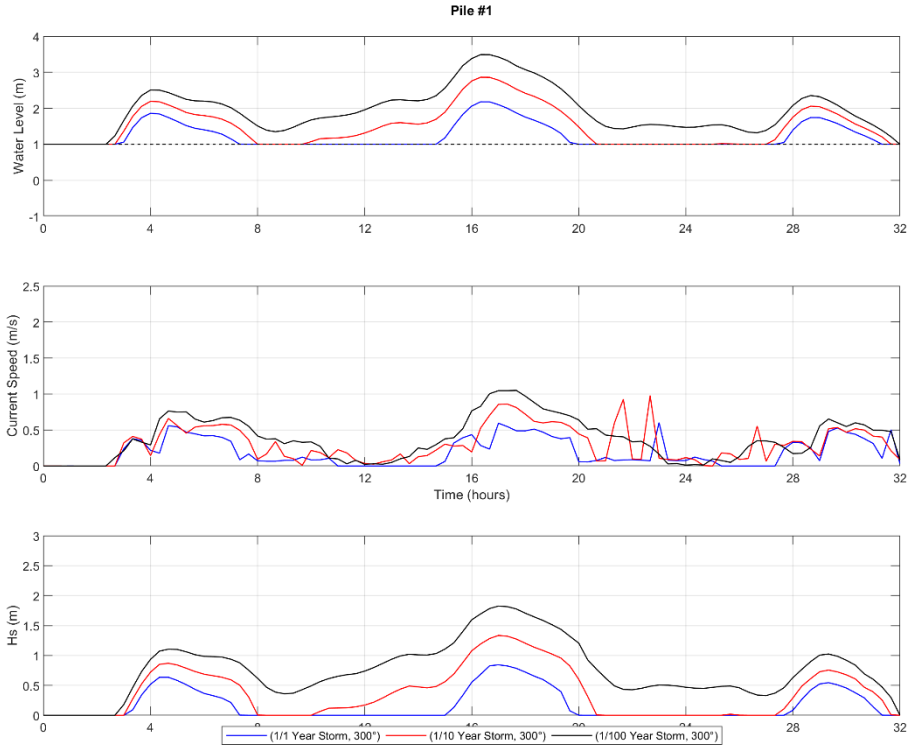

Pile #9
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Hs (m)
14/10/2011
21/10/2011
28/10/2011
04/11/2011
(Tides)
(Tides + Storm surge + Winds)
(Tides + Storm surge + Winds + Waves)

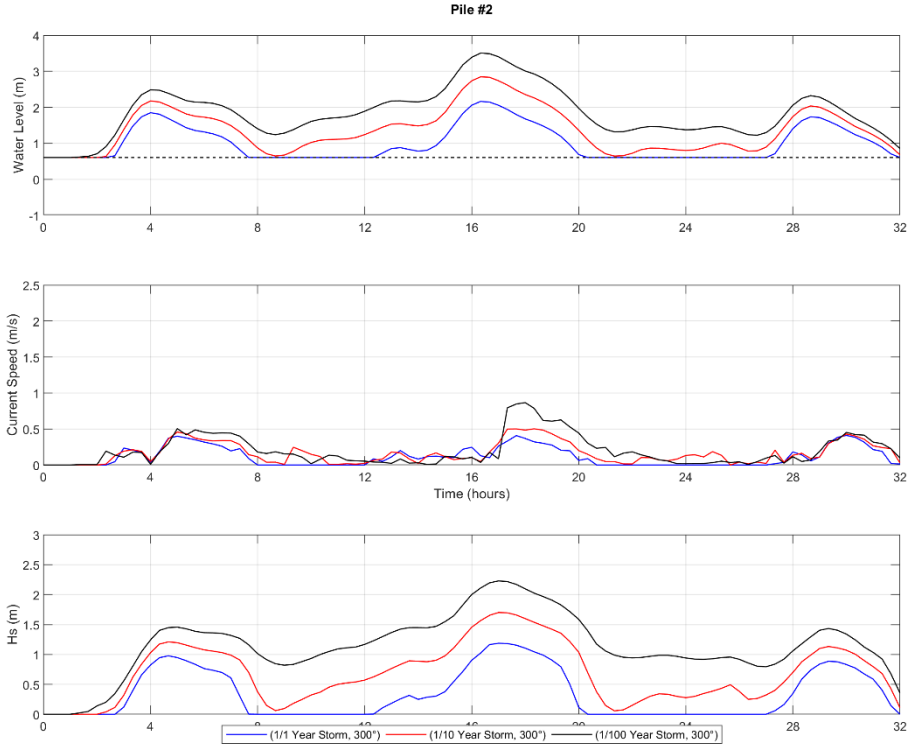

Pile #10
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Hs (m)
14/10/2011
21/10/2011
28/10/2011
04/11/2011
(Tides)
(Tides + Storm surge + Winds)
(Tides + Storm surge + Winds + Waves)

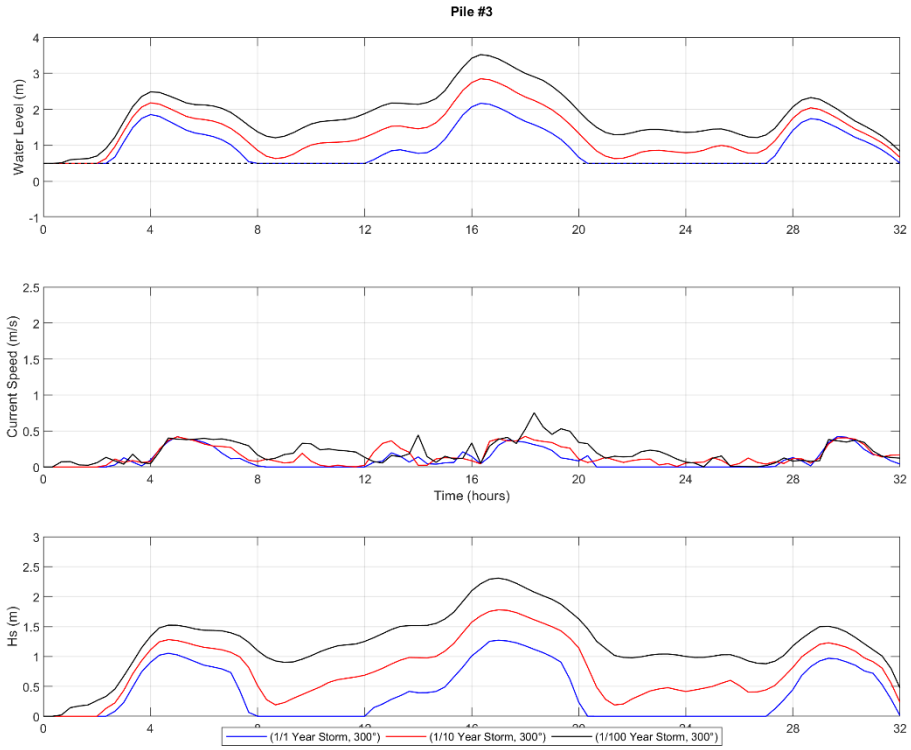

Pile #11
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Hs (m)
14/10/2011
21/10/2011
28/10/2011
04/11/2011
(Tides)
(Tides + Storm surge + Winds)
(Tides + Storm surge + Winds + Waves)

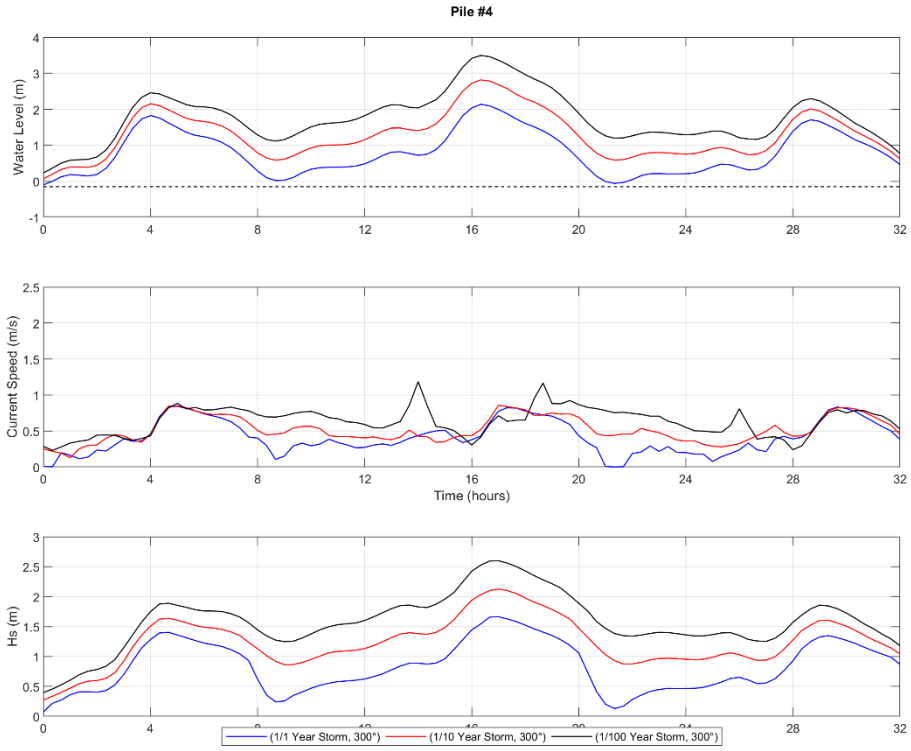

Pile #12
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Hs (m)
14/10/2011
21/10/2011
28/10/2011
04/11/2011
(Tides)
(Tides + Storm surge + Winds)
(Tides + Storm surge + Winds + Waves)

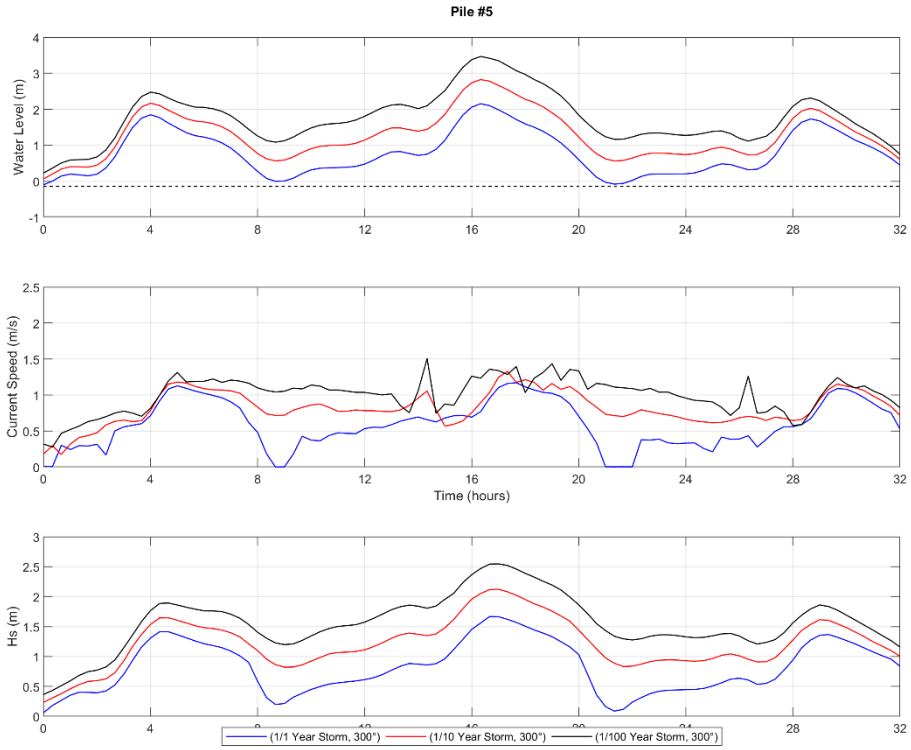
A.2.2 Scenario's 4, 5 en 6

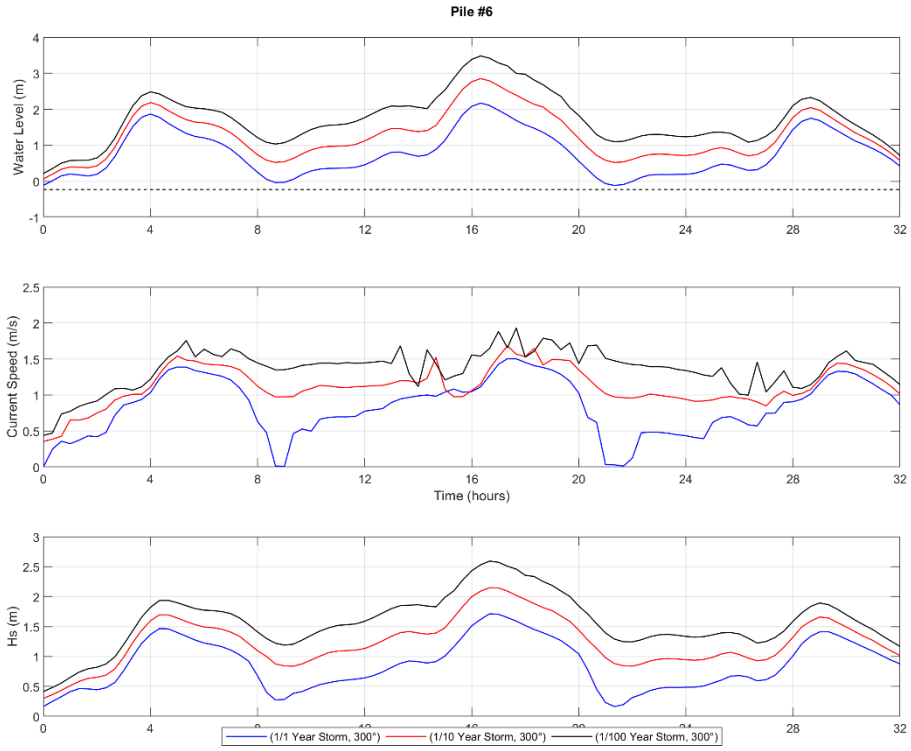


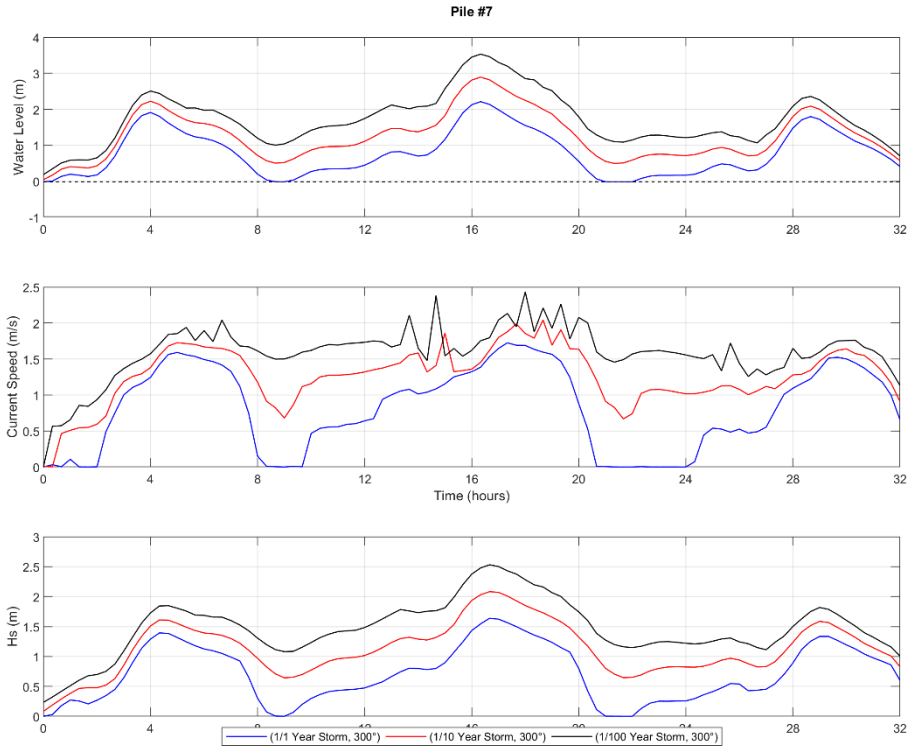


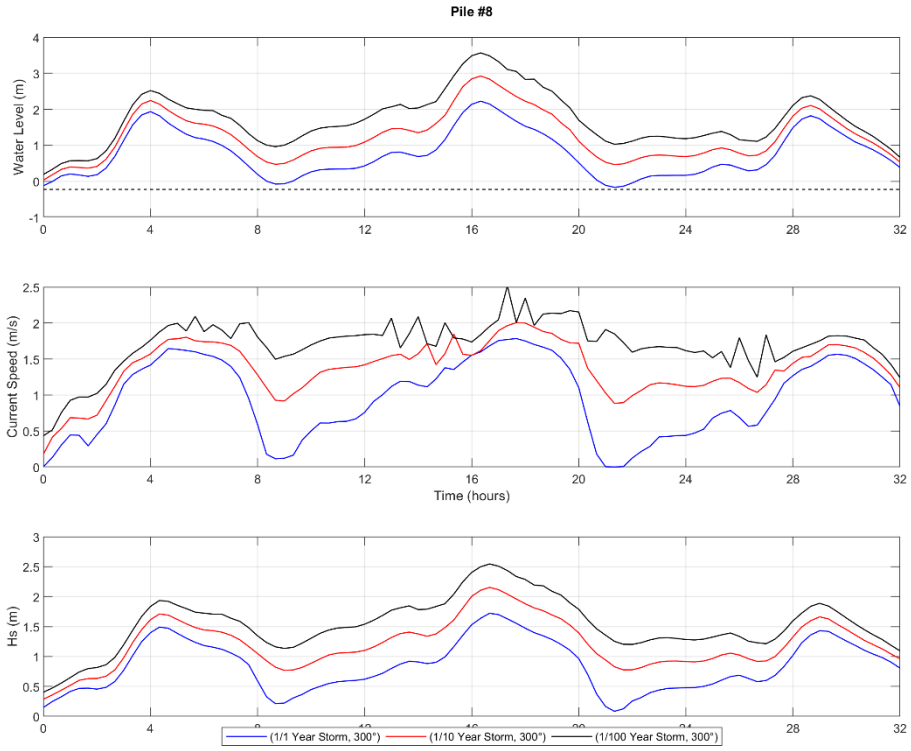

Pile #3
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Time (hours)
Hs (m)
(1/1 Year Storm, 300°)
(1/10 Year Storm, 300°)
(1/100 Year Storm, 300°)

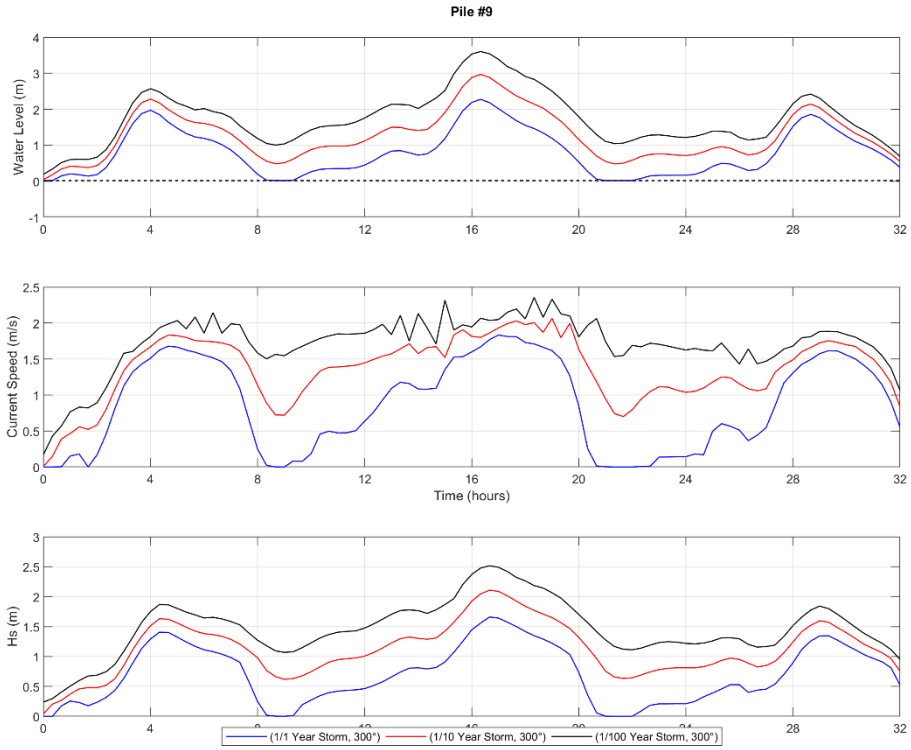

Pile #4
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Time (hours)
Hs (m)
(1/1 Year Storm, 300°)
(1/10 Year Storm, 300°)
(1/100 Year Storm, 300°)

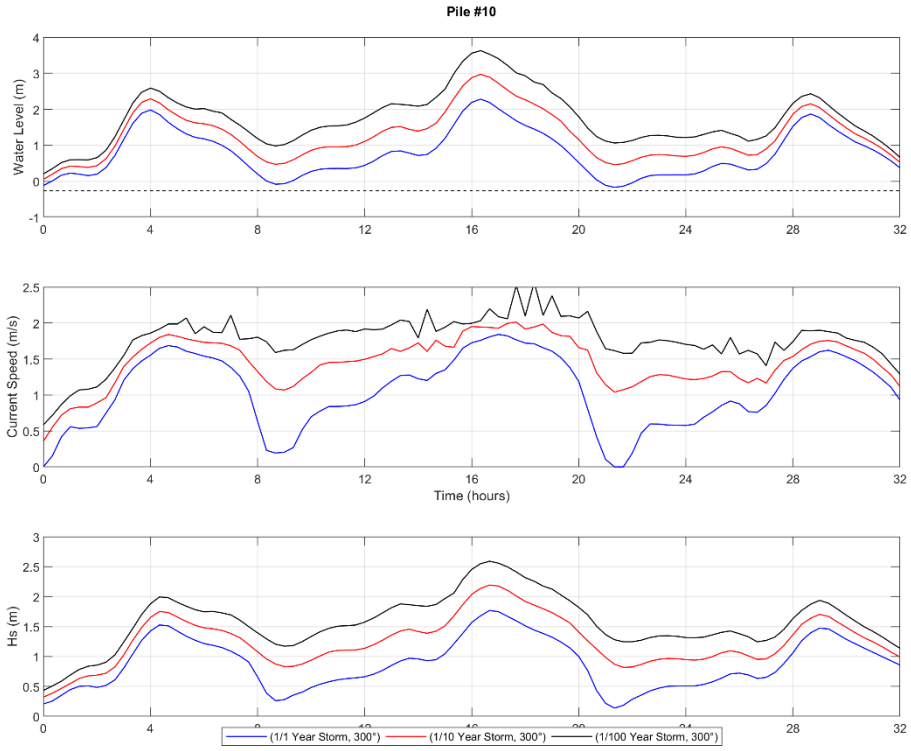

Pile #5
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Time (hours)
Hs (m)
(1/1 Year Storm, 300°)
(1/10 Year Storm, 300°)
(1/100 Year Storm, 300°)

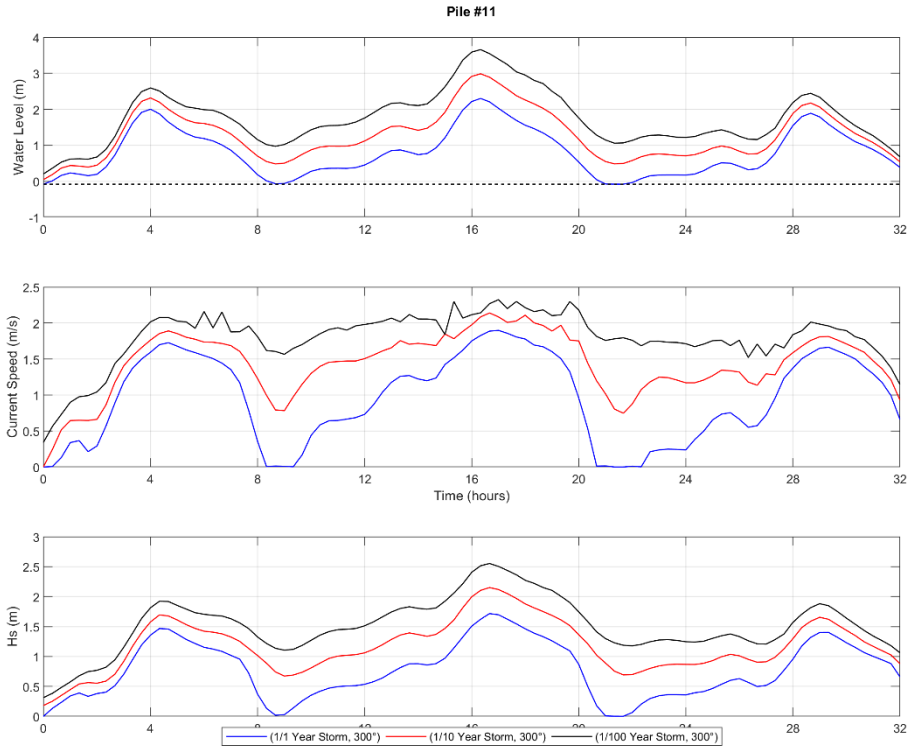

Pile #6
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Time (hours)
Hs (m)
(1/1 Year Storm, 300°)
(1/10 Year Storm, 300°)
(1/100 Year Storm, 300°)

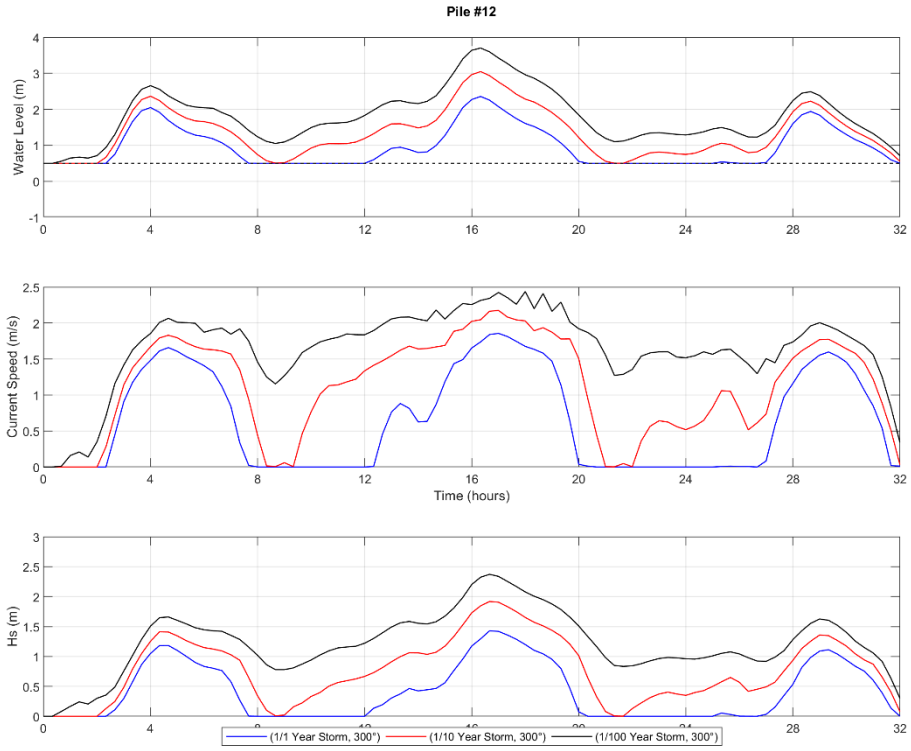

Pile #7
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Time (hours)
Hs (m)
(1/1 Year Storm, 300°)
(1/10 Year Storm, 300°)
(1/100 Year Storm, 300°)


Pile #8
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Time (hours)
Hs (m)
(1/1 Year Storm, 300°)
(1/10 Year Storm, 300°)
(1/100 Year Storm, 300°)


Pile #9
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Time (hours)
Hs (m)
(1/1 Year Storm, 300°)
(1/10 Year Storm, 300°)
(1/100 Year Storm, 300°)


Pile #10
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Time (hours)
Hs (m)
(1/1 Year Storm, 300°)
(1/10 Year Storm, 300°)
(1/100 Year Storm, 300°)


Pile #11
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Time (hours)
Hs (m)
(1/1 Year Storm, 300°)
(1/10 Year Storm, 300°)
(1/100 Year Storm, 300°)


Pile #12
Water Level (m)
Current Speed (m/s)
Time (hours)
Hs (m)
(1/1 Year Storm, 300°)
(1/10 Year Storm, 300°)
(1/100 Year Storm, 300°)

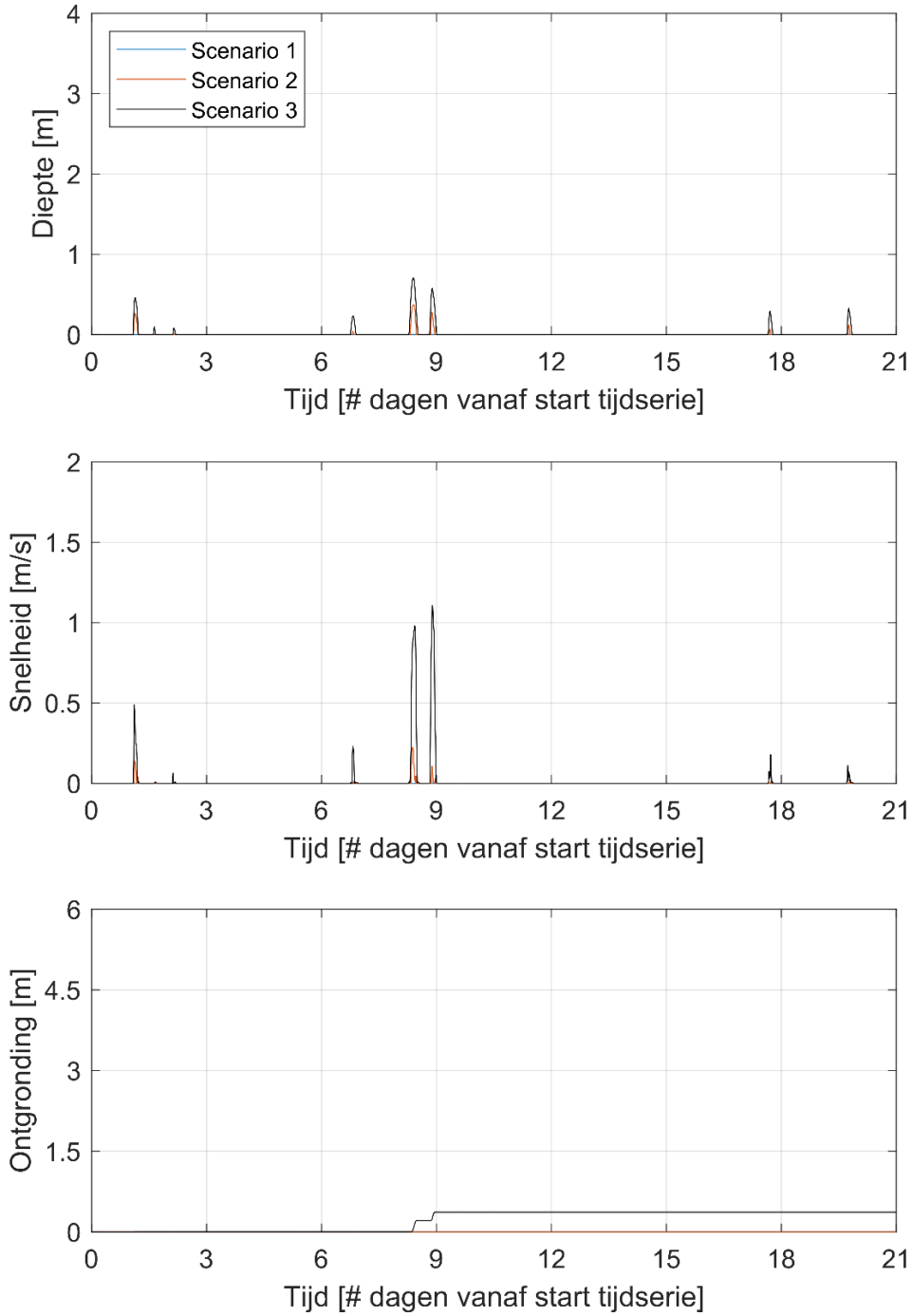
B Ontgrondingsgrafieken per windturbine

In deze bijlage worden ontgronding grafieken per windturbine gepresenteerd voor de twee beschouwde bodems. Deze bijlage bevat de volgende figuren:

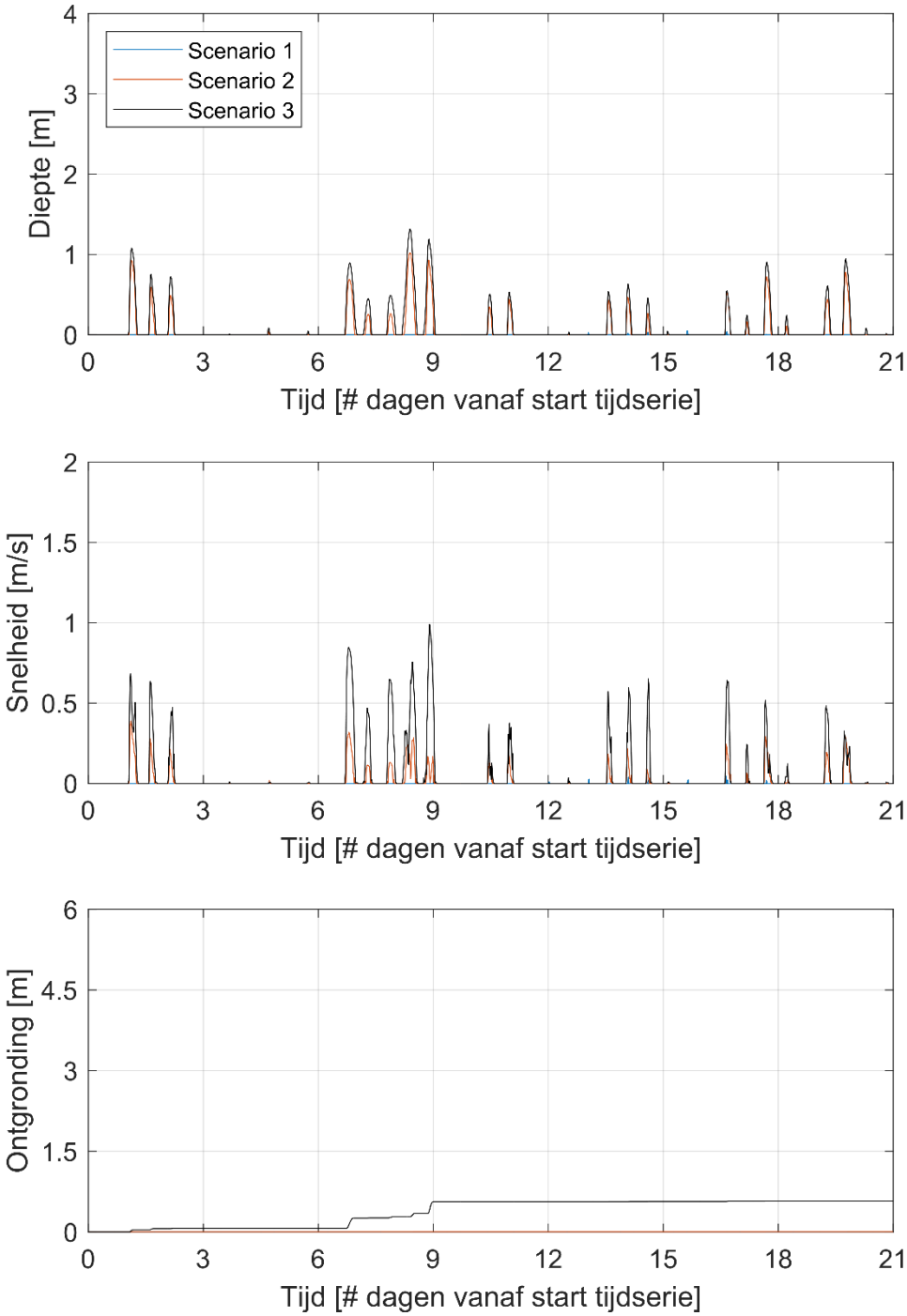
- Ontgronding per turbine voor scenario 1-3
- Ruimtelijk beeld van de ontgrondingen voor scenario 4-6 (1-, 10-, 100-jaarsstorm)
- Ontgronding per turbine inclusief onzekerheid voor de stormcondities.

B.1 Ontgrondingen per turbine voor scenario's 1-3

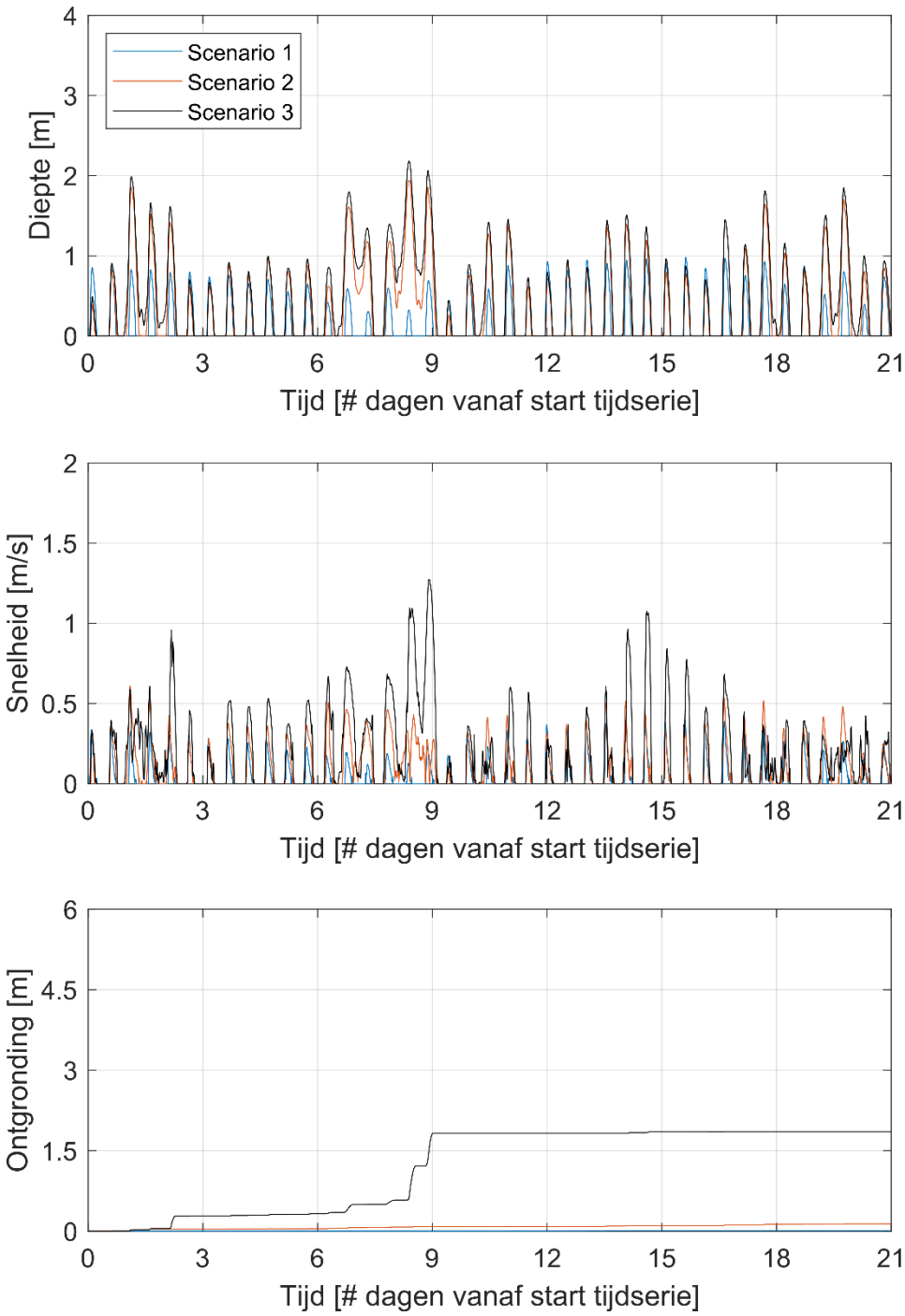
B.1.1.1. Bodemligging 2019



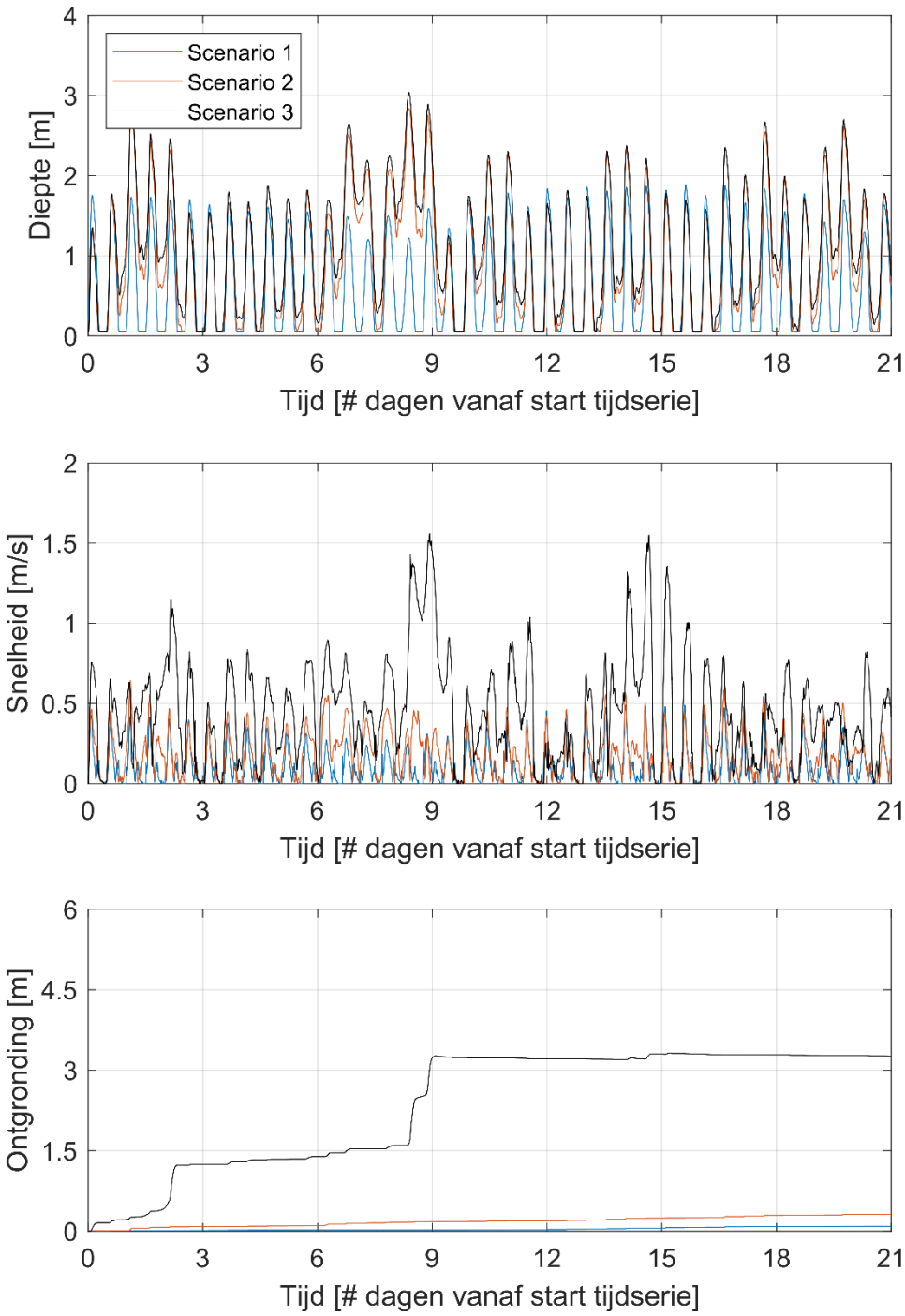
Figuur 7.1 Ontgronding voor windturbine 1 voor scenario 1-3



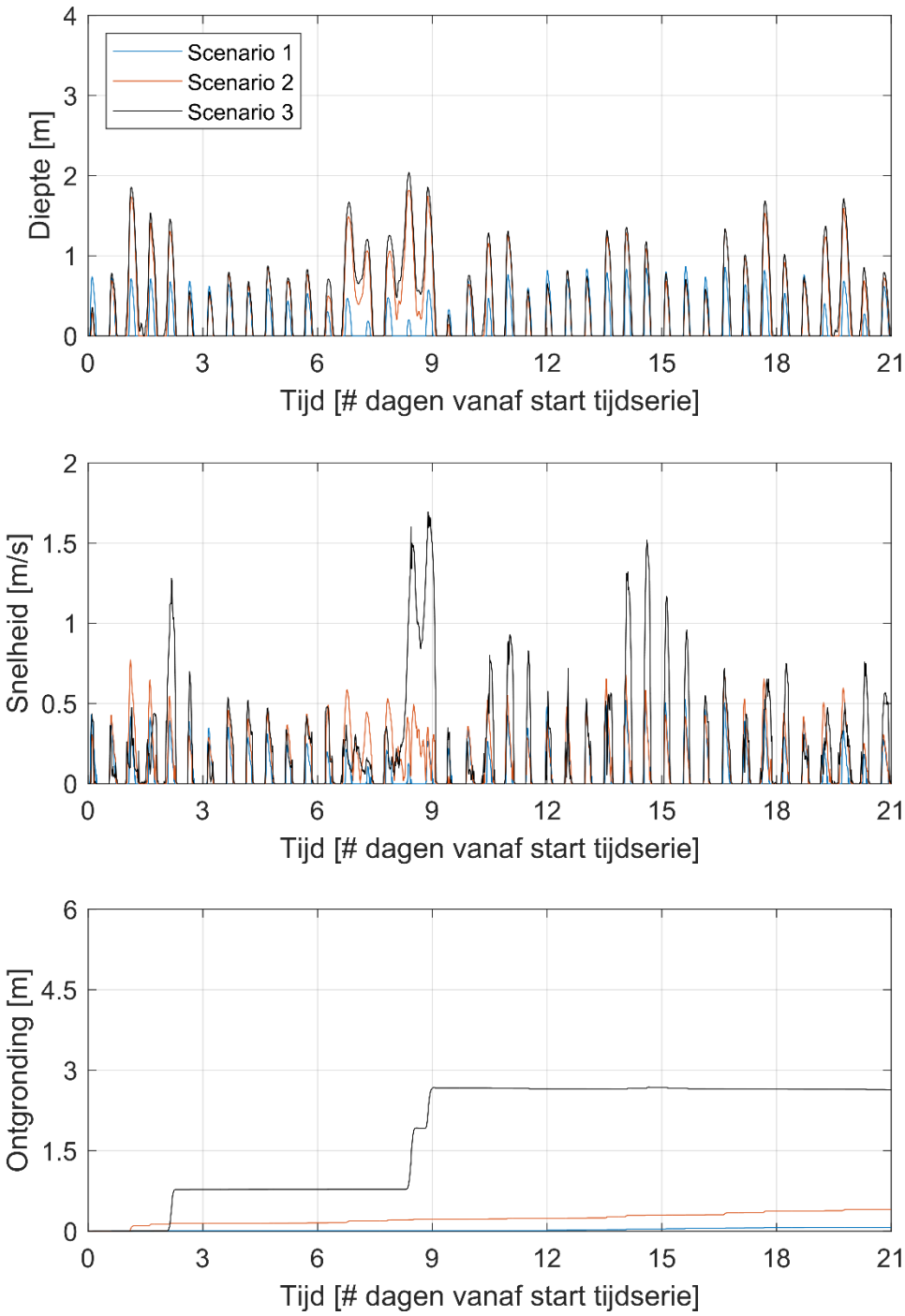
Figuur 7.2 - Ontgronding voor windturbine 2 voor scenario 1-3



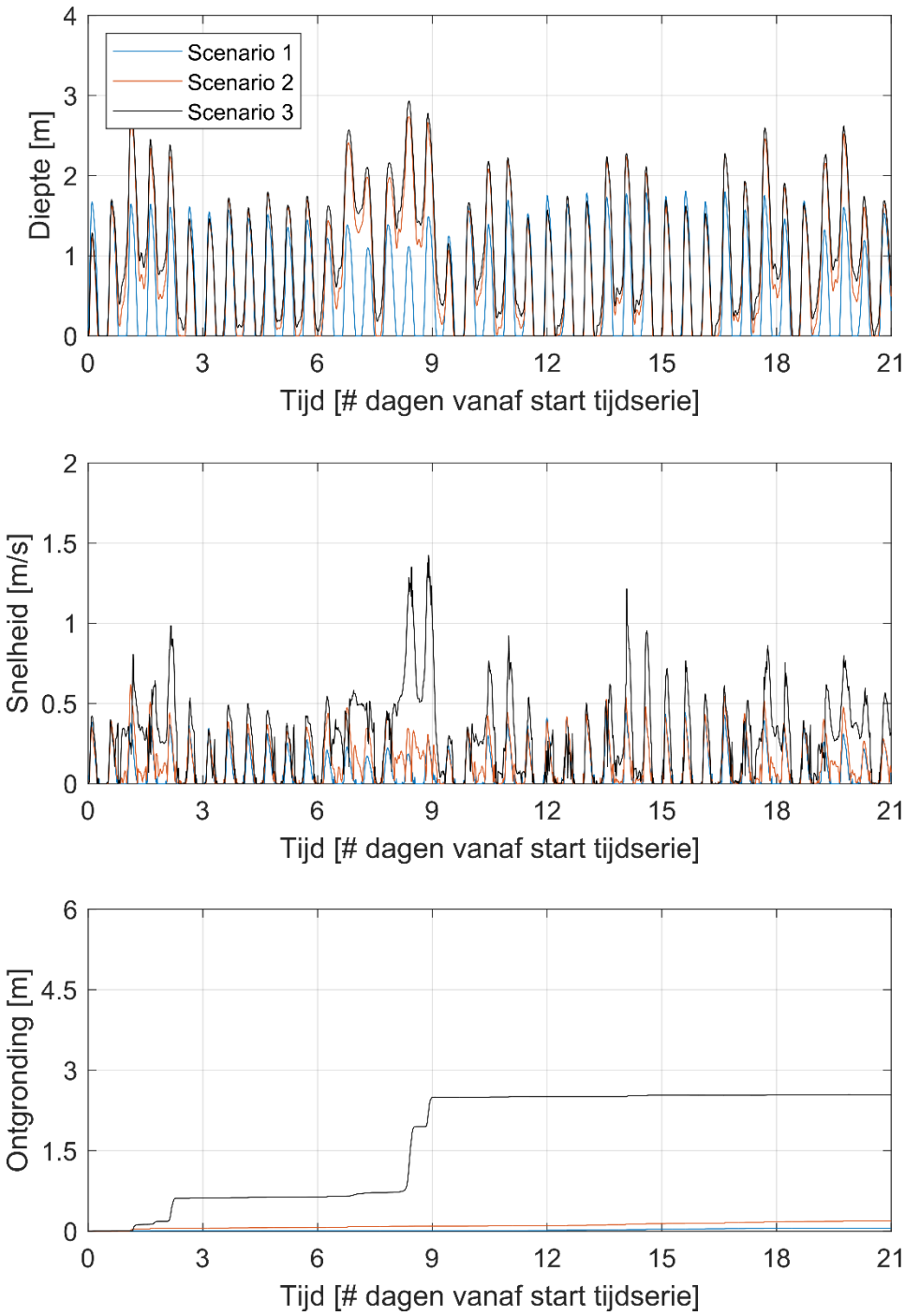
Figuur 7.3 Ontgronding voor windturbine 3 voor scenario 1-3



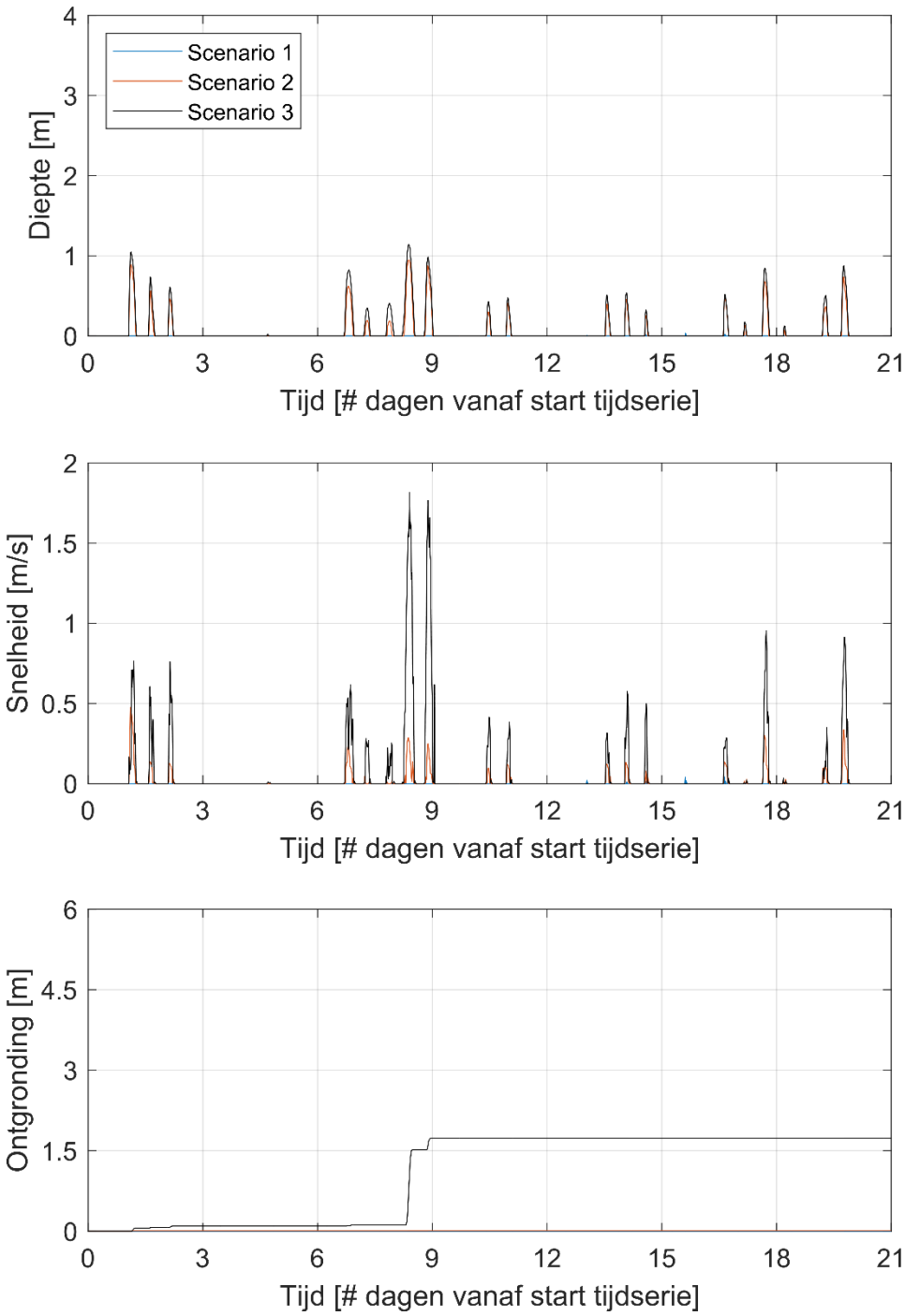
Figuur 7.4 Ontgronding voor windturbine 4 voor scenario 1-3



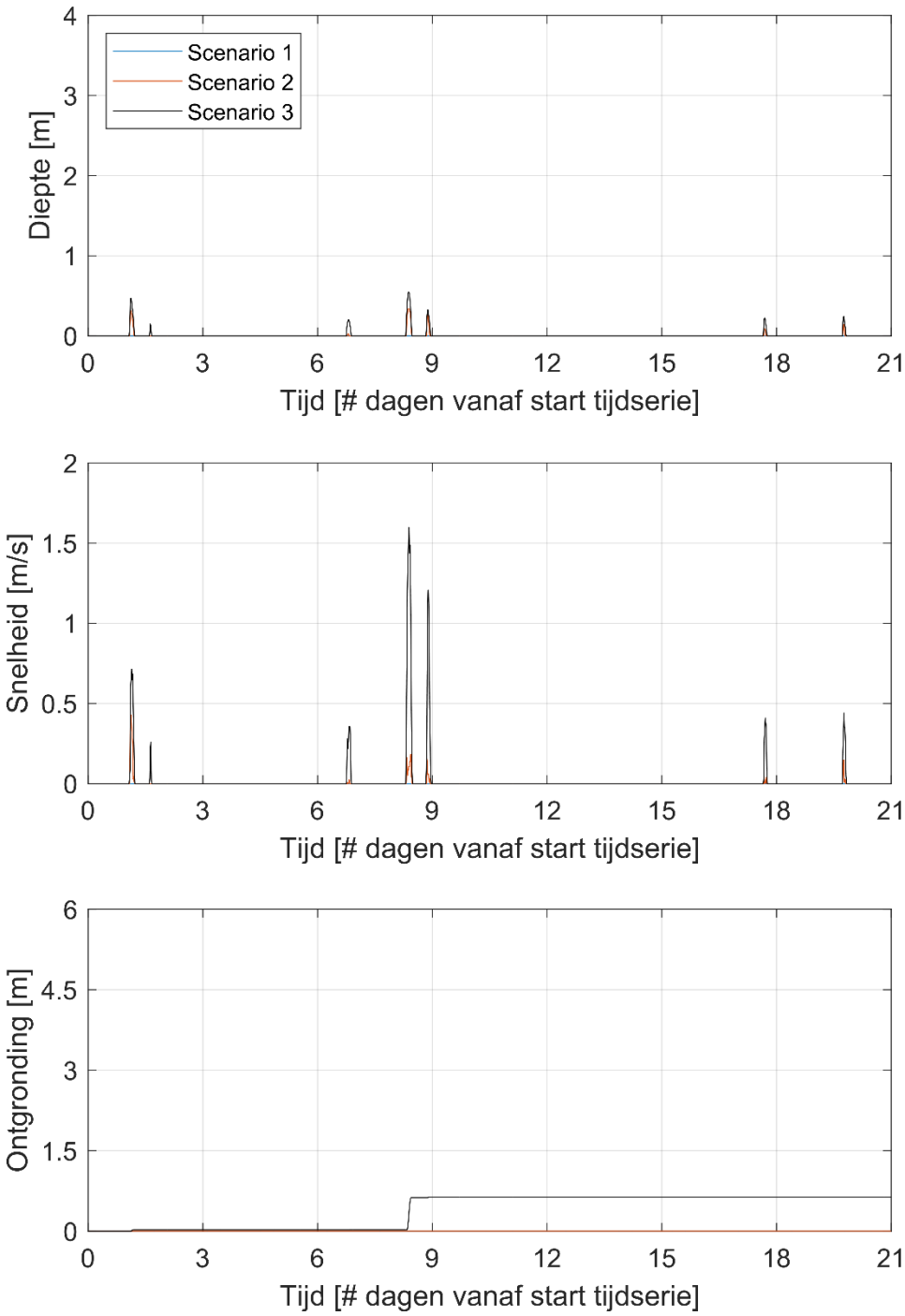
Figuur 7.5 Ontgronding voor windturbine 5 voor scenario 1-3



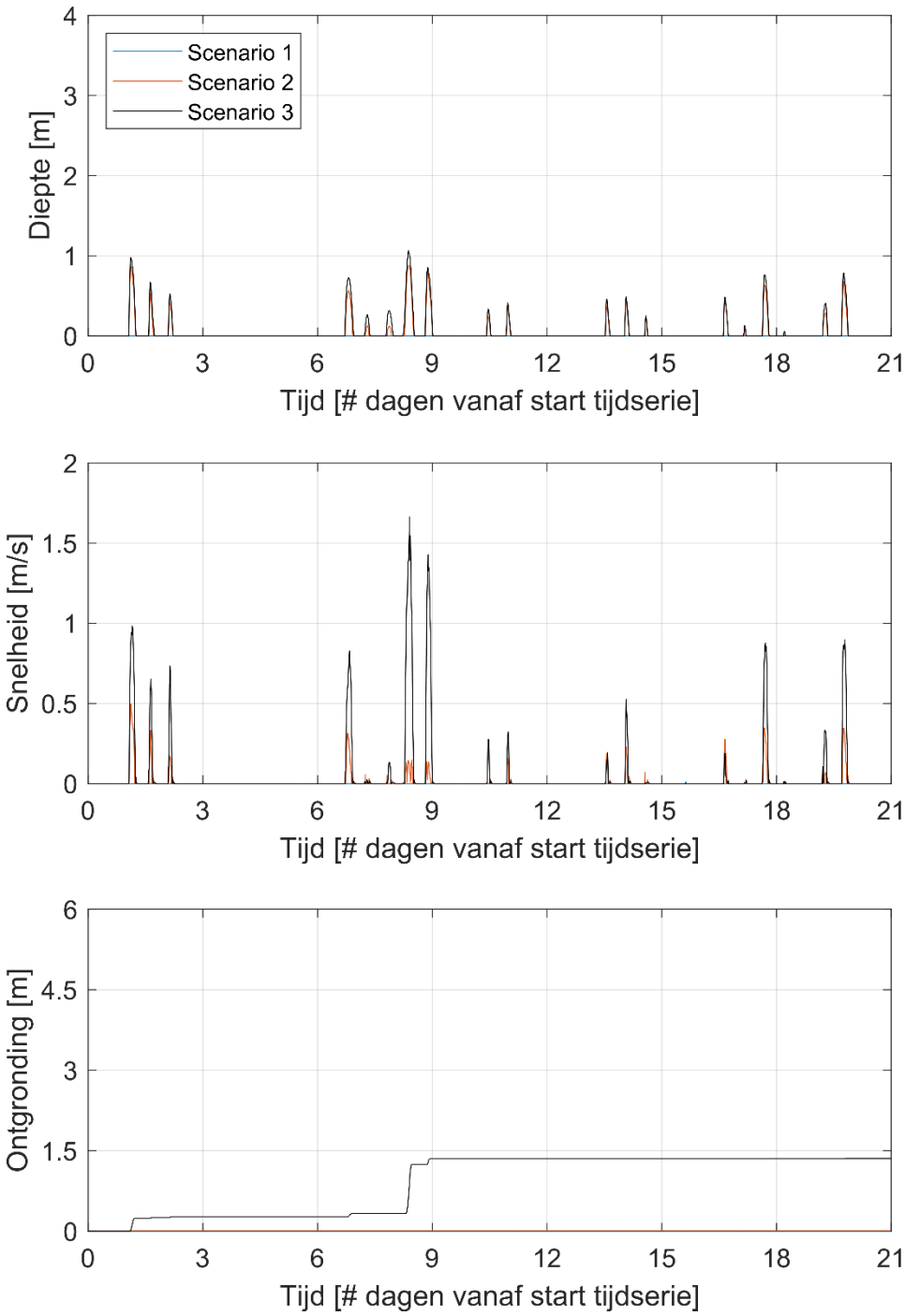
Figuur 7.6 Ontgronding voor windturbine 6 voor scenario 1-3



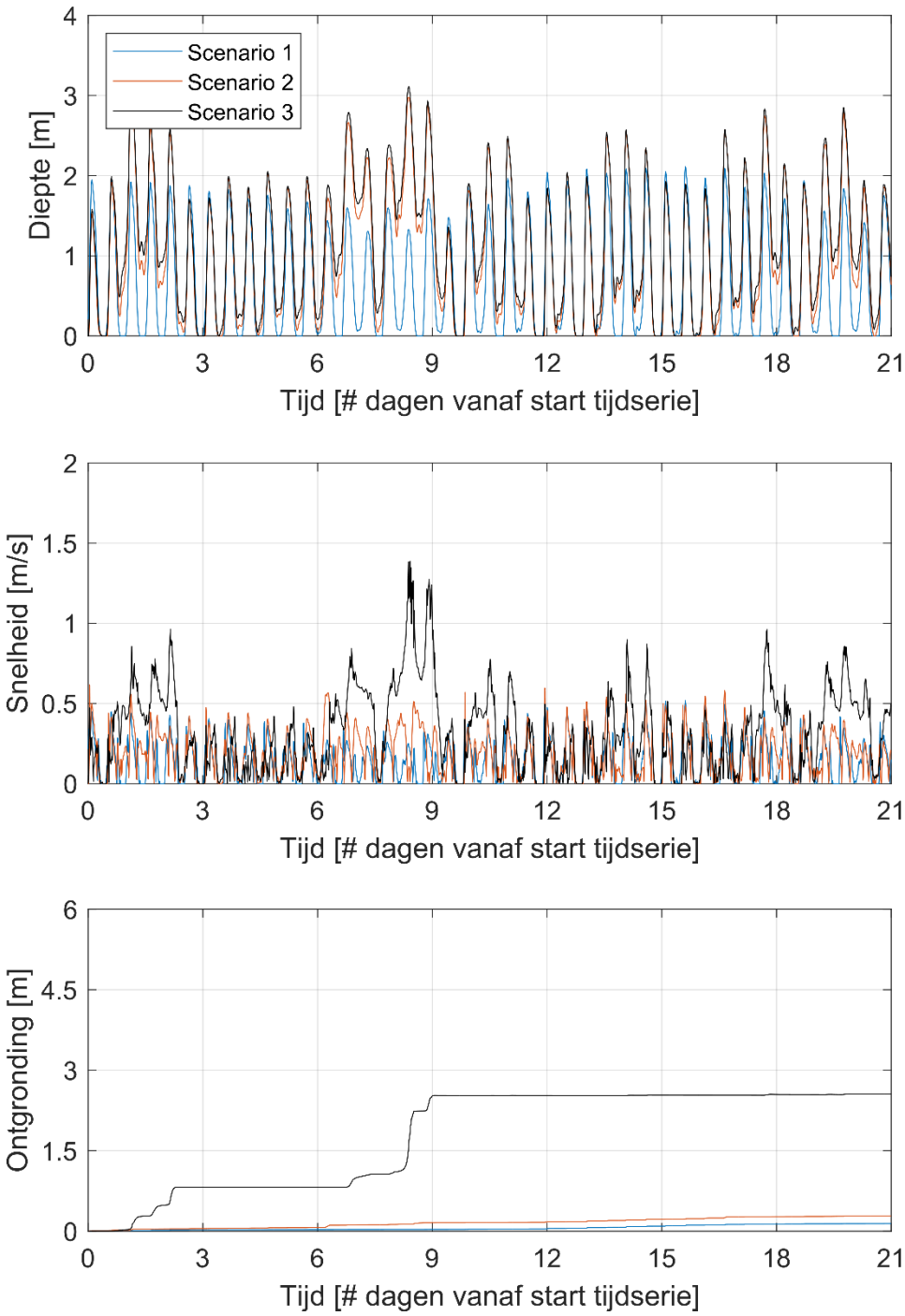
Figuur 7.7 Ontgronding voor windturbine 7 voor scenario 1-3



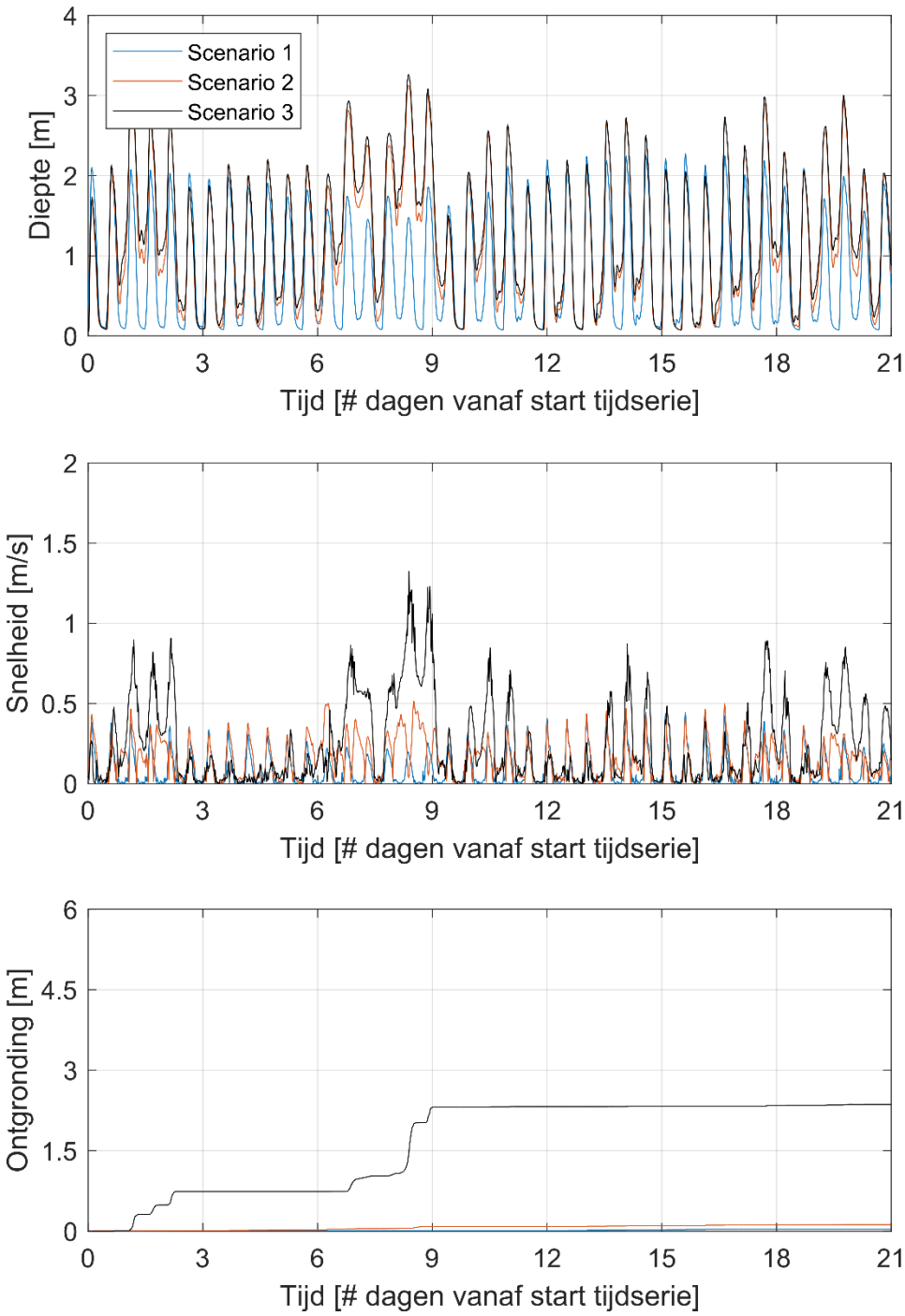
Figuur 7.8 Ontgronding voor windturbine 8 voor scenario 1-3



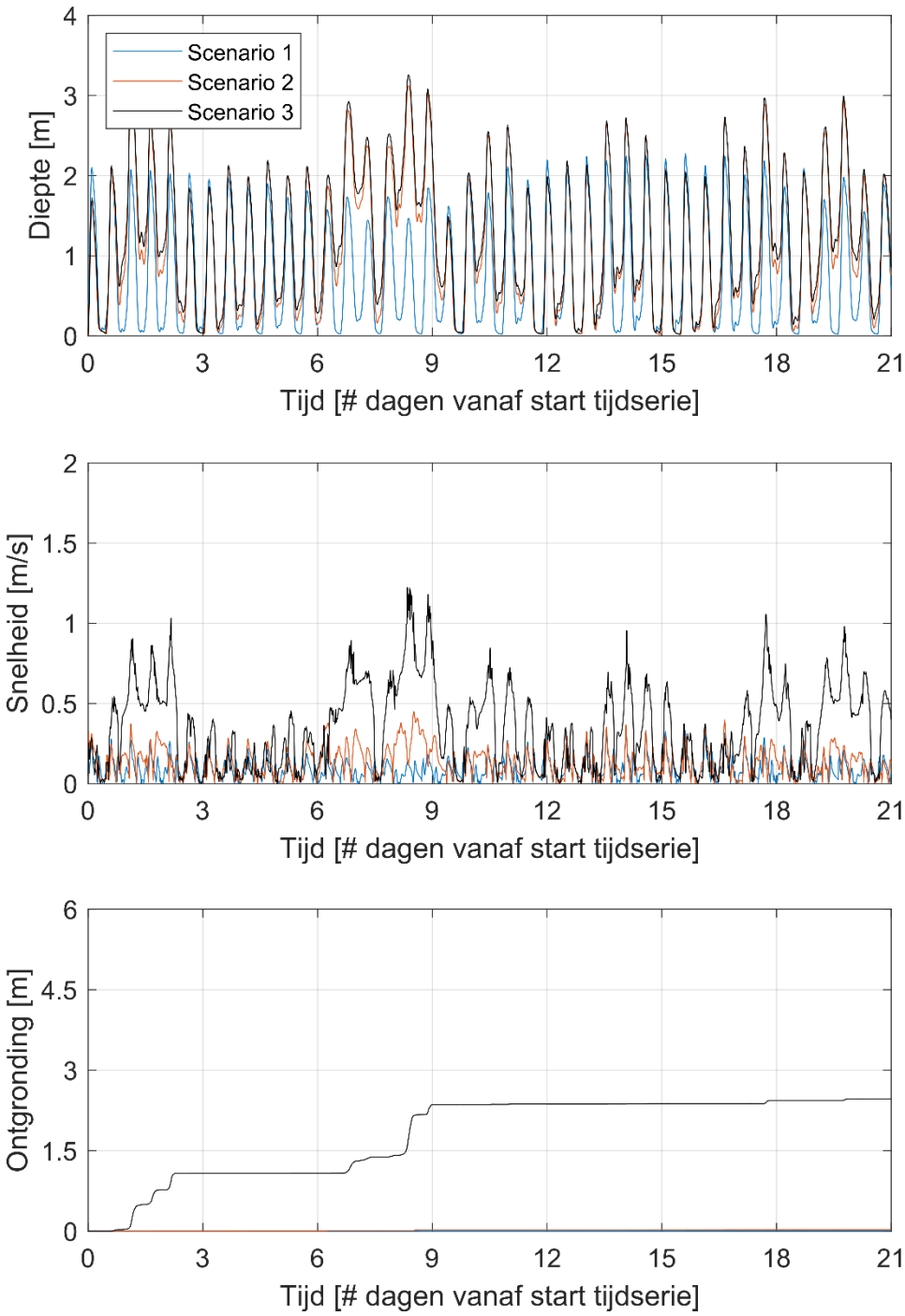
Figuur 7.9 Ontgronding voor windturbine 9 voor scenario 1-3



Figuur 7.10 Ontgronding voor windturbine 10 voor scenario 1-3

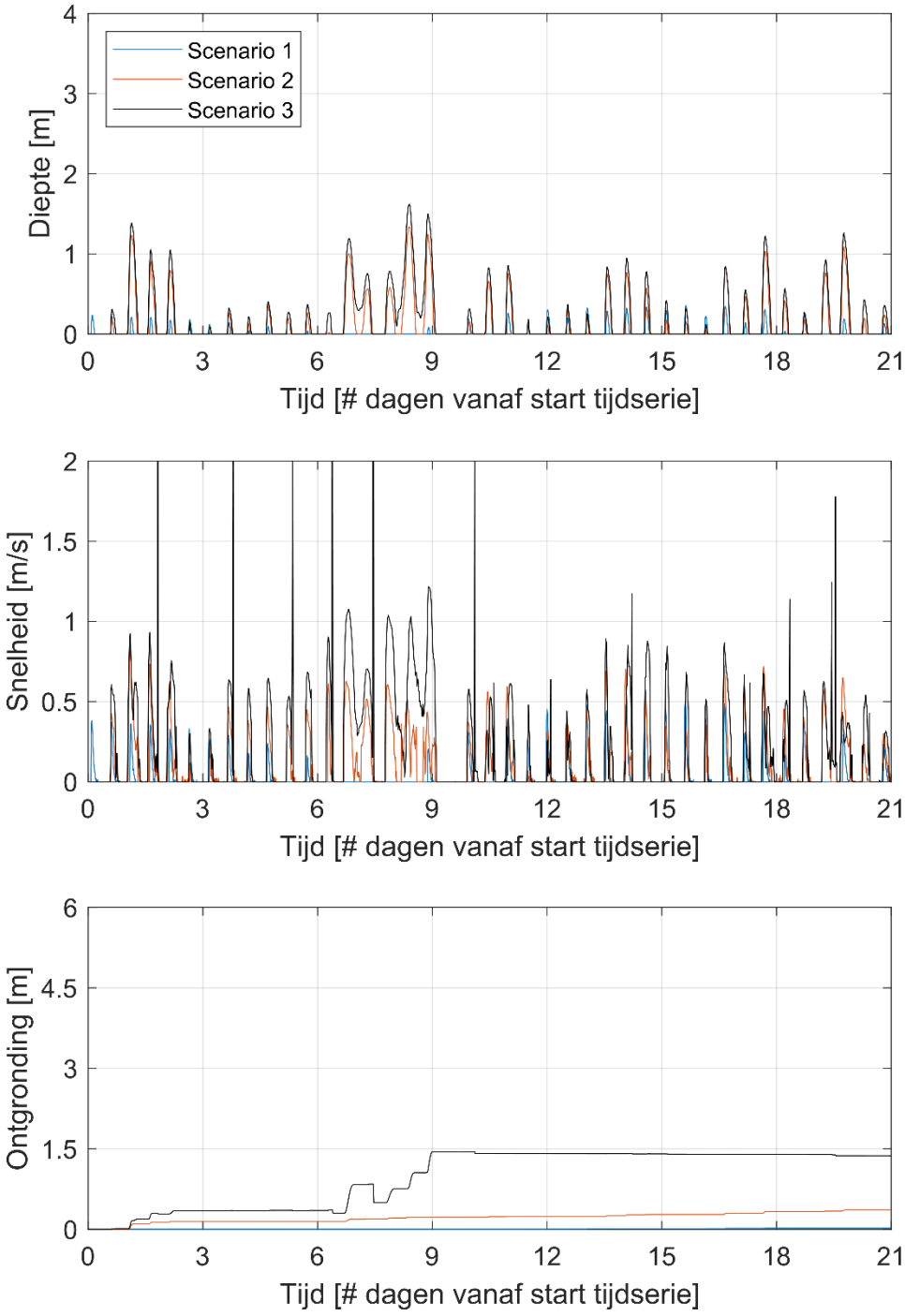


Figuur 7.11 Ontgronding voor windturbine 11 voor scenario 1-3

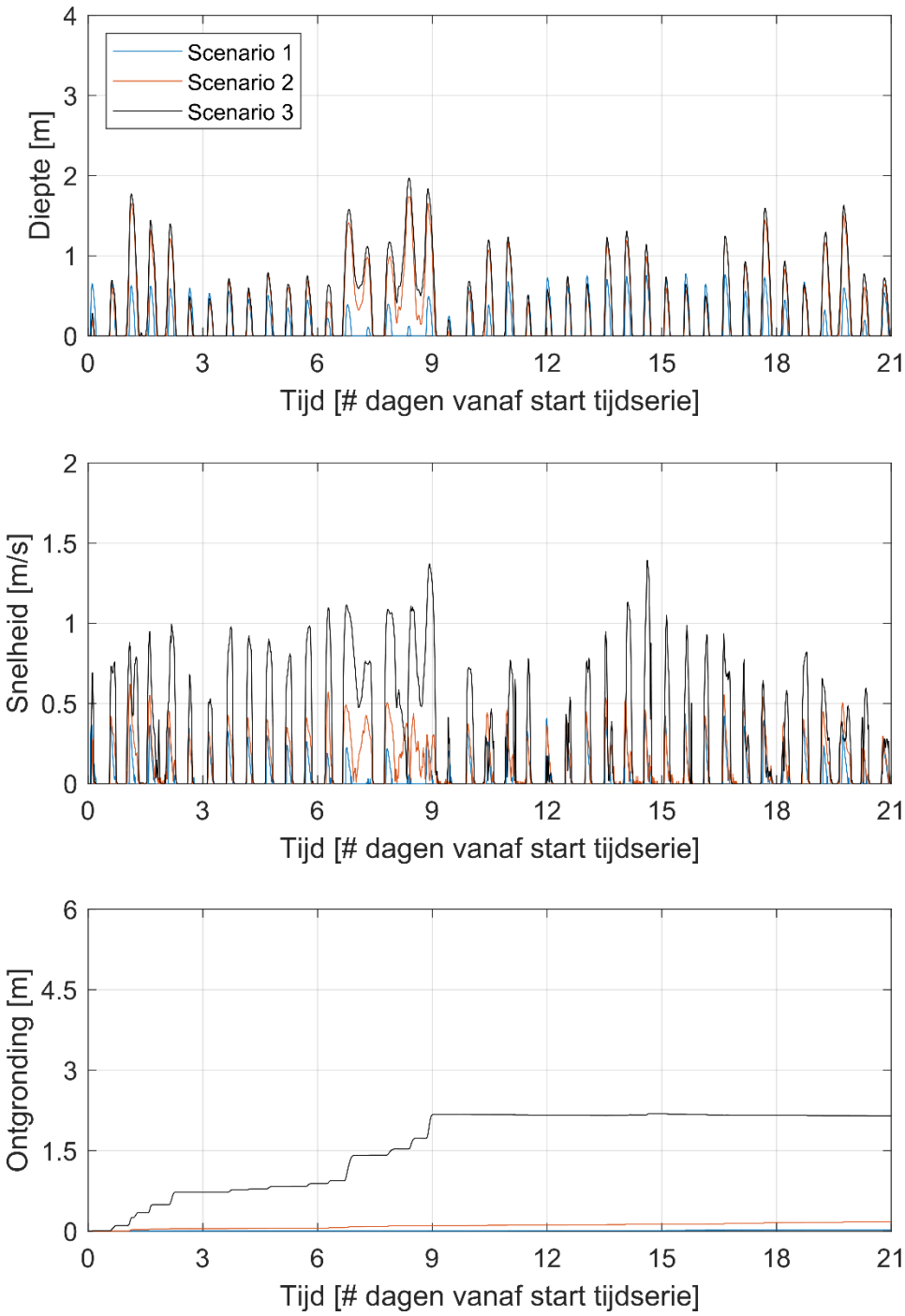


Figuur 7.12 Ontgronding voor windturbine 12 voor scenario 1-3

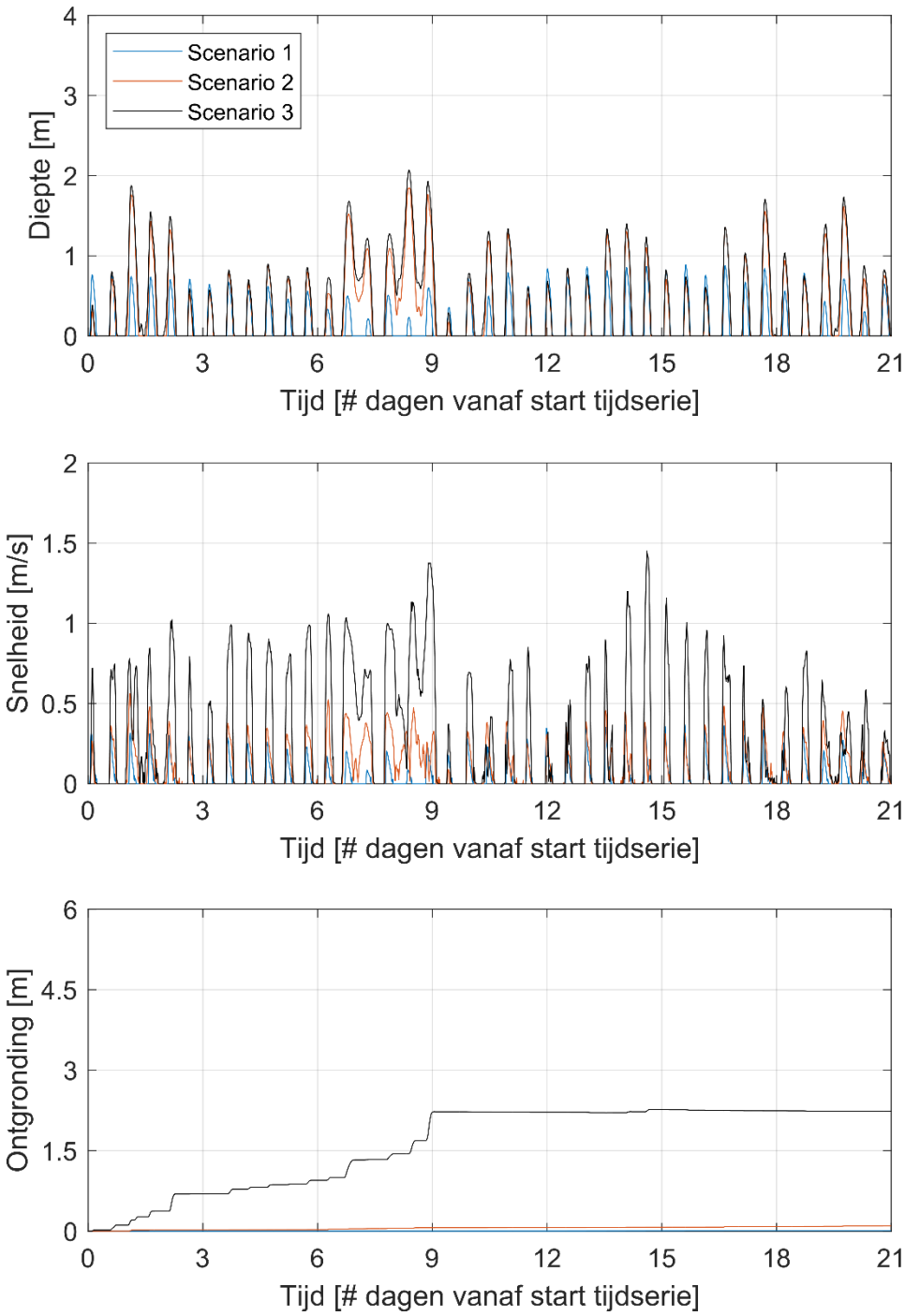
B.1.1.2. Ontwerpbodem



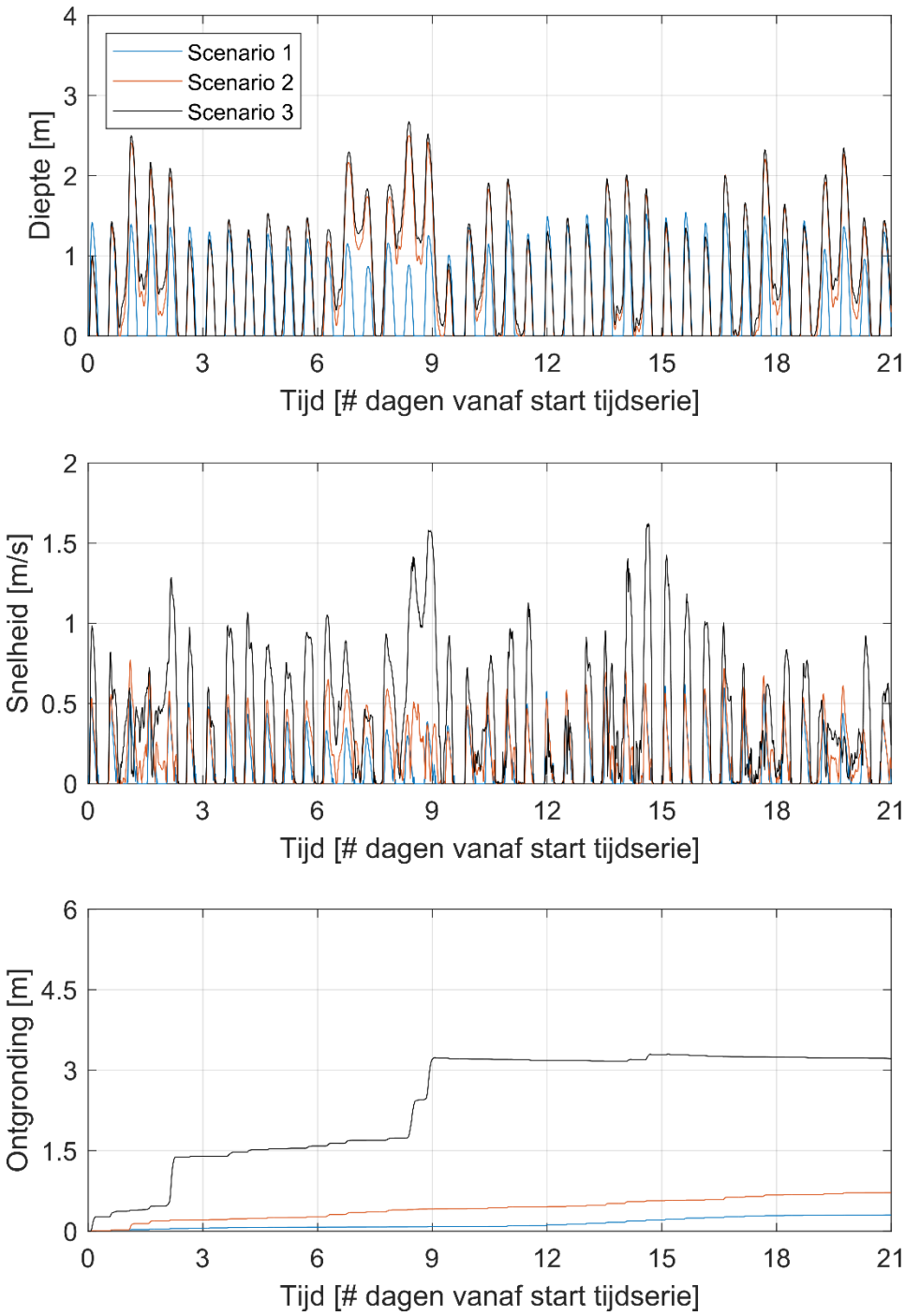
Figuur 7.13 Ontgronding voor windturbine 1 voor scenario 1-3.



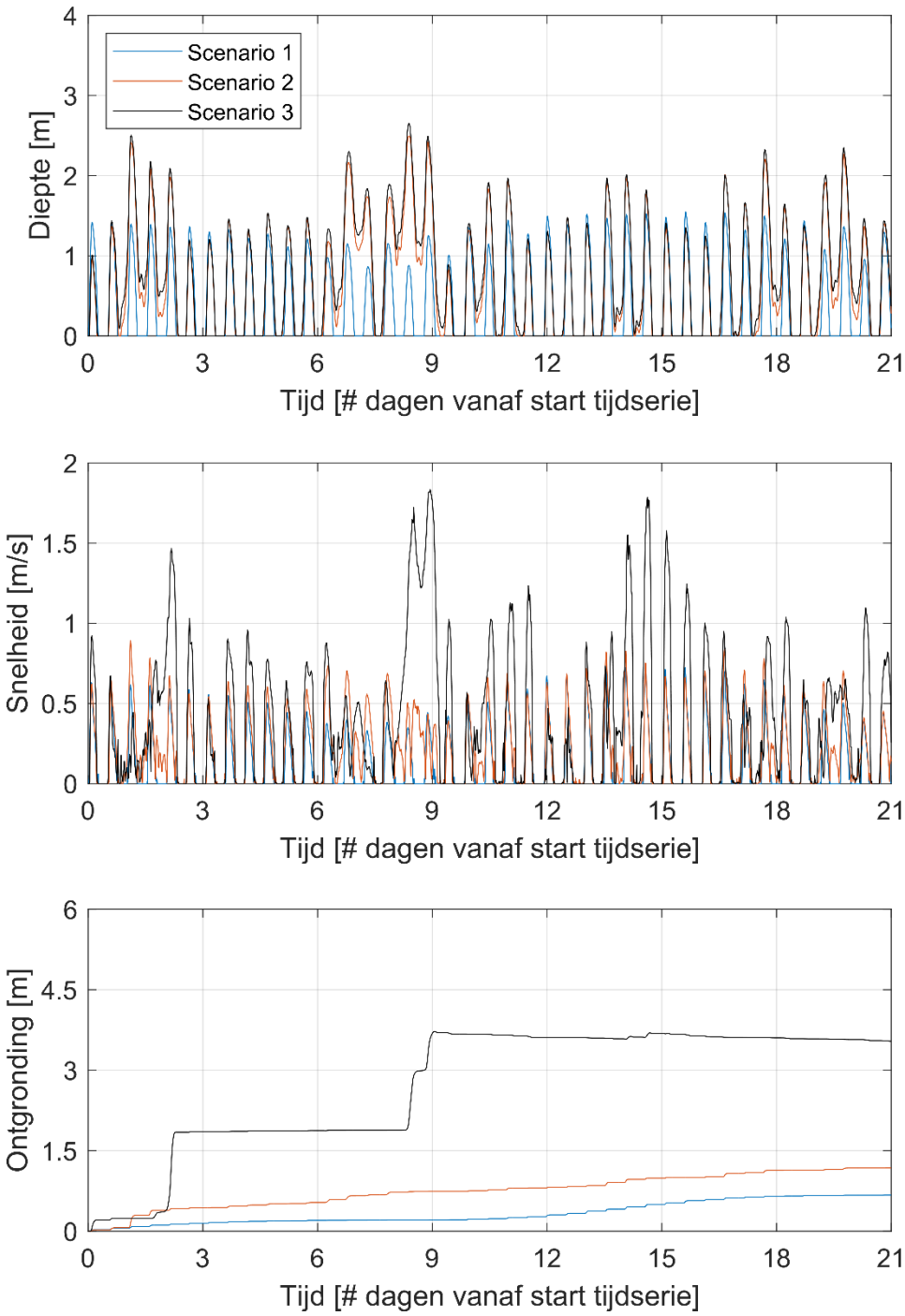
Figuur 7.14 Ontgronding voor windturbine 2 voor scenario 1-3



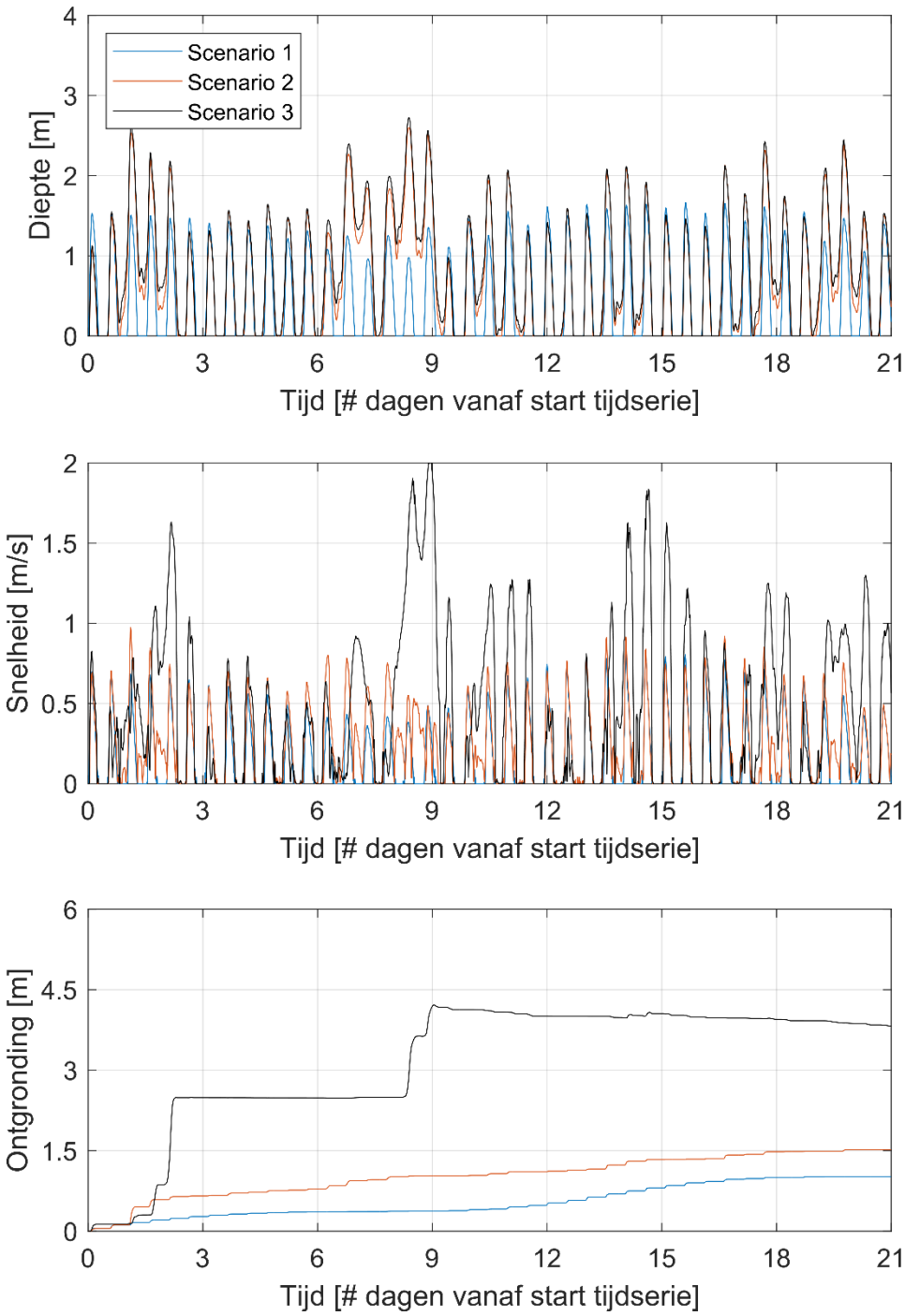
Figuur 7.15 Ontgronding voor windturbine 3 voor scenario 1-3



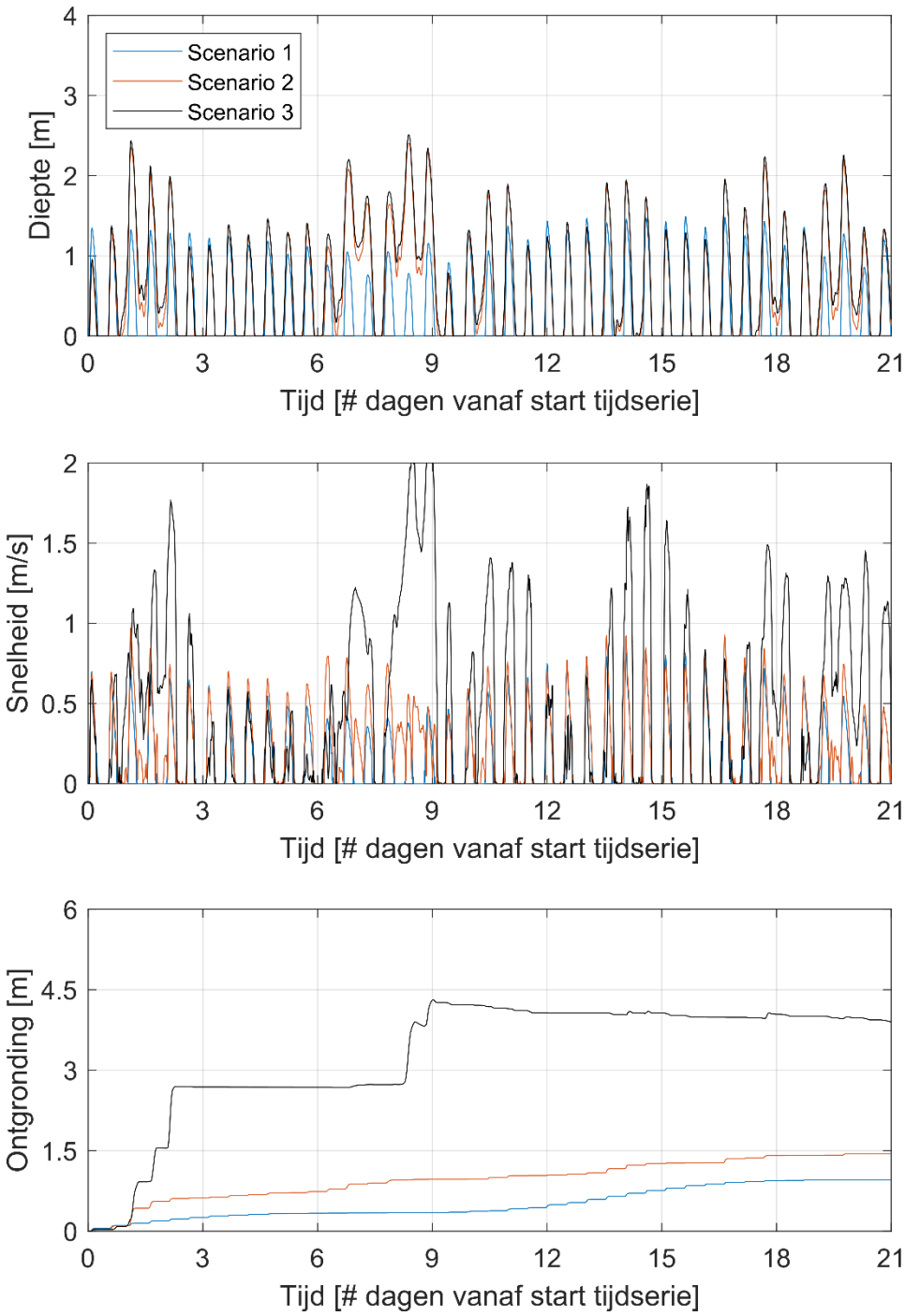
Figuur 7.16 Ontgronding voor windturbine 4 voor scenario 1-3



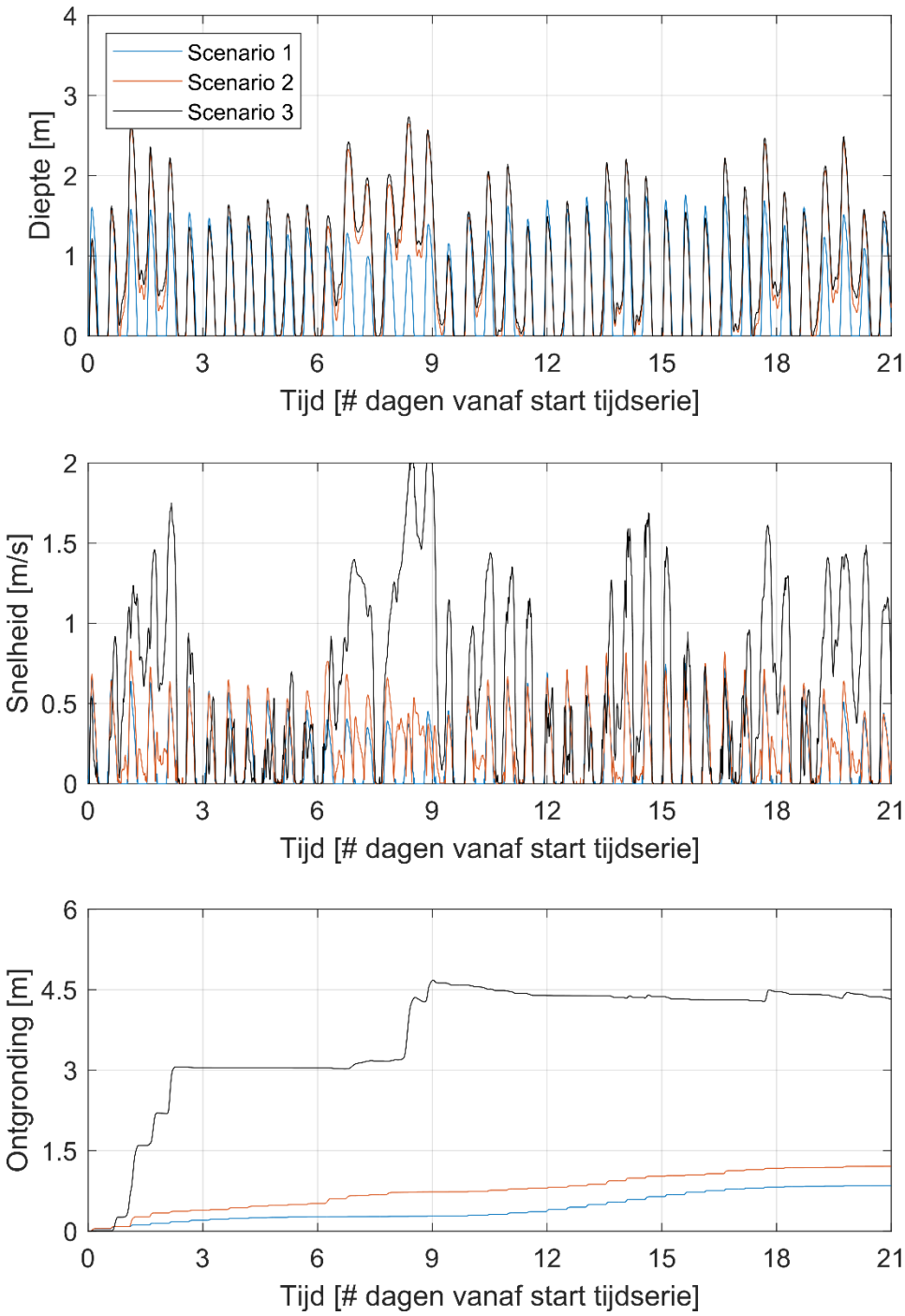
Figuur 7.17 Ontgronding voor windturbine 5 voor scenario 1-3



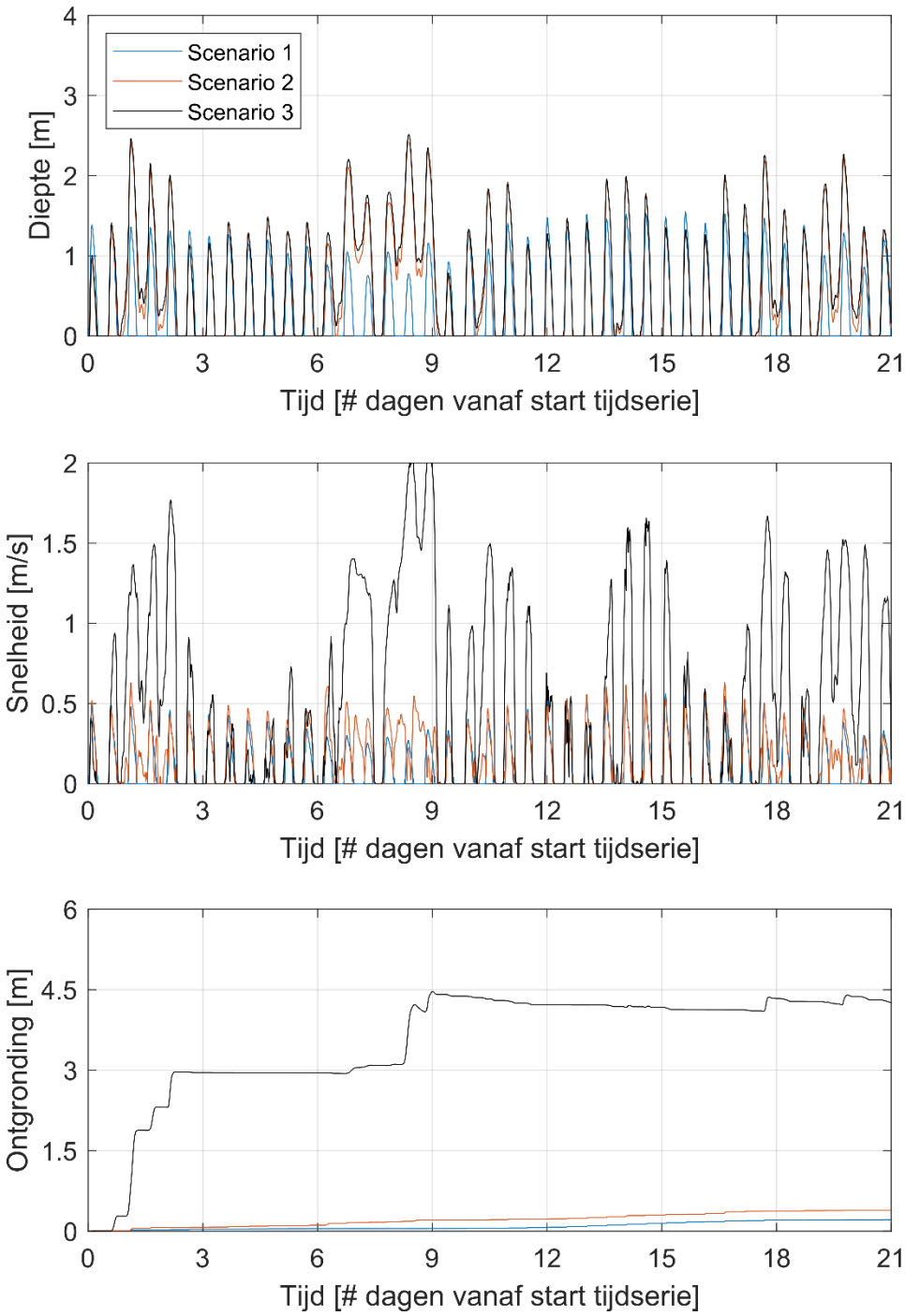
Figuur 7.18 Ontgronding voor windturbine 6 voor scenario 1-3



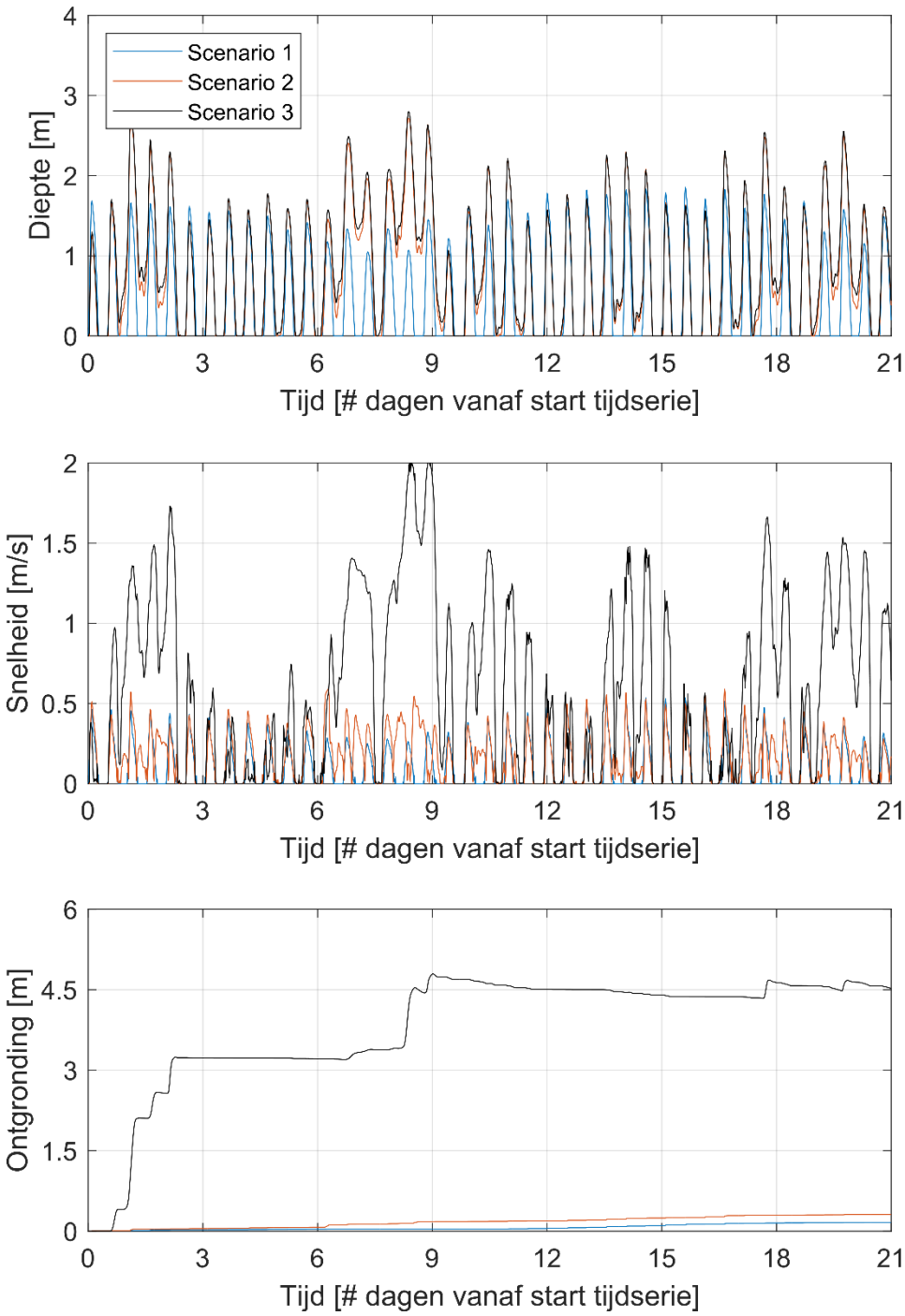
Figuur 7.19 Ontgronding voor windturbine 7 voor scenario 1-3



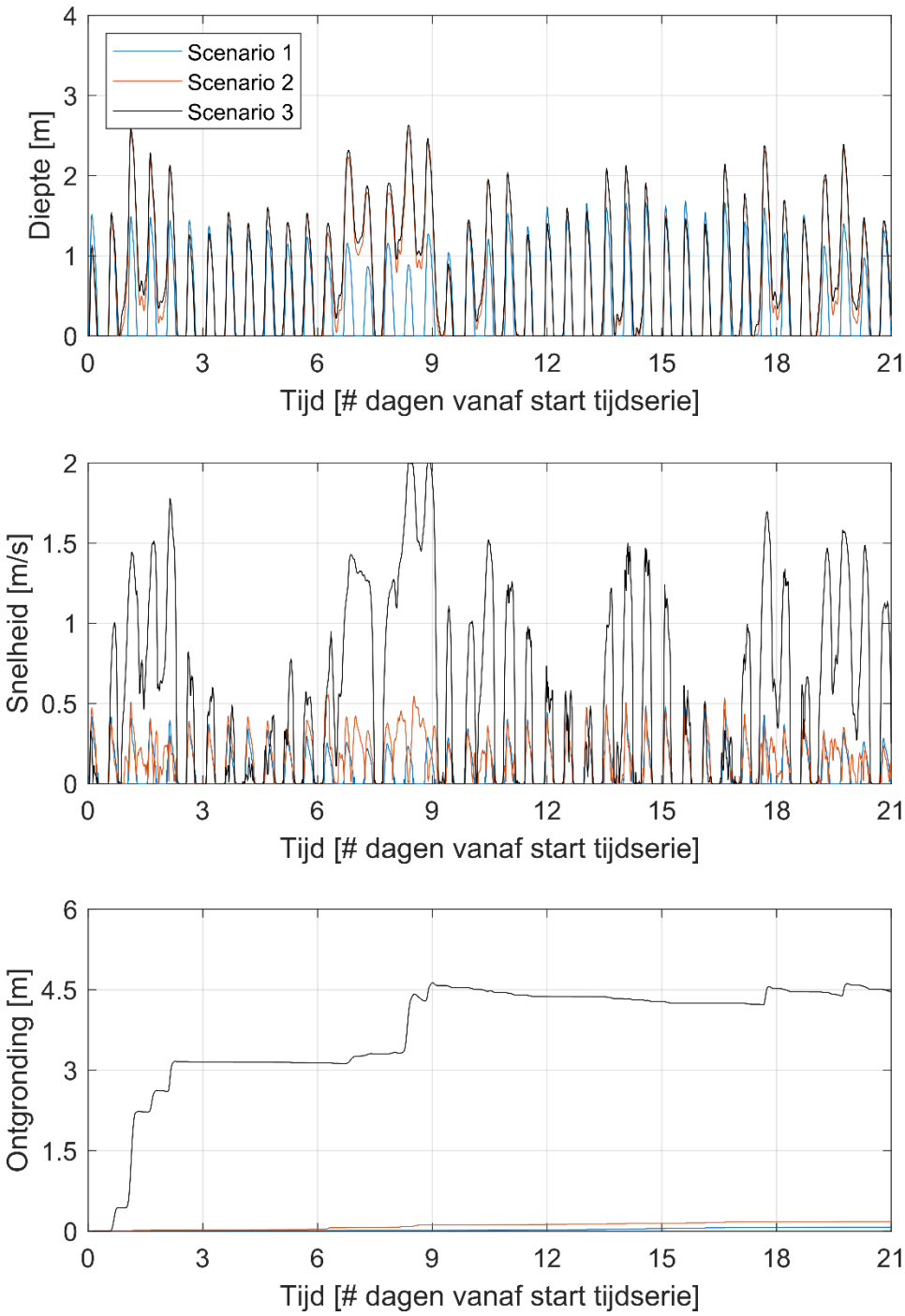
Figuur 7.20 Ontgronding voor windturbine 8 voor scenario 1-3



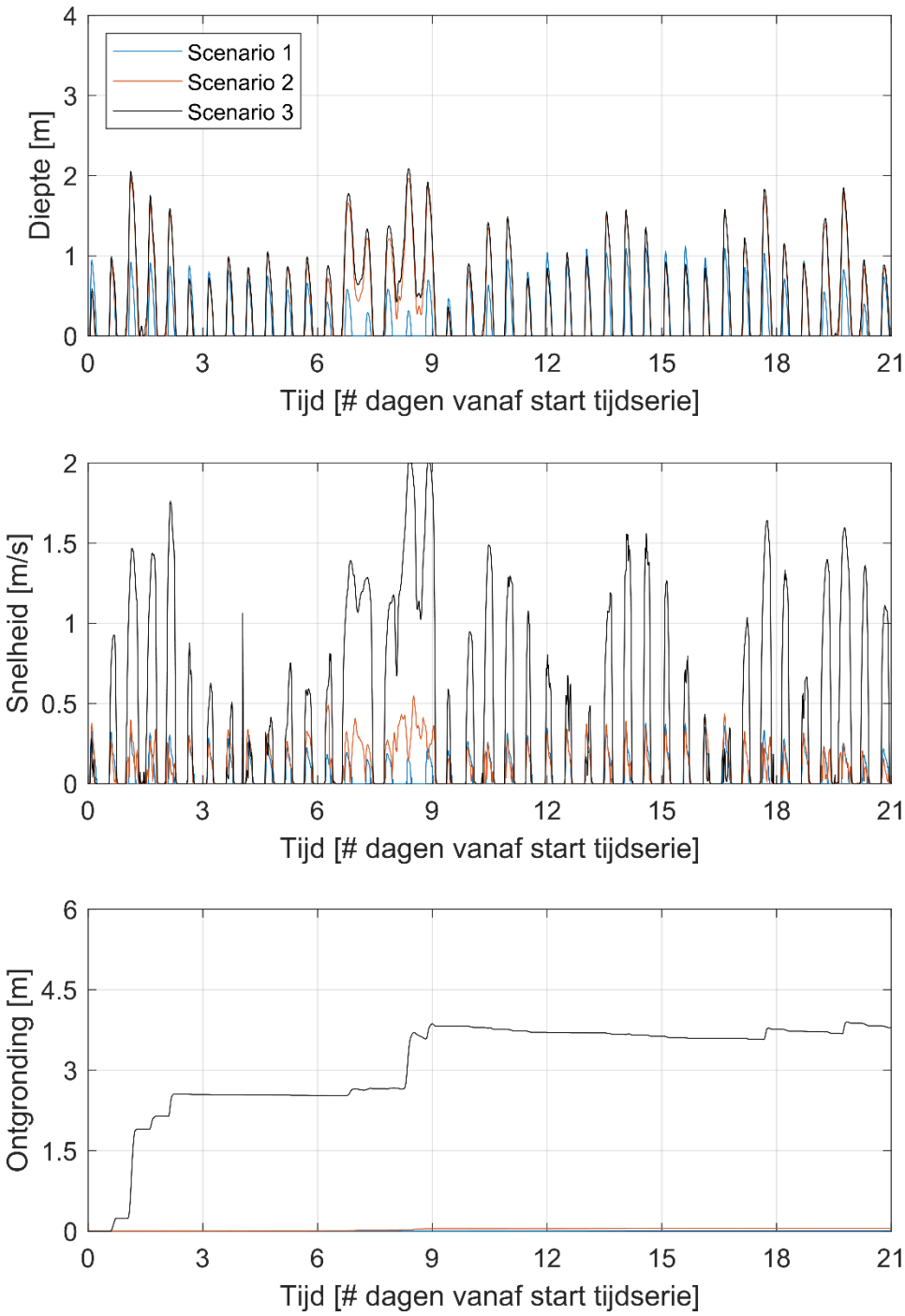
Figuur 7.21 – Ontgronding voor windturbine 9 voor scenario 1-3



Figuur 7.22 Ontgronding voor windturbine 10 voor scenario 1-3



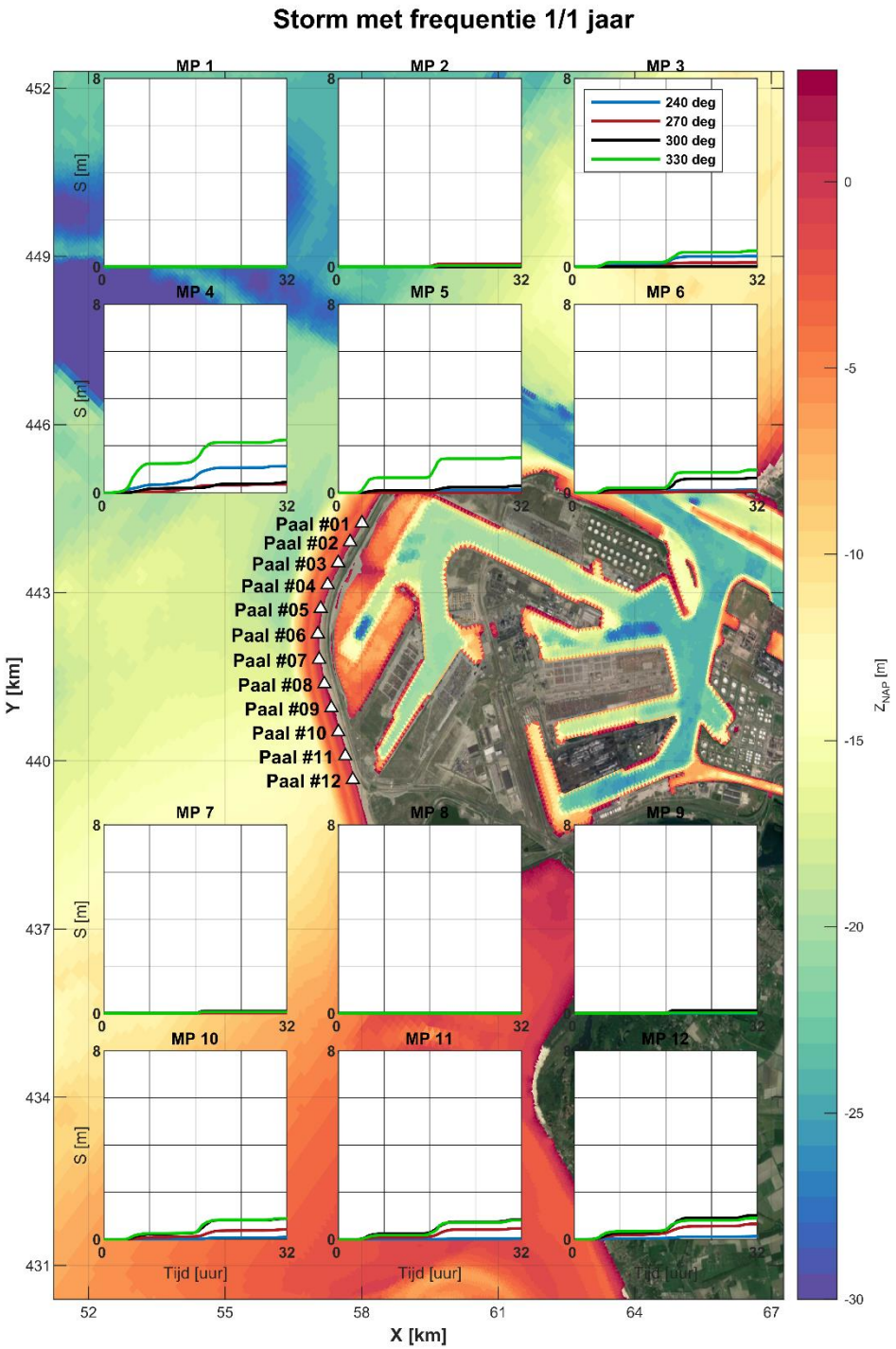
Figuur 7.23 Ontgronding voor windturbine 11 voor scenario 1-3



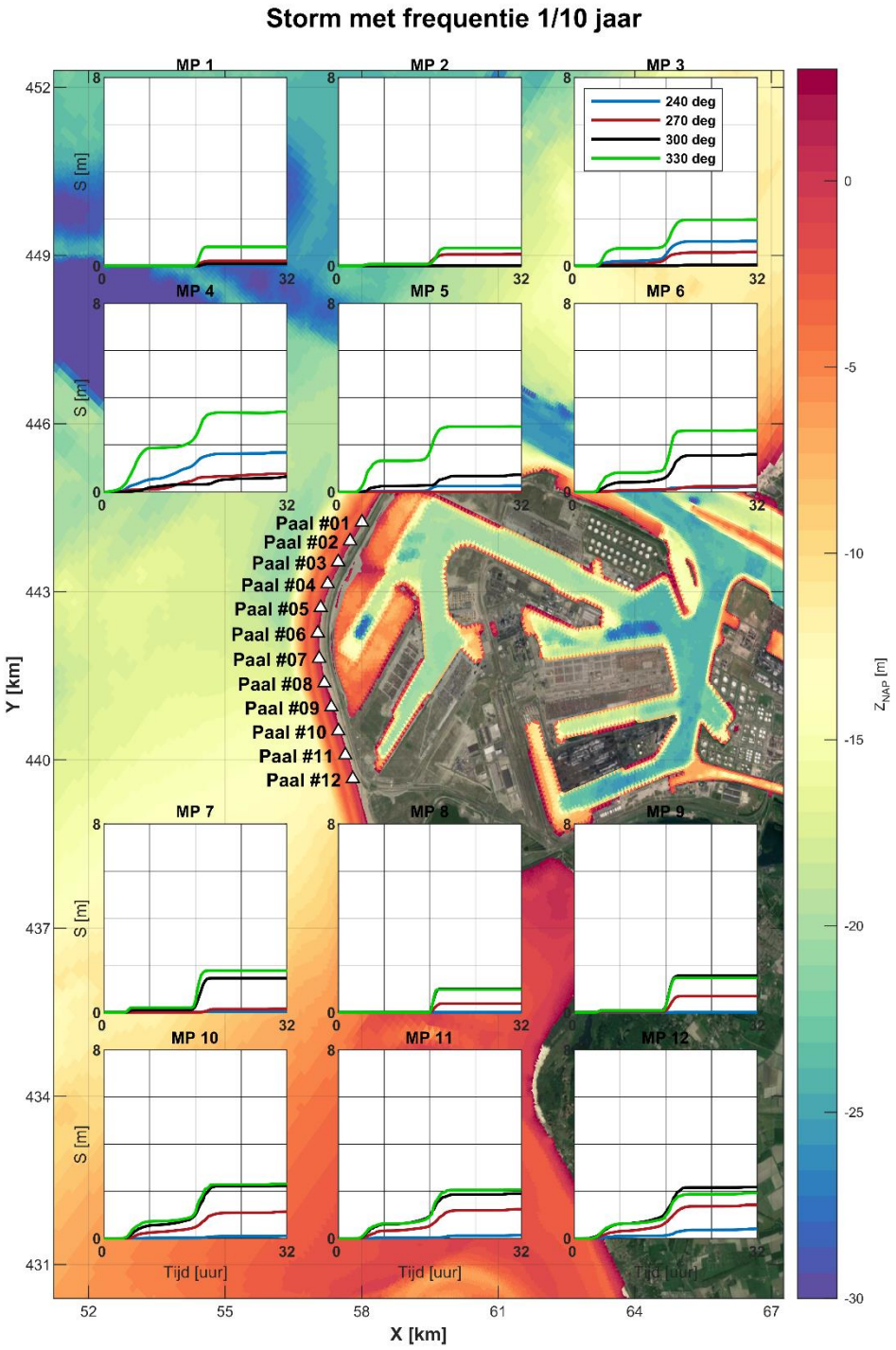
Figuur 7.24 Ontgronding voor windturbine 12 voor scenario 1-3

B.2 Ruimtelijk beeld van de ontgrondingen voor scenario's 4-6

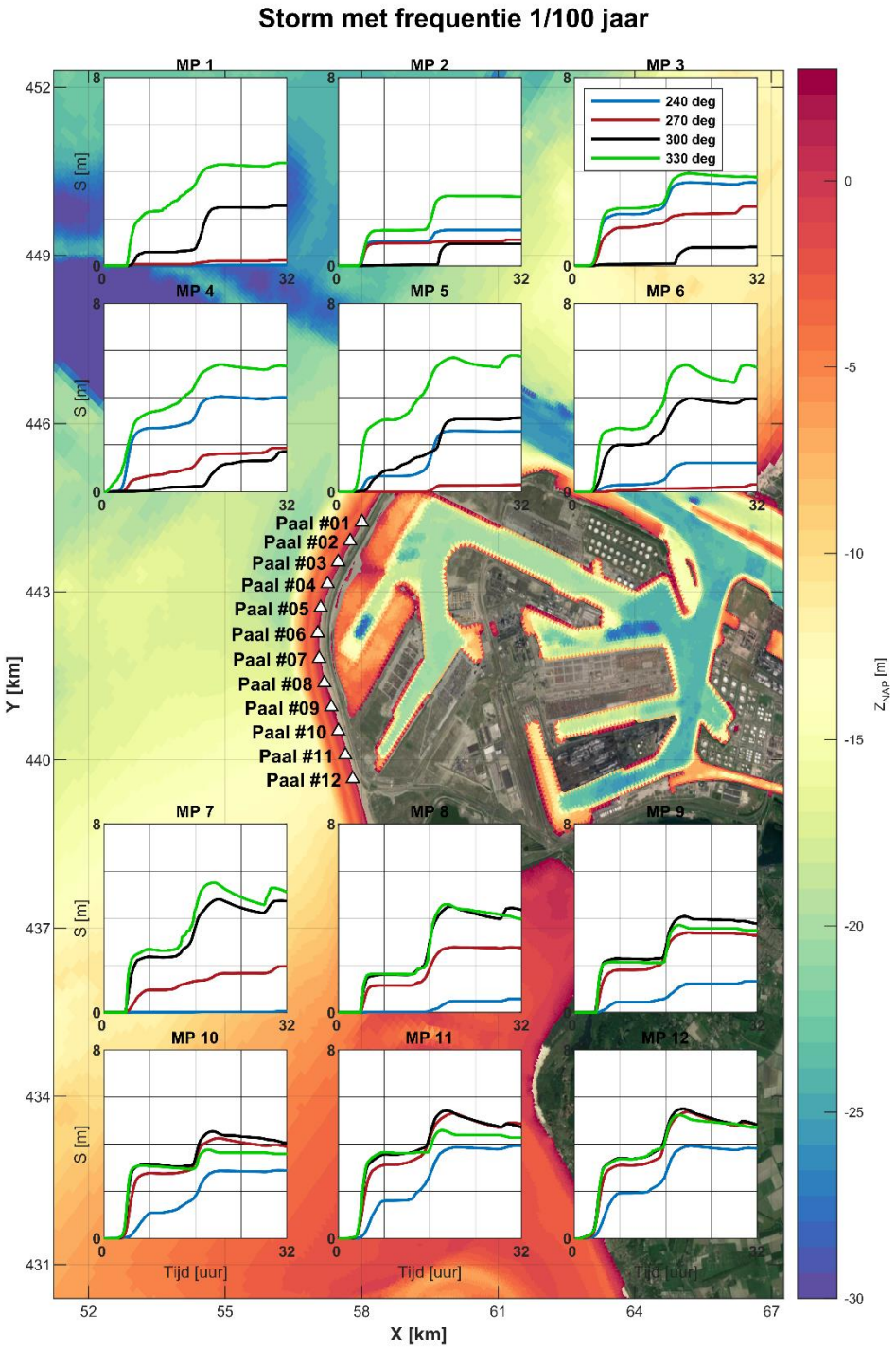
B.2.1 Bodemligging 2019



Figuur 7.25 Berekende ontgronding voor de 1-jaarsstorm

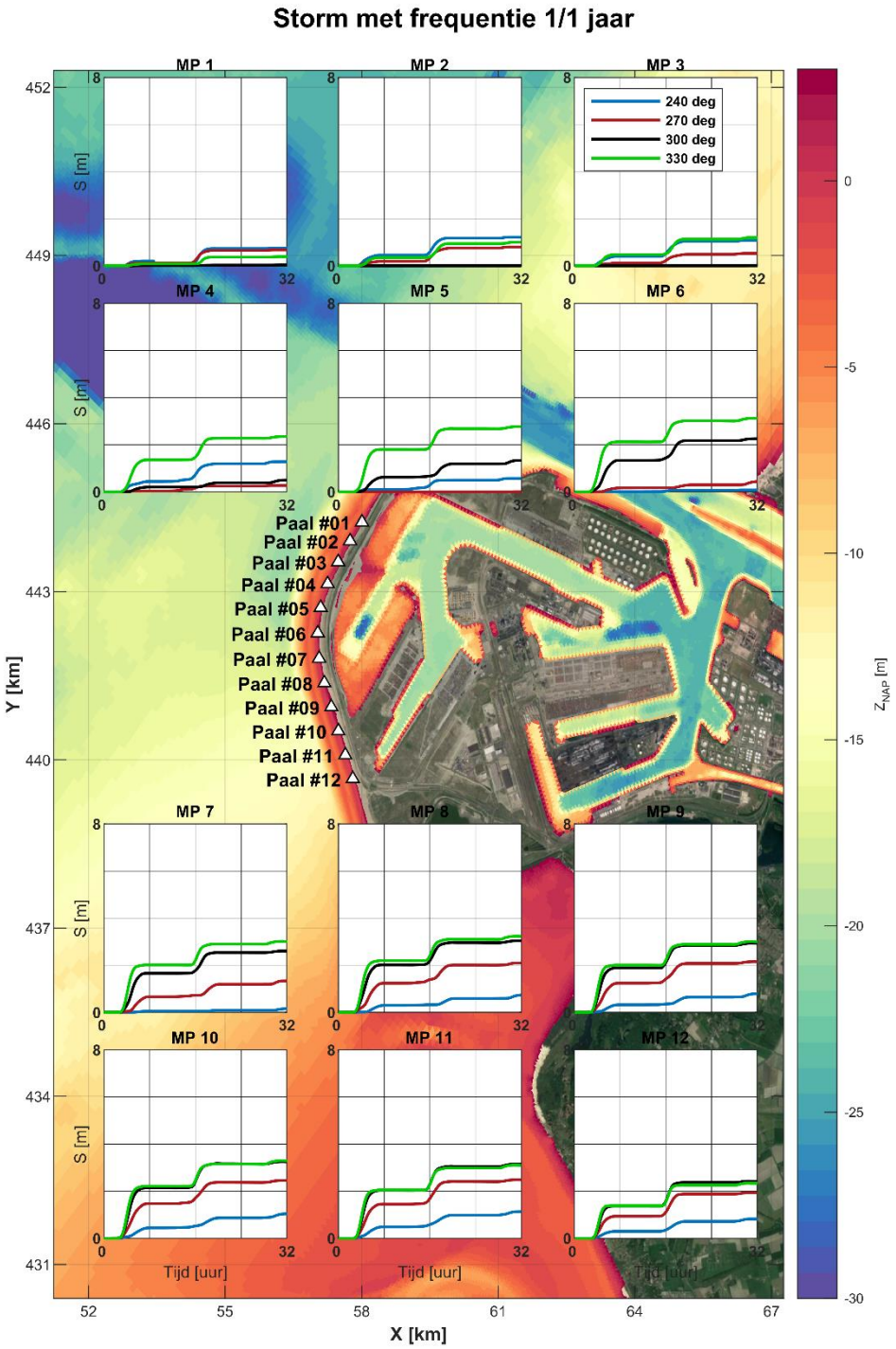


Figuur 7.26 Berekende ontgronding voor de 10-jaarsstorm

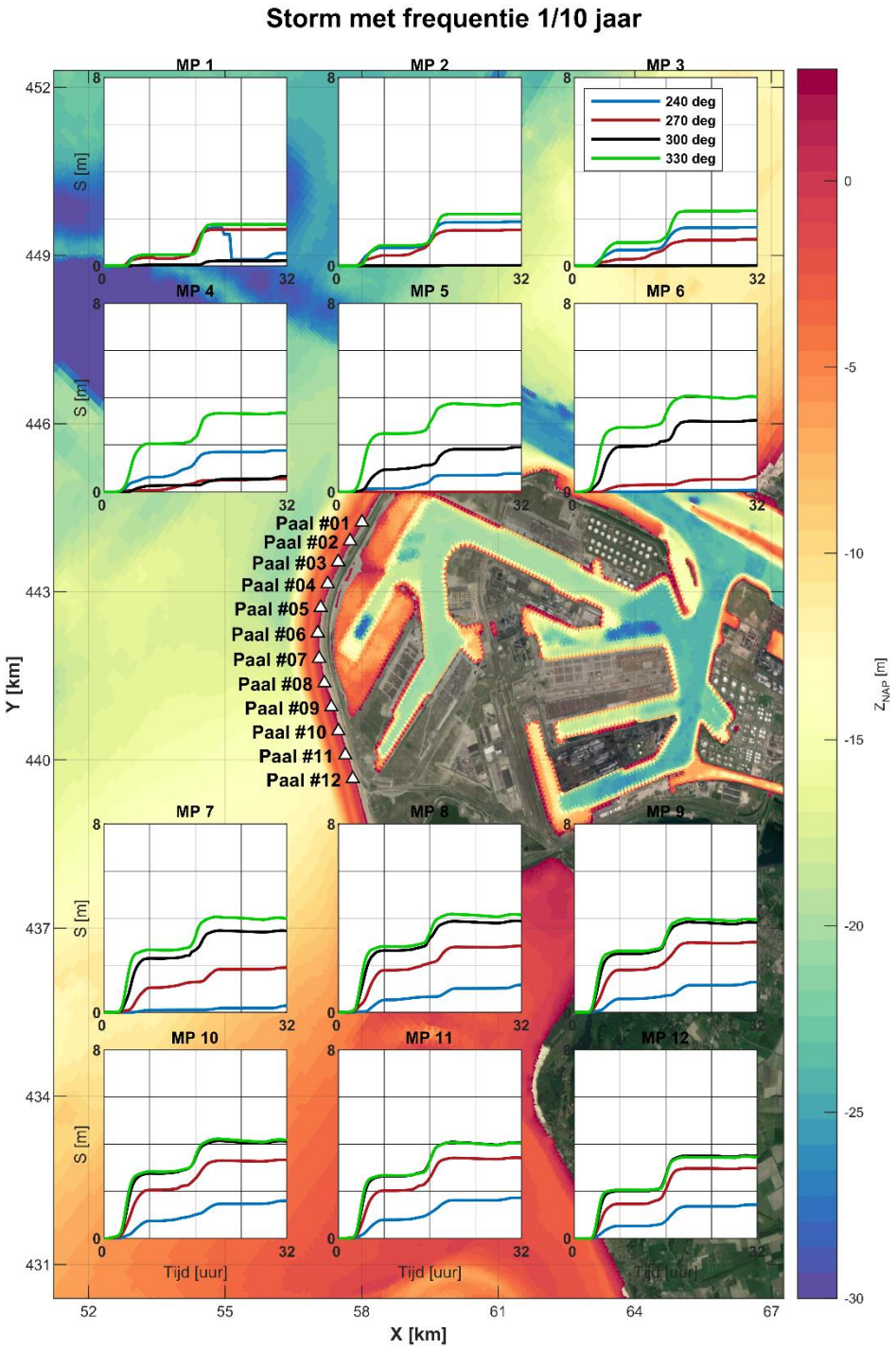


Figuur 7.27 Berekende ontgronding voor de 100-jaarsstorm

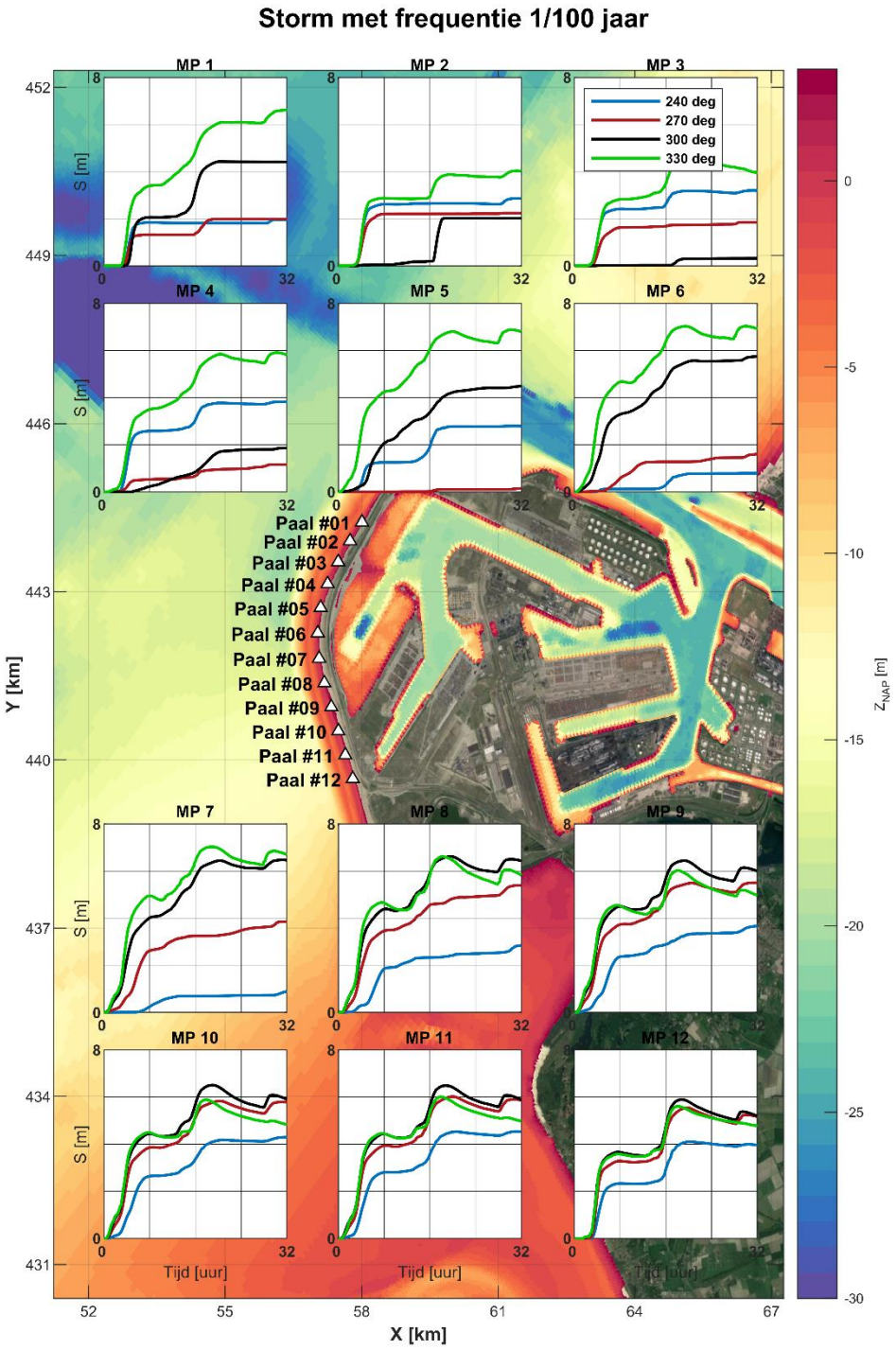
B.2.2 Ontwerpbodem



Figuur 7.28 Berekende ontgronding voor de 1-jaarsstorm

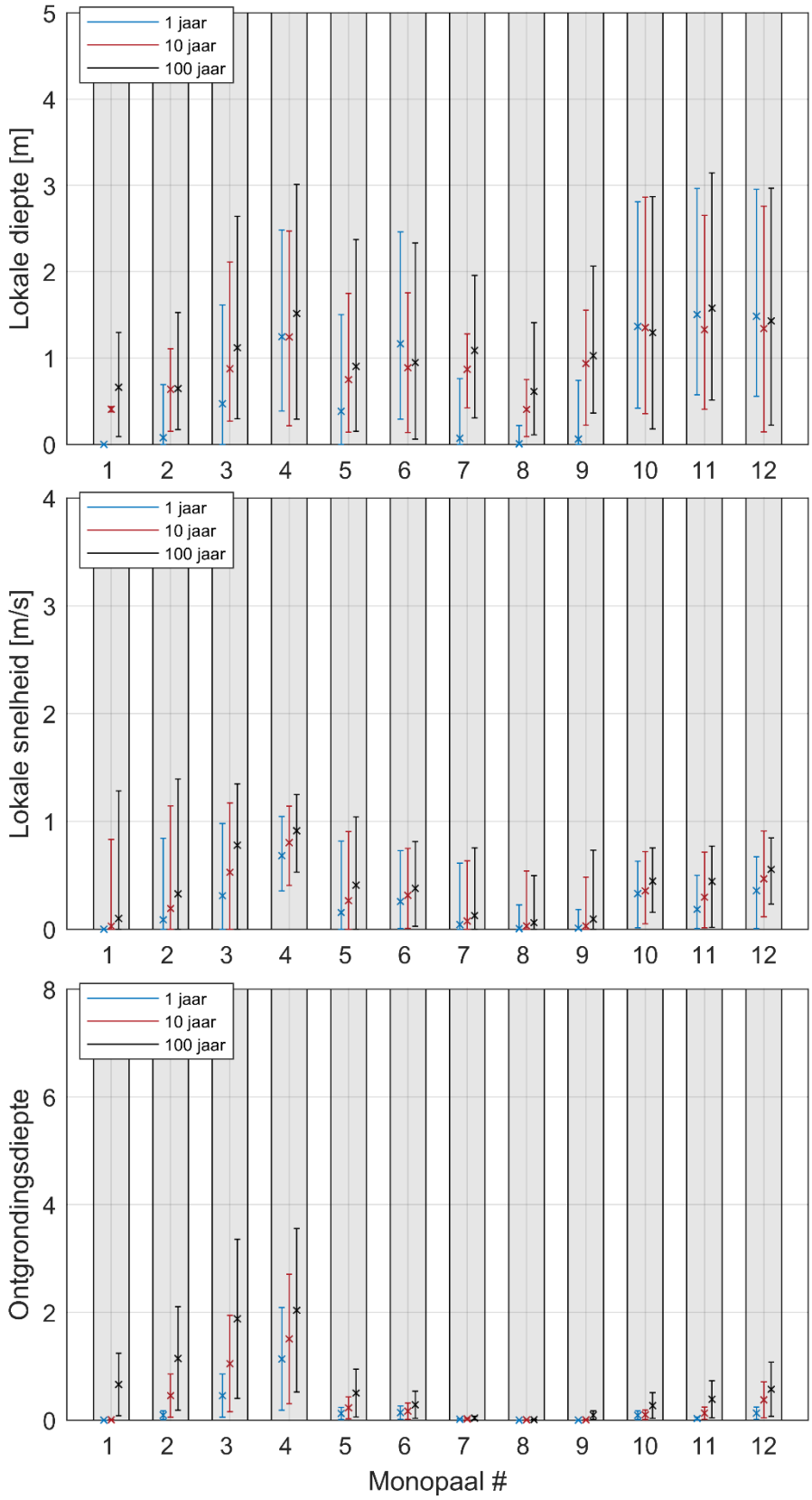


Figuur 7.29 Berekende ontgronding voor de 10-jaarsstorm

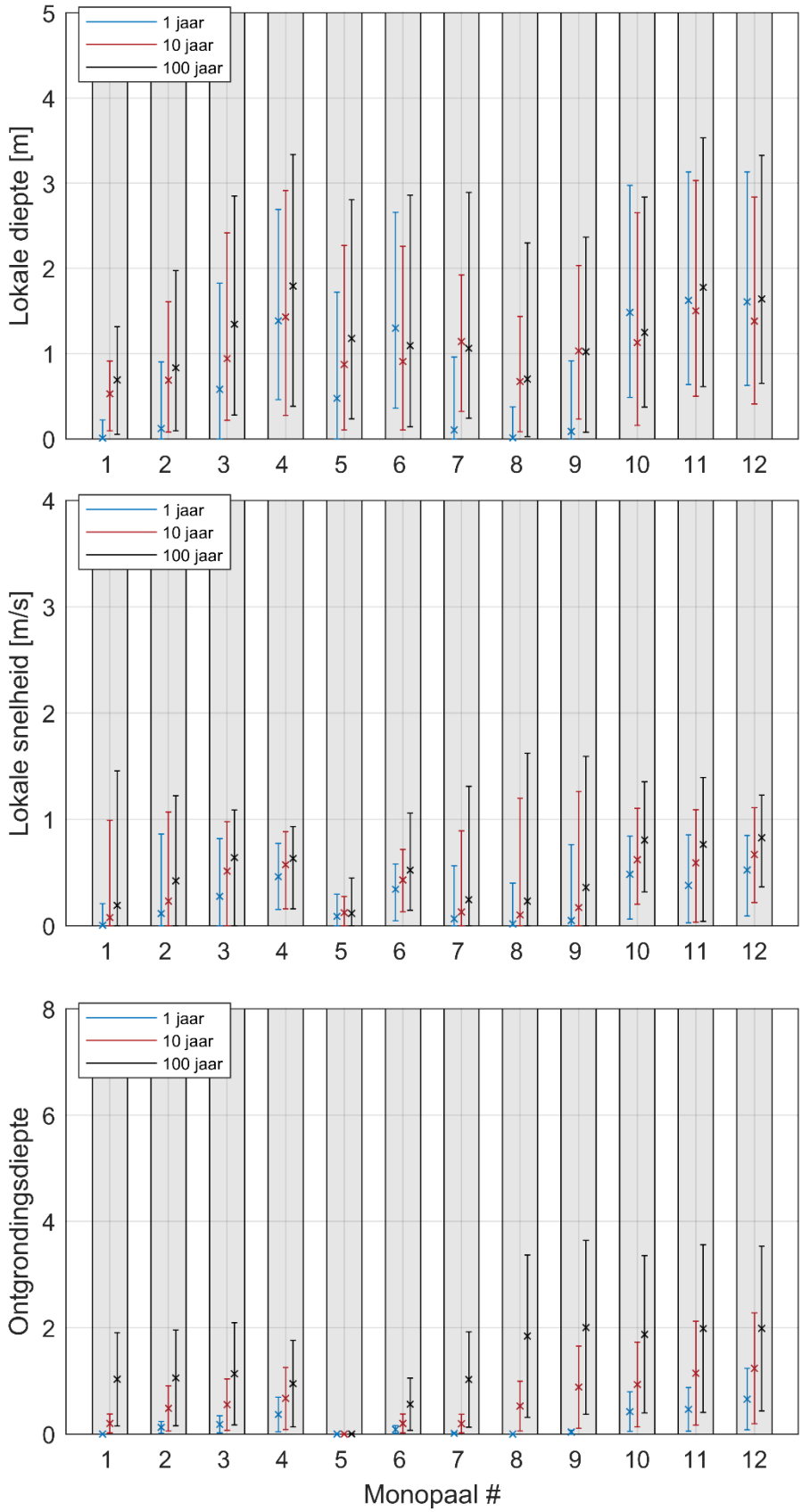


Figuur 7.30 Berekende ontgronding voor de 100-jaarsstorm

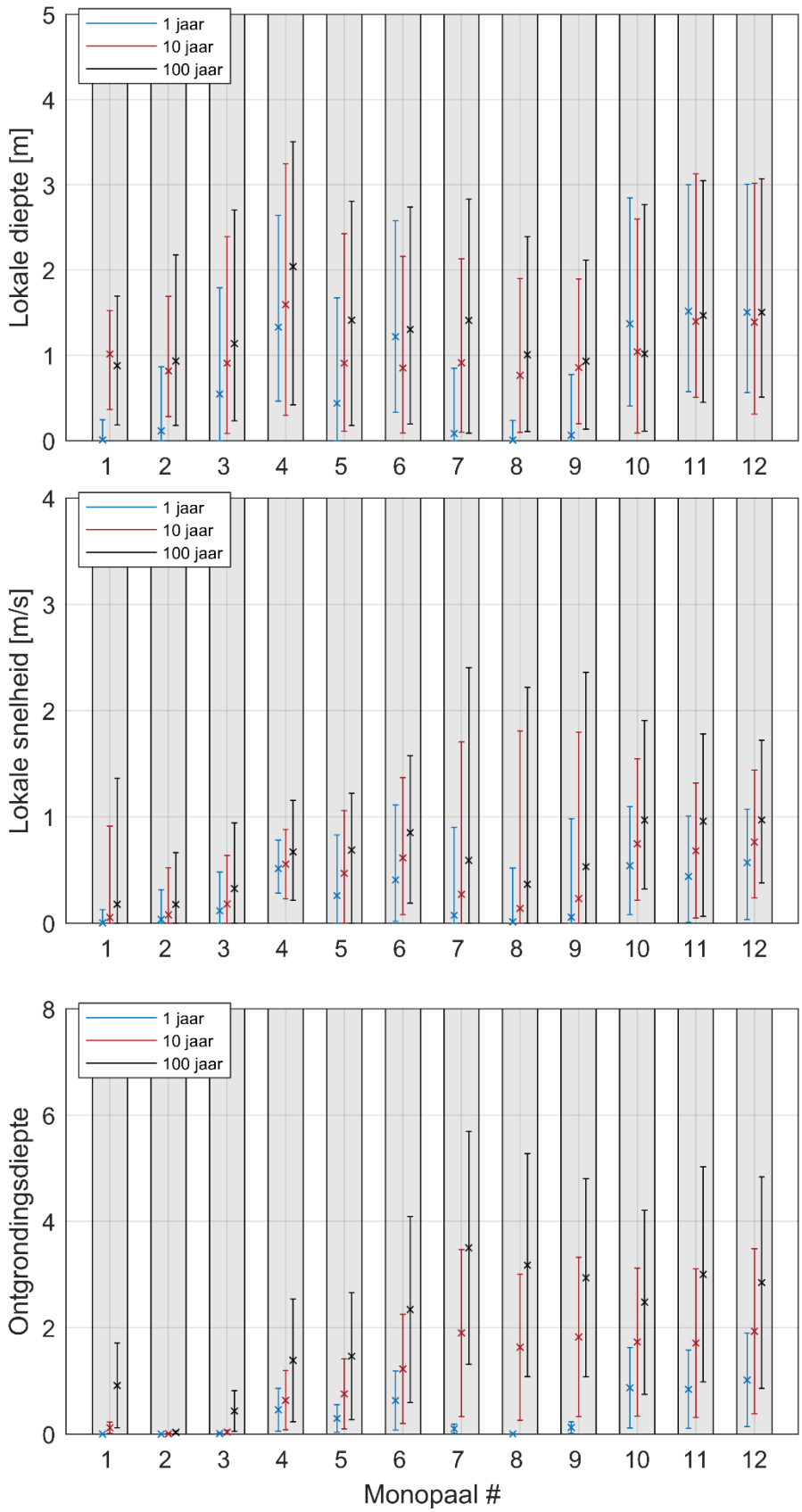
B.3 Ontgronding per turbine voor scenario's 4-6 (bodem 2019)



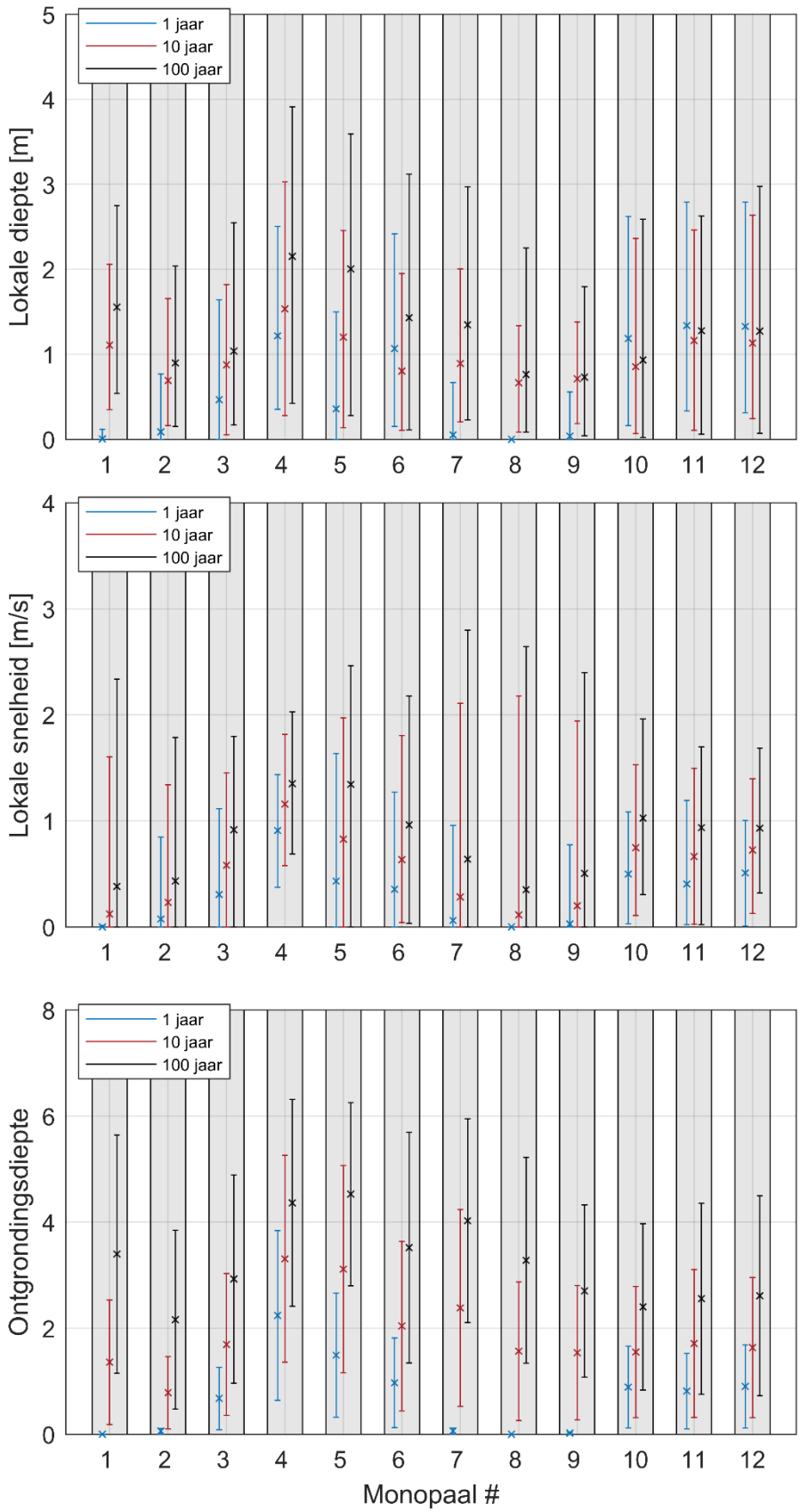
Figuur 7.31 Waterstand (boven), snelheid (midden) en ontgronding (onder) per paal voor een invalshoek van 240 graden



Figuur 7.32 Waterstand (boven), snelheid (midden) en ontgronding (onder) per paal voor een invalshoek van 270 graden

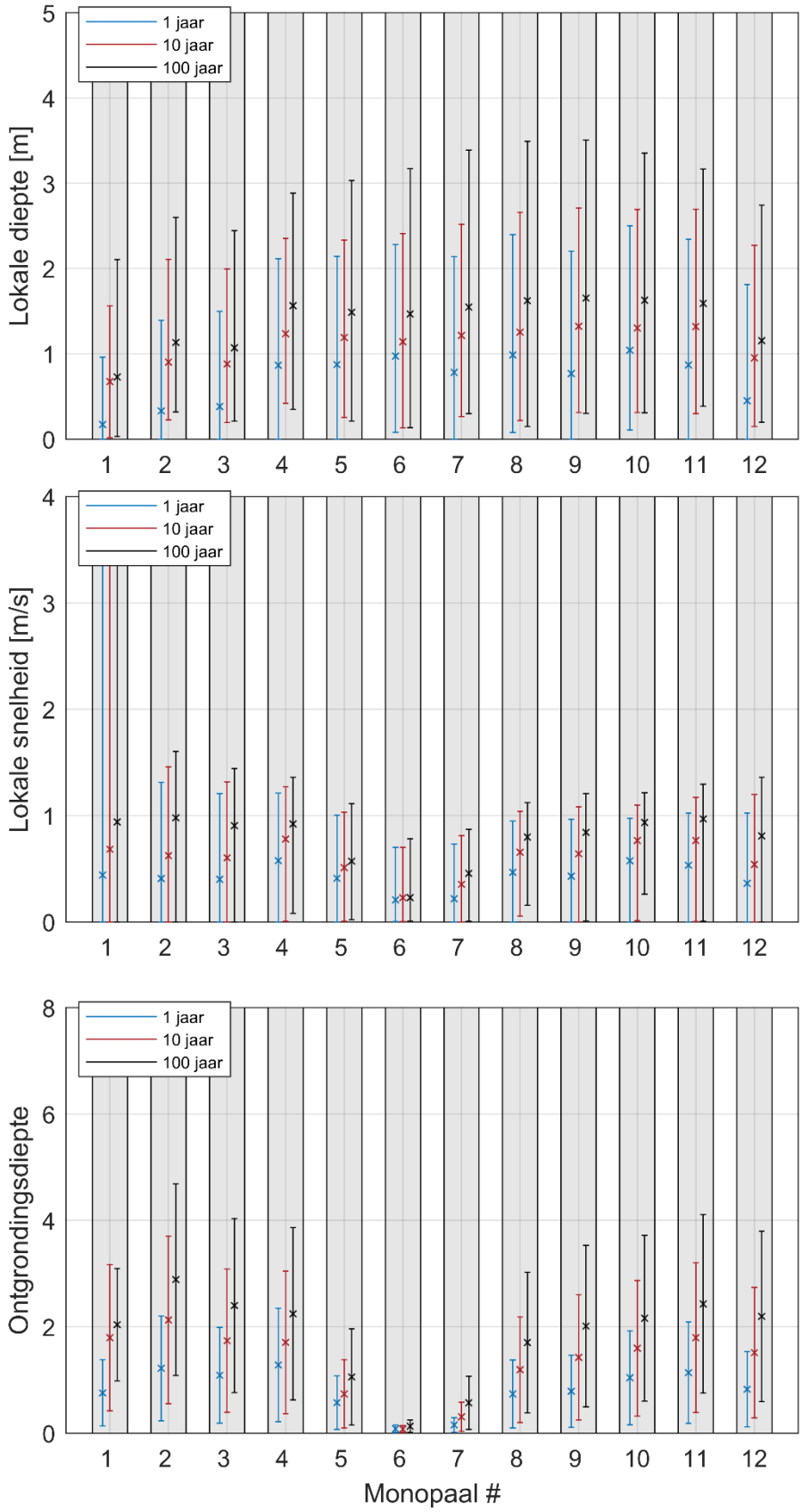


Figuur 7.33 Waterstand (boven), snelheid (midden) en ontgronding (onder) per paal voor een invalshoek van 300 graden

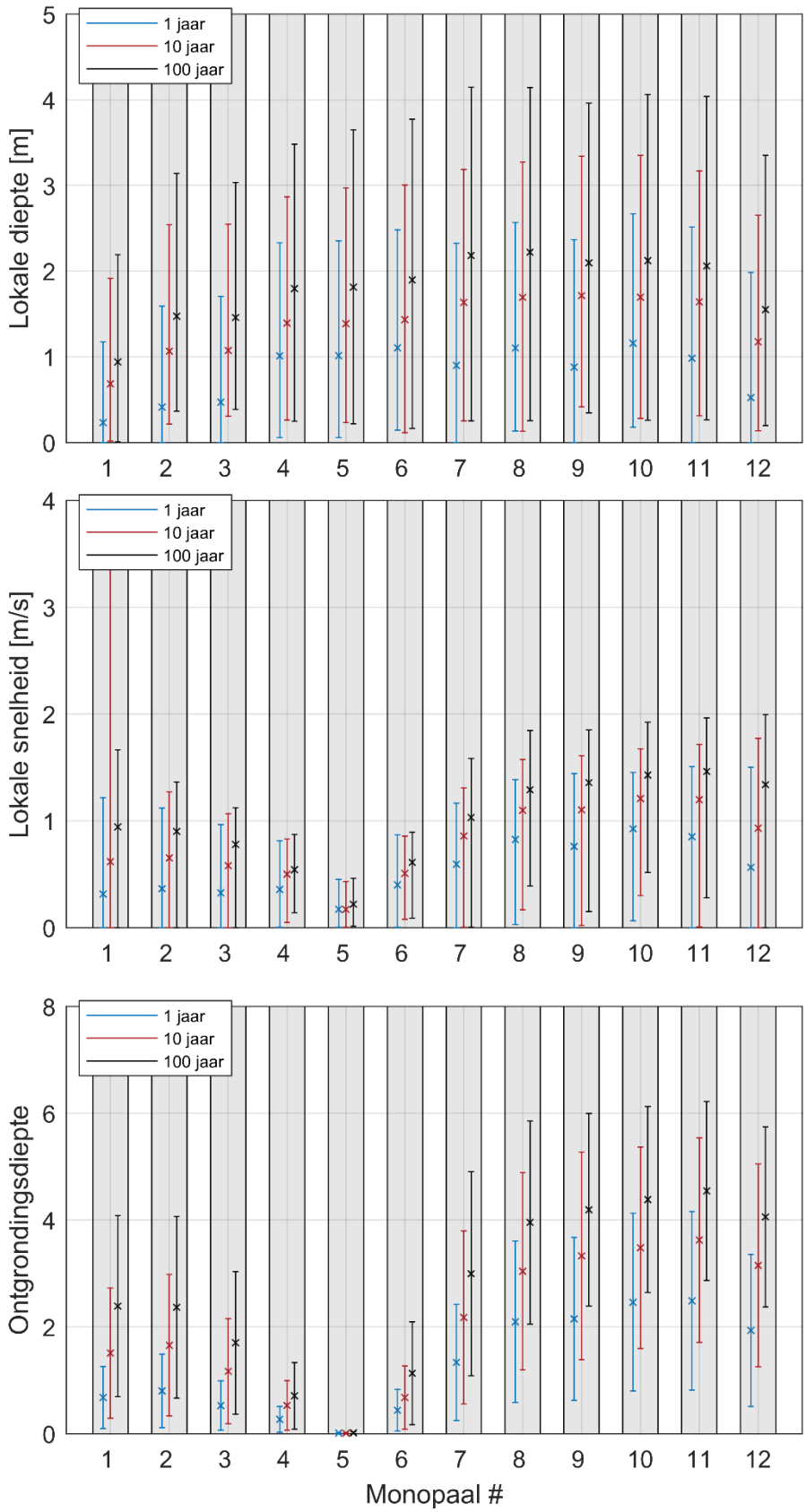


Figuur 7.34 Waterstand (boven), snelheid (midden) en ontgronding (onder) per paal voor een invalshoek van 330 graden (ook te vinden in het hoofdrapport).

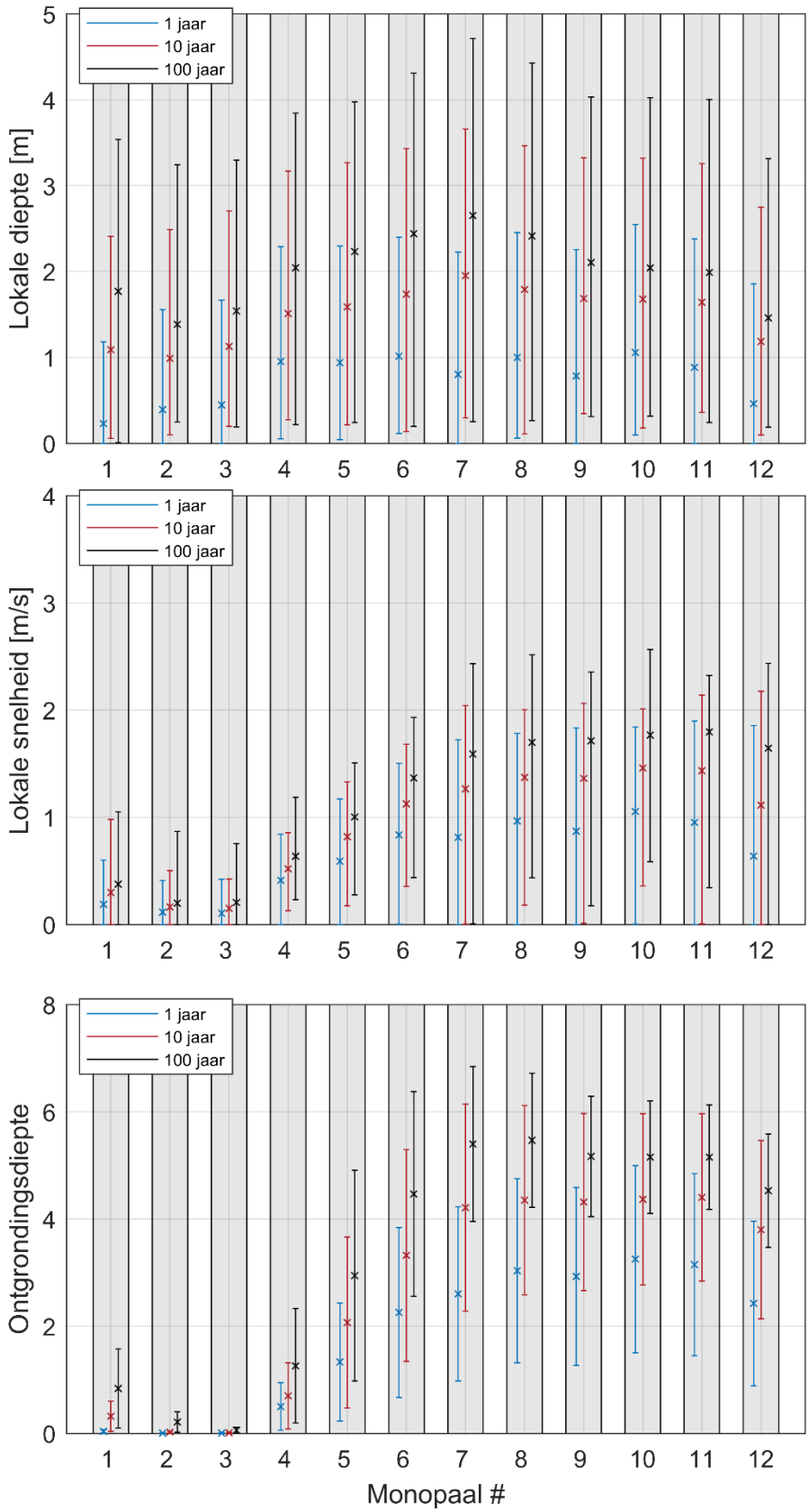
B.4 Ontgrondingen per turbine voor scenario's 4-6 (ontwerpbodem)



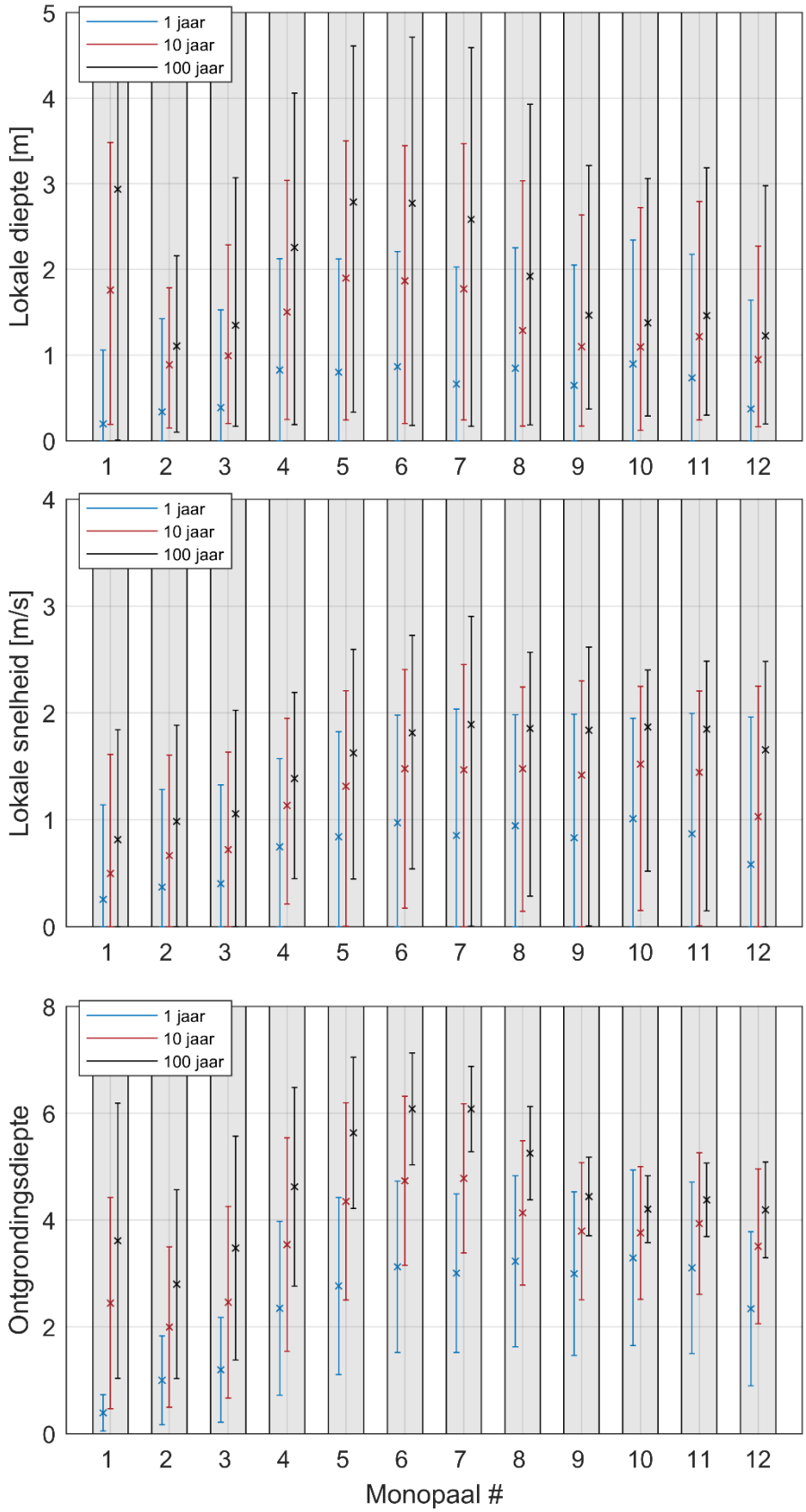
Figuur 7.35 Waterstand (boven), snelheid (midden) en ontgronding (onder) per paal voor een invalshoek van 240 graden



Figuur 7.36 Waterstand (boven), snelheid (midden) en ontgronding (onder) per paal voor een invalshoek van 270 graden



Figuur 7.37 Waterstand (boven), snelheid (midden) en ontgronding (onder) per paal voor een invalshoek van 300 graden



Figuur 7.38 Waterstand (boven), snelheid (midden) en ontgronding (onder) per paal voor een invalshoek van 330 graden (ook te vinden in het hoofdrapport).

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

SVASEK 2020A 2034-U20125-C-LSPA

Morfogische Effecten Windmolens MV2

Royal HaskoningDHV

MEMO: MORFOLOGISCHE EFFECTEN VAN WINDTURBINES OP MV2 CONFIGURATIE ENECO APRIL 2020

Aan	:[redacted](Royal Haskoning DHV)
Van	[redacted] (Svašek Hydraulics)
Datum	: 29 april 2020
Referentie	: 2034/U20125/C/LSpa
Gecontroleerd door	: [redacted]

1 INTRODUCTIE

Svašek Hydraulics heeft in opdracht van Rijkswaterstaat uitgebreid onderzoek gedaan naar de effecten van windturbines op de zachte zeewering van de Tweede Maasvlakte (MV2). In het rapport 'Morfologische Analyse Windturbines MV2' (Svašek Hydraulics, 2019a) is onderzoek gedaan naar de morfologische effecten van winturbines op de zachte (zandige) wering van de Tweede Maasvlakte. Naar aanleiding van dat rapport en een Expert Meeting (zie Svašek Hydraulics, 2019e) zijn aanvullende analyses en XBeach berekeningen uitgevoerd (Svašek Hydraulics, 2019b), zowel wat betreft veiligheid als lange termijn onderhoud. In de tenderfase is voor Eneco maar in opdracht van Rijkswaterstaat een specifieke configuratie van turbines doorgerekend voor wat betreft stormafslag (veiligheid) en is een kwalitatieve inschatting gemaakt van het effect op lange termijn onderhoud (Svašek Hydraulics, 2019c). Dit alles heeft een relatief compleet beeld gegeven van de te verwachten effecten van windturbines op veiligheid en onderhoud van de wering.

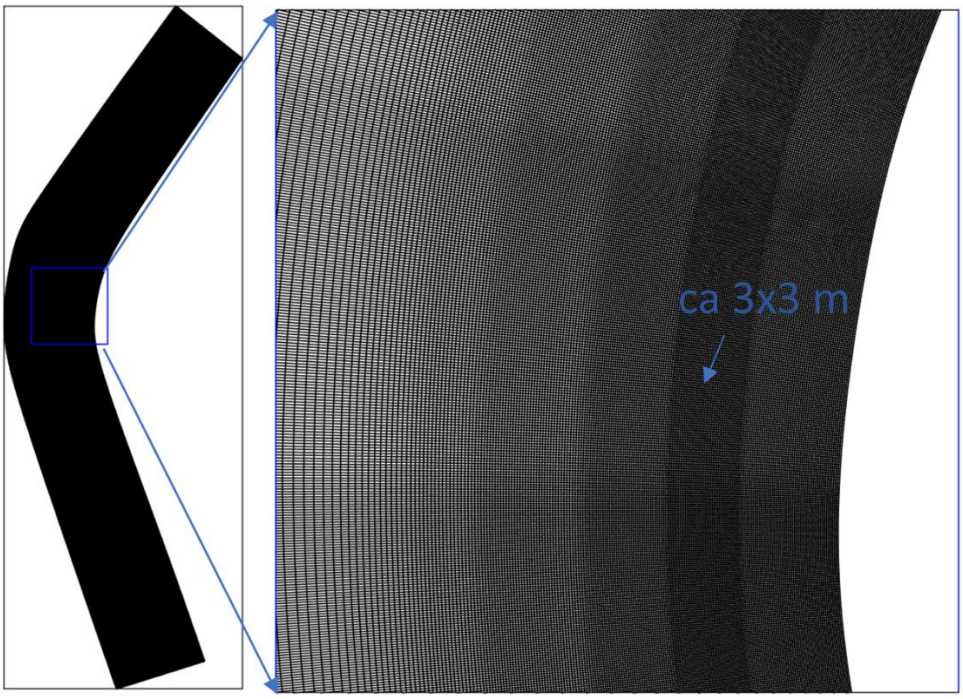
In de genoemde studies is een breed scala aan mogelijke configuraties onderzocht. De tender is gegund aan Eneco en in het ontwerpproces is inmiddels sprake van een nieuwe configuratie met twaalf turbines met een monopile fundering (in deze memo: Eneco-2020). RHDHV heeft namens Eneco Svašek Hydraulics gevraagd de effecten van deze configuratie in te schatten op veiligheid (stormafslag, kwantitatief met behulp van XBeach) en op lange termijn onderhoud (kwalitatief op basis van eerdere berekeningen en expert judgement).

Qua structuur volgt deze memo grotendeels Svašek Hydraulics (2019c). Relevante delen van de modelbeschrijving en uitgevoerde simulaties zijn uit deze eerdere memo overgenomen. De modelopzet (zie paragraaf sectie 2) beschrijft de aanpassingen die aan het model zijn gedaan (t.o.v. Svašek Hydraulics, 2019b, de modelopzet is gelijk aan die in Svašek Hydraulics, 2019c) om de analyse mogelijk te maken. Vervolgens (sectie 3) wordt ingegaan op de configuratie zoals aangeleverd door Eneco; hoe deze in het XBeach model is gerepresenteerd en hoe deze zich verhoudt tot de eerder beoordeelde configuratie van Rijkswaterstaat (vanaf hier RWS-2019, zie Svašek Hydraulics, 2019b) en de eerdere configuratie van Eneco (vanaf hier Eneco-2019, zie Svašek Hydraulics, 2019c). Daarna (sectie 4) wordt een overzicht gegeven van de stormsimulaties die in XBeach zijn gedaan. De resultaten van deze simulaties van de configuratie worden vervolgens getoond (sectie 5). Daarna wordt de configuratie kwalitatief beoordeeld op het effect op lange termijn onderhoud van de wering (sectie 6). Vervolgens (sectie 7) wordt de onzekerheid in de analyse toegelicht. De resultaten worden uiteindelijk samengevat in de conclusie (sectie 8) die volgt in de aanbeveling (sectie 9).

2 XBEACH REFERENTIEMODEL

De simulaties zijn uitgevoerd conform Svašek Hydraulics (2019c), welke in beginsel weer uitgevoerd zijn conform Svašek Hydraulics (2019b). Voor een volledige modelbeschrijving (met beperkte andere uitgangspunten) wordt verwezen naar het achtergrondrapport van de XBeach

studie (Svašek Hydraulics, 2019d). Het gebruikte rooster, met een verfijning tot 3x3 m, is afgebeeld in Figuur 2-1, het heeft circa 370 000 cellen.



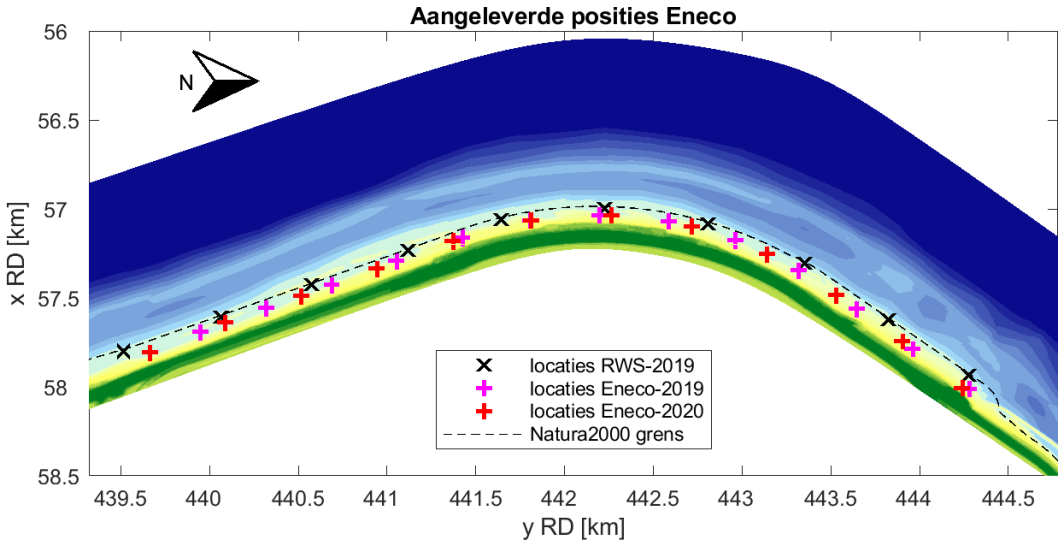
Figuur 2-1: Rooster gebruikt in huidige memo. De windturbines liggen in het verfijnde gebied met cellen van circa 3x3 m.

3 AANGELEVERDE CONFIGURATIE

Eneco heeft de windturbine configuratie aangeleverd zoals weergegeven in Tabel 3-1 en Figuur 3-1.

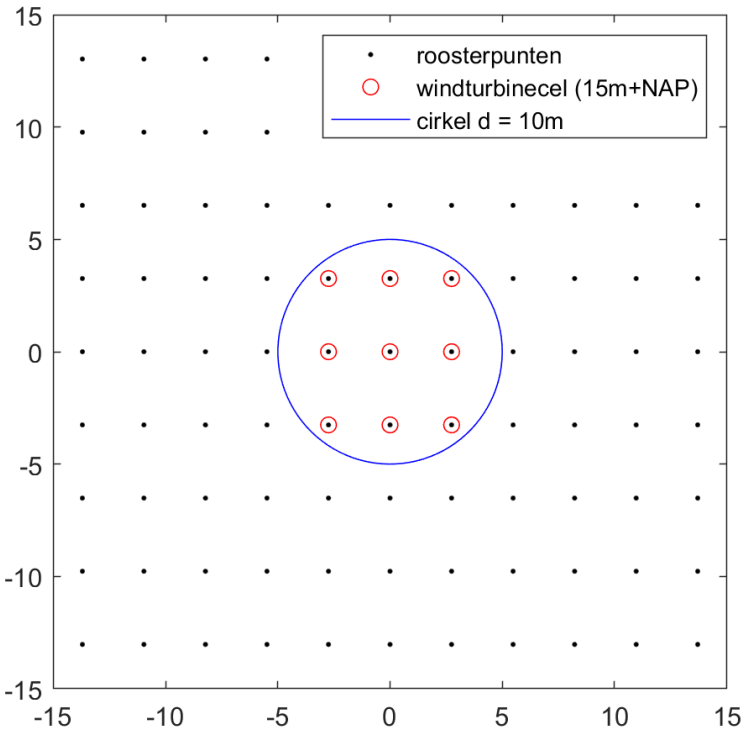
Tabel 3-1: Aangeleverde windturbine coördinaten (Eneco, 2020) en de positie hoogte op de 2019 bodem.

Windturbine	Eneco-2020		
	x RD [m]	y RD [m]	z [m+NAP]
1	58007,29	444242,88	2.3
2	57742,87	443906,67	1.4
3	57485,32	443531,87	0.5
4	57251,22	443142,79	-0.5
5	57099,15	442714,88	0.8
6	57035,71	442265,22	0.0
7	57063,31	441811,96	1.7
8	57180,28	441373,14	2.1
9	57333,38	440944,81	1.7
10	57486,47	440516,47	-0.4
11	57639,56	440088,14	-0.7
12	57805,45	439665,35	-0.6



Figuur 3-1: Aangeleverde ruimtelijke configuratie. Het rooster is in langsrichting iets minder fijn dan in dwarsrichting.

Het betreft monopiles met een diameter van 5 à 6 m. Het rooster in XBeach heeft een verfijning naar circa 3x3m[1]. Er is een afweging gemaakt tussen enerzijds het met het juiste formaat en anderzijds het met voldoende rekencellen representeren van de fundering. Er is voor gekozen om een fundering met een diameter van circa 10 m aan te houden. Het resultaat is weergegeven in onderstaand figuur.



Figuur 3-2: Implementatie 10 m diameter mast in (bij benadering) 3x3 m XBeach rooster.

Alle locaties die onderdeel zijn van de turbine zijn niet erodeerbaar gemaakt.

[1] Het betreft een curvilineair rooster met daardoor varierende roosterafmetingen.

4 OVERZICHT XBEACH STORMSIMULATIES

Er wordt gerekend met twee bathymetrieën en twee stormen, waarbij steeds wordt gekeken naar de effecten ten opzichte van een referentie zonder windturbines. Voor deze memo worden zodoende acht XBeach simulaties gebruikt. In tegenstelling tot de eerdere studies (Svašek Hydraulics, 2019b, c) wordt uitgegaan van de 2019 bodem (Q2 2019). In de zomer van 2018 zijn suppleties uitgevoerd, dus deze bathymetrie bevat gemiddeld gezien meer volume op het strand en de vooroever dan de eerder gebruikte 2018 bodem.

De twee bathymetrieën zijn zodoende:

- De 2019 bodem (loding Q2 2019).
- De ontwerpbodem waarbij het minimaal te garanderen profiel aanwezig is.

De stormen duren 32 uur en zijn weergegeven in onderstaande tabel. Storm A is representatief voor maatgevende condities voor de noordkant van MV2, Storm B is representatief voor de zuidkant.

Tabel 4-1: 1:10.000 jaar randvoorwaarden.

	Hs [m]	Tp [s]	Dir °N	Wl [m+NAP]
Storm A	8.1	13.5	317	4.95
Storm B	7.6	13.5	306	4.95

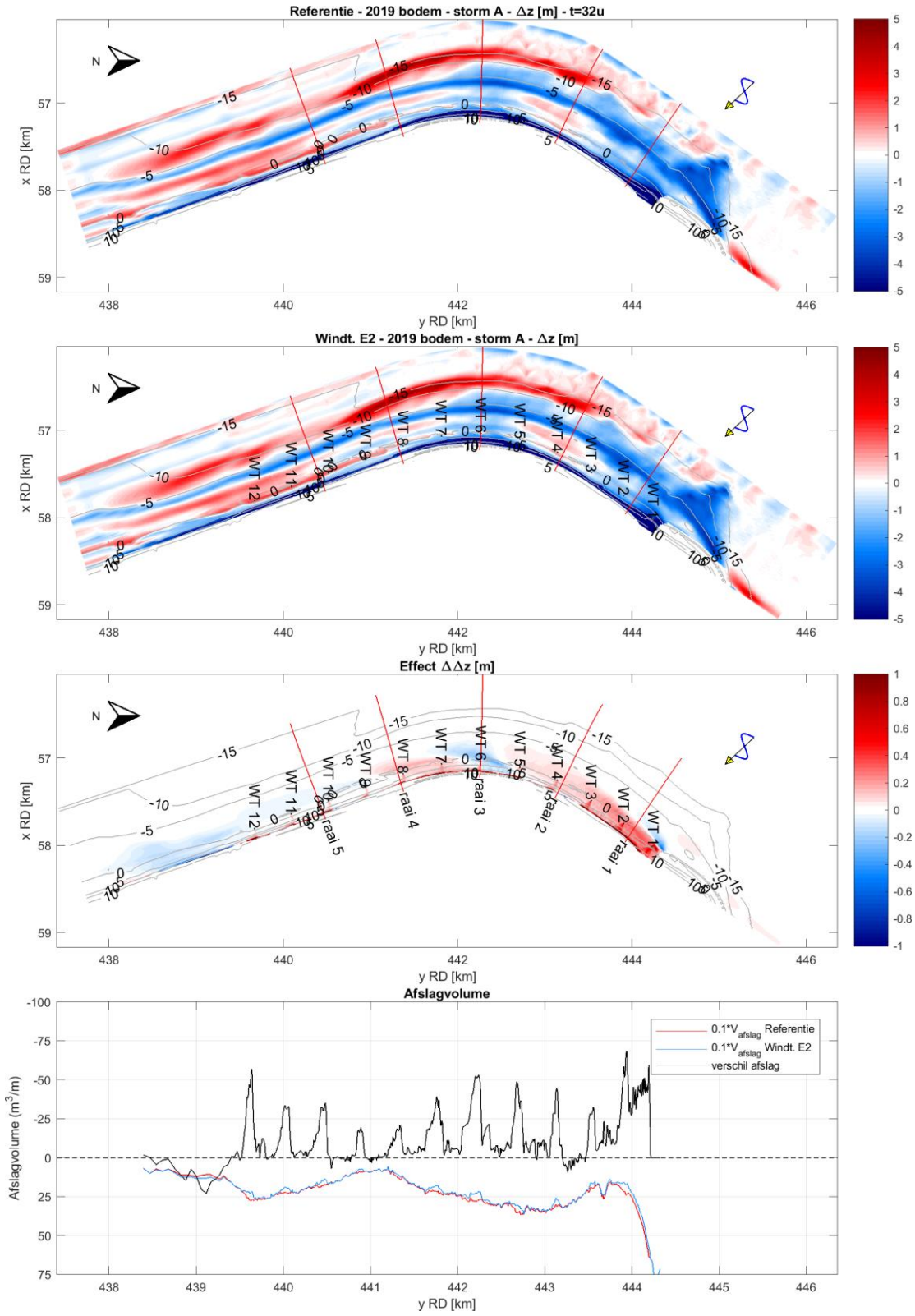
5 RESULTATEN

5.1 Erosie/sedimentatie figuren en effect op afslag

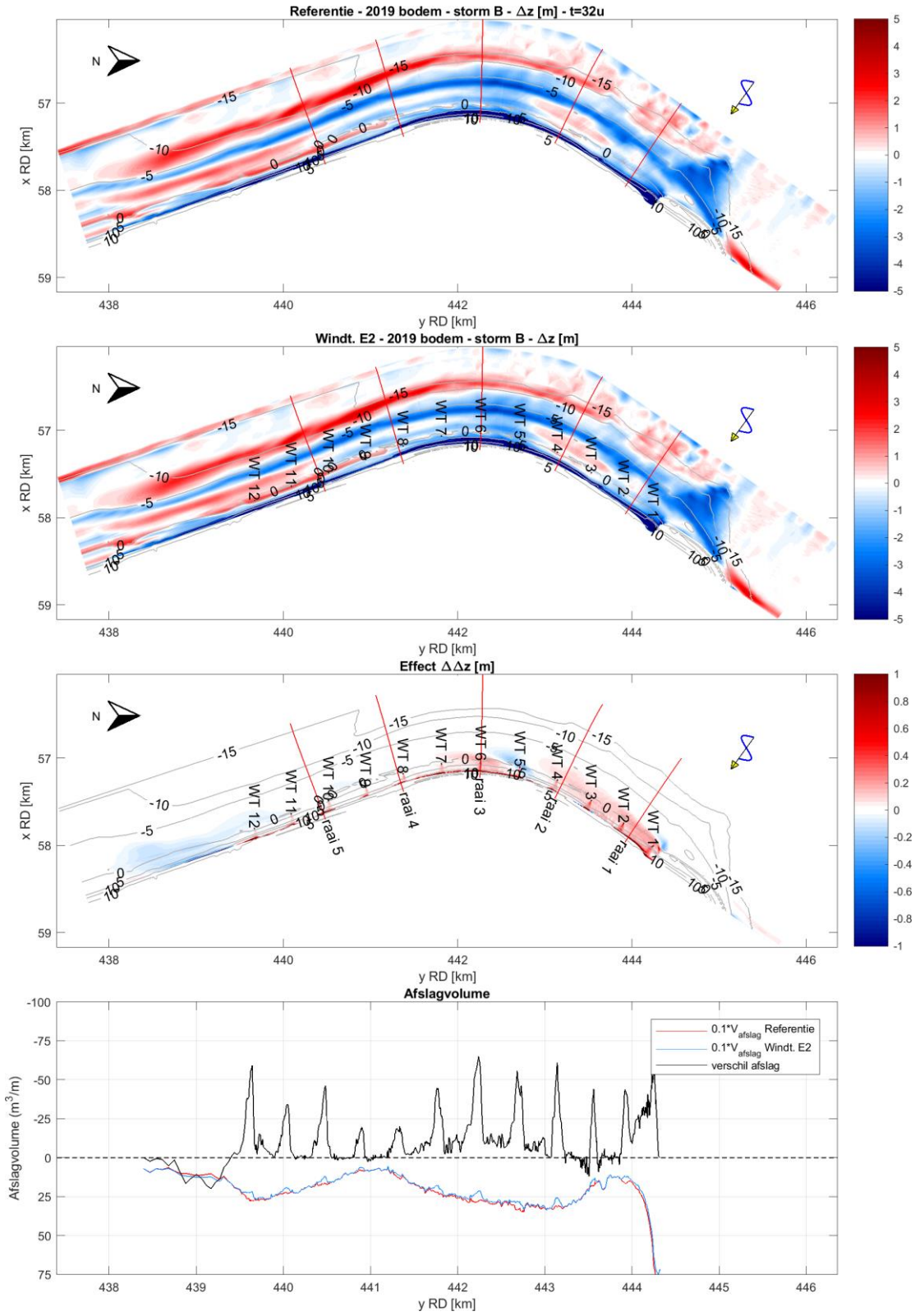
Voor ieder scenario is steeds een erosie/sedimentatie figuur van de referentiesituatie gegeven (bovenste), eenzelfde figuur maar met windturbines (midden boven), een verschilfiguur tussen de eindsituaties van beide scenario's (midden onder) en een afslagvolume plot (onderste). Deze laatste geeft per scenario het afslagvolume boven rekenpeil (in al deze gevallen 4,95 m+NAP), en het verschil daartussen. Een negatief verschil geeft minder afslag voor de situatie met windturbines.

Door de hoge ruimtelijke resolutie zijn in de effecten achter de turbines (vooral bij de vlakke ontwerpbodem) stralenpatronen zichtbaar die overeenkomen met de richtingen meegenomen in de kortegolven-routine van XBeach (20° interval). In werkelijkheid is het golfspectrum continu en zullen dergelijk effecten niet op deze wijze zichtbaar zijn. Specifiek voor de huidige simulatie waar uitgegaan wordt van relatief smalle palen (10 m breed in simulatie, 5 m in werkelijkheid) is het de vraag hoeveel golfenergie daadwerkelijk breekt op de obstakels. In werkelijkheid zullen lange stormgolven voor een groot deel om de palen heen lopen. Wat betreft blokkade van golfenergie overschat de berekening dus het werkelijke effect.

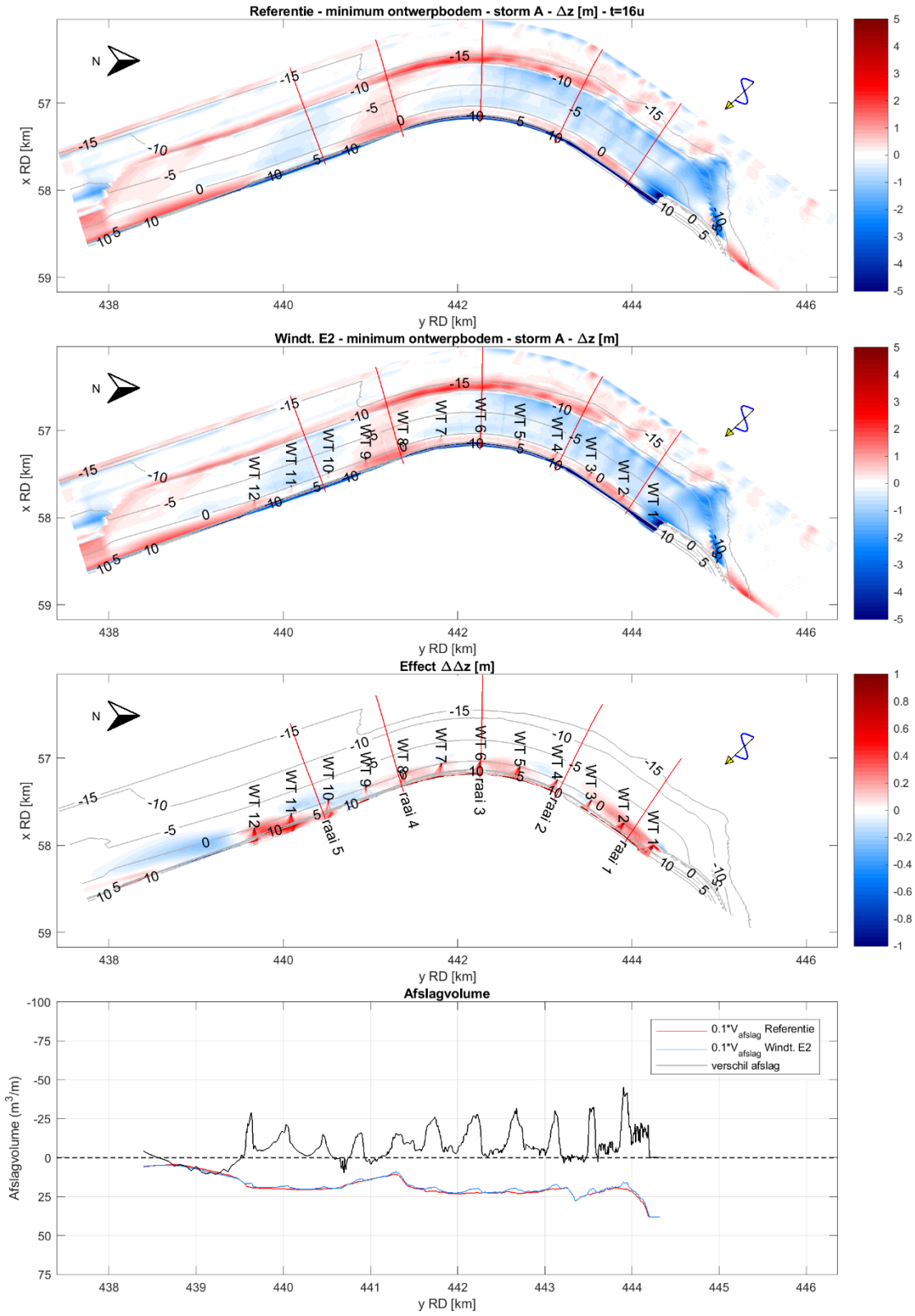
In geval van de simulatie met het minimale ontwerpprofiel breken de duinen over een groot deel van de bocht en in het zuidelijke deel in zijn geheel door. Een dergelijke overslagsituatie is niet representatief voor normale afslagprocessen. Er is daarom gekozen om op het moment voor doorbreken van de duinen de resultaten te presenteren voor het minimale ontwerpprofiel, het betreft resultaten op de helft van de simulatie, tijdens de piek van de storm. Overigens is de duinenrij bij de aansluiting hard-zacht dan al doorgebroken



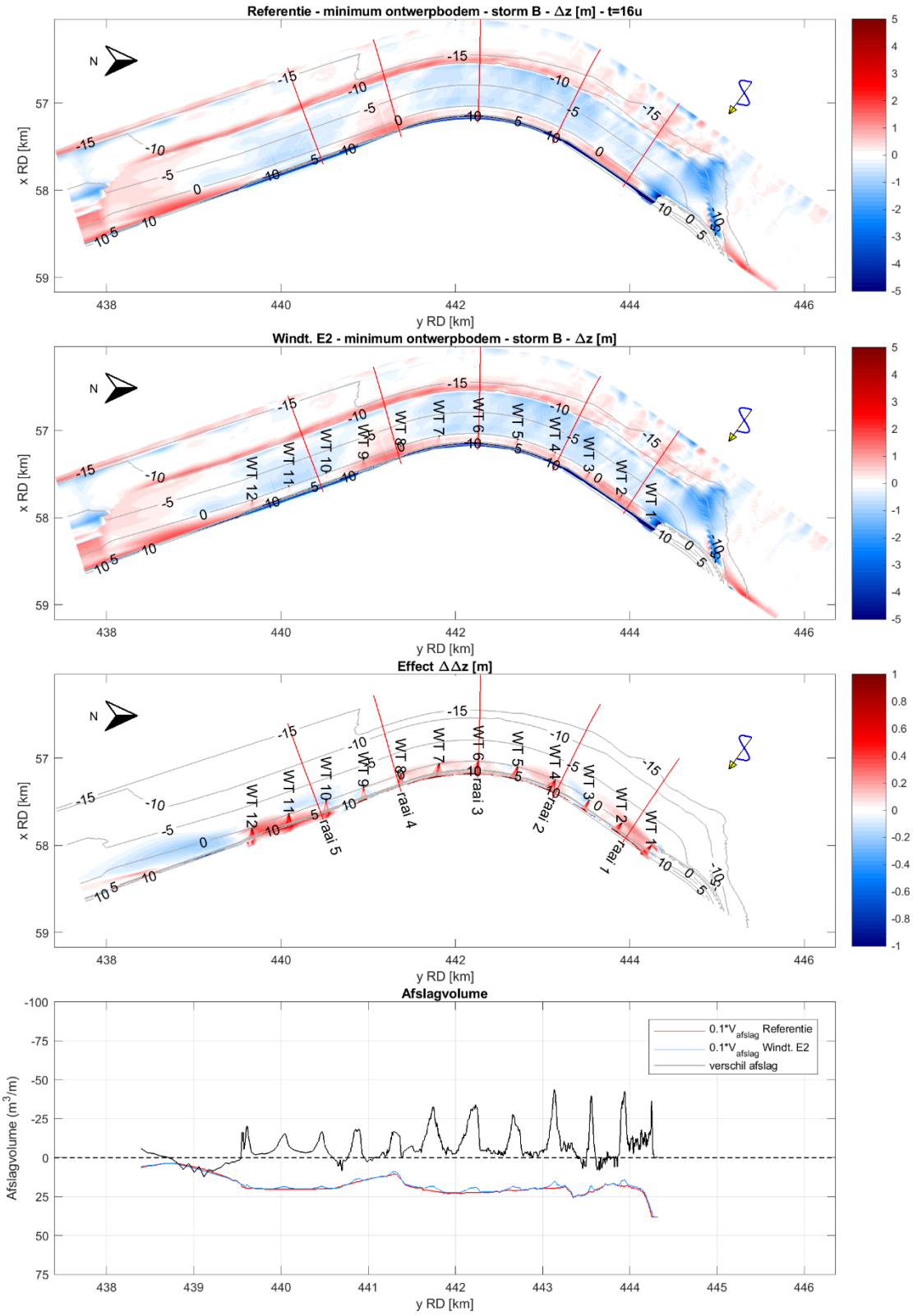
Figuur 5-1: Effect bij storm A, op basis van 2019 bodem.



Figuur 5-2: Effect bij storm B, op basis van 2019 bodem.



Figuur 5-3: Effect bij storm A, op basis van ontwerpbodem.



Figuur 5-4: Effect bij storm B, op basis van ontwerpbodem.

5.2 Resultaten in dwarsprofielen

Voor ieder scenario zijn de resultaten voor de vijf dwarsprofielen weergegeven in bijlage A. De locaties van deze dwarsprofielen zijn weergegeven in Figuur 5-1 t/m Figuur 5-4. Daarnaast zijn er voor ieder scenario 12 dwarsprofielen bij de windturbines weergegeven in bijlage A.

5.3 Samenvatting uitkomsten XBeach stormsimulaties

Het effect is geconcentreerd achter de windturbines zichtbaar. Ten opzichte van Svašek Hydraulics (2019c) is het effect kleiner (verklaarbaar want er is met significant slankere obstakels gerekend). Het netto resultaat is in ieder geval dat de negatieve effecten tussen de turbines zeer beperkt blijven tot circa 10 m^3/m extra duinafslag zoals te zien in Tabel 5-1.

Bij zowel storm A als B is sprake van een kleinere opbouw van de voeroever ten zuiden van het traject van de windturbines. Dit leidt tot hogere afslag ter plaatse van 20 m^3/m (in geval van de 2019 bodem) zoals te zien in Tabel 5-1.

Tabel 5-1: Maximum extra afslag voor elk scenario, verdeeld in de gebieden tussen en ten zuiden van de turbines.

	Maximum extra afslag tussen turbines	Maximum extra afslag ten zuiden van turbines
2019 bodem storm A na 32 uur	9.5 m^3/m	NVT, want niet maatgevend[2]
2019 bodem storm B na 32 uur	12.1 m^3/m	19.9 m^3/m
Ontwerpbodem storm A na 16 uur	9.7 m^3/m	NVT, want niet maatgevend[2]
Ontwerpbodem storm B na 16 uur	8.5 m^3/m	12.3 m^3/m

Een opvallend effect is ook de relatief grote vermindering van erosie bij de overgang van hard naar zacht aan de noordkant van de zachte wering. Hier lijkt niet alleen sprake te zijn van effect achter de windturbines maar ook ter hoogte van de windturbines zelf. De overgangszone wordt gekarakteriseerd door grote erosie doordat golfgedreven kustlangse stroming met weinig sediment over de harde wering bij het strand aankomt en daar gelijk veel sediment oppikt. De eerste meest noordelijke windturbine vertraagt deze stroming en dus het morfologisch effect. Bij storm B komt de golf in deze zone loodrechter invallen en daardoor is de kustlangse stroming en ook het effect van windturbines hierop beperkter.

6 KWALITATIEVE BEOORDELING EFFECT OP LANGE TERMIJN ONDERHOUD

In Svašek Hydraulics (2019b) is het effect van de turbines met een positie tegen de rand van het Natura2000 in beeld gebracht, zowel wat betreft effect op eolisch transport als op watergedreven morfologie. Er is geconcludeerd dat er zowel positieve als negatieve effecten te verwachten zijn, die allen ruim een orde kleiner zijn dan het jaarlijks onderhoud van de zachte wering.

[2] Storm A is niet representatief voor maatgevende condities voor de zuidkant van MV2, waar de extra afslag ten zuiden van de turbines plaatsvindt,

Binnen de scope van het voorliggende onderzoek passen de (rekenintensieve) lange termijn XBeach berekeningen niet. Er wordt daarom een inschatting gemaakt op basis van de eerdere berekeningen in Svašek Hydraulics (2019b). Deze berekeningen lieten een beperkte salientvoming zien achter de turbines en een netto afname in de suppletiebehoefte van enkele tienduizenden kubieke meter per jaar. Het jaarlijks onderhoud van de wering is orde 600-700 duizend kubieke meter per jaar. Het lange termijn effect op zowel grootschalige watergedreven morfologie als op eolisch transport zal beperkter zijn door:

1. De beperkte diameter van het slanke monopile ontwerp.
2. De positie van de turbines hoger op het strand (in geval van de 2019 bodem op circa 1m+NAP). Omdat de turbines ongeveer op gemiddeld hoogwater staan zal er minder effect zijn op watergedreven transport. Daarnaast zal het effect op eolisch transport ook afnemen aangezien het intergetijdengebied wordt gezien als de bron voor eolisch transport (Svašek Hydraulics, 2019b).

Aan de eindconclusies van de eerdere rapportage (Svašek Hydraulics, 2019b) verandert dit weinig. Het effect is kleiner, maar zal nog steeds aanwezig zijn. Doordat zand wordt vastgelegd in salienten en het eolisch transport groter wordt kan de onderhoudsbehoefte initieel toenemen, zie Svašek Hydraulics (2019b, paragraaf 4.6). Op langere termijn wordt sediment beter vastgehouden en is een toename in onderhoud – op basis van de uitgevoerde analyse – niet te verwachten. Hierbij dient de kanttekening te worden geplaatst dat de effecten naar alle waarschijnlijkheid niet te onderscheiden zijn van de 'natuurlijke' variatie in onderhoud.

7 OMGAAN MET ONZEKERHEID

De expertgroep heeft tijdens de Expert Meeting in 2019 (zie Svašek Hydraulics, 2019e) aanbevolen om een onzekerheidsmarge af te leiden uit een gevoeligheisanalyse met XBeach. Deze is dan ook uitgevoerd als onderdeel van Svašek Hydraulics (2019b). Instellingen, de afstand van de kust en het aantal turbines zijn hierbij gevarieerd. Uit de resultaten blijkt het maximum verschil tussen referentie en ingreep niet erg gevoelig te zijn voor deze variaties. Op basis van expert judgement is uiteindelijk een factor van 2 aangenomen, als conservatieve factor. Zeker gegeven de toch al conservatieve benadering in de sommen (veel afslag, te grote turbine funderingen).

8 CONCLUSIES

De Eneco-2020 configuratie wijkt beperkt af van de eerder beschouwde ingrepen RWS-2019 en Eneco-2019 zie respectievelijk Svašek Hydraulics (2019b en c). Waar eerder een conventionele landfundering is beschouwd (en in de simulaties conservatief wordt gerepresenteerd) wordt in de aangeleverde configuratie uitgegaan van slankere monopiles. In deze configuratie zijn de monopiles (5 à 6 meter) gesimuleerd door palen met een diameter van circa 10 meter. De funderingen staan (net als Eneco-2019) wel beduidend dichter bij de hoogwaterlijn.

De berekening is om drie redenden conservatief en zal daardoor het effect van de turbines overschatten:

- De palen zijn geschematiseerd als 10 m brede objecten, terwijl ze in werkelijkheid 5 m breed worden.
- Korte golfenergie zal voor een deel om de palen heen lopen, in de korte-golven-module van XBeach wordt deze energie volledige geblokkeerd. Het effect van de palen wordt hierdoor dus overschat. Bij lange golven (maatgevend voor duinafslag) speelt dit niet omdat ze door XBeach volledig worden *resolved*.
- Het model laat sowieso veel afslag zien (de ontwerpduin breekt halverwege de storm door), bij meer default instellingen waarbij de afslag kleiner is, is ook het effect kleiner (zie Svašek Hydraulics, 2019b, Bijlage A.1).

Op grote schaal betekent dit dat de effecten van de turbines op vooral stormafslag beperkter zijn. De turbines blokkeren minder golven waardoor de verandering in afslag kleiner zal zijn. Extra afslag ten opzichte van de referentie blijft op de meeste locaties en voor alle scenario's beperkt tot circa 10 m^3/m. Alleen ten zuiden van de windturbines is door grootschalige onthouding van zand in de bocht (turbines zorgen lokaal voor minder afslag, waardoor op andere locaties minder opbouw is) sprake van een toename in afslag van 20 m^3/m.

Op het gebied van lange termijn onderhoud zullen de effecten vergelijkbaar zijn zoals ingeschat op basis van configuratie RWS-2019 (zie Svašek Hydraulics, 2019b). Ook hier zijn de palen ranker en staan ze hoger in het profiel dan eerder aangenomen. Maar in Svašek Hydraulics (2019b) is de conclusie al dat de effecten op onderhoud waarschijnlijk niet te onderscheiden zijn van de 'natuurlijke' variatie in onderhoud.

Effecten op lokale scour zijn in deze memo niet onderzocht.

9 AANBEVELING

De in deze memo gepresenteerde resultaten geven geen reden om af te wijken van eerder gedane aanbeveling (vrij naar Svašek Hydraulics, 2019b):

> Er wordt geadviseerd uit te gaan van 40 m^3/m extra toeslag boven rekenpeil. In eerste instantie is onderscheid in locatie gemaakt, maar uiteindelijk is in overleg met Rijkswaterstaat het advies gegeven de toeslag over de gehele zachte wering toe te passen. Dit kan worden gegarandeerd door het bestaande ontwerpprofiel (Dean) naar voren te schuiven (maar dit vergt een veelvoud van het benodigde zand en geeft uiteindelijk een grotere veiligheid dan nodig), of het te onderhouden profiel aan te passen aan het profiel zoals dat over de afgelopen zes jaar is ontstaan, bijvoorbeeld door het zand bovenop het duin te garanderen.
>
> Er dient rekening te worden gehouden met in ieder geval initieel extra onderhoud door een variatie in lange termijn morfologie en eolisch transport.

REFERENTIES

Eneco (2020). Gewijzigde coördinaten windmolens zachte zeewering. E-mail, 16 april 2020.

Svašek Hydraulics (2019a). Morfologische inpassing windturbines zachte zeewering MV2. Rapport, 11 maart 2019, referentie 1966/U19006/C/BvL.

Svašek Hydraulics (2019b). Effecten Windturbines op MV2 op stormafslag, lange termijn morfologie en eolisch transport - Opvolging adviezen expert meeting. Rapport, 18 juli 2019, referentie 1966/U19221/C/BvL.

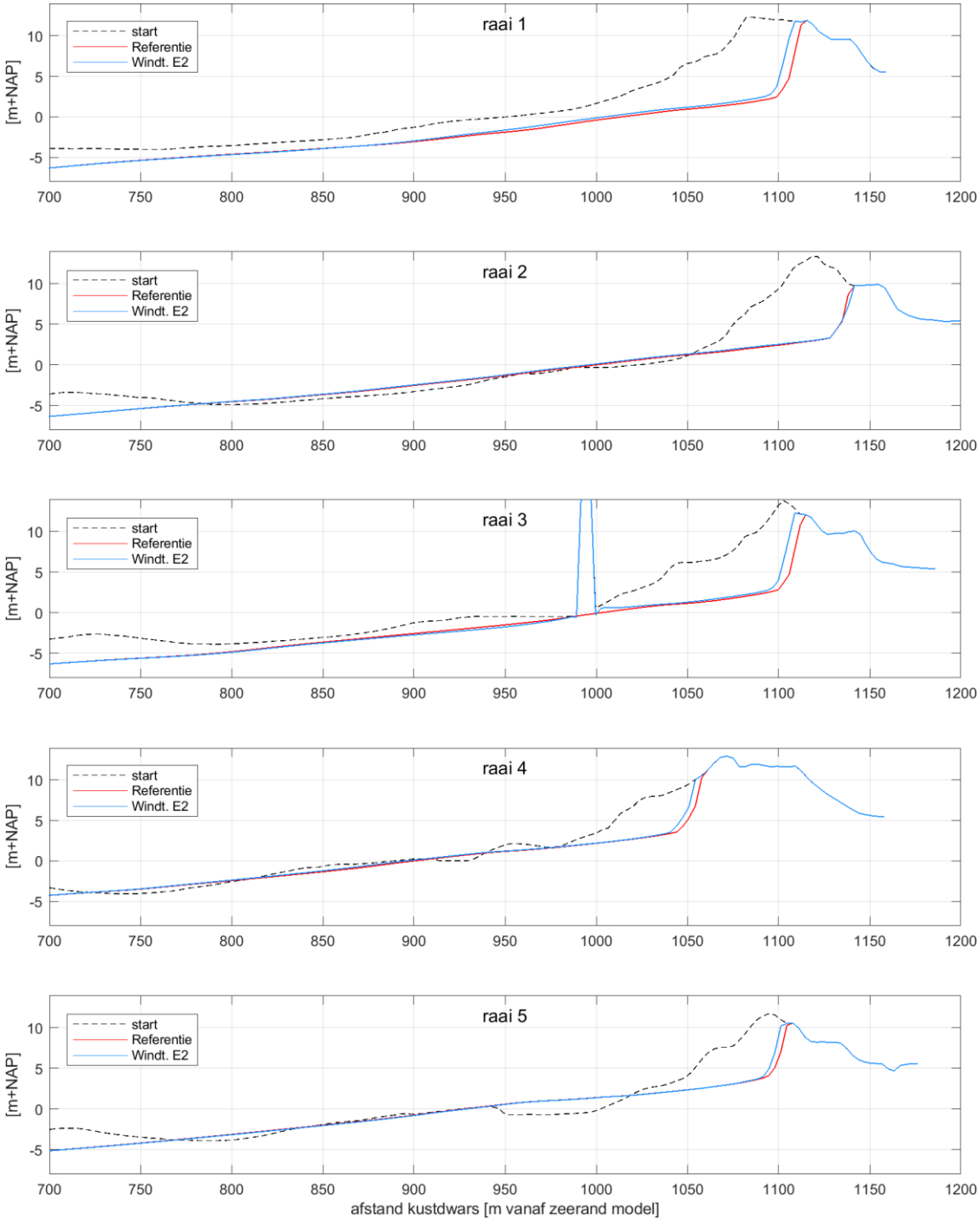
Svašek Hydraulics (2019c). Morfologische effecten op MV2 van windturbine configfuratie E. Memo, 9 oktober 2019, referentie: 1966/U19403/A/BvL.

Svašek Hydraulics (2019d). Achtergrondrapport: XBeach modellering windturbines op de Tweede Maasvlakte. Rapport, 13 juli 2019, referentie: 1966/U19244/A/YAT.

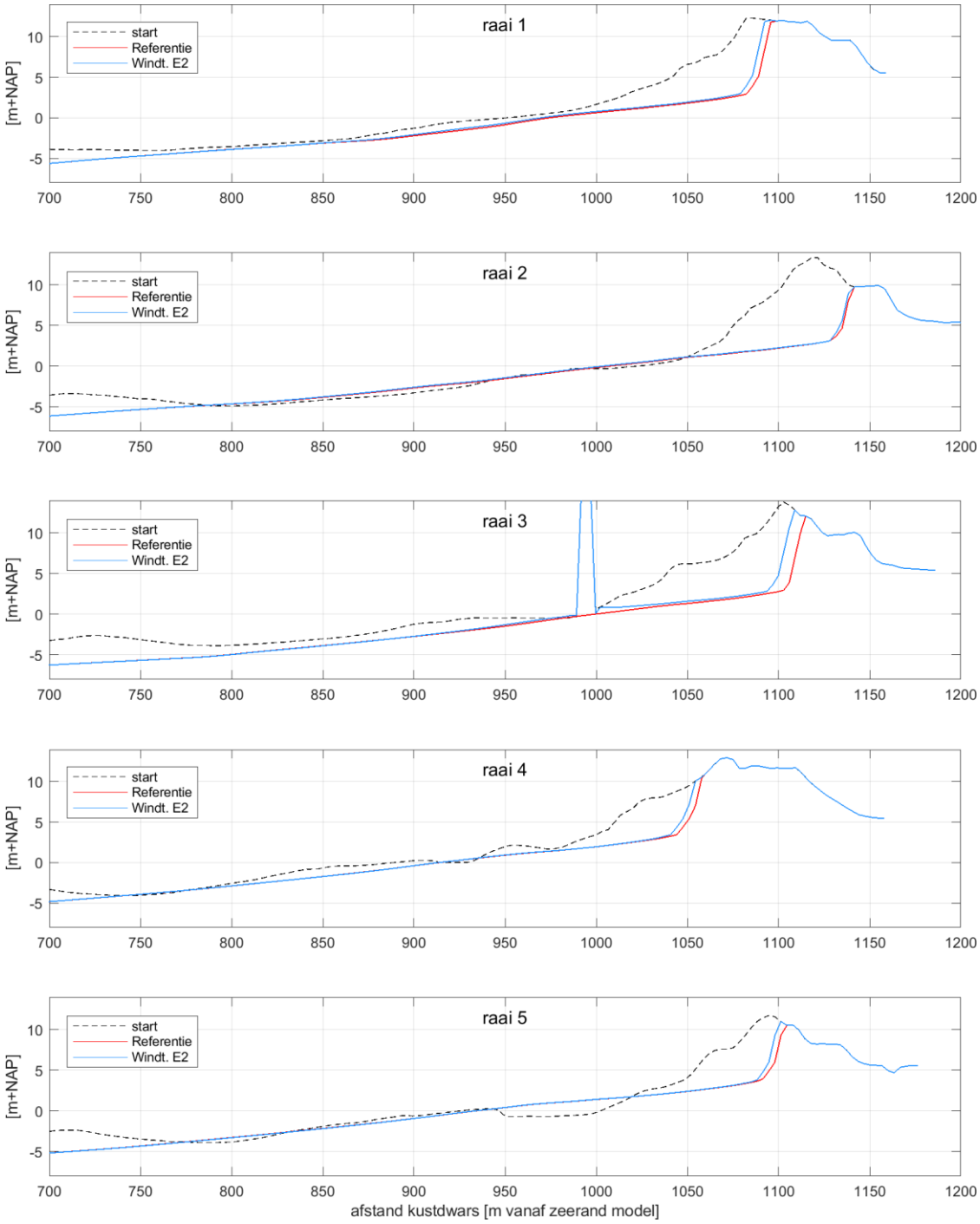
Svašek Hydraulics (2019e). Aanleg windturbines MV2 – Verslag Expert Meeting. Verslag 5 april 2019, referentie 1966/U19140/D/AKR.

10 BIJLAGE A: RESULTATEN IN DWARSPROFIELEN

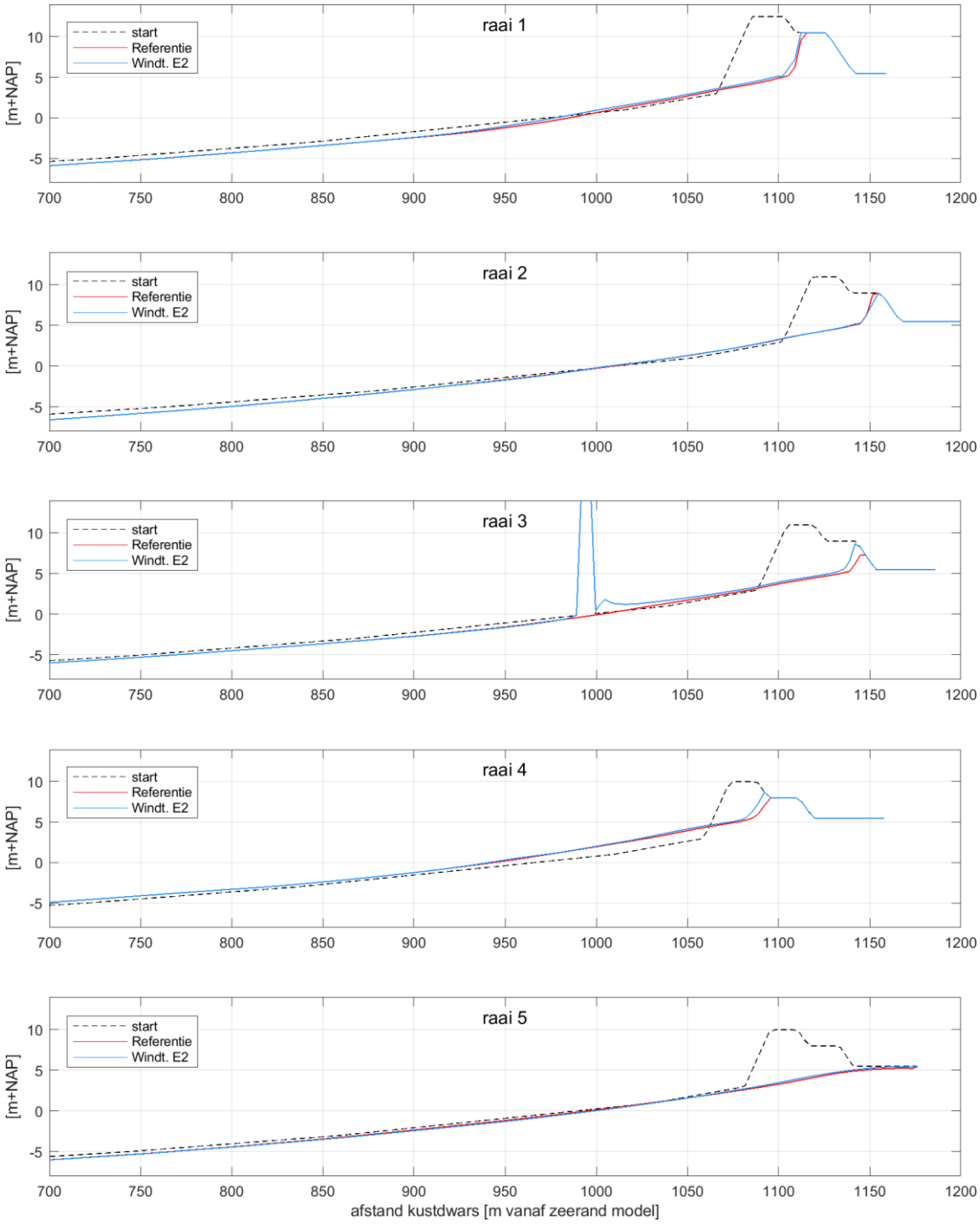
10.1 Dwarsprofielen bij de locaties uit de erosie/sedimentatie figuren



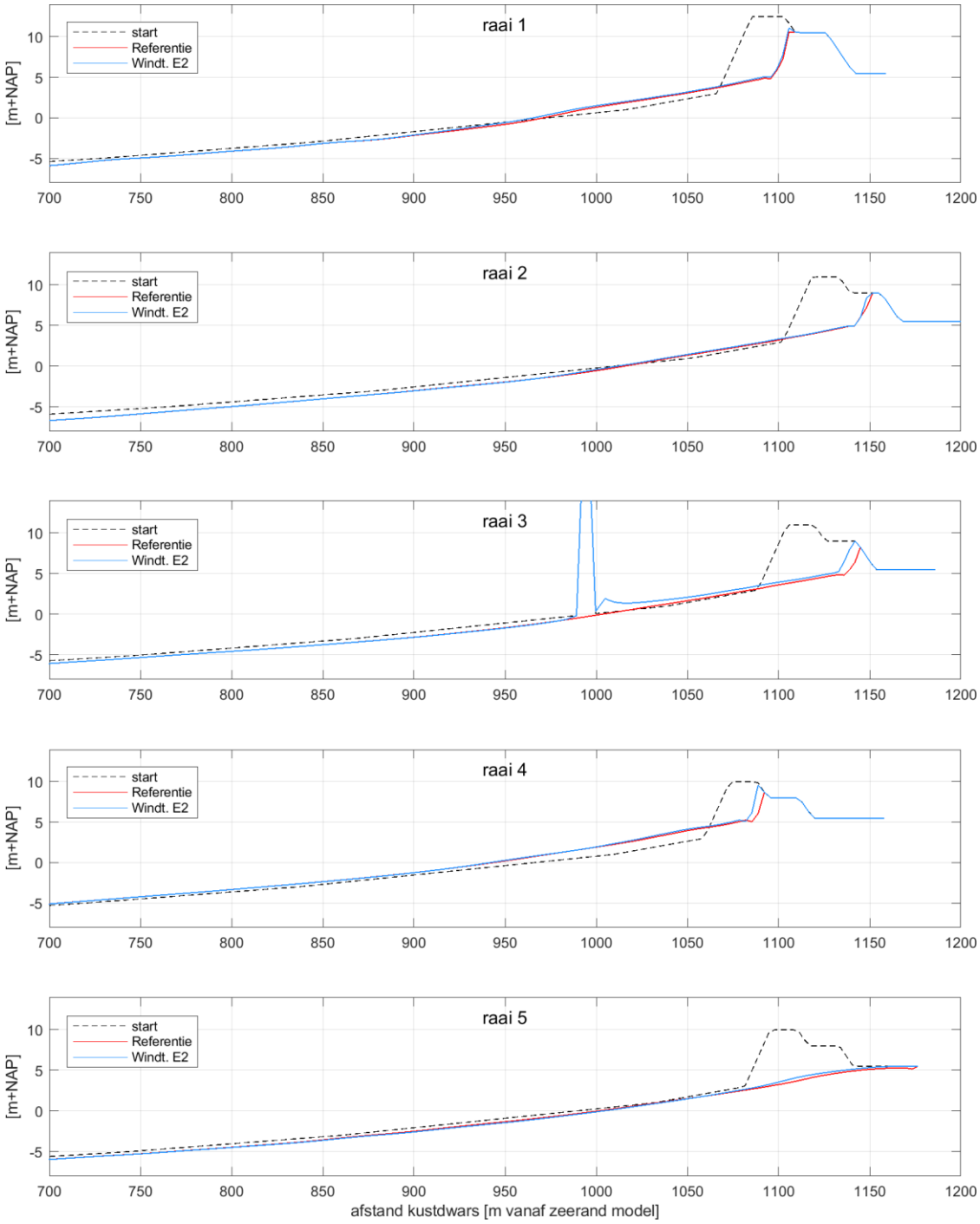
Figuur 10-1: Effect bij storm A, op basis van 2019 bodem, voor vijf raaien, zie Figuur 5-1.



Figuur 10-2: Effect bij storm B, op basis van 2019 bodem, voor vijf raaien, zie Figuur 5-2.

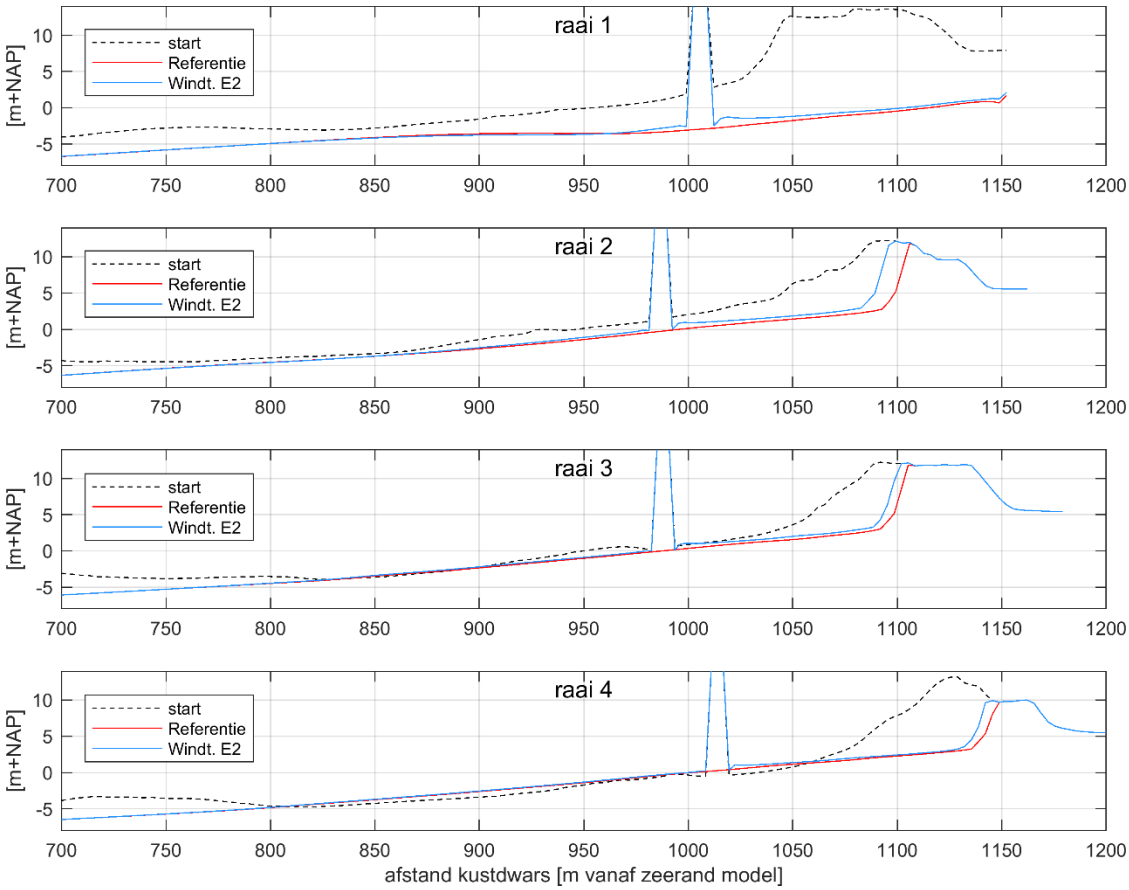


Figuur 10-3: Effect bij storm A, op basis van ontwerpbodem, voor vijf raaien, zie Figuur 5-3.



Figuur 10-4: Effect bij storm A, op basis van ontwerpbodem, voor vijf raaien, zie Figuur 5-4.

10.2 Dwarsprofielen bij de 12 windturbines



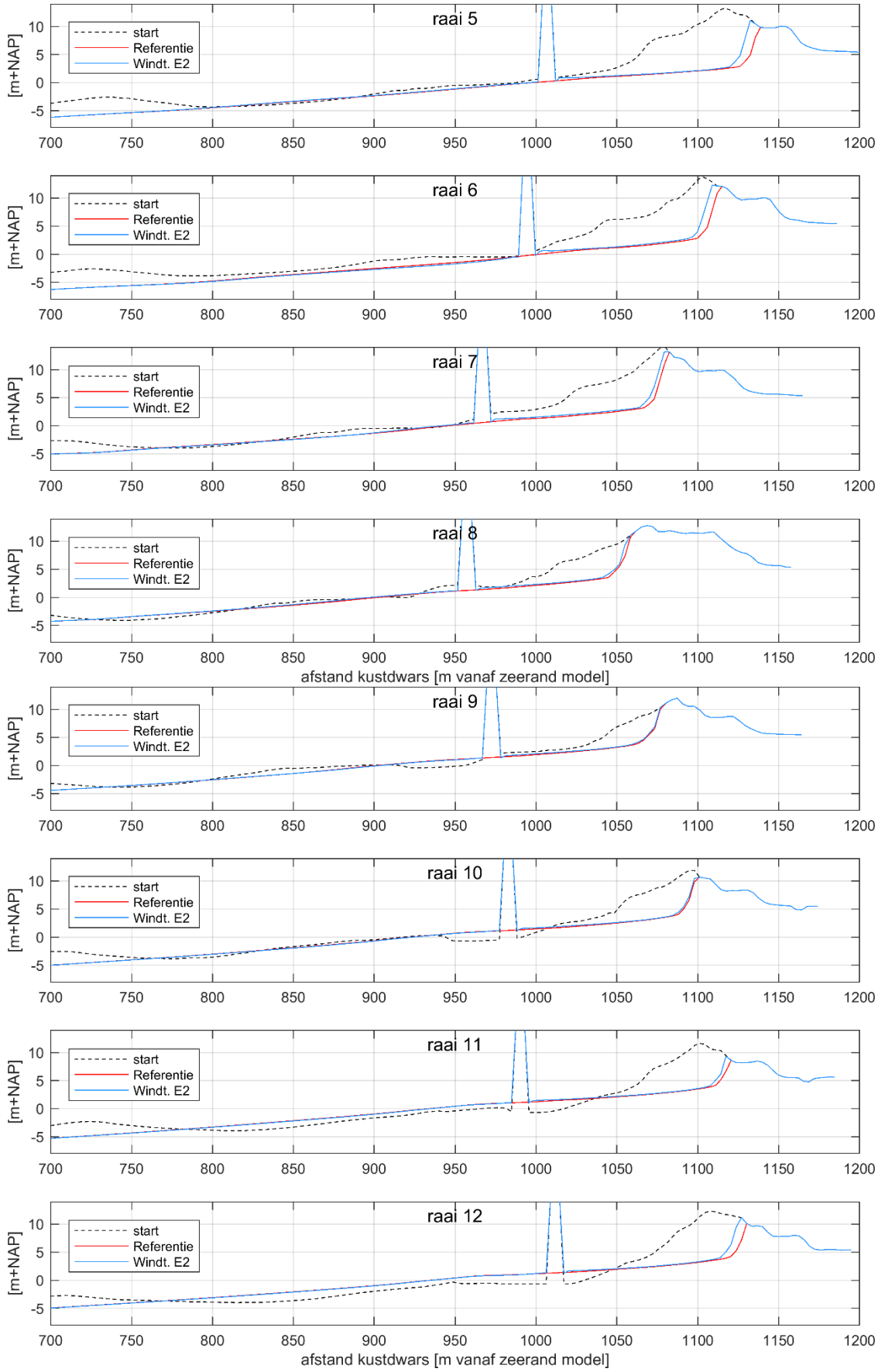
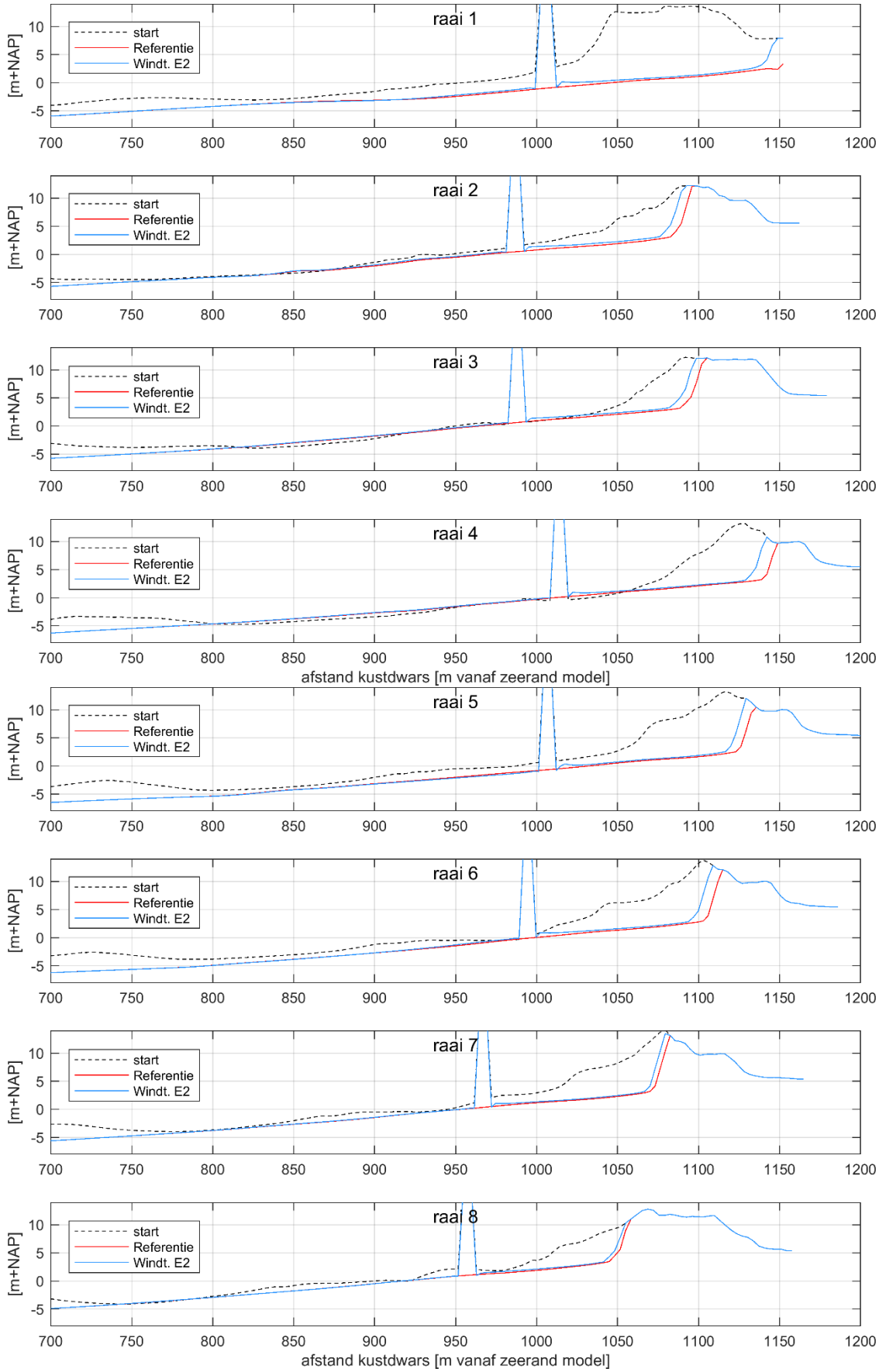


Figure 10-1: Effect bij storm A, op basis van 2019 bodem, voor 12 raaien bij de windturbines.


raai 1
raai 2
raai 3
raai 4
raai 5
raai 6
raai 7
raai 8
start
Referentie
Windt. E2
[m+NAP]
afstand kustdwars [m vanaf zeerand model]

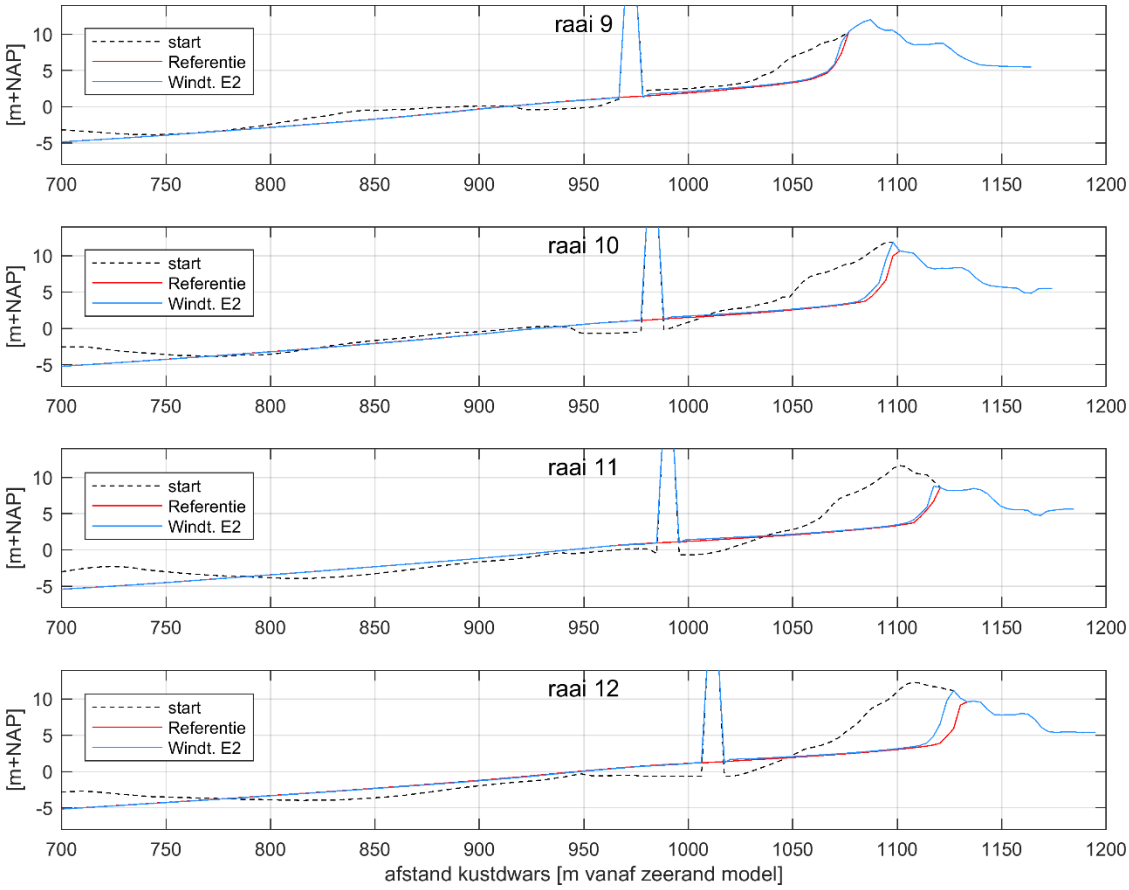
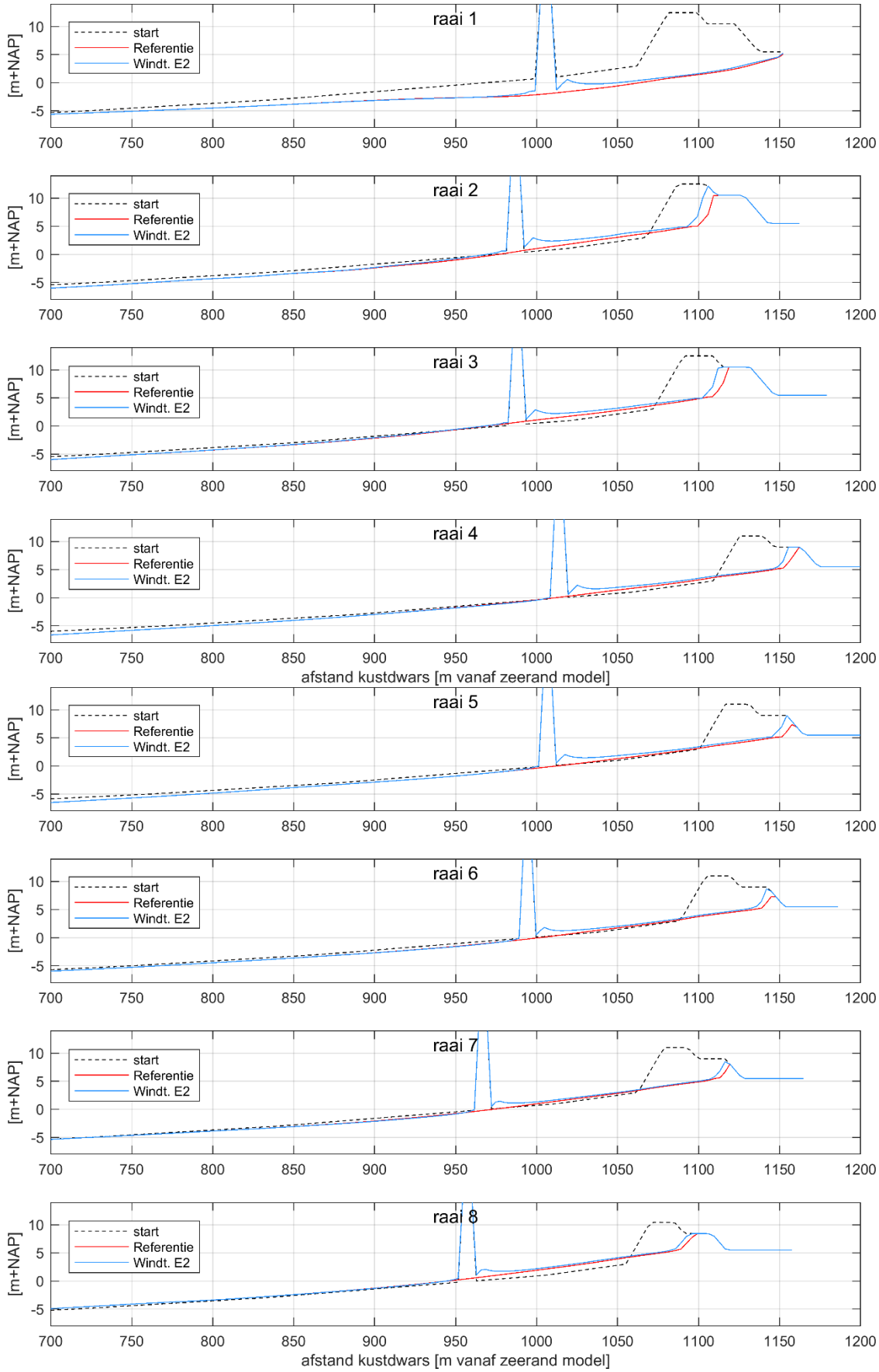


Figure 10-2: Effect bij storm B, op basis van 2019 bodem, voor 12 raaien bij de windturbines.


raai 1
raai 2
raai 3
raai 4
raai 5
raai 6
raai 7
raai 8
start
Referentie
Windt. E2
[m+NAP]
10
5
0
-5
700
750
800
850
900
950
1000
1050
1100
1150
1200
afstand kustdwars [m vanaf zeerand model]

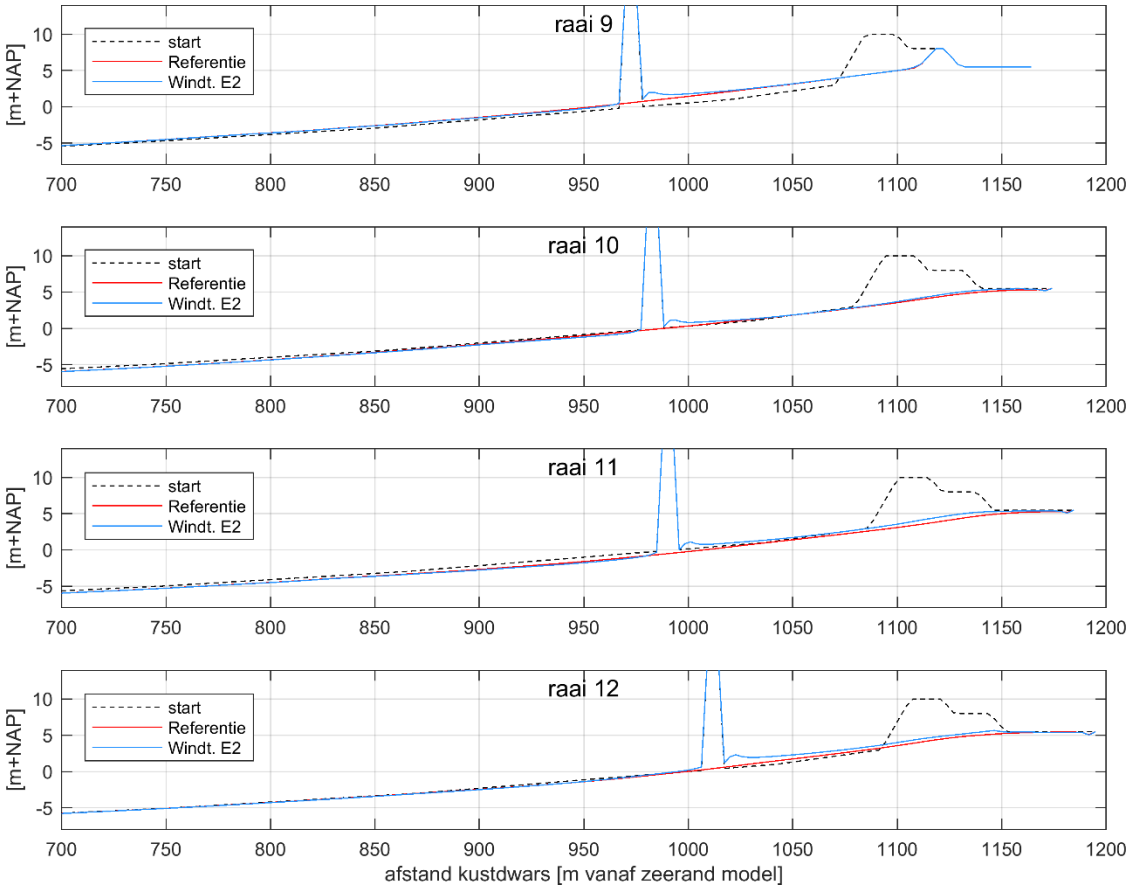
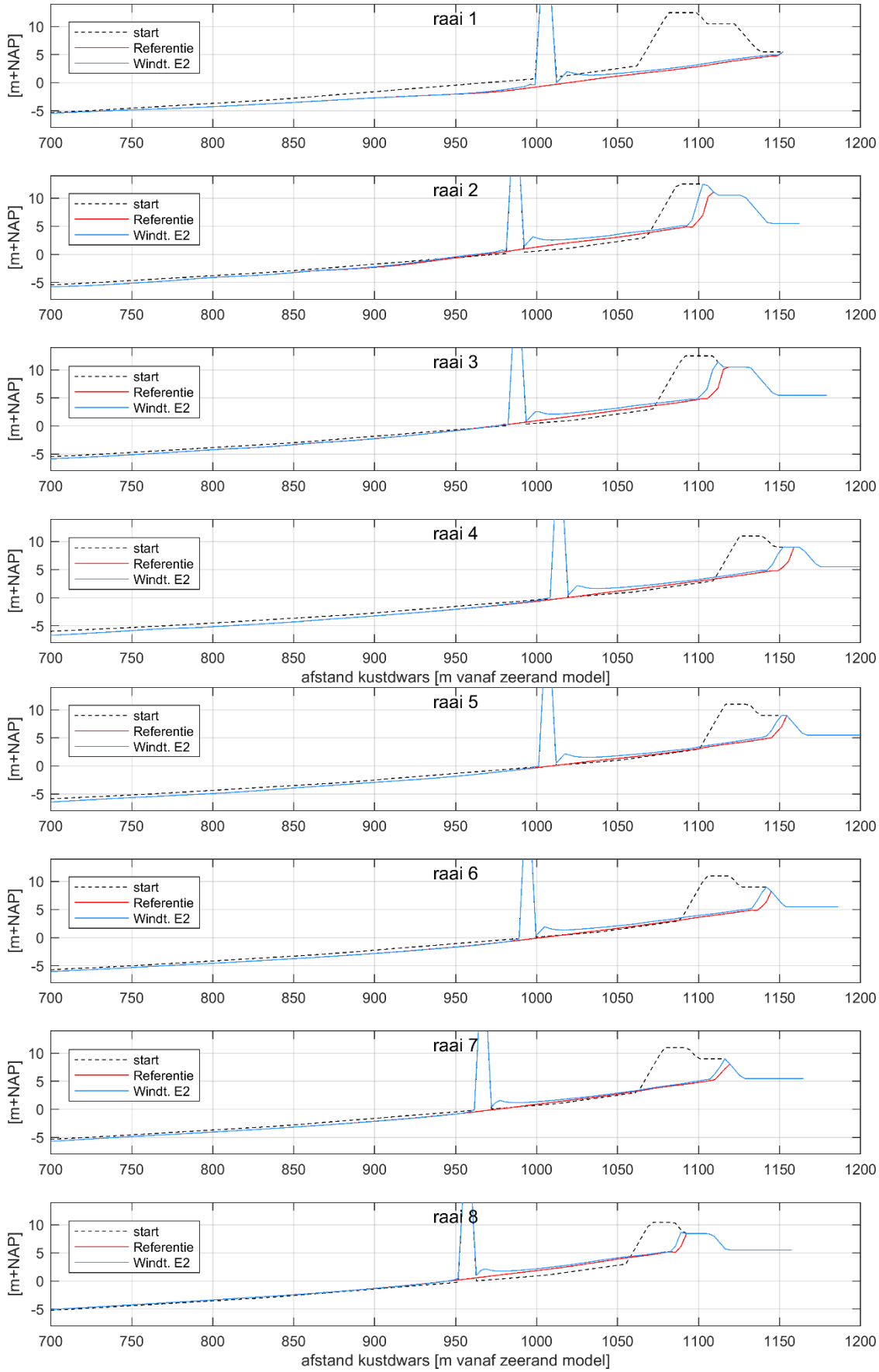


Figure 10-3: Effect bij storm A, op basis van ontwerpbodem, voor 12 raaien bij de windturbines.


raai 1
raai 2
raai 3
raai 4
raai 5
raai 6
raai 7
raai 8
start
Referentie
Windt. E2
[m+NAP]
afstand kustdwars [m vanaf zeerand model]

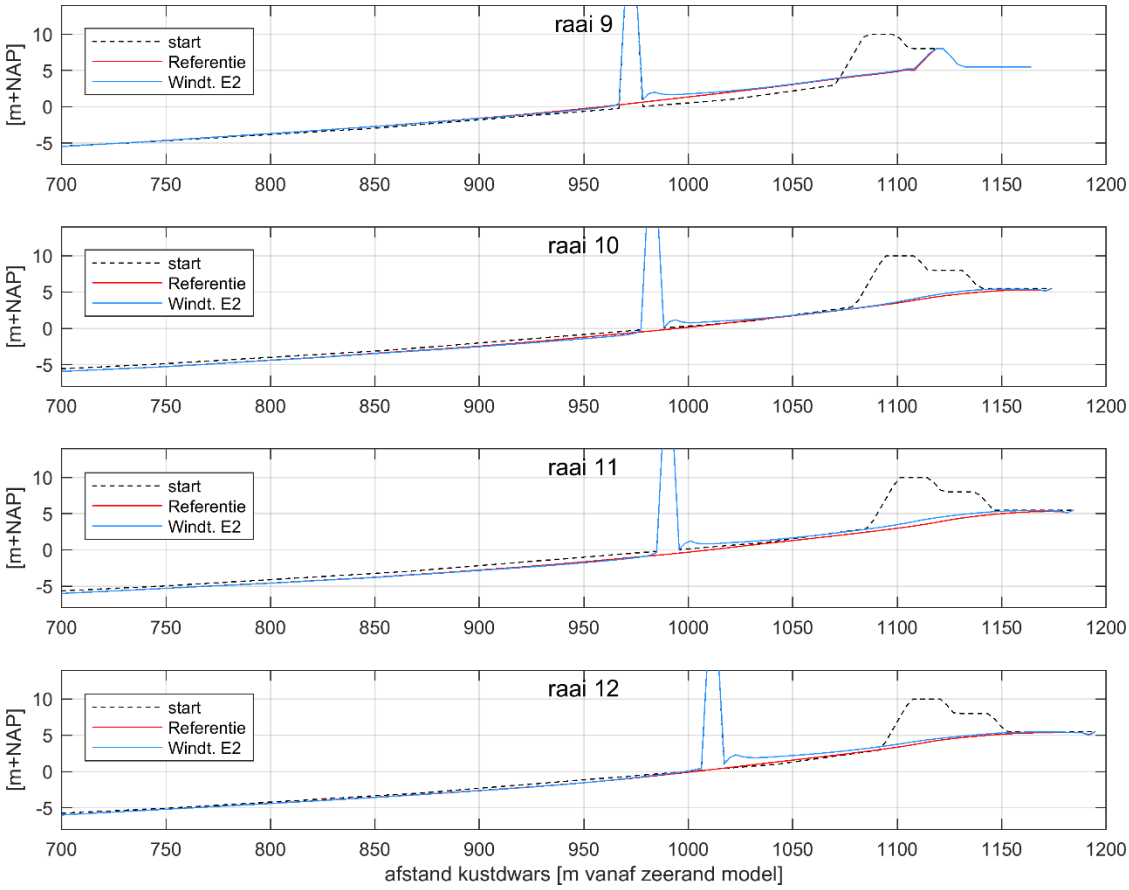


Figure 10-4: Effect bij storm B, op basis van ontwerpbodem, voor 12 raaien bij de windturbines.

SVASEK 2020B 2034-U20140-B-BVL

Inschatting minimum bodem obv Xbeach 1op10000som

Royal HaskoningDHV

MEMO: MINIMUM BODEM NA AFSLAG 1:10000 STORM

Aan	: [redacted](RHDHV)
Van	: [redacted]Svašek Hydraulics)
Datum	: 4 mei 2020
Referentie	: 2034/U20140/B/BvL
Status	: Werkdocument

DISCLAIMER

De in deze memo weergegeven werkwijze komt voort uit een zeer krappe planning en het beschikbaar zijn van slechts enkele stormafslagsommen in XBeach. Deze sommen zijn bovendien met een ander doel opgezet en daardoor voor de toepassing niet persé conservatief. De uitkomsten zijn zodoende expliciet van het karakter: 'beter dan niets' en dienen alleen als indicatie voor een werkelijke inschatting. De normale kwaliteitscontrole van Svašek is op deze memo niet van toepassing geweest.

1 PROBLEEMSTELLING

RHDHV vraagt de minimum hoogtepositie voor 12 windturbines op het strand van MV2.

Ons inziens kunnen deze bepaald worden door de minimumhoogte te nemen van:

- Minimum bodem gedurende normale condities en onderhoud volgens BIP (analyse Anne) MINUS maximum scour gedurende dagelijkse condities (Deltares).
- Minimum bodem tijdens storm condities (ontbreekt nog) MINUS maximum scour gedurende stormcondities (Deltares).

NB: er dient te worden gekeken naar het minimum van deze twee, de erosie dient NIET te worden opgeteld:

- Dat de bodem onder normale condities erg laag kan worden betekent bijvoorbeeld (uitgaande van gegarandeerd volumes) dat er erg veel sediment in het duin en het hoge strand zit, bij stormafslag kan dan worden aangenomen dat de bodem bij de turbines dan alleen maar omhoog komt.
- Anderzijds heeft het geen zin om met een dergelijke bodem te beginnen in de afslagberekening: voor bodemligging na de storm, is het volume in strand en duin voor de storm maatgevend, de verdeling is minder van belang. Deze stelling verdient overigens meer onderzoek. Dit is door Svašek in 2019 nagevraagd bij betrokkenen in het MV2 ontwerp, maar het effect van verschillende profielvormen op de duinafslag is tijdens het ontwerp nooit onderzocht. Dit is vreemd aangezien niet de profielvorm, maar alleen het bijbehorende volume wordt gegarandeerd.

Probleemstelling in het kort: de minimum bodemligging na stormafslag ter plaatse van de turbines ontbreekt. Deze memo geeft een snelle inschatting voor die bodemligging op basis van eerder gemaakte simulaties. Een betere inschatting zou kunnen worden gemaakt op basis van nieuwe berekeningen en extra analyse.

2 AANPAK

We beschikken over simulaties zonder turbines[1] met de ontwerpbodem (die minimum volumes volgens BIP bevat). De berekening is waarschijnlijk conservatief in de zin dat hij veel afslag laat zien en de duinen op veel locaties doorbreken. We gaan uit van het volgende:

- We nemen aan dat MV2 goed ontworpen is en de duinen stand houden bij een 1:10000 storm. Dit betekent dat het grensprofiel (in dit geval circa 28 m2 boven rekenpijl) moet blijven liggen (zie Technisch Rapport Duinafslag, 2007).
- Aan de andere kant nemen we aan dat de MV2 efficient is ontworpen en dat er ook niet veel méér dan het grensprofiel blijft liggen.
- Tot slot is het mogelijk dat in het begin van de storm (wanneer het rekenpijl nog laag is) op de windturbine locatie meer erosie kan zijn dan aan het eind (als de windturbine meer in de sedimentatiezone zit). Dus qua bodemligging is niet perse het moment maatgevend wanneer nog net het grensprofiel aanwezig is; dat moment kan eerder zijn.

Er wordt daarom een plot in de tijd gemaakt van de bodemligging bij de turbine gedurende de 1:10000 storm[2] en tegelijkertijd het volume dat beschikbaar is voor het grensprofiel. De minimum bodemligging die optreedt voordat het volume voor het grensprofiel < 28 m^2 is de maatgevende bodemligging.

3 DISCUSSIE/AANBEVELINGEN

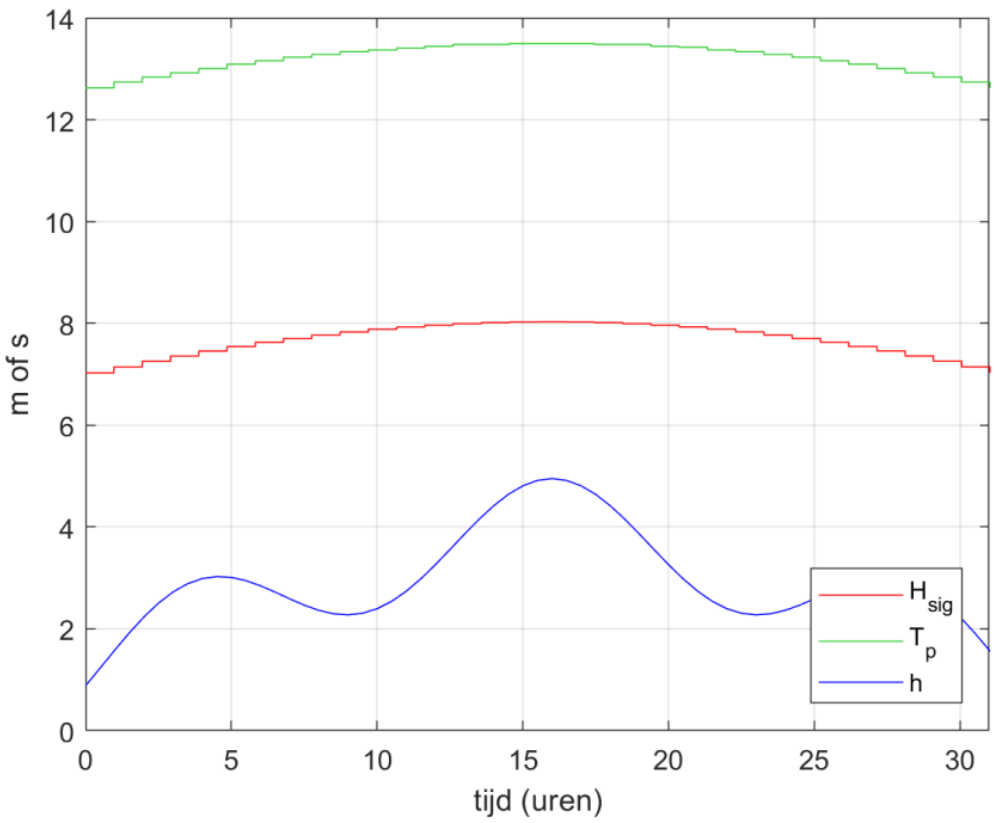
Deze aanpak is onderhevig aan diverse misten en maren - zie ook disclaimer aan het begin van deze memo – de belangrijkste aandachtspunten:

- Een harde storm met laag aangrijpingspunt kan mogelijkerwijs meer erosie veroorzaken dan de 1:10000 storm. We kijken ook naar de vroege fase in de 1:10000 storm, wanneer de waterstand nog relatief laag is (zie onderstaand figuur). Een goede analyse zou echter ook kleinere stormen meenemen. Een tussen-oplossing is ook de stormen van Deltares (1:1, 1:10 en 1:100?) met een gelijksoortige analyse te benaderen[3]; de laagste bodemligging is dan steeds maatgevend.

[1] Simulaties met turbines houden zand vast en de mate waarin dat gebeurt is onzeker, dus dat is geen conservatieve aanpak.

[2] Er zijn er 2: A en B, we kiezen degene die de de laagste bodemligging geeft.

[3] Klopt het dat de resolutie daarvan 10x10 m is? Zo ja, dat is erg grof voor een duinafslag berekening in XBeach.



- We kijken nu naar het absolutie effect in XBeach. Daar zit meer onzekerheid in dan in een effectbepaling. Het verdient aanbeveling om een gevoeligheidsanlayse met XBeach te doen waarbij o.a. ook numerieke instellingen (bijvoorbeeld aantal processoren) worden gevarieerd.
- Het eerder aangegeven proces van afslag die vanaf de bocht wordt afgezet aan weerzijden is onzeker en zal van invloed zijn op de strandligging voor zowel de bocht als aan weerzijden. Het zou goed zijn vooral het positieve effect hiervan te kwantificeren (bijvoorbeeld in een 1D berekening) want is de analyse niet overlag conservatief.
- De overgangszone (tussen hard en zacht) laat veel afslag en erosie zien. Voor zover bij ons bekend is de duinenrij hier extra versterkt. Die versterking zit vermoedelijk niet in de ontwerpbodem zoals die nu wordt gebruikt. Het zou goed zijn dit extra volume wel mee te nemen, want dan zul je op een hogere bodemligging uitkomen.
- Meer onderzoek zou nodig zijn naar effect van [profielvorm voor storm] naar [strandligging na storm].
- Een onzekerheidstoeslag zal geen overbodige luxe zijn. **Gegeven bovenstaande (maar niet alleen die) onzekerheden zou alleen op dit deel van de inschatting een minimale onzekerheidstoeslag van 2 m niet ongepast zijn**. Deze onzekerheid moet wel worden meegenomen in een bredere onzekerheidsanalyse van alle factoren in de minimum-bodemligging-bepaling zoals die aan het begin van deze memo is beschreven.

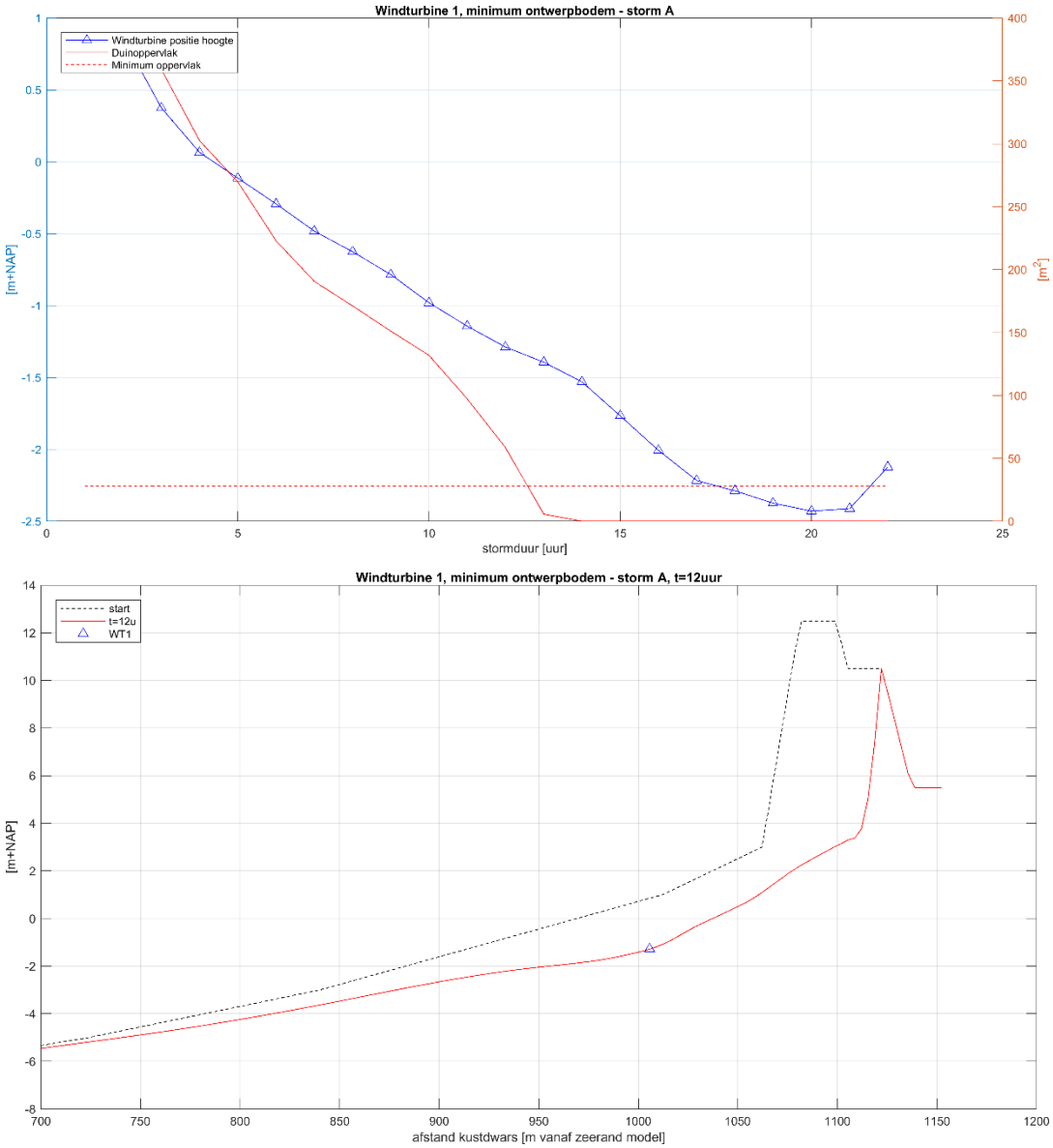
4 RESULTATEN

Eerst een tabel met de eindresultaten.

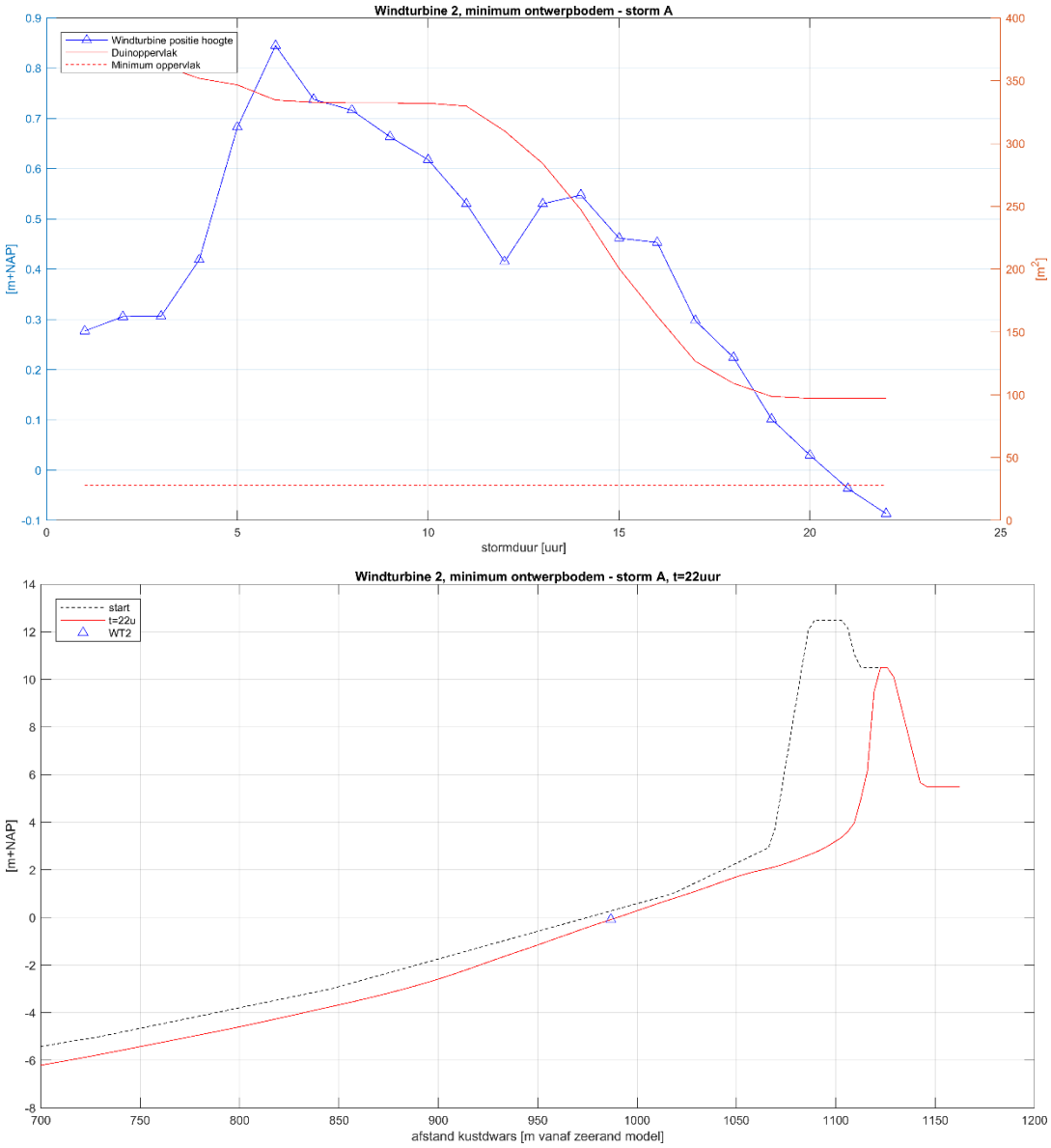
Daaronder per locatie een grafiek met bodemligging in de tijd en het afslagprofiel op het maatgevende moment.

Windturbine	Starthoogte [m+NAP]	Minimumhoogte [m+NAP]
1	0.8	-1.3
2	0.2	-0.1
3	0.2	0.1
4	-0.1	-0.3
5	0.0	-0.4
6	0.0	-0.5
7	-0.1	-0.4
8*	-0.1	-0.1
9	-0.1	-0.3
10	-0.1	-0.4
11	-0.1	-0.6
12	0.3	0.0

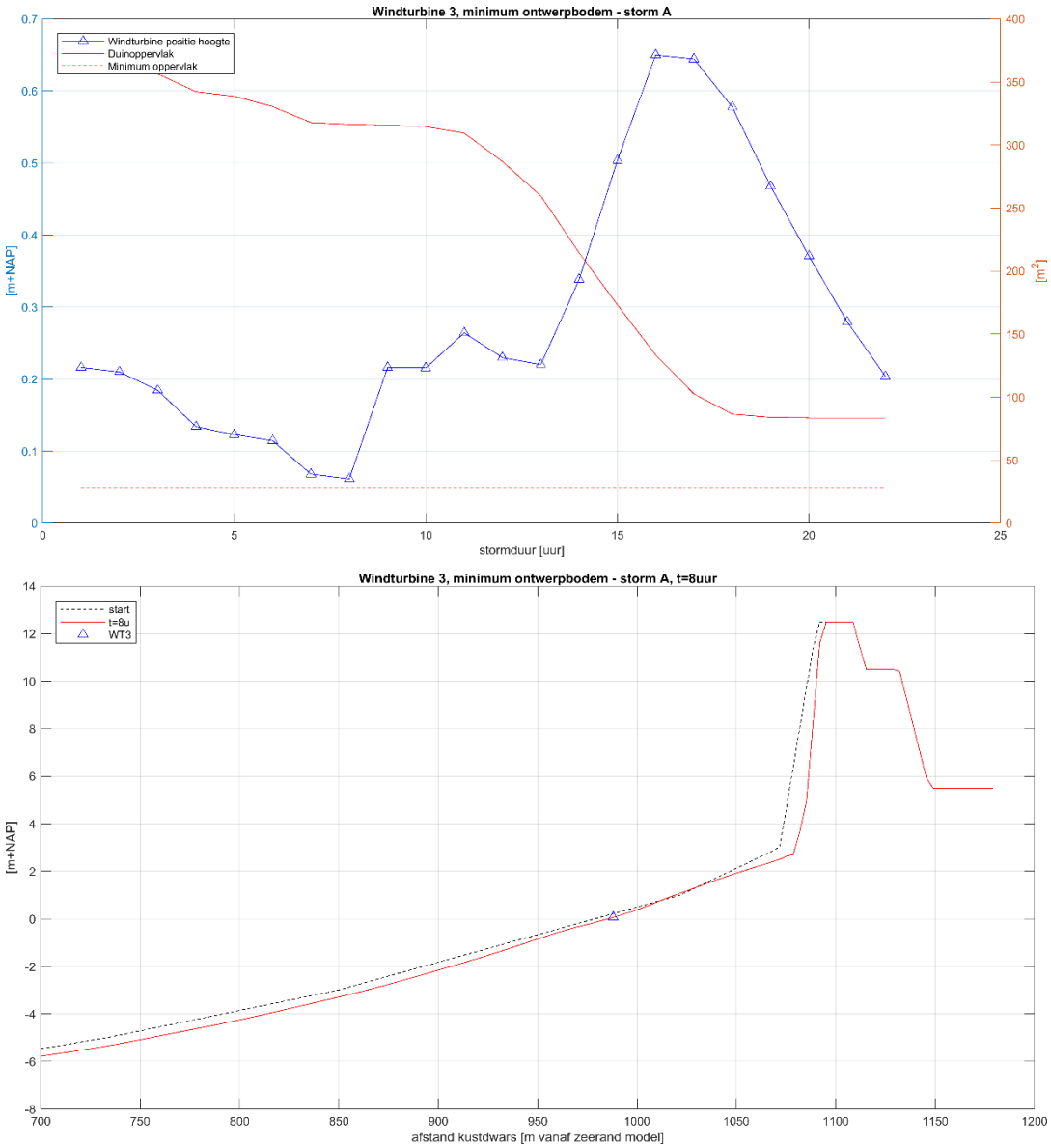
*) Windturbine 8 komt niet lager dan de starthoogte.



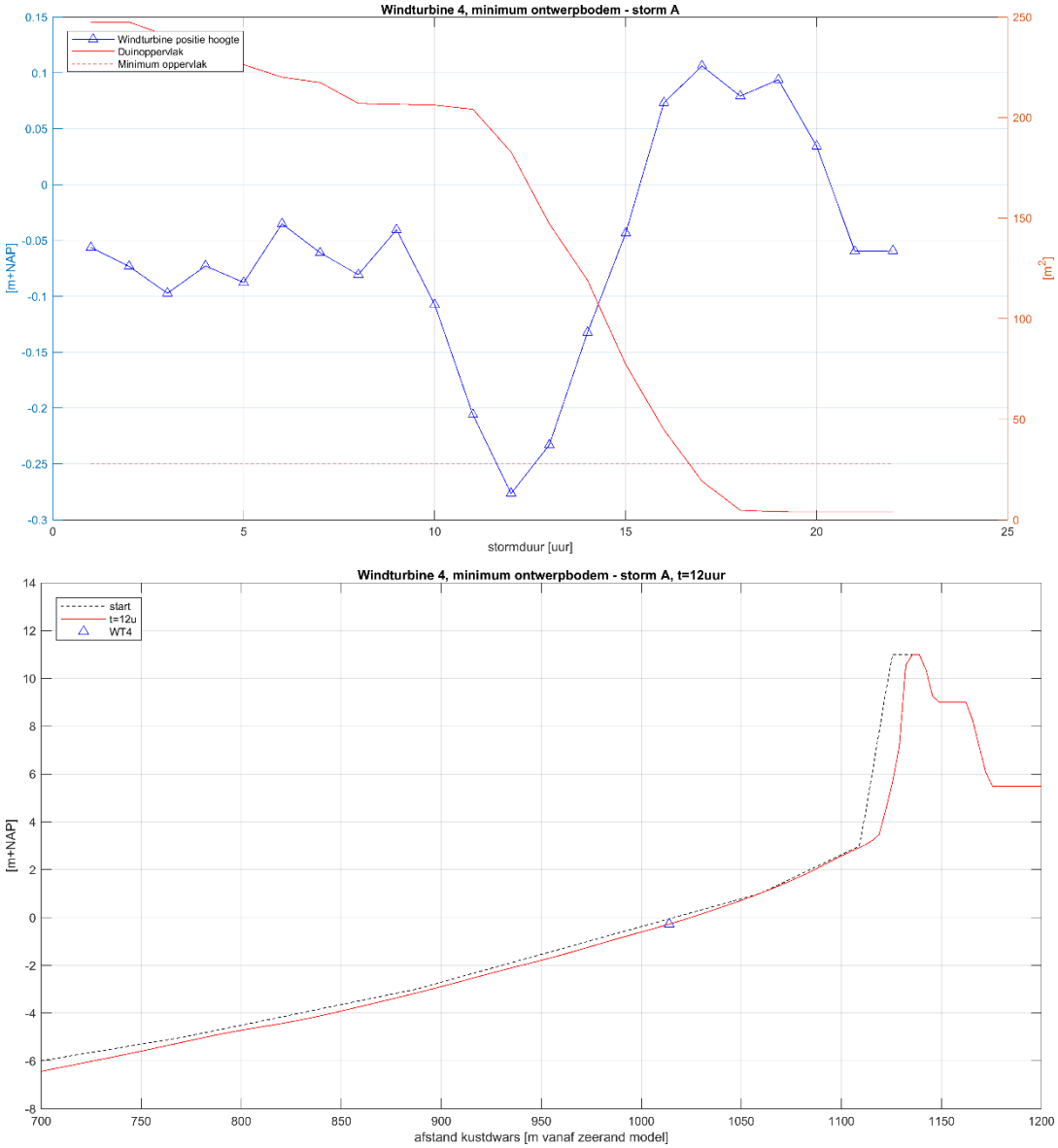
Figuur 1: Windturbine 1, bodemligging in de tijd (boven) en maatgevende afslagprofiel (onder).



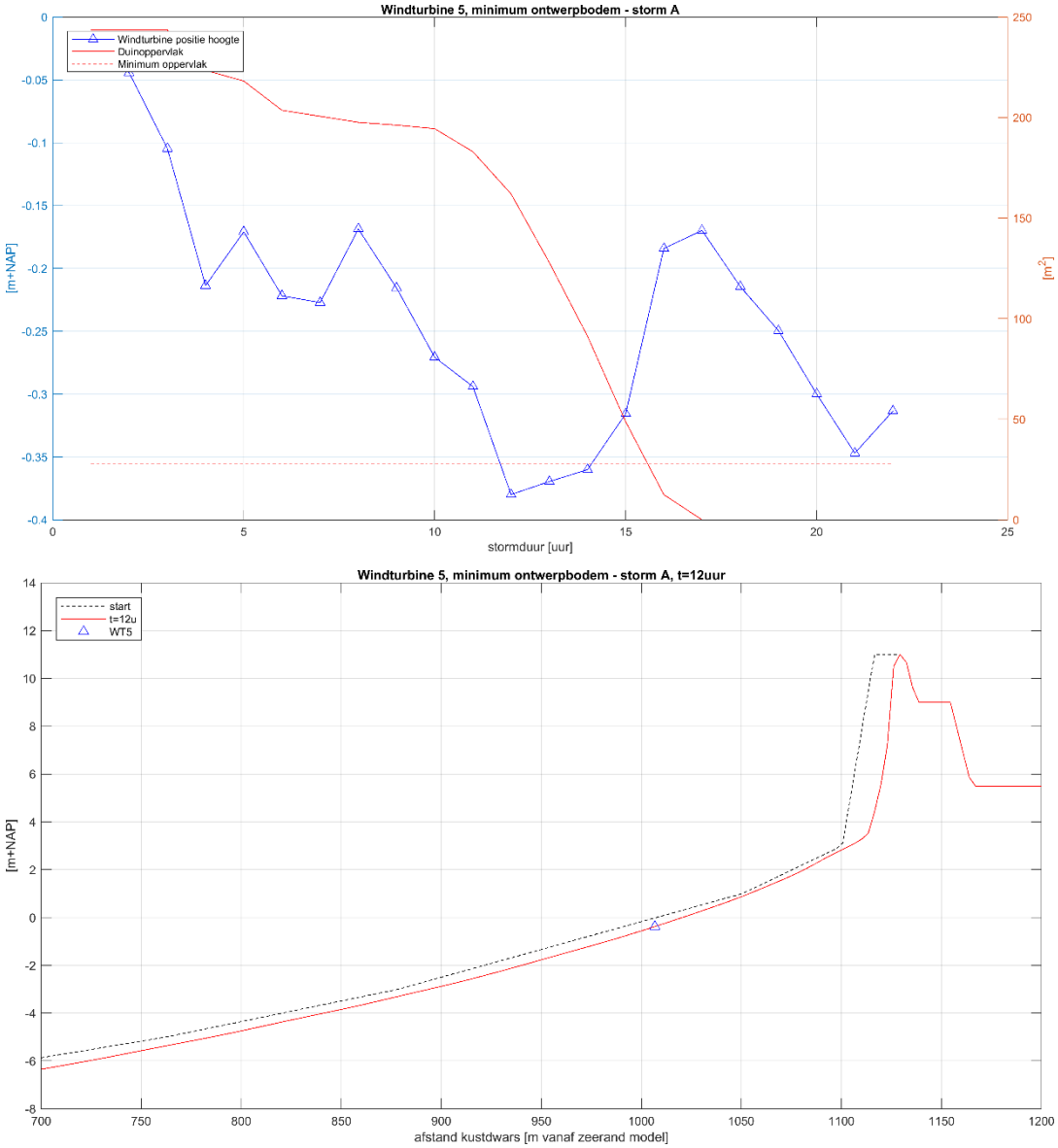
Figuur 2: Windturbine 2, bodemligging in de tijd (boven) en maatgevende afslagprofiel (onder).



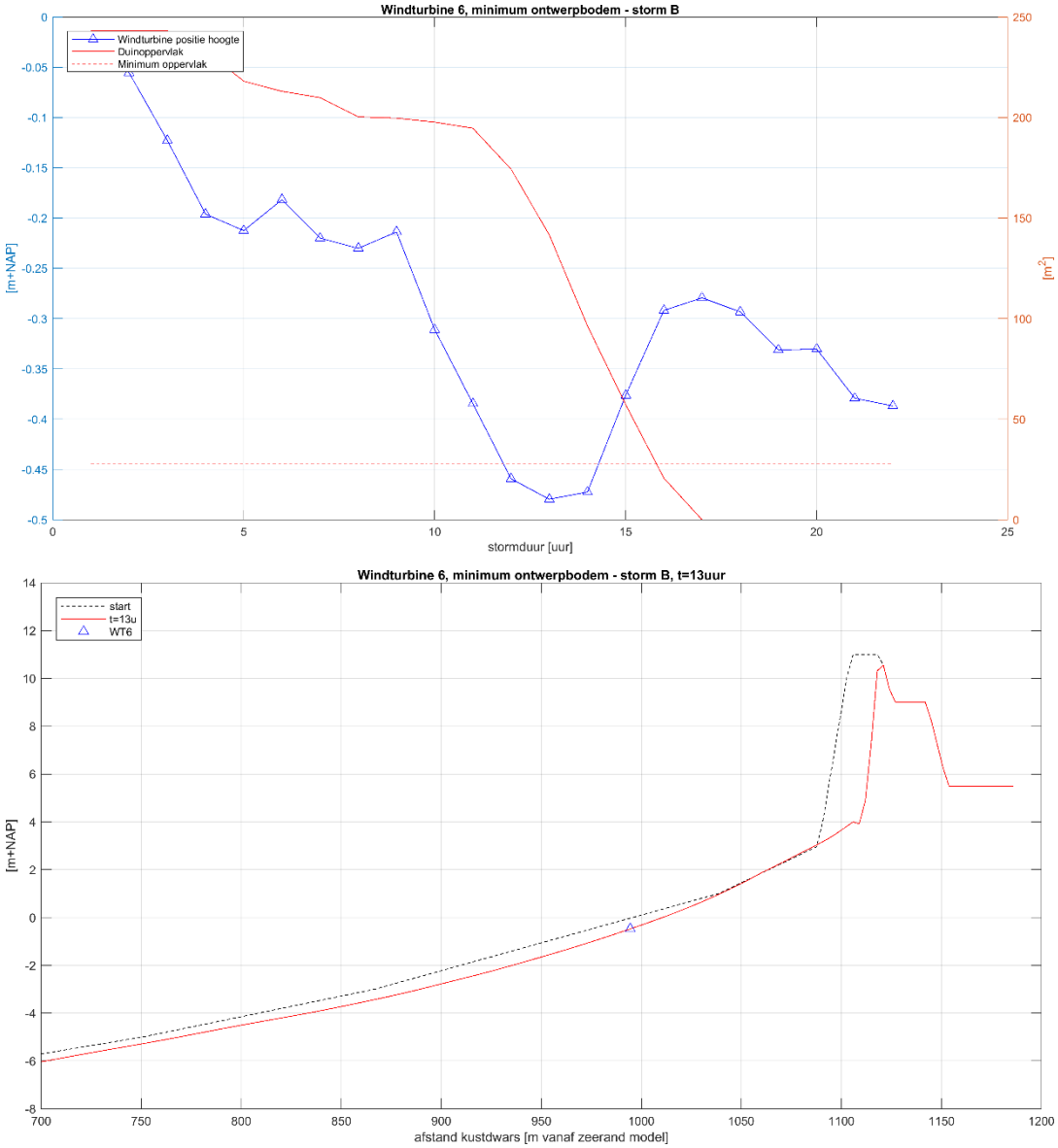
Figuur 3: Windturbine 3, bodemligging in de tijd (boven) en maatgevende afslagprofiel (onder).



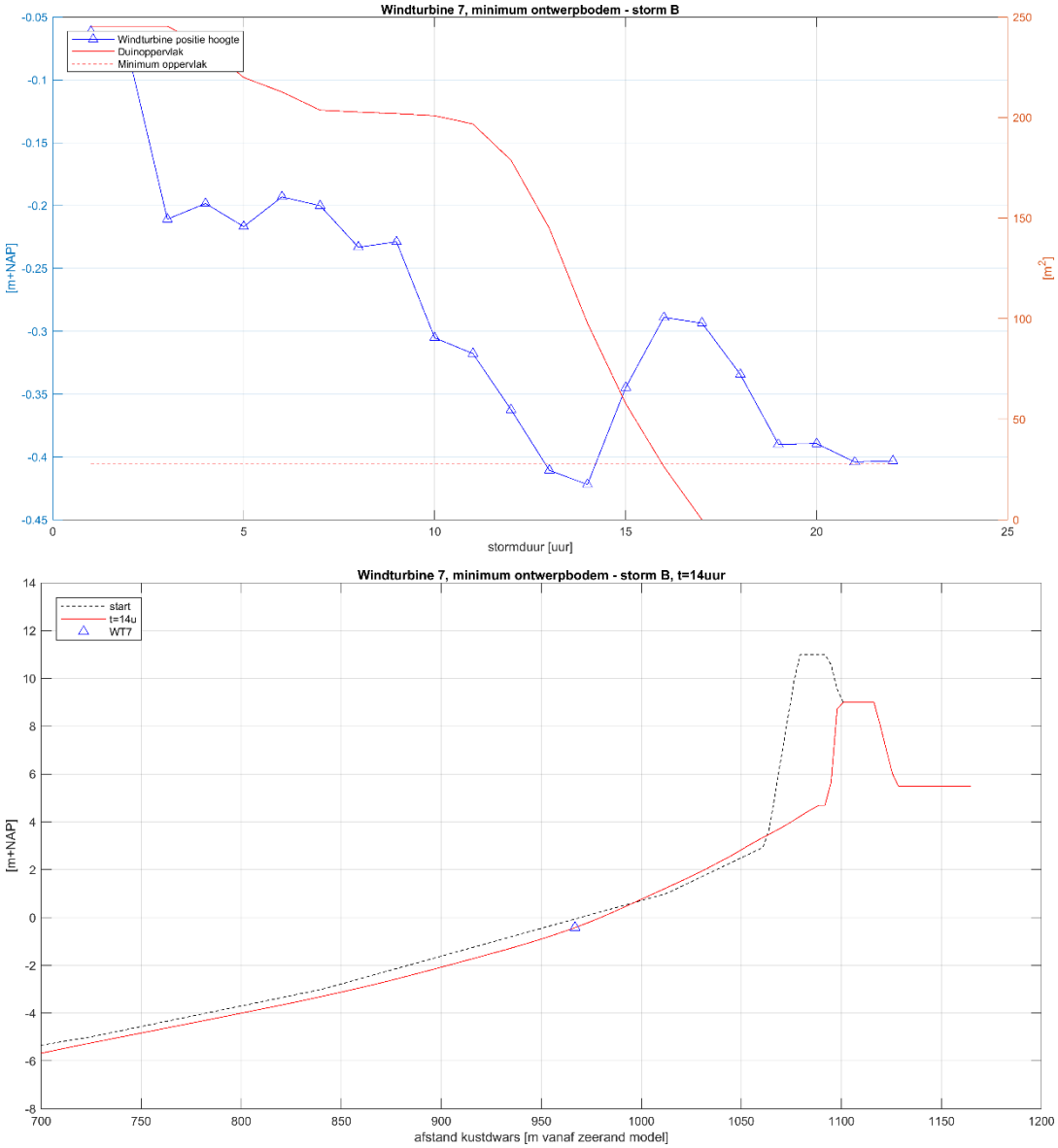
Figuur 4: Windturbine 4, bodemligging in de tijd (boven) en maatgevende afslagprofiel (onder).



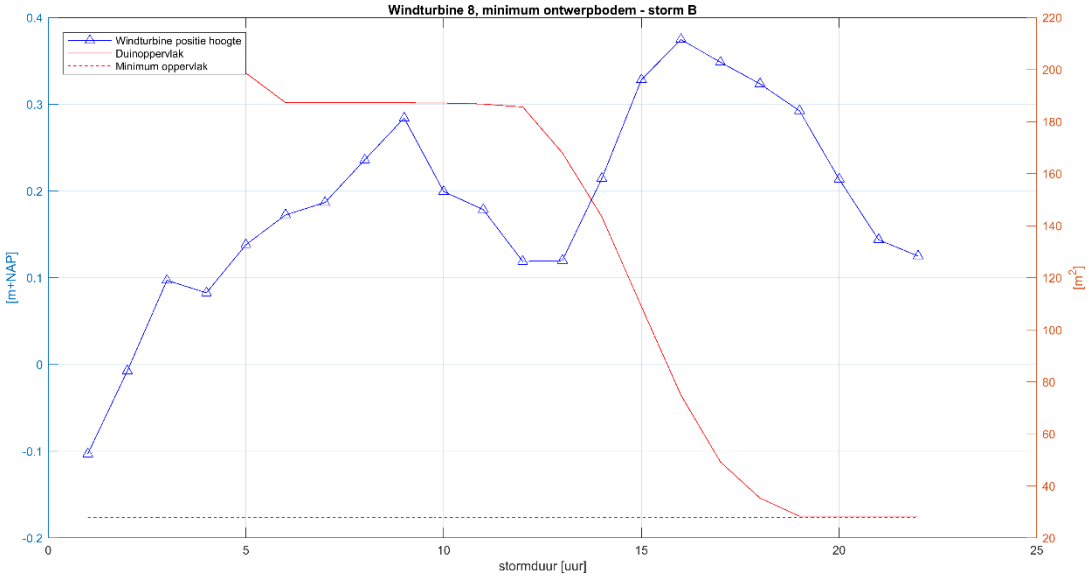
Figuur 5: Windturbine 5, bodemligging in de tijd (boven) en maatgevende afslagprofiel (onder).



Figuur 6: Windturbine 6, bodemligging in de tijd (boven) en maatgevende afslagprofiel (onder).

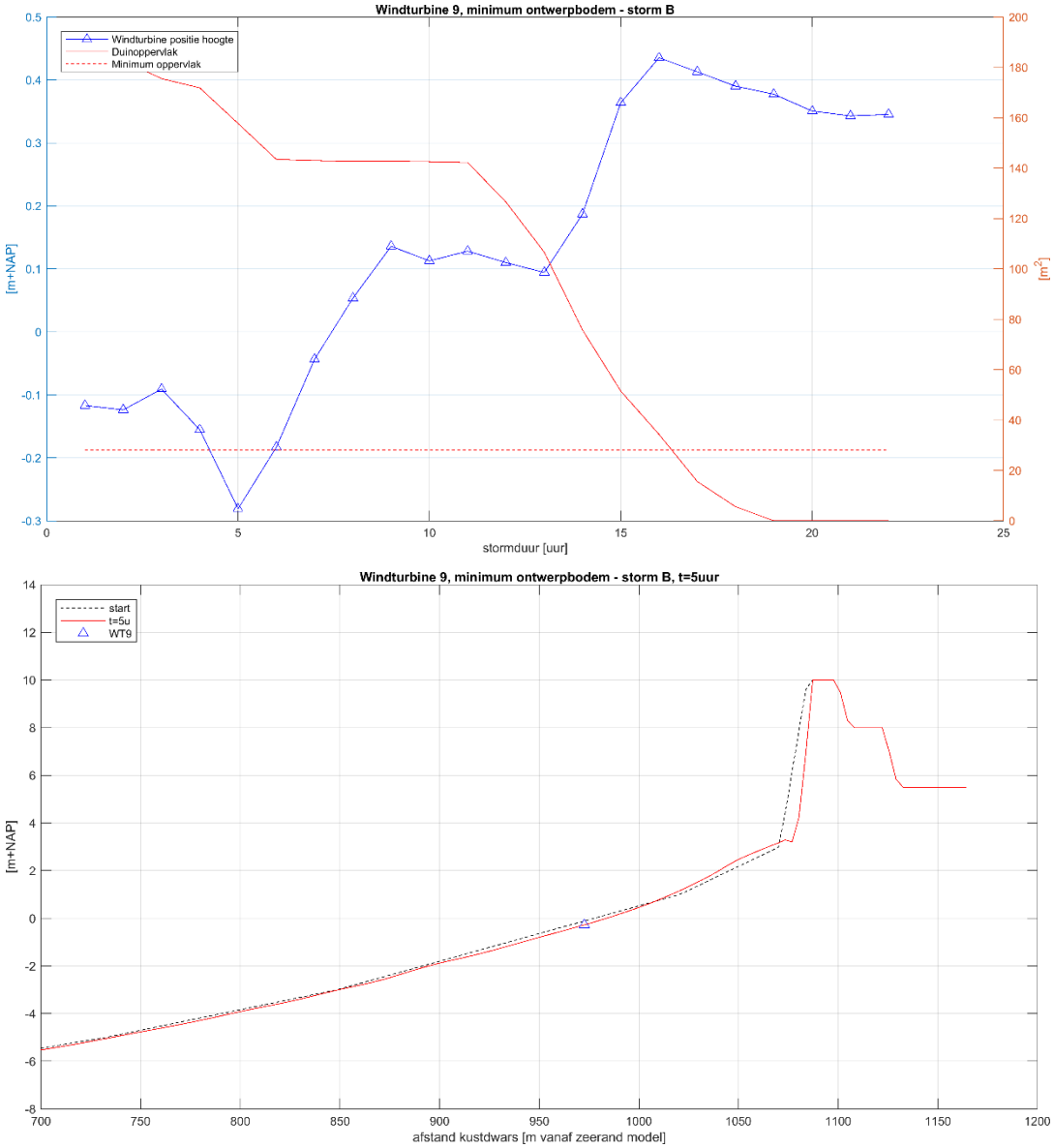


Figuur 7: Windturbine 7, bodemligging in de tijd (boven) en maatgevende afslagprofiel (onder).

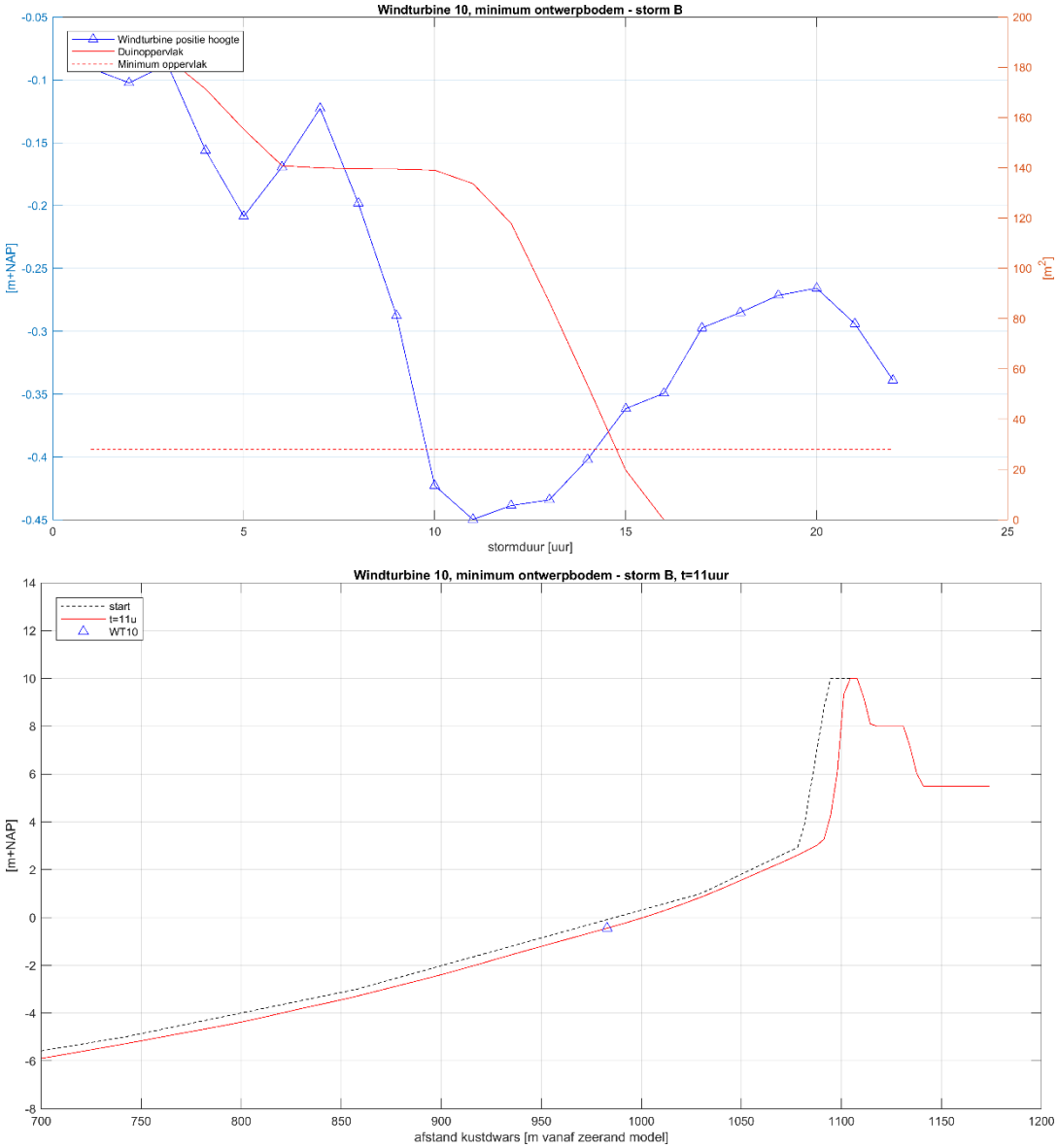


Figuur 8: Windturbine 8, bodemligging in de tijd.

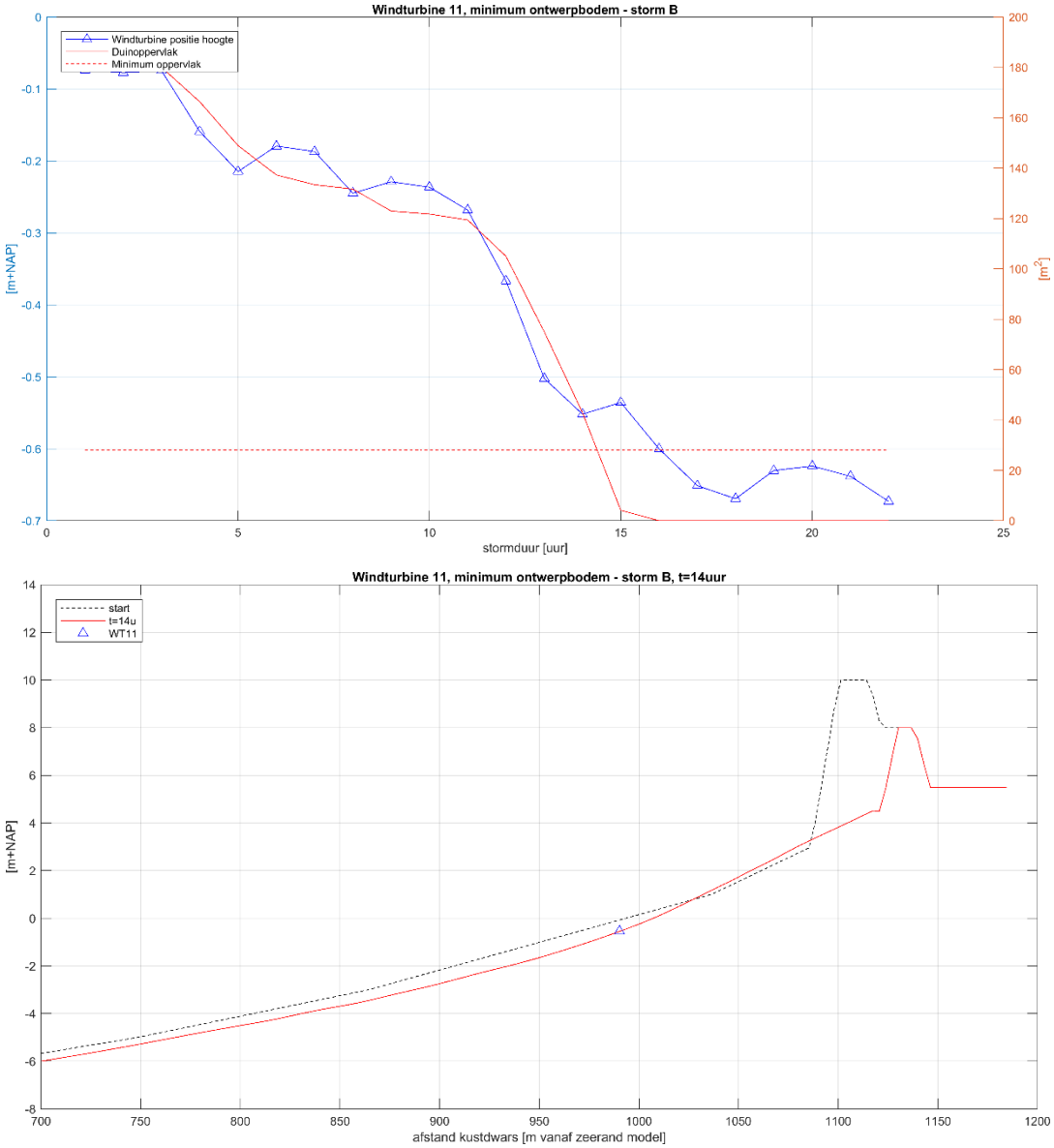
[raai figuur is opzettelijk achterwege gelaten. De minimum bodemligging is niet lager dan bij het ontwerpprofiel]



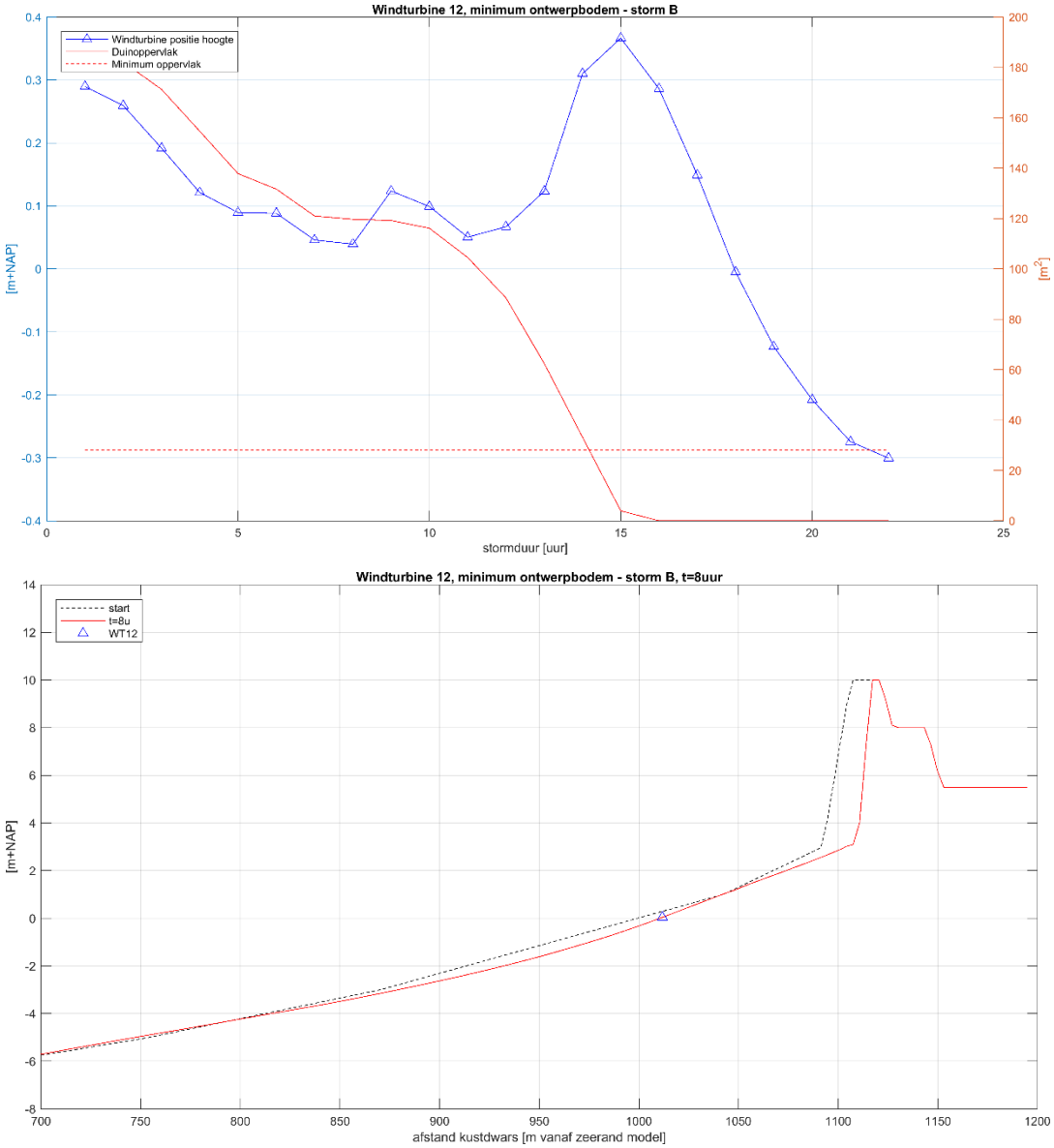
Figuur 9: Windturbine 9, bodemligging in de tijd (boven) en maatgevende afslagprofiel (onder).



Figuur 10: Windturbine 10, bodemligging in de tijd (boven) en maatgevende afslagprofiel (onder).



Figuur 11: Windturbine 11, bodemligging in de tijd (boven) en maatgevende afslagprofiel (onder).



Figuur 12: Windturbine 12, bodemligging in de tijd (boven) en maatgevende afslagprofiel (onder).

SVASEK 2020C 2034-U20177-A-LSPA

Morfologische Effecten Erosiebescherming MV2

Royal HaskoningDHV

MEMO: MORFOLOGISCHE EFFECTEN EROSIEBESCHERMING ROND WINDTURBINES IN XBEACH SIMULATIES MV2

Aan	: [redacted](Royal Haskoning DHV)
Van	: [redacted](Svašek Hydraulics)
Datum	: 3 juni 2020
Referentie	: 2034/U20177/A/LSpa
Gecontroleerd door	:[redacted]

1 INTRODUCTIE

Svašek Hydraulics heeft in opdracht van Rijkswaterstaat uitgebreid onderzoek gedaan naar de effecten van windturbines op de zachte zeewering van de Tweede Maasvlakte (MV2). Het huidige ontwerp bestaat uit een configuratie met twaalf turbines met een monopile fundering (Svašek Hydraulics, 2020).

Tussen de windturbines en de duin wordt een kabelbundel geplaatst. Onder andere om blootlegging van de kabels door scour rond de turbine te voorkomen wordt erosiebescherming rondom de windturbines toegepast. RHDHV heeft Svašek Hydraulics gevraagd de effecten van deze erosiebescherming in te schatten op veiligheid (stormafslag, kwantitatief met behulp van XBeach), door toepassing van hetzelfde model als eerder gebruikt voor effectbepaling van turbines op de veiligheid.

2 OVERZICHT XBEACH STORMSIMULATIES

Er wordt gerekend met twee configuraties, één met en één zonder erosiebescherming rondom de windturbines. In de situatie zonder erosiebescherming wordt een maximale ontgronding toegepast volgens Deltares (RHDHV, 2020), zoals weergegeven in Tabel 2-1. Vanaf de windturbines, waar deze maximale ontgronding wordt toegepast, volgen de ontgrondingskuilen een helling van 1:4 tot aan de ontwerpbodem. Deze ontgronding wordt al bij het begin van de berekening aangebracht. De aangebrachte erosiekuilen zijn qua volume om twee redenen groter dan ingeschat door Deltares:

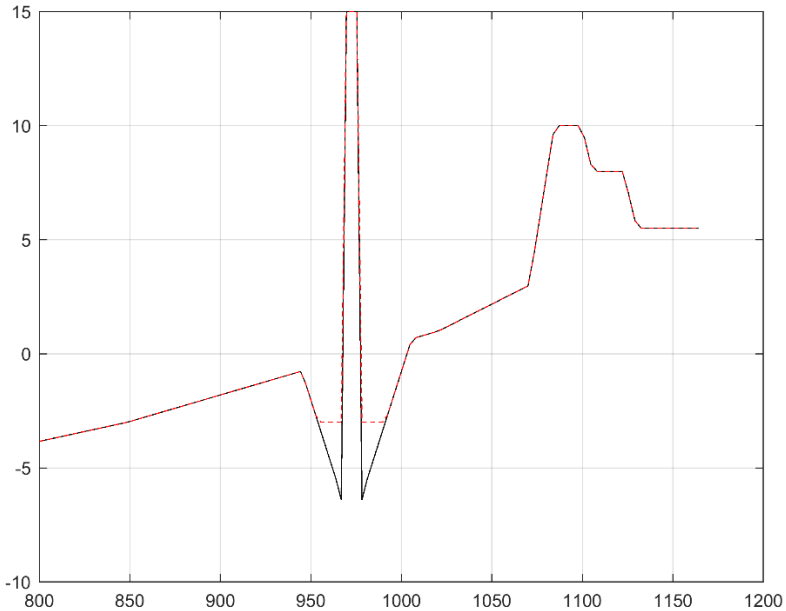
- de turbines hebben een grotere diameter in het model dan in het ontwerp (10 versus 5 m), pas vanaf de buitenkant van de turbine loopt de erosiekuil met een talud van 1:4 omhoog. Een grotere binnendiameter betekent een groter (qua volume) gat.
- de erosiegaten zijn door Deltares bepaald ten opzichte van een bodem tijdens 1:100 jaar stormafslag. De omliggende strandbodem gedurende die afslagberekening lager zijn komen te liggen dan aan de start van de berekening het geval is. De diepte van de erosiekuilen is ten opzichte van NAP gekozen en niet relatief ten opzichte van het omliggende strand.

Bij de configuratie met erosiebescherming is de maximale ontgronding gelijk aan de bovenkant van de beschermlaag (zie Tabel 2-1). Voor deze configuratie wordt aangenomen dat de dimensies van de ontgrondingskuilen boven de erosiebescherming gelijk zijn aan de situatie zonder erosiebescherming. De erosiebescherming wordt voor elke windturbine geïmplementeerd met een diameter van 50 meter. Zodoende is de diameter van de erosiebescherming groter dan de diameter van de ontgrondingskuilen.

Tabel 2-1: Maximale ontgronding en niveau erosiebescherming.

Windturbine	Max. ontgronding volgens Deltares [m NAP]	Niveau bovenkant erosiebescherming [m NAP]
1	-6.0	-4.0
2	-2.9	-3.0
3	-3.0	-3.0
4	-5.4	-3.0
5	-7.6	-4.0
6	-8.3	-4.5
7	-8.1	-4.0
8	-7.2	-3.5
9	-6.4	-3.0
10	-5.9	-3.5
11	-6.0	-3.0
12	-4.5	-3.0

De inplementatie (zowel met als zonder erosiebescherming) is als voorbeeld gegeven voor turbine locatie 9.



Figuur 2-1: Voorbeeld dwarsdoorsnede scourhole turbinelocatie 9. Zwarte lijn geeft de simulatie zonder erosiebescherming, rode onderbroken lijn met. Op de y-as [m+NAP], op de x-as [m dwars op de wering].

Naast de twee configuraties wordt er gerekend met twee stormen, waarbij wordt gekeken naar de effecten ten opzichte van de configuratie zonder erosiebescherming. Voor deze memo worden zodoende vier XBeach simulaties gebruikt. Er wordt voor deze studie gerekend met de ontwerpbodem.

De stormen duren 32 uur en zijn weergegeven in onderstaande tabel. Storm A is representatief voor maatgevende condities voor de noordkant van MV2, Storm B is representatief voor de zuidkant.

Tabel 2-2: 1:10.000 jaar randvoorwaarden.

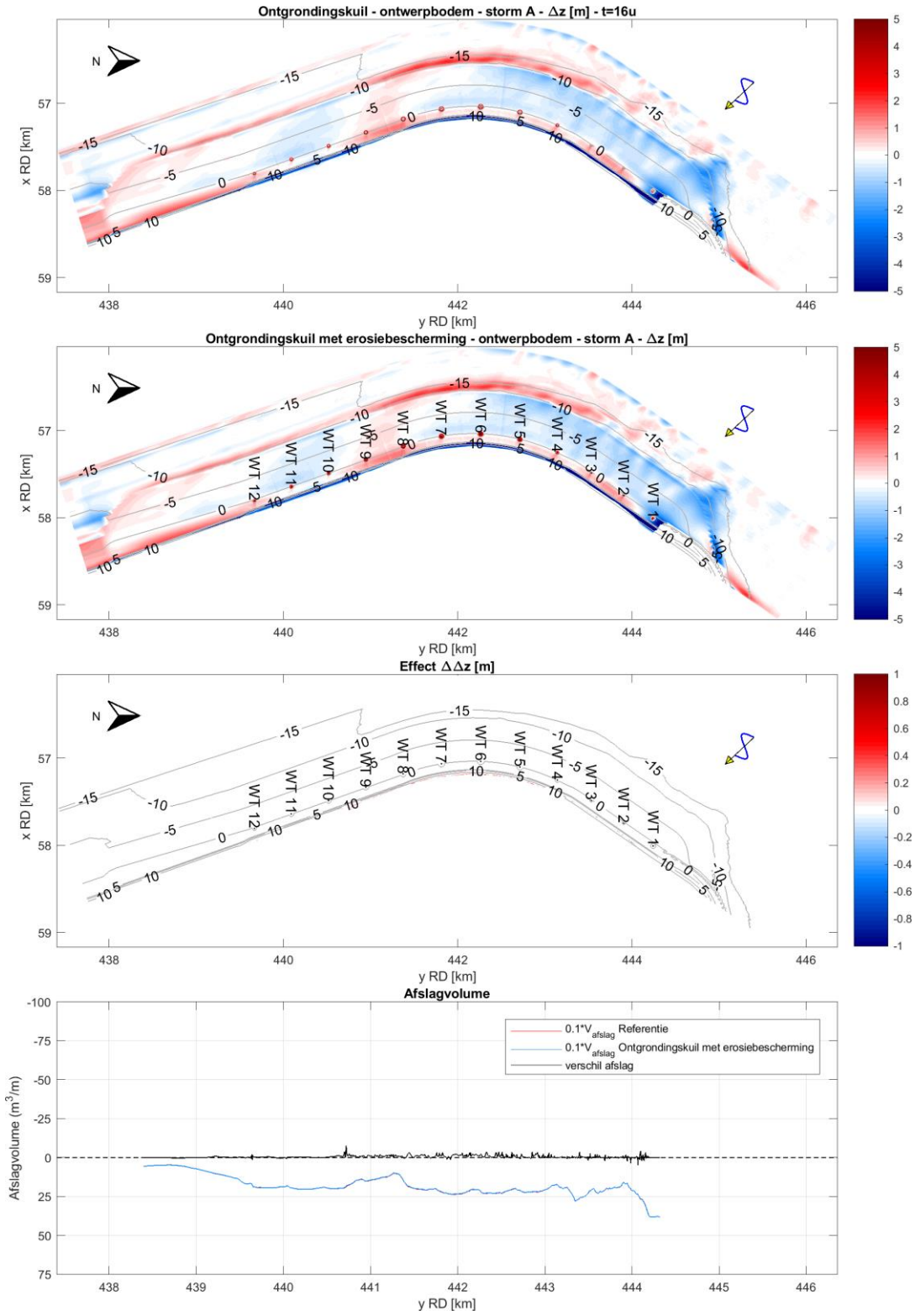
	Hs [m]	Tp [s]	Dir °N	Wl [m+NAP]
Storm A	8.1	13.5	317	4.95
Storm B	7.6	13.5	306	4.95

3 RESULTATEN

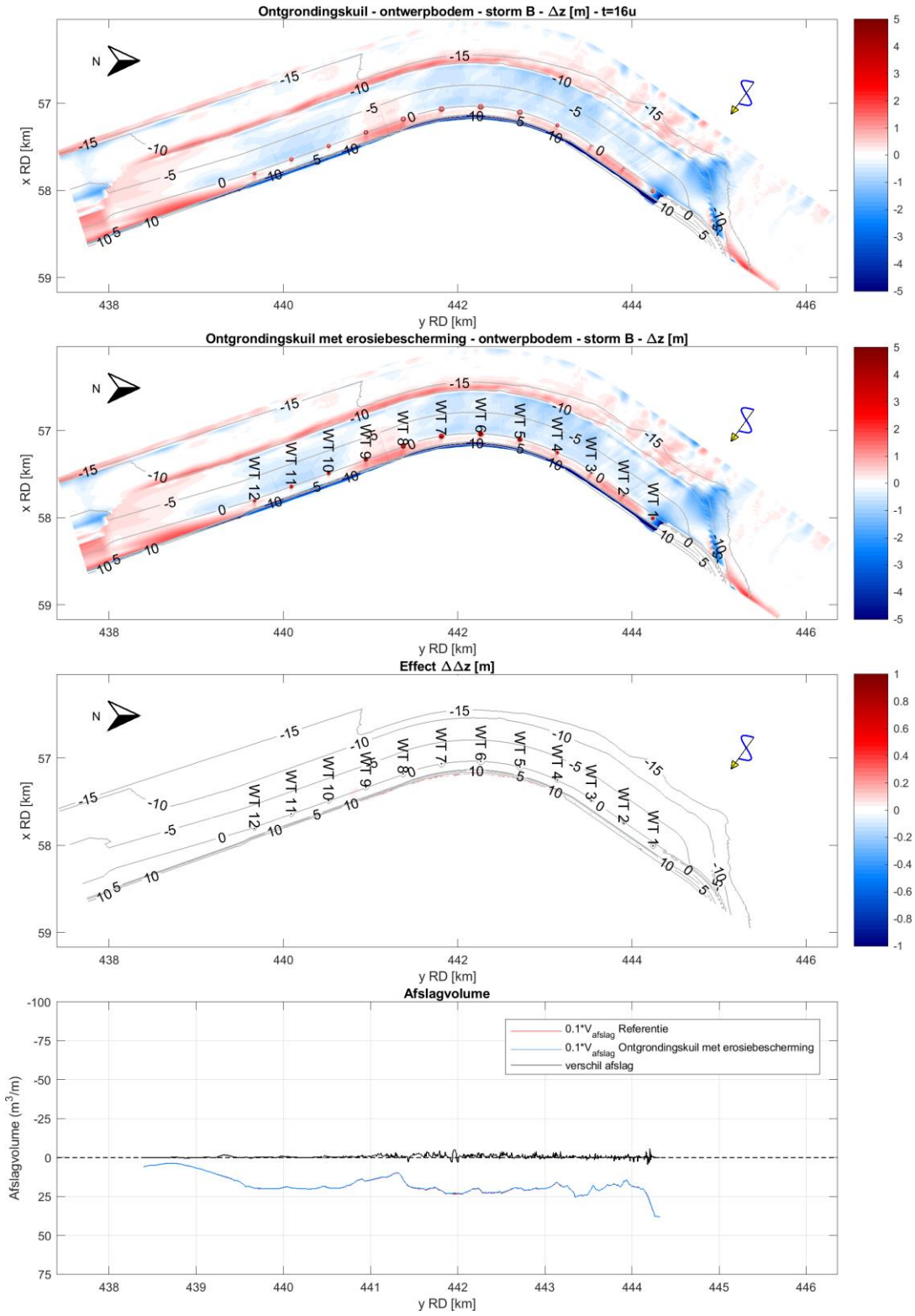
3.1 Erosie/sedimentatie figuren en effect op afslag

Voor beide stormen is een erosie/sedimentatie figuur van de situatie zonder erosiebescherming gegeven (bovenste), eenzelfde figuur maar met erosiebescherming (midden boven), een verschilfiguur tussen de eindsituaties van beide scenario's (midden onder) en een afslagvolume plot (onderste). Deze laatste geeft per scenario het afslagvolume boven rekenpeil (in al deze gevallen 4,95 m+NAP), en het verschil daartussen. Een negatief verschil geeft minder afslag voor de situatie met erosiebescherming.

Het effect van de erosiebescherming in de berekeningen is is nauwelijks zichtbaar en te beoordelen als nihil.



Figuur 3-1: Effect bij storm A.



Figuur 3-2: Effect bij storm B.

4 CONCLUSIES

Het effect van erosiebescherming zoals dat blijkt uit de berekeningen is nihil.

REFERENTIES

Svašek Hydraulics (2020). Morfologische effecten op MV2 van windturbines op MV2 configuratie Eneco april 2020. Memo, 29 april 2020, referentie: 2034/U20125/C/LSpa.

Royal Haskoning DHV (2020). Afmetingen erosiekuilen & erosiebescherming. Excel, 29 mei 2020, referentie: 2034/IN20265/BvL.

SVASEK 2020D 2034-U20167-B-LSPA

Morfologische Effecten
Bouwfase MV2

Royal HaskoningDHV

MEMO: MORFOLOGISCHE EFFECTEN VAN WINDTURBINES EN BOUWPLATFORMEN OP MV2 CONFIGURATIE ENECO APRIL 2020

Aan	: [redacted], [redacted] (Royal Haskoning DHV)
Van	: [redacted] (Svašek Hydraulics)
Datum	: 28 mei 2020
Referentie	: 2034/U20167/B/LSpa
Gecontroleerd door	: [redacted]

1 INTRODUCTIE

Svašek Hydraulics heeft in opdracht van Rijkswaterstaat uitgebreid onderzoek gedaan naar de effecten van windturbines op de zachte zeewering van de Tweede Maasvlakte (MV2). Het huidige ontwerp bestaat uit een configuratie met twaalf turbines met een monopile fundering (Svašek Hydraulics, 2020).

Voor de bouw van de turbines wordt bij elke turbine een bouwplatform aangelegd. Dit betreft een zandlichaam met aan de zeezijde en weerszijden een damwand. RHDHV heeft Svašek Hydraulics gevraagd de effecten van deze bouwplatformen en turbines in te schatten op veiligheid (stormafslag, kwantitatief met behulp van XBeach).

2 OVERZICHT XBEACH STORMSIMULATIES

Er wordt gerekend met twee configuraties en twee stormen, waarbij steeds wordt gekeken naar de effecten ten opzichte van een referentie zonder windturbines en bouwplatformen (zoals berekend in Svašek Hydraulics, 2020). Voor deze memo worden zodoende vier XBeach simulaties gebruikt. Er wordt voor deze studie gerekend met de 2019 bodem (Q2 2019). De twee configuraties bestaan uit:

1. Alleen de zuidelijke zes platformen (tot 3.3m+NAP) zonder monopiles.
2. Alle twaalf platformen (tot 3.3m+NAP) met twaalf monopiles.

De stormen duren 32 uur en zijn weergegeven in onderstaande tabel. Storm A is representatief voor maatgevende condities voor de noordkant van MV2, Storm B is representatief voor de zuidkant.

Tabel 2-1: 1:10.000 jaar randvoorwaarden.

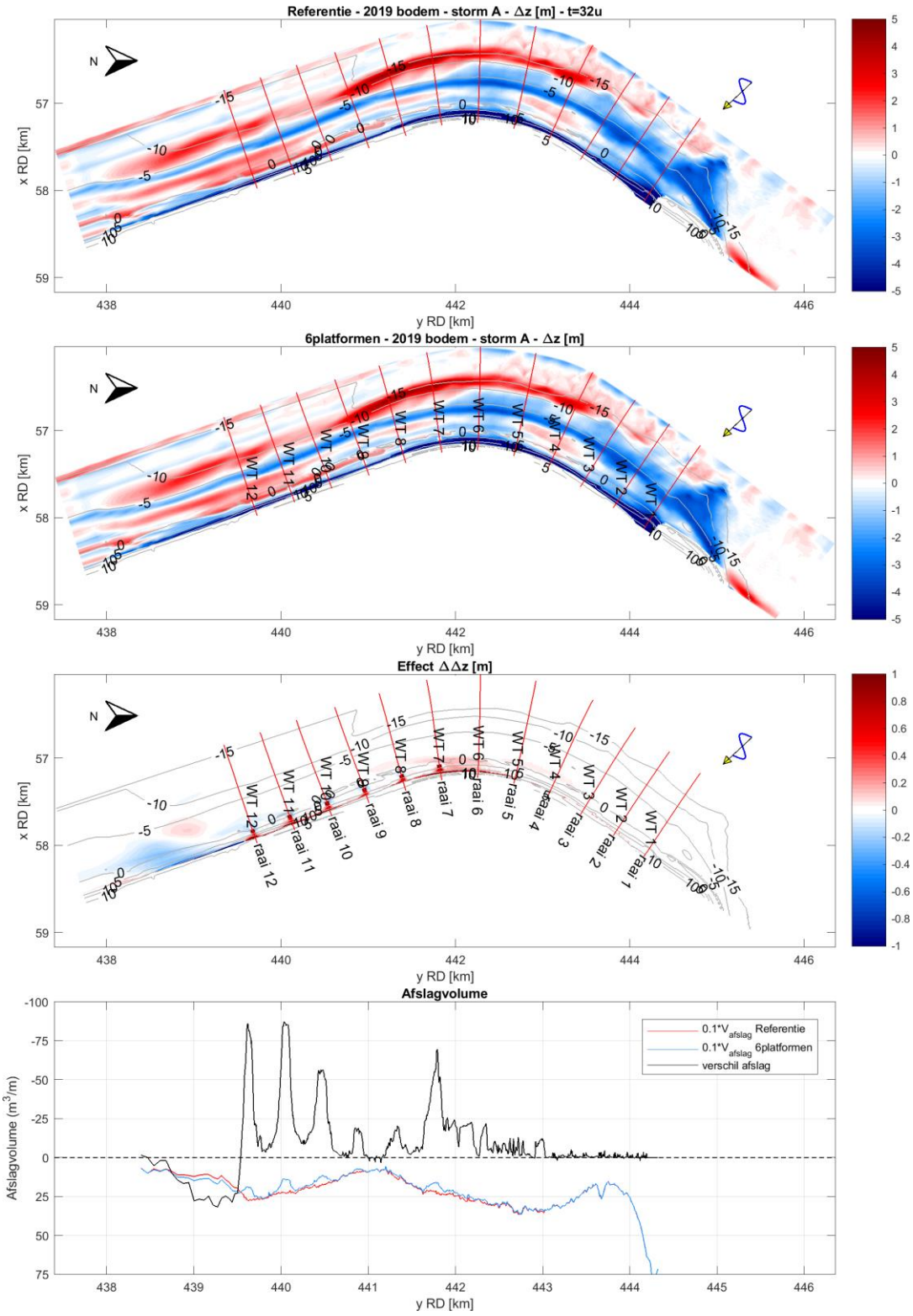
	Hs [m]	Tp [s]	Dir °N	Wl [m+NAP]
Storm A	8.1	13.5	317	4.95
Storm B	7.6	13.5	306	4.95

De gehele platformen, met een afmeting van circa 40x50 meter, worden gesimuleerd als niet-erodeerbare elementen. In werkelijkheid zijn alleen de damwanden aan de zeezijde en de zijkanten niet erodeerbaar. Mogelijkerwijs zal in werkelijkheid een deel van het zand in de platformen eroderen en aan de kustveiligheid ten goede komen.

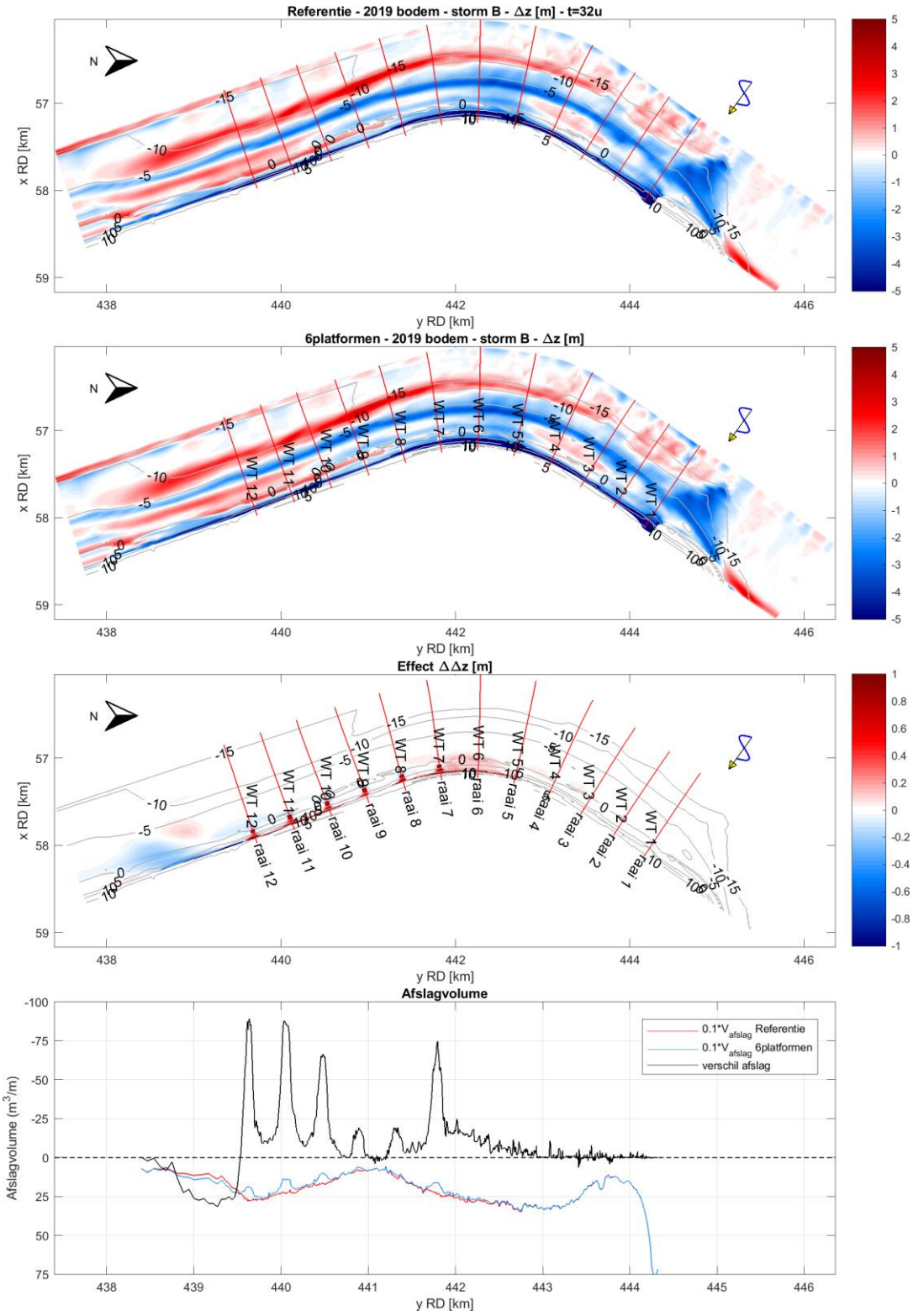
3 RESULTATEN

3.1 Erosie/sedimentatie figuren en effect op afslag

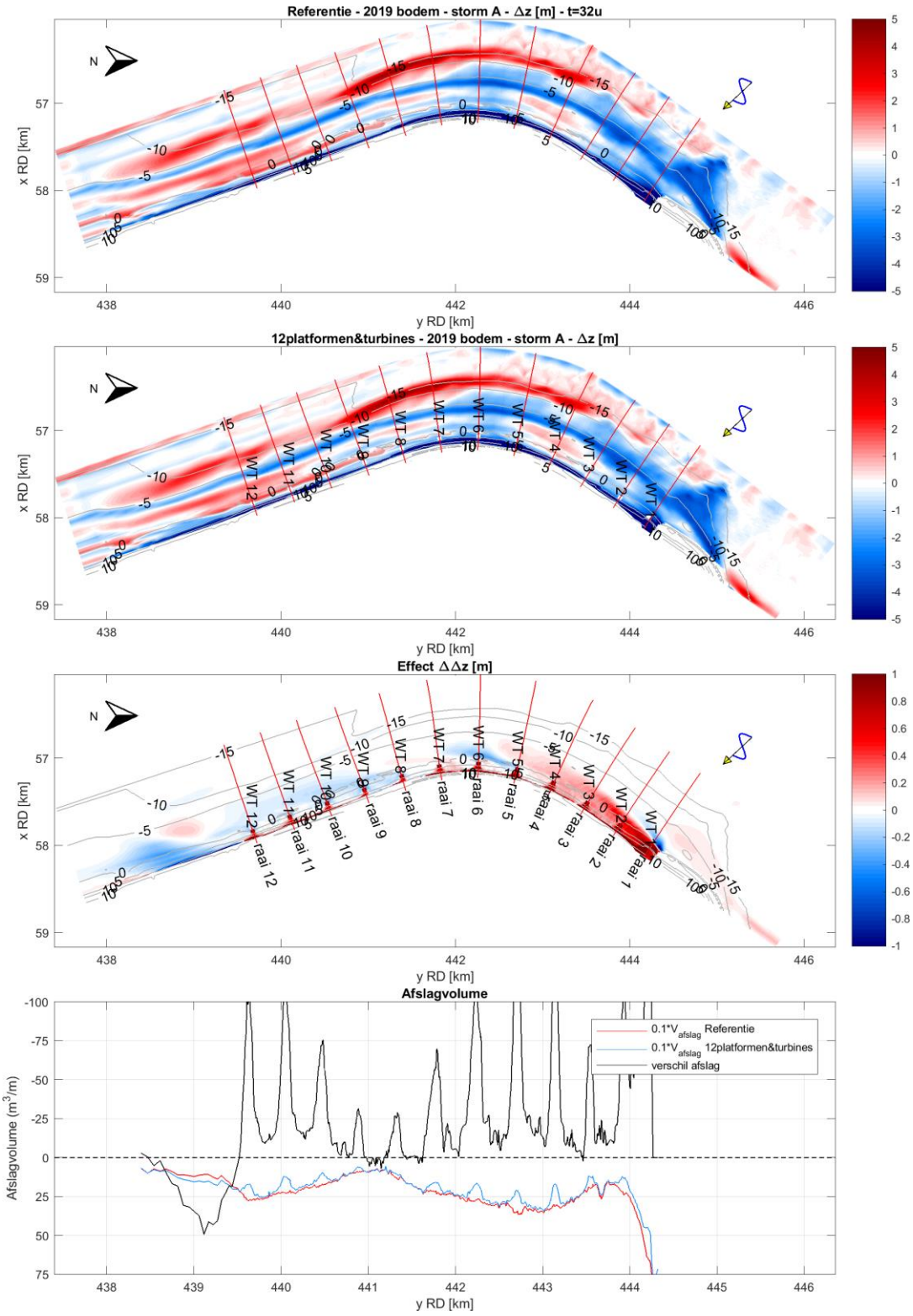
Voor ieder scenario is steeds een erosie/sedimentatie figuur van de referentiesituatie gegeven (bovenste), eenzelfde figuur maar met windturbines en/of platformen (midden boven), een verschilfiguur tussen de eindsituaties van beide scenario's (midden onder) en een afslagvolume plot (onderste). Deze laatste geeft per scenario het afslagvolume boven rekenpeil (in al deze gevallen 4,95 m+NAP), en het verschil daartussen. Een negatief verschil geeft minder afslag voor de situatie met windturbines en bouwplatforms.



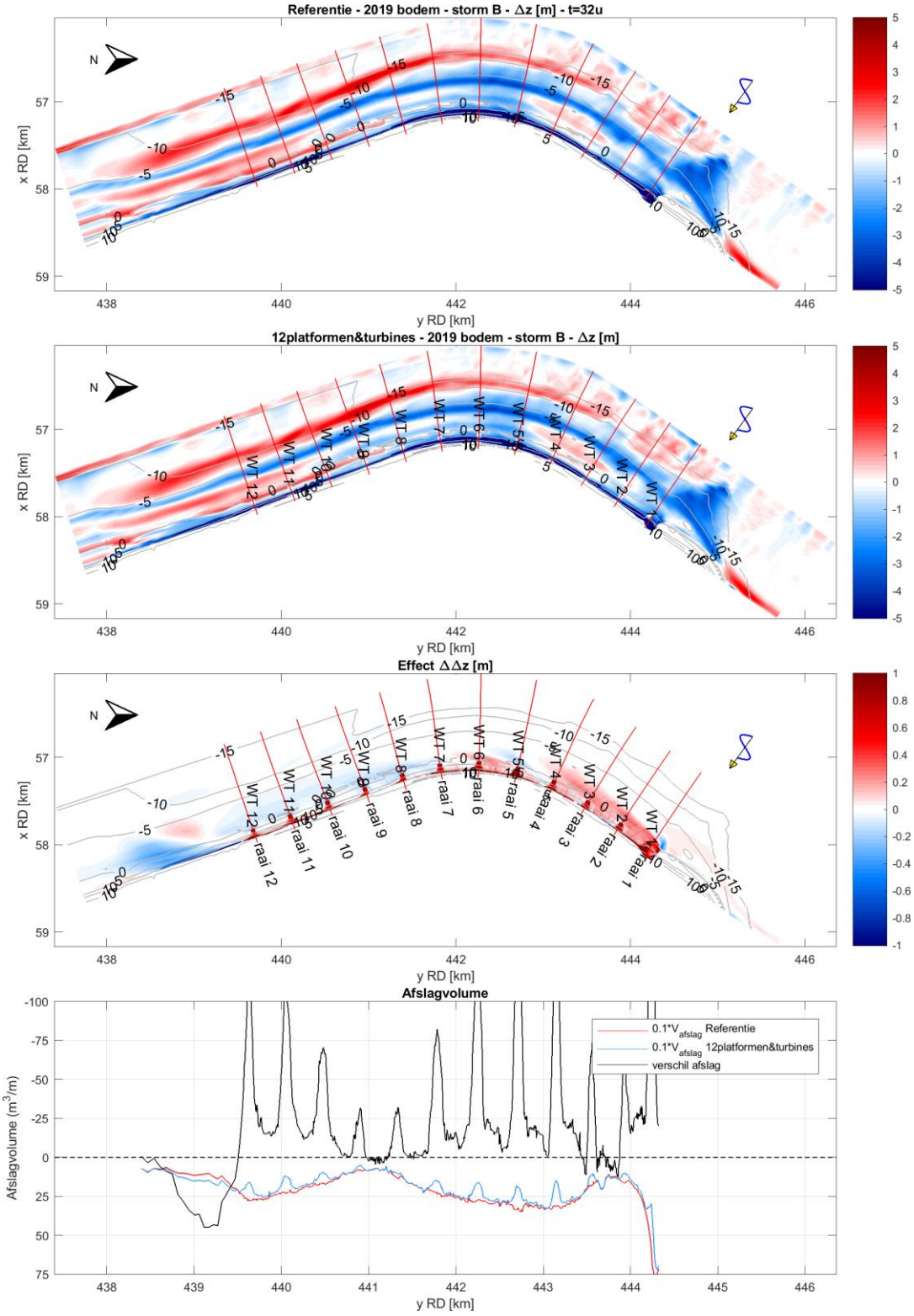
Figuur 3-1: Effect bij storm A, met de zes zuidelijke platformen.



Figuur 3-2: Effect bij storm B, met de zes zuidelijke platformen.



Figuur 3-3: Effect bij storm A, met alle twaalf platformen en monopiles.



Figuur 3-4: Effect bij storm B, met alle twaalf platformen en monopiles.

3.2 Resultaten in dwarsprofielen

Voor ieder scenario zijn de resultaten voor 12 dwarsprofielen bij de windturbines weergegeven in bijlage A. De locaties van deze dwarsprofielen zijn weergegeven in Figuur 3-1 t/m Figuur 3-4.

3.3 Samenvatting uitkomsten XBeach stormsimulaties

Het effect is geconcentreerd achter de platformen zichtbaar. Het netto resultaat is dat de negatieve effecten tussen de platformen beperkt blijven tot circa 10 m^3/m extra duinafslag zoals te zien in Tabel 3-1.

Bij zowel storm A als B is sprake van een kleinere opbouw van de voeroever ten zuiden van het traject van de windturbines. Dit leidt tot hogere afslag ter plaatse van 45 m^3/m in de situatie waarbij alle twaalf platformen en windturbines gebouwd zijn, zoals te zien in Tabel 3-1.

Tabel 3-1: Maximum extra afslag voor elk scenario, verdeeld in de gebieden tussen en ten zuiden van de platformen.

	Maximum extra afslag tussen turbines	Maximum extra afslag ten zuiden van turbines
2019 bodem storm A 6 platformen	3.5 m^3/m	NVT, want niet maatgevend[1]
2019 bodem storm B 6 platformen	6.3 m^3/m	31.5 m^3/m
2019 bodem storm A 12 platformen + windturbines	7.0 m^3/m	NVT, want niet maatgevend[1]
2019 bodem storm B 12 platformen + windturbines	12.5 m^3/m	45.0 m^3/m

4 CONCLUSIES

De extra afslag ten opzichte van de referentie blijft op de meeste locaties en voor alle scenario's beperkt tot circa 10 m^3/m. Alleen ten zuiden van de platformen en windturbines is door grootschalige onthouding van zand in de bocht (platformen en turbines zorgen lokaal voor minder afslag, waardoor op andere locaties minder opbouw is) sprake van een toename in afslag van 45 m^3/m.

De simulatie is tot op zekere hoogte conservatief omdat er in het model geen zand uit de platformen zelf kan eroderen, waardoor ter plaatse de blokkade van de duinen groot blijft en op andere locaties minder zand beschikbaar is voor de opbouw van de vooroever. In werkelijkheid zal in ieder geval een deel van het zand uit de platformen eroderen, dit zand kan de berekende duinafslag mogelijk reduceren. Echter de redenen dat voorgaande berekeningen zeer conservatief waren vallen bij de voorliggende configuratie weg: overdimensioneren van de ingreep om numerieke reden en het om een slanke paal heenlopen van korte golven. De huidige berekening is daardoor beduidend minder conservatief dan eerder (Svašek Hydraulics, 2020).

[1] Storm A is niet representatief voor maatgevende condities voor de zuidkant van MV2, waar de extra afslag ten zuiden van de turbines plaatsvindt.

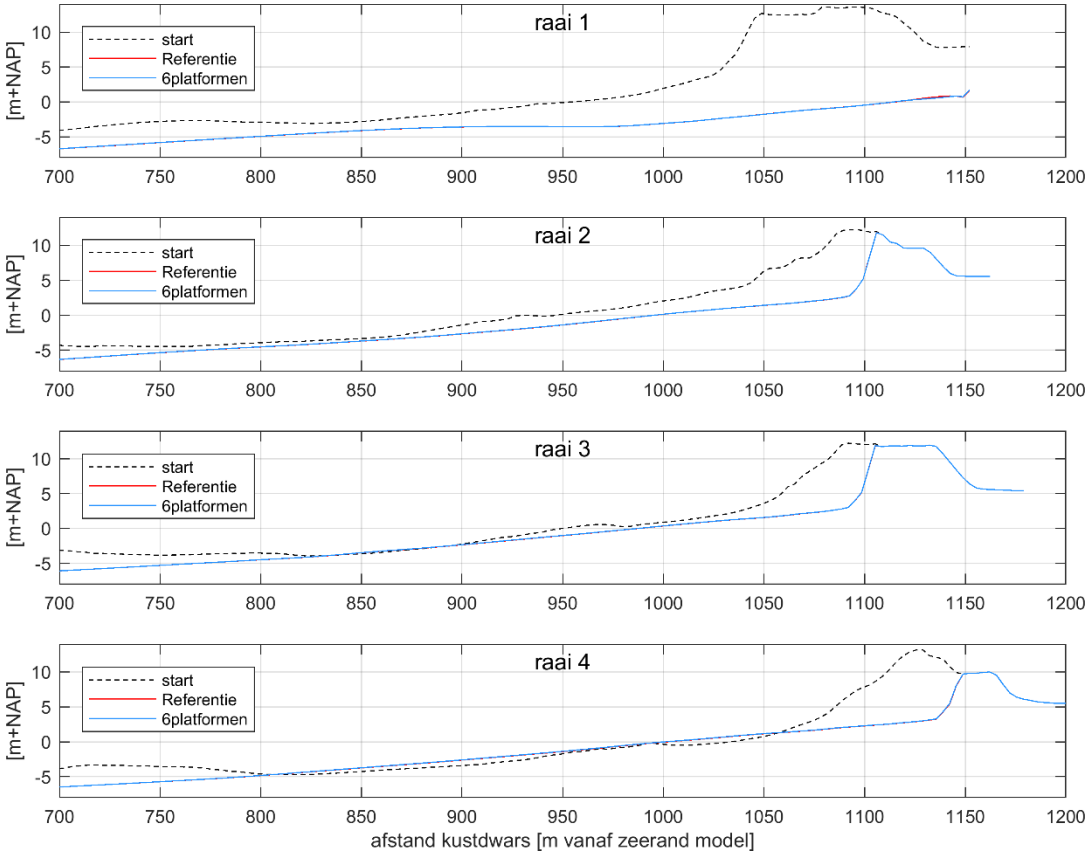
REFERENTIES

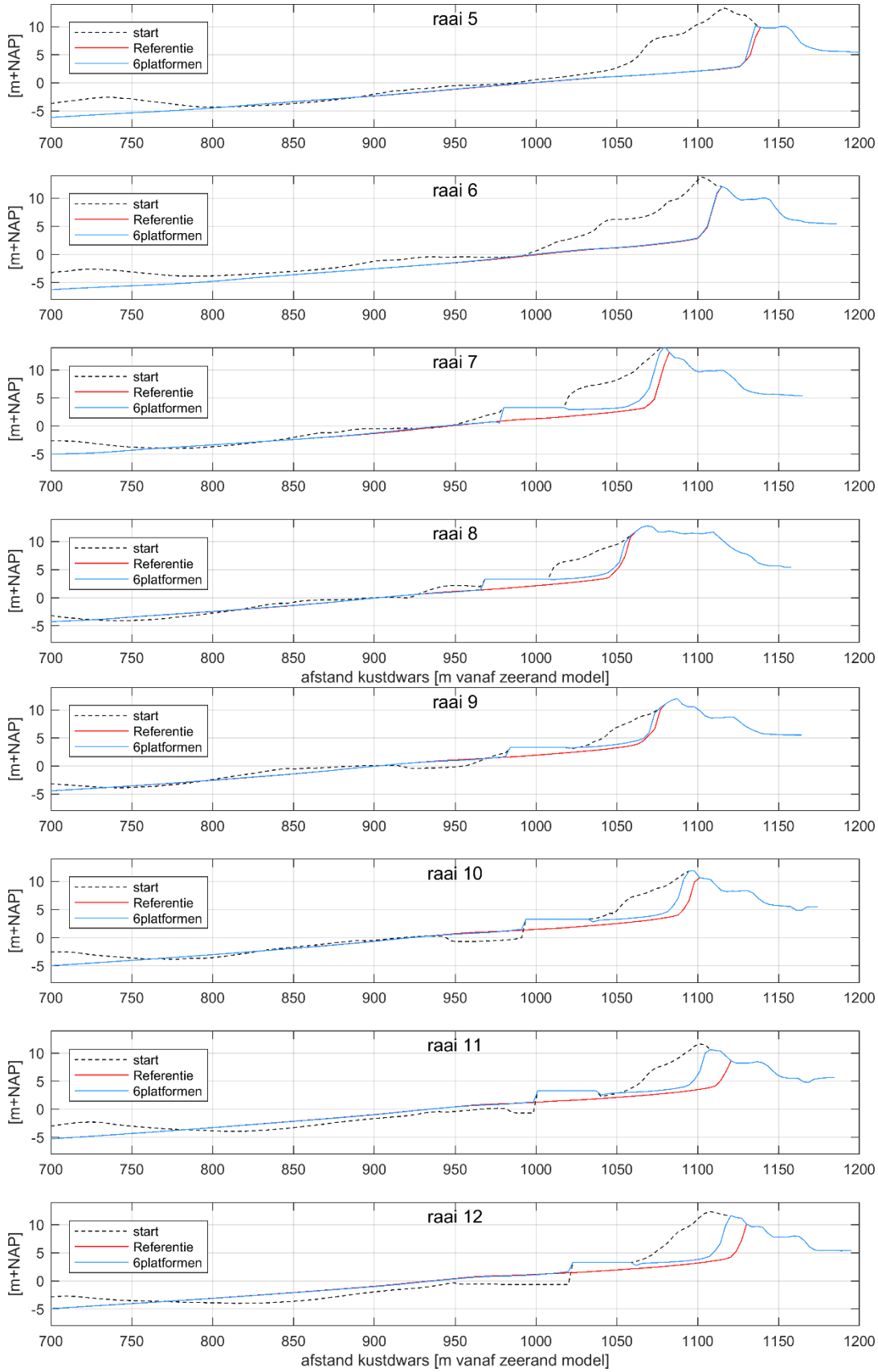
Svašek Hydraulics (2020). Morfologische effecten op MV2 van windturbines op MV2 configuratie Eneco april 2020. Memo, 29 april 2020, referentie: 2034/U20125/C/LSpa.

Svašek Hydraulics (2019). Effecten Windturbines op MV2 op stormafslag, lange termijn morfologie en eolisch transport - Opvolging adviezen expert meeting. Rapport, 18 juli 2019, referentie 1966/U19221/C/BvL.

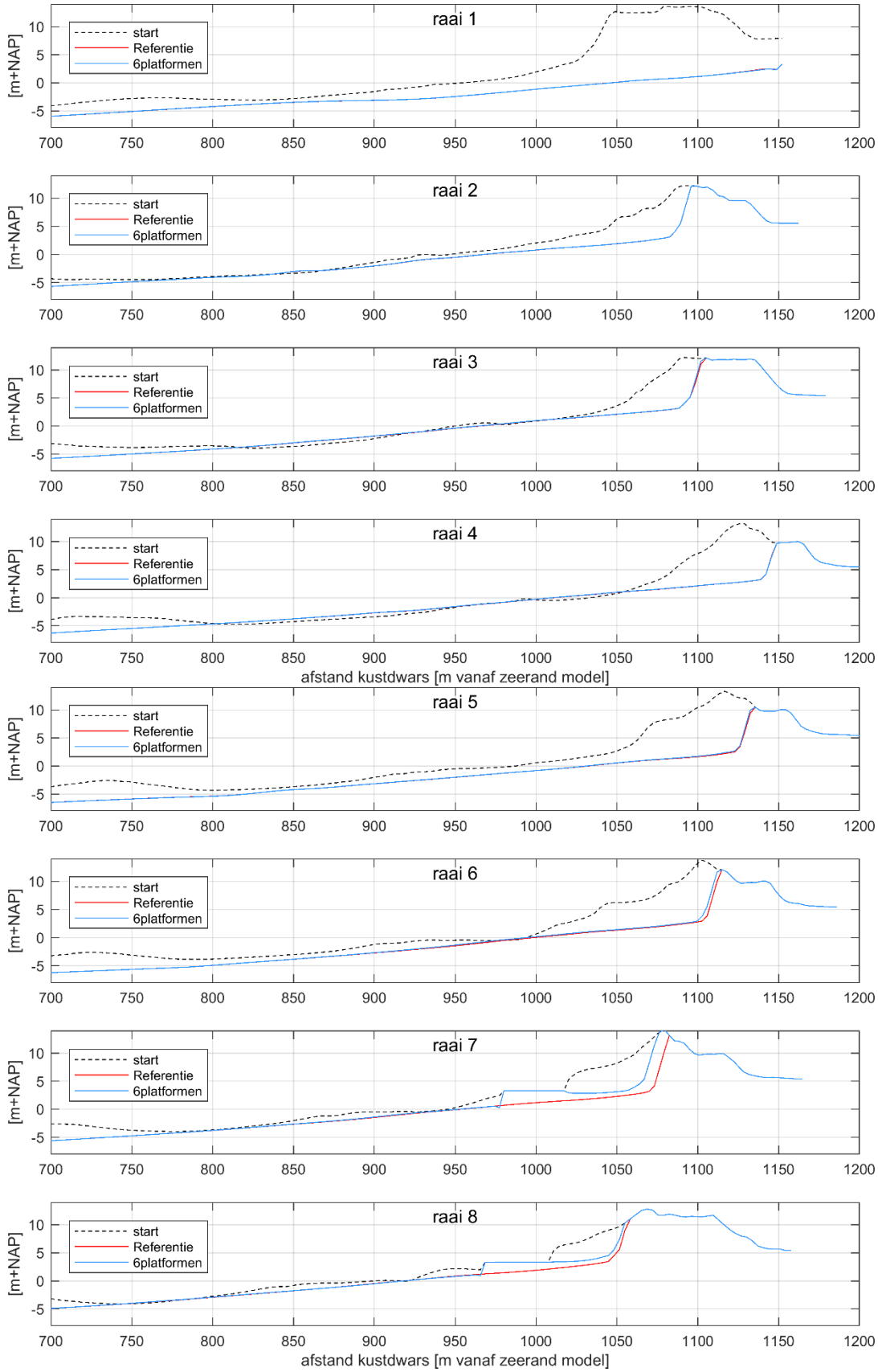
5 BIJLAGE A: RESULTATEN IN DWARSPROFIELEN

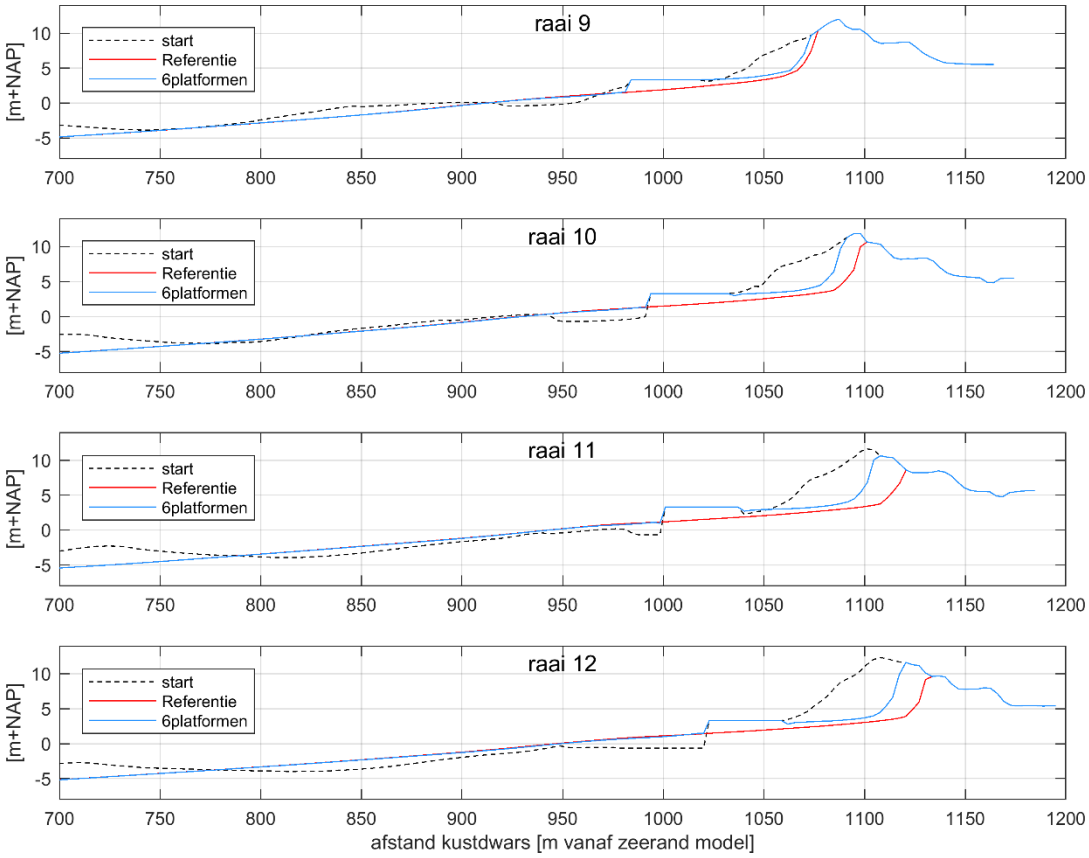
5.1 Dwarsprofielen bij de 12 windturbines



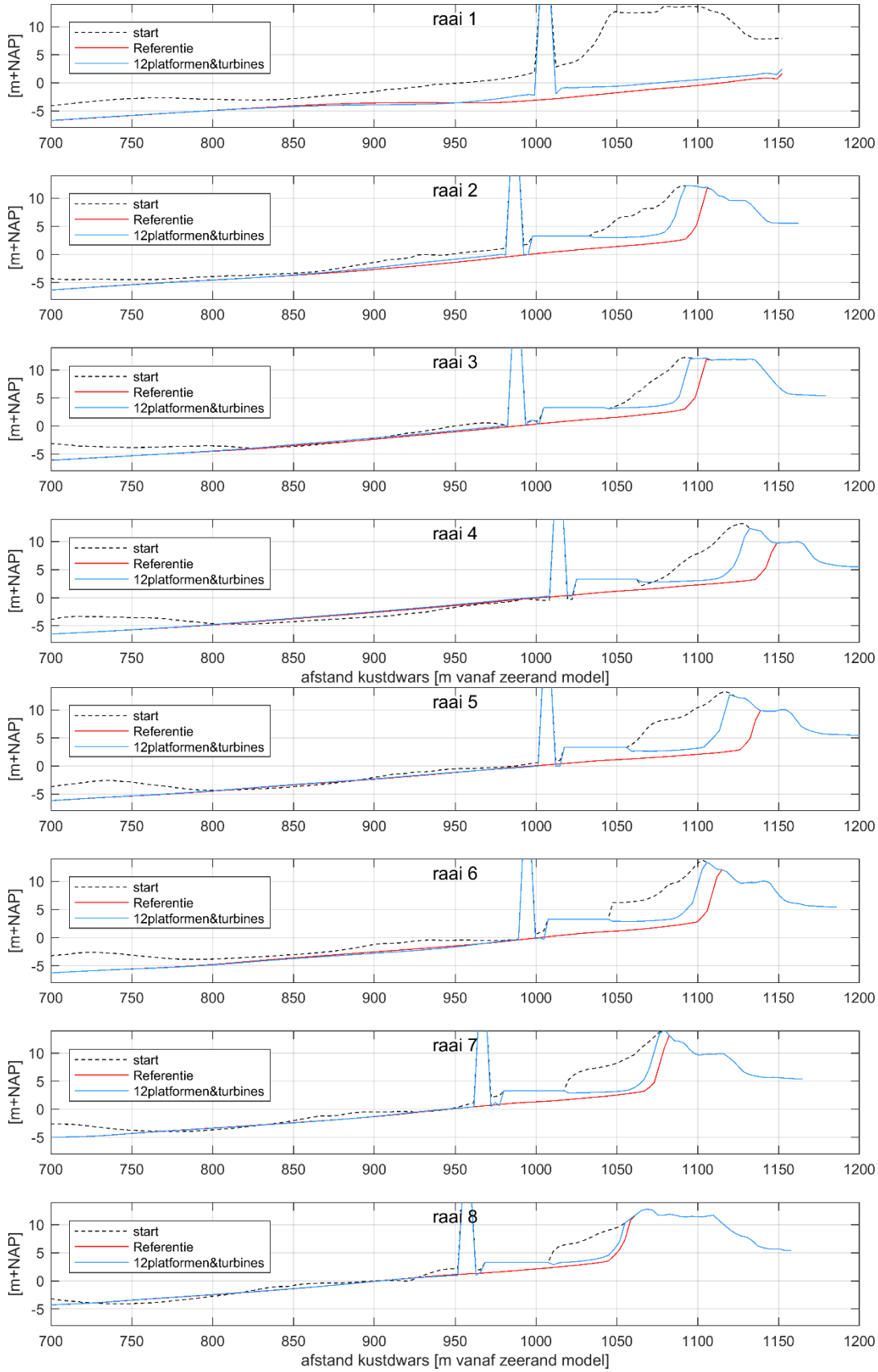


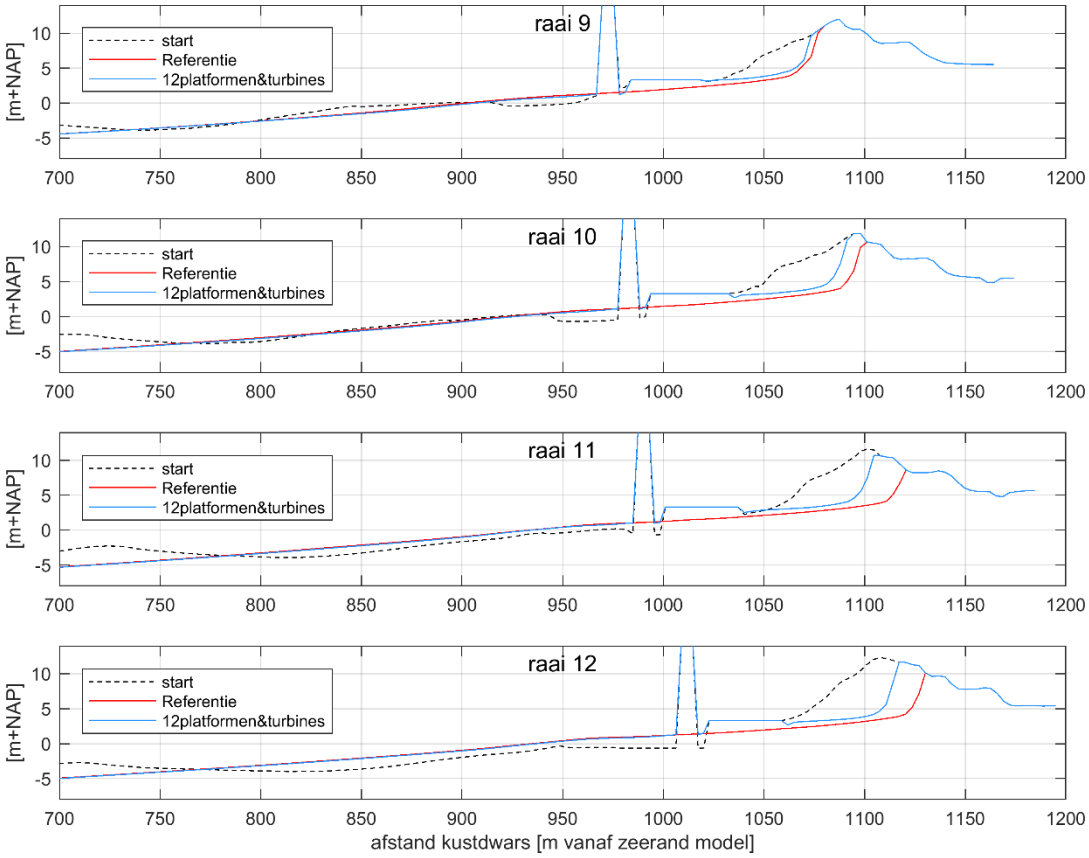
Figuur 5-1: Effect bij storm A, met de zes zuidelijke platformen, voor 12 raaien bij de windturbines.


raai 1
raai 2
raai 3
raai 4
raai 5
raai 6
raai 7
raai 8
start
Referentie
6platformen
[m+NAP]
afstand kustdwars [m vanaf zeerand model]

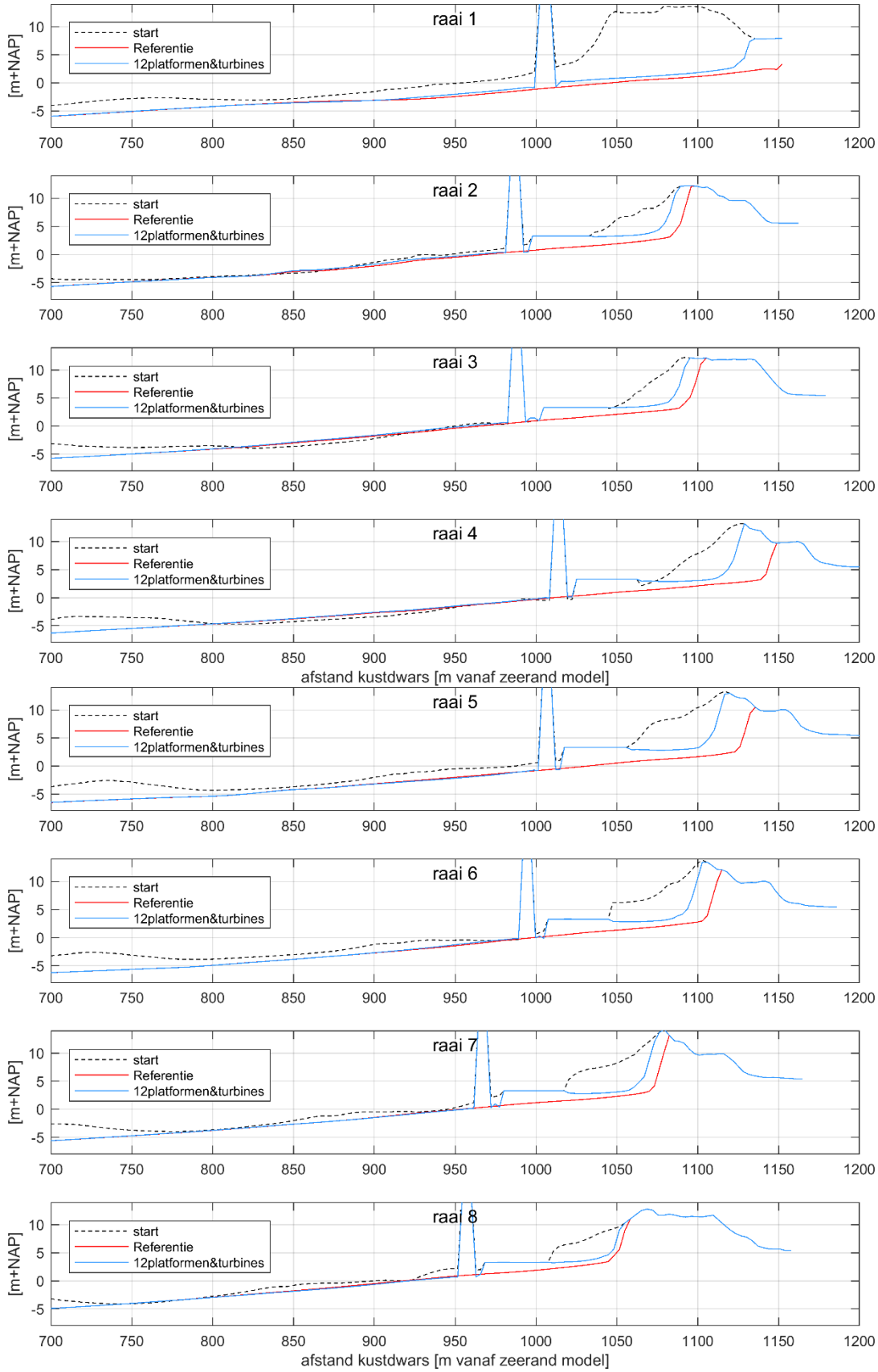


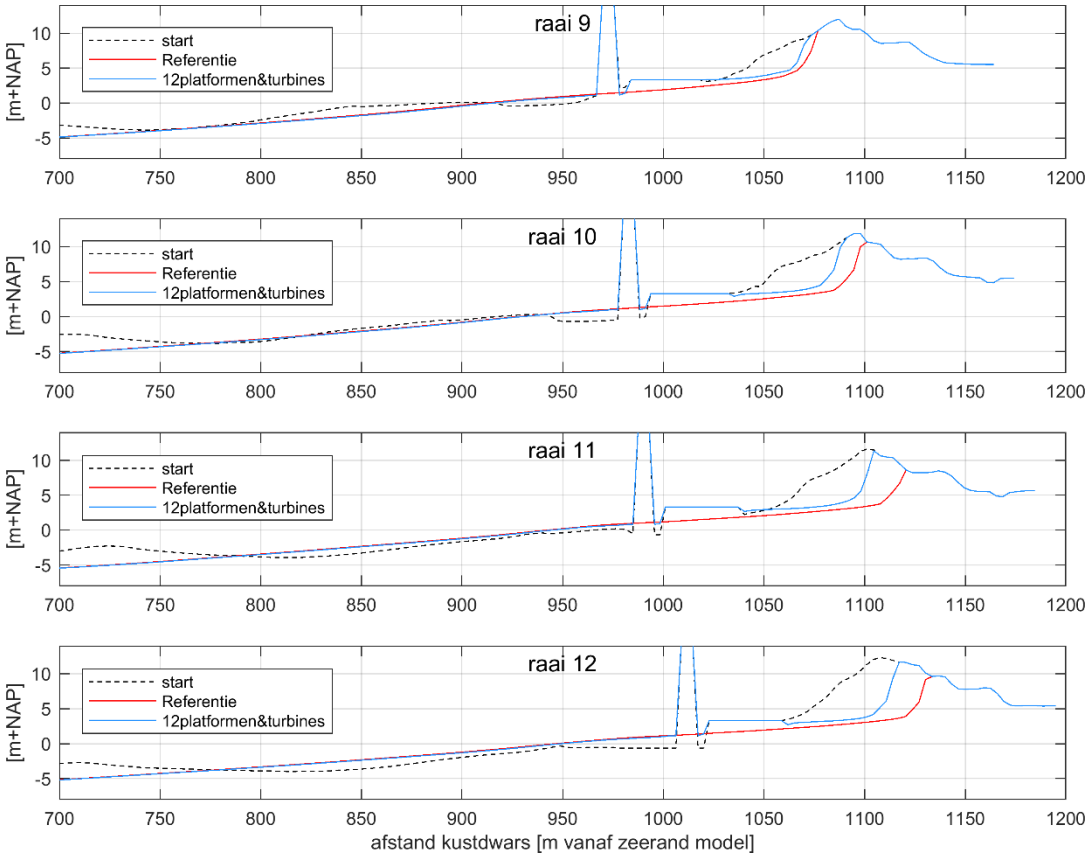
Figuur 5-2: Effect bij storm B, met de zes zuidelijke platformen, voor 12 raaien bij de windturbines.


raai 1
raai 2
raai 3
raai 4
raai 5
raai 6
raai 7
raai 8
start
Referentie
12platformen&turbines
[m+NAP]
afstand kustdwars [m vanaf zeerand model]



Figuur 5-3: Effect bij storm A, met alle twaalf platformen en monopiles, voor 12 raaien bij de windturbines.


raai 1
raai 2
raai 3
raai 4
raai 5
raai 6
raai 7
raai 8
start
Referentie
12platformen&turbines
[m+NAP]
afstand kustdwars [m vanaf zeerand model]



Figuur 5-4: Effect bij storm B, met alle twaalf platformen en monopiles, voor 12 raaien bij de windturbines.

Arcadis 2020a

Beschouwing omtrent standzekerheid en suppletie ten behoeve van windmolens in de Zachte Zeewering van Maasvlakte 2

Eneco

Royal HaskoningDHV

MEMO

ARCADIS Design & Consultancy for natural and built assets

ONDERWERP
Beschouwing omtrent standzekerheid en suppletie ten behoeve van windmolens in de Zachte Zeewering van Maasvlakte 2

DATUM
13 juli 2020

PROJECTNUMMER
C06041.000040

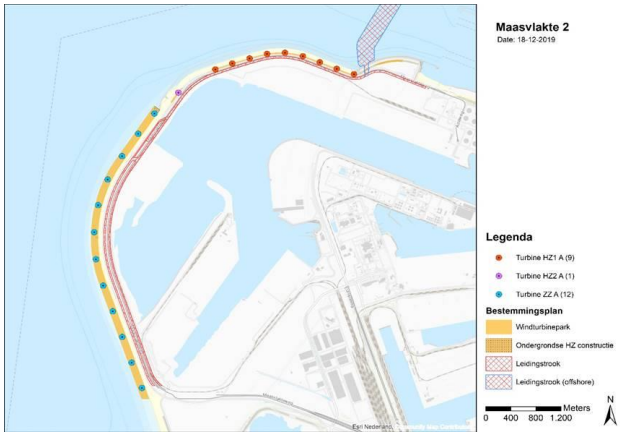
ONZE REFERENTIE
C06041.000040me01

VAN
[redacted]

AAN
[redacted]

Inleiding

Er zijn plannen voor het plaatsen van windmolens op zowel de Harde- als de Zachte Zeewering van Maasvlakte 2. Langs de Zachte Zeewering zullen dit monopile constructies zijn met een diameter van ongeveer 5 meter. De monopiles zullen rond de waterlijn worden geplaatst. Er wordt verwacht dat monopiles van een dergelijke omvang geen effect zullen hebben op de grootschalige morfologie. Zeer lokaal kan enige invloed worden verwacht. Er heeft inmiddels overleg plaatsgevonden met Rijkswaterstaat en er is overeengekomen dat er ter compensatie van lokale effecten een extra zandbuffer van 40 m^3/m^1 aanwezig moet zijn langs de gehele Zachte Zeewering. Daarnaast verlangt Rijkswaterstaat dat de standzekerheid van de Zachte Zeewering van Maasvlakte 2 wordt aangetoond middels de onlangs overeengekomen keuringsmethodiek voor de jaarlijkse keuring van Maasvlakte 2.



Figuur 1: Beoogde locatie van windmolens langs Maasvlakte 2

Arcadis is gevraagd om bij te dragen aan de standzekerheidsbeschouwing (door het uitvoeren van aanvullende berekeningen conform de keuringsmethodiek) en om mee te denken in mogelijke oplossingen om extra benodigd zand in het bestaande kustprofiel in te passen (dan wel als permanente aanpassingen in het duin, dan wel middels periodieke suppletie). Hierbij wordt alleen het meest noordelijke deel van de Zachte Zeewering beschouwd. In dit beknopte memo zijn de resultaten gepresenteerd.

Binnen deze opdracht zijn de volgende activiteiten uitgevoerd:

1. **De bepaling van het effect van de windmolens op de jaarlijkse keuring**.
   De jaarlijkse keuring van de Zachte Zeewering is aangepast zodat ook de extra benodigde 40 m^3/m^1 in de berekening is meegenomen. Uit de keuring (een trendlijn over een periode van 1,35 jaar na Q2-2020 voor de raaien KP3535 en KP3635) zal blijken wat het effect is van het extra benodigde zandvolume en in hoeverre er aanvullend gesuppleerd zou moeten worden ter compensatie van de aanwezigheid van de windmolens;
2. **De bepaling van eventueel benodigde (onderhouds-)suppletie voor standzekerheid**.
   Regulier onderhoud van het meest noordelijke deel van de Zachte Zeewering van Maasvlakte 2

vindt plaats door middel van een strandsuppletie. Hiertoe wordt een zandbanket aangebracht tegen de bestaande duinvoet. Als uit de keuring (activiteit 1) blijkt dat er suppletie nodig is, zal de omvang van de suppletie worden afgeleid door de benodigde breedte van het zandbanket (met kruin op NAP+3 m of NAP+5 m) te berekenen waarbij de Zachte Zeewering Standzeker is.

3. **Advisering over de (on)mogelijkheden met betrekking tot toevoeging van extra zand.** Onderhoud zoals benoemd onder activiteit 2 zal periodiek plaats moeten vinden. Ook zal dit onderhoud toenemen als gevolg van de windmolens, omdat een extra zandvolume van 40 m^3/m^1 ten alle tijden gegarandeerd dient te worden. Teneinde de extra onderhoudsbehoefte te voorkomen, zou het extra zand hoger in het profiel aangebracht moeten worden. Dit zand zal dan immers gedurende dagelijkse omstandigheden niet eroderen. Aanvulling van zand in het duin is echter aan regels/eisen gebonden. Op basis van de bestaande eisen en discussies die in de afgelopen jaren hierover hebben plaatsgevonden, wordt inzicht worden gegeven in de mogelijkheden en onmogelijkheden van zand toevoegen in het bestaande duin van de Zachte Zeewering.

Activiteit 1: Effect van windmolens op de keuring

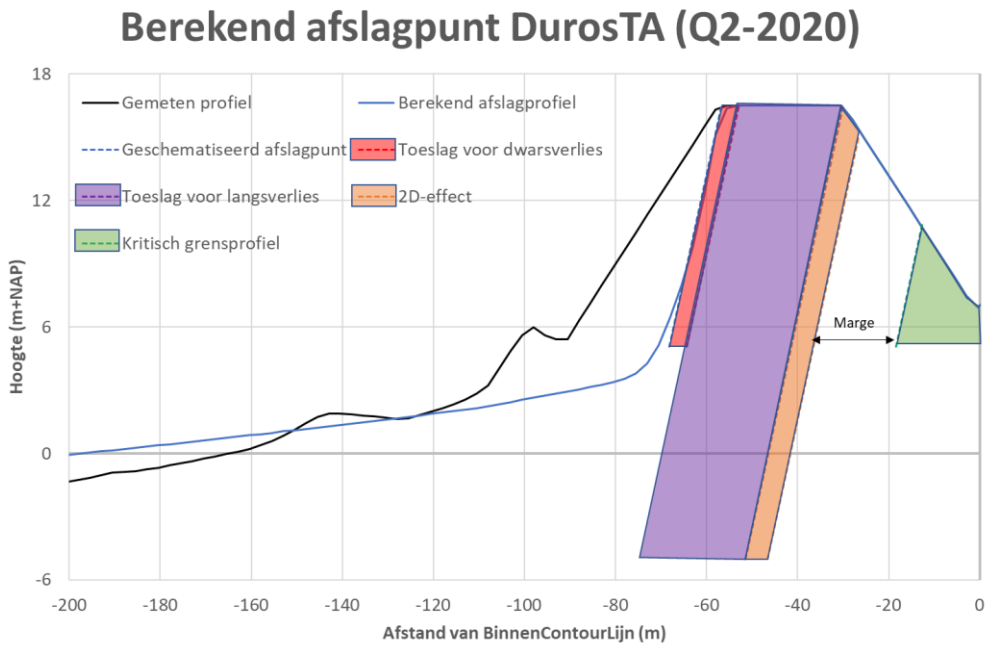
Toelichting van de keuringsmethodiek

Ten tijde van de realisatie van Maaslakte 2 is een keuringsmethodiek ontwikkeld waarin de aanwezige zandvolumes en de prognose van de ontwikkeling van deze zandvolumes centraal staat. Zo wordt elk jaar een keuring uitgevoerd op basis waarvan de geprognotiseerde zandverliezen na 1,35 jaar worden vastgesteld. Als het aanwezige zandvolume voldoende is voor de komende 1,35 jaar, is er geen onderhoudssuppletie nodig. Als het aanwezige zandvolume niet voldoende is voor de komende 1,35 jaar, wordt een onderhoudssuppletie uitgevoerd die voor een periode van 2,35 jaar het benodigde zandvolume moet garanderen.

Voor het meest noordelijke deel van de Zachte Zeewering bleek de hierboven genoemde methodiek niet goed te werken. Dit deel kenmerkt zich door sterke variatie in aanwezige zandvolumes. Volgens de oorspronkelijke keuringmethodiek leidt tot relatief grote suppletievolumes. Het aanbrengen van deze grote suppletievolumes brengt het natuurlijksysteem dan sterk uit evenwicht en dit leidt weer tot grote erosie van zand. Om deze grilligheid in suppletievolumes en daaruit volgende erosietrends te doorbreken is in de laatste jaren een aangepaste keuringsmethodiek ontwikkeld voor het meest noordelijke deel van de Zachte Zeewering. In deze keuringsmethodiek wordt niet alleen gekeken naar de prognose van aanwezige zandvolumes, maar wordt met name gekeken naar de prognose van de standzekerheid van 2 representatieve raaien, te weten Kp3535 en Kp3635.

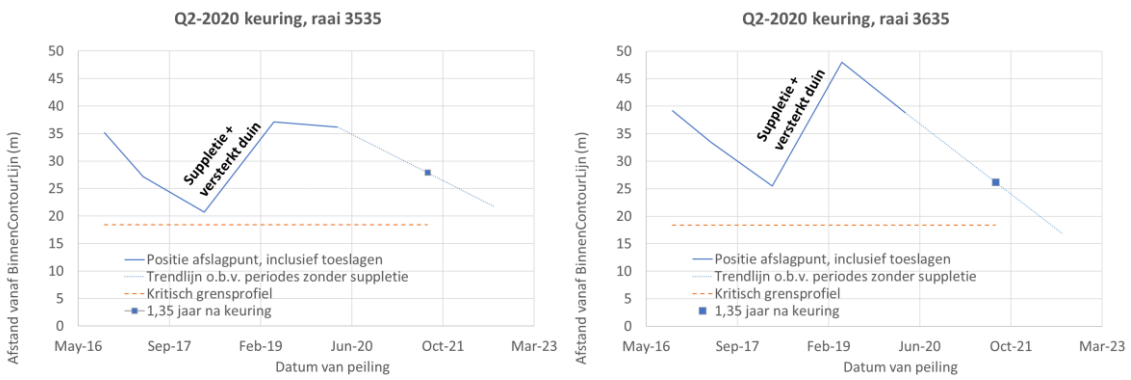
In de onderstaande Figuur 2 is de beschouwing van standzekerheid grafisch weergegeven. In deze beschouwing zijn de volgende elementen opgenomen:

- In het twee kwartaal (Q2) van elk jaar wordt het profiel ter plaatse van Kp3535 en Kp3635 ingemeten (zwarte lijn);
- Met behulp van het numerieke model DurosTA wordt de profielverandering berekend voor een ontwerpstormconditie met een overschrijdingskans van 1/10.000ste per jaar (blauwe lijn);
- Het afslagfront boven stormvloedpeil (NAP+5,07 m) wordt geschematiseerd tot een lijn met helling 1:1 (blauwe stippellijn);
- Ter compensatie van modelonzekerheden wordt een toeslag van 30% van het afslagvolume (boven stormvloedpeil) toegepast (rode arcering);
- Als gevolg van gradiënten in langverlies verdwijnt extra zand uit het betreffende kustvak en zal het afslagprofiel verder landwaarts verschuiven. Dit langsverlies (paarse arcering) is vastgesteld op basis van het ontwerp van Maasvlakte 2 en wordt niet elk jaar herzien. Gezien het grootschalige karakter, wordt langsverlies als een schil tussen NAP-5 m en de kruin van het duin toegepast.
- Het zandige gebied ten noorden van de Zachte Zeewering (de Conus) ligt qua profielligging lager dan de Zachte Zeewering zelf. Bij optreden van een zware storm zal zand uit de Zachte Zeewering richting de Conus verdwijnen, waardoor er langs het 200 m meest noordelijke deel van de Zachte Zeewering een additioneel zandtekort ontstaat. Dit is het zogeheten 2D-effect. De extra achteruitgang (oranje arcering) wordt bepaald met behulp van het volumeverschil tussen de Conus en het berekende afslagprofiel ter plaatse van Kp3495. Gezien het grootschalige karakter, wordt het 2D-effect als een schil tussen NAP-5 m en de kruin van het duin toegepast.
- Het gekeurde dwarsprofiel is standzeker als de uiteindelijke ligging van het afslagpunt (inclusief de hierboven benoemde toeslagen) zeewaarts ligt van het kritieke grensprofiel (groene arcering).



Figuur 2: Beschouwing standzekerheid voor profiel Kp3535, Q2-2020

In de onderstaande figuur is de ligging van het afslagpunt (inclusief toeslagen) gepresenteerd voor de raaien Kp3535 en Kp3635 en voor de keuringen sinds Q3-2016 (blauwe lijn). Tussen Q2-2018 en Q2-2019 is het afslagpunt in zeewaartse richting verschoven. Dit komt door een uitgevoerde suppletie in combinatie met de versterking van het zandig duin. De stippellijn betreft de trend van het afslagpunt over een periode van 2,35 jaar. Deze trendlijn is afgeleid op basis van de 2 perioden waarin geen suppleties zijn uitgevoerd (te weten Q3-2016 – Q2-2018 en Q2-2019 – Q2-2020). Uit de keuringen volgt dat het afslagpunt voor de beide raaien na 1,35 jaar (blauwe punt) nog zeewaarts liggen van het kritieke grensprofiel. Dit houdt in dat er geen suppletie ingepland wordt.

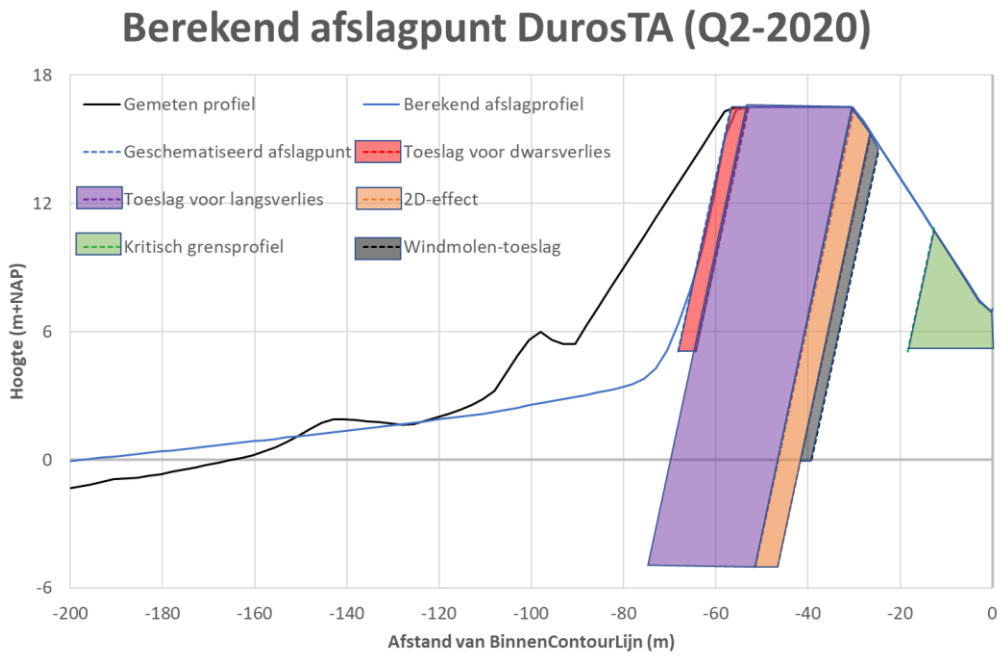


Figuur 3: Trendanalyse afslagpunt (inclusief toeslagen) voor raai Kp3535 (links) en Kp3635 (rechts)

Met Rijkswaterstaat is overeengekomen dat er ter compensatie van lokale verliezen rondom de monopiles een extra zandvolume van 40 m^3/m^1 aanwezig dient te zijn in elk dwarsprofiel van de Zachte Zeewering, zo ook in de keuringsraaien Kp3535 en Kp3635.

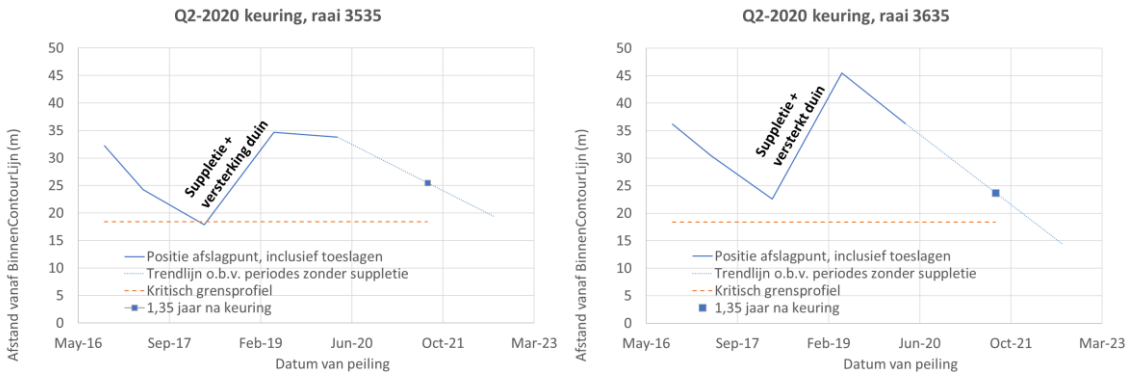
In de figuur hieronder is opnieuw de beschouwing voor standzekerheid voor profiel Kp3535 gepresenteerd, maar nu inclusief de benodigde 40 m^3/m^1 met betrekking tot de windmolens. Aangezien het een lokaal effect betreft, is ervoor gekozen om het volume als een schil tussen NAP en de kruin van het duin in te passen. Zoals te zien is in

de onderstaande figuur verschuift het afslagpunt ongeveer 3 m landwaarts als gevolg van de toeslag voor de windmolens.



Figuur 4: Beschouwing standzekerheid voor profiel Kp3535, Q2-2020, inclusief toeslag t.b.v. windmolens

In de onderstaande figuur is de ligging van het afslagpunt (inclusief toeslagen en inclusief toeslag voor windmolens) gepresenteerd voor de raaien Kp3535 en Kp3635 en voor de keuringen sinds Q3-2016 (blauwe lijn). Uit de keuringen volgt dat het afslagpunt voor de beide raaien na 1,35 jaar (blauwe punt) ook voor een situatie inclusief windmolens nog zeewaarts liggen van het kritieke grensprofiel. Dit houdt in dat er geen suppletie ingepland zou moeten worden om nog 1,35 jaar vooruit te komen.



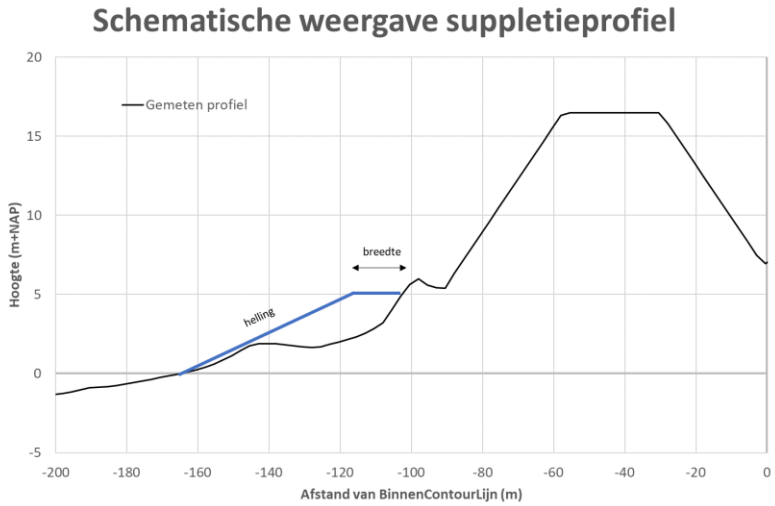
Figuur 5: Trendanalyse afslagpunt (inclusief toeslagen) voor raai Kp3535 (links) en Kp3635 (rechts), inclusief toeslag t.b.v. windmolens

Activiteit 2: Benodigde suppletie

Het onderhoudscontract schrijft voor dat aannemerscombinatie Puma de Zachte Zeewering na uitvoering van een onderhoudssuppletie de Zachte Zeewering dient op te leveren met een buffer die tenminste 2,35 jaar standzekerheid garandeert. Plaatsing van de windmolens is staat momenteel gepland voor 2022. Op dit moment kan niet worden voorspeld hoe de kust van de Zachte Zeewering er op dat moment bij ligt en wat de aanvullende

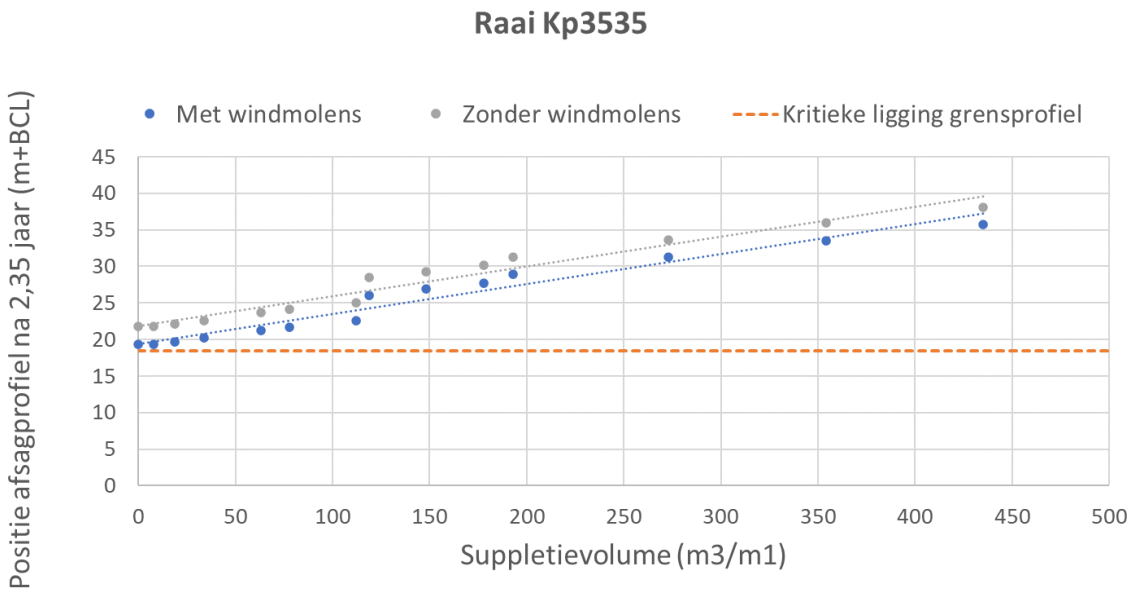
suppletiebehoefte dan zal zijn om voor dit 'nieuwe' kustsysteem de standzekerheid te garanderen. Om hier toch een uitspraak over te doen, is een denkbeeldige situatie verondersteld dat de windmolens in Q2-2020 zijn geplaatst. Zoals uit Figuur 5 blijkt, is de prognose voor profiel Kp3635 dat na 2,35 jaar het afslagpunt landwaarts ligt van het kritisch afslagpunt. In de huidige situatie (zonder windmolens) is deze overschrijding beperkt. De overschrijding zal vervolgens gecompenseerd worden door middel van een beperkte onderhoudssuppletie. In geval met windmolens zal de overschrijding groter zijn en daarmee is ook de suppletiebehoefte groter.

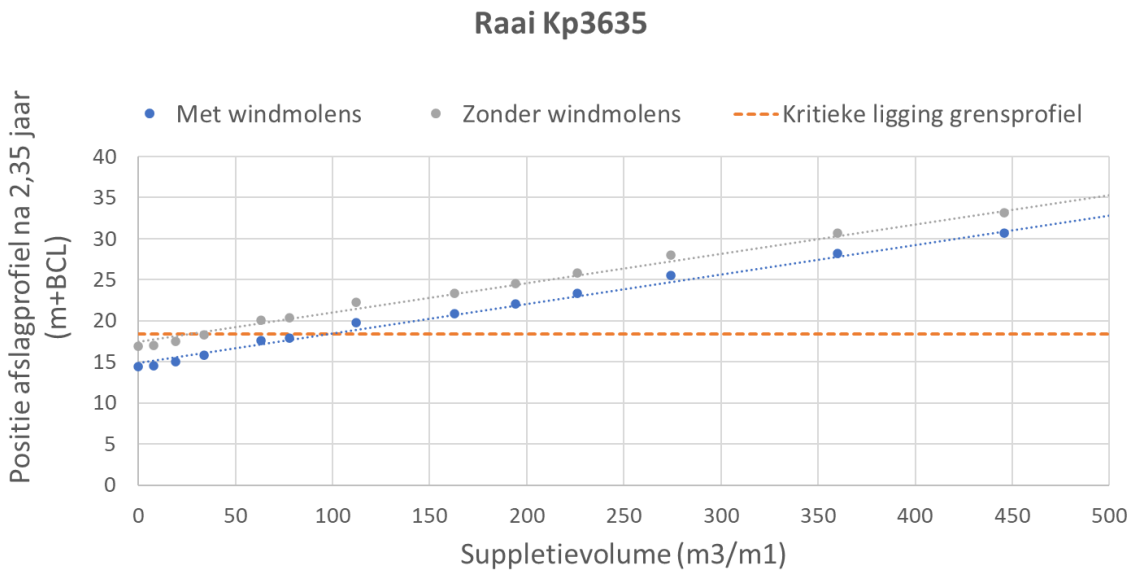
De suppleties langs het meest noordelijke deel van de Zachte Zeewering worden uitgevoerd middels een strandsuppletie. In de uitwerking van de benodigde suppletie wordt uitgegaan van een theoretisch profiel waarin een banket met een hoogte van NAP+3m of NAP+5 m met een zekere breedte wordt aangebracht tegen het bestaande profiel. Het banket sluit onder heling 1:x aan op het bestaande profiel. Het schematische suppletieprofiel is hieronder schematisch weergegeven.



Figuur 6: Schematisatie van ontwerpsuppletie

De benodigde suppletie om over een periode van 2,35 jaar standzekerheid te garanderen is aangehaald als case om het effect van de windmolens op het benodigde suppletievolume inzichtelijk te maken. Hiertoe is voor een verscheidenheid aan suppleties het afslagpunt berekend voor een situatie met en zonder windmolens. In de onderstaande figuur zijn de resultaten hiervan weergegeven.





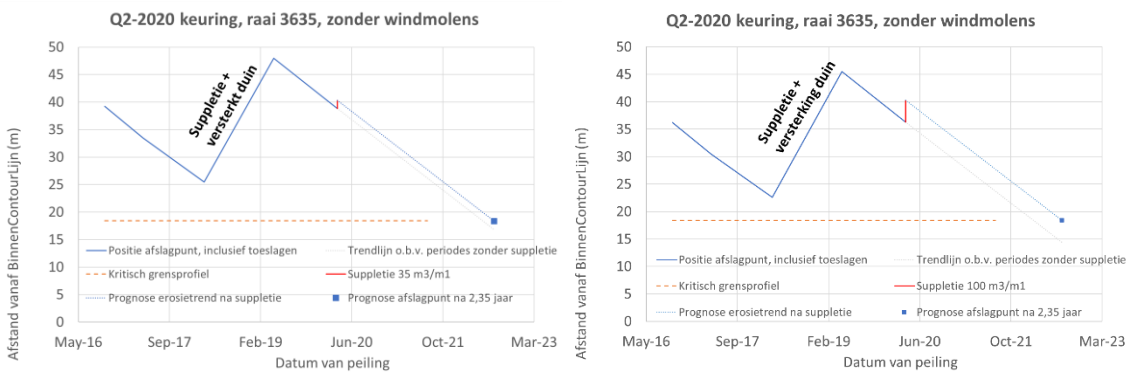
Figuur 7: Afslagpunt, 2,35 jaar na Q2-2020, als functie van het suppletievolume voor raai 3535 (boven) en raai 3635 (onder)

Uit de figuur volgt, net als uit Figuur 5, dat er ter plaatste van raai Kp3535 in principe geen suppletie noodzakelijk is om ook in een geval met windmolens over een periode van 2,35 jaar te voldoen aan de eisen met betrekking tot standzekerheid. Immers, ook zonder suppletie ligt het afslagpunt zeewaarts van het kritieke grensvolume. Ter plaatse van raai Kp3635 is wel een suppletie nodig om over 2,35 jaar te voldoen aan de eisen. In een situatie zonder windmolens is de suppletiebehoefte 35 m^3/m^1. In een situatie met windmolens is de benodigde suppletie 100 m^3/m^1. Dit is een verschil van 65 m^3/m^1.

Om het een en ander visueel te maken, zijn de suppletievolumes ingebracht in het keuringsresultaat voor raai Kp3635, Zie Figuur 8:

- In de linker figuur is de keuring weergegeven voor een situatie zonder windmolens (zie voor vergelijk de rechter figuur in Figuur 3). Door toevoeging van 35 m^3/m^1 wordt bereikt, dat het afslagpunt na 2,35 jaar precies op het kritieke grensprofiel ligt.

- In de rechter figuur is de keuring weergegeven voor een situatie zonder windmolens (zie voor vergelijk de rechter figuur in Figuur 5). Door toevoeging van 100 m^3/m^1 wordt bereikt, dat het afslagpunt na 2,35 jaar precies op het kritieke grensprofiel ligt.



Figuur 8: Visualisatie van het effect van een suppletie op de uitslag van de keuring. Links: Keuring zonder windmolens (suppletie 35 m^3/m^1). Rechts: Keuring met windmolens suppletie (100 m^3/m^1)

Om een enigszins vloeiende belijning van de kustlijn te behouden (dit is noodzakelijk om abrupte gradiënten in langstransport te voorkomen) zal zand gelijkmatig over een afstand van orde 200 m worden aangebracht. Op basis hiervan kan dus worden geconcludeerd dat er, langs het meest noordelijke deel van de Zachte Zeewering, als gevolg van de windmolens, orde 65 m^3/m^1 x 200 m = 13.000 m^3 extra zand gesuppleerd dient te worden om in de aankomende 2,35 jaar te voldoen aan de keuringseisen. Zoals gezegd, is deze afleiding uitgevoerd voor een denkbeeldige situatie waarin de windmolens in Q2-2020 zijn geplaatst. De hieruit volgende extra zandsuppletie van 13.000 m^3 is ook van toepassing als de windmolens op een later moment worden geplaatst.

Bij elke aankomende keuring wordt vervolgens opnieuw beoordeeld of de Zachte Zeewering aan de keuringseisen met betrekking tot standzekerheid voldoet. Het enige verschil tussen een situatie met en zonder windmolens is de extra toeslag van 40 m^3/m^1 (hetgeen overeenkomt met een verschuiving van het afslagpunt van ongeveer 3 m). Dit kan ook geïnterpreteerd worden als een te onderhouden kustlijn die 3 m verder zeewaarts ligt in vergelijking met een situatie zonder windmolens. Dit kan voor de aankomende onderhoudsperiode in één keer op orde worden gebracht door toevoeging van 13.000 m^3 zand. In de jaren erna wordt verwacht dat de 3 m zeewaarts verschoven kustlijn niet zal leiden tot een merkbare verhoging van de onderhoudsbehoefte (ofwel een verandering van de helling van de blauwe stippellijn in Figuur 8). Een verschuiving van ‘slechts’ 3 meter kan als nihil worden gezien ten opzichte van de dimensies van het grote systeem.

Activiteit 3: Mogelijkheden voor extra zand binnen profiel van Maasvlakte 2

Tussen Q2-2018 en Q2-2019 is het duin van het meest noordelijke deel van de Zachte Zeewering versterkt om daarmee dit deel van de Zachte Zeewering standzekerder te maken. Hierdoor is minder zand op het strand en de vooroever nodig om toch aan de eisen met betrekking tot standzekerheid te voldoen.

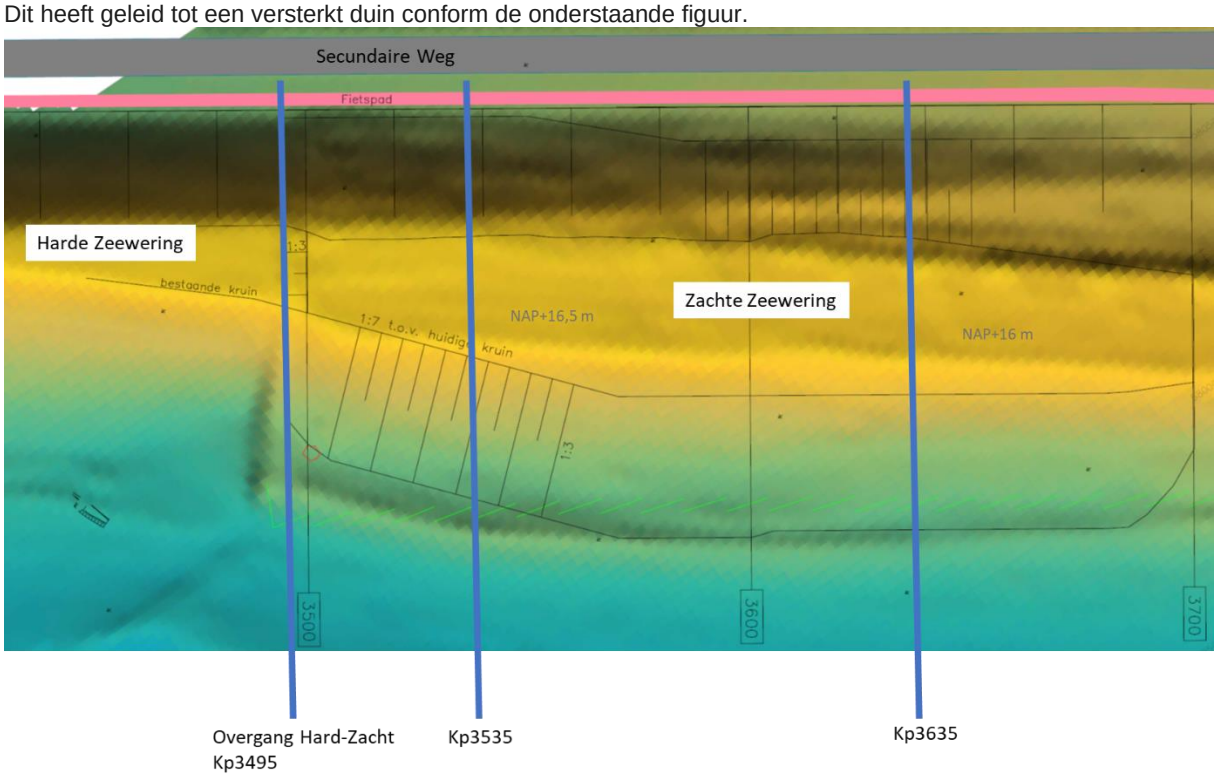
Uit de voorgaande analyse blijkt dat de extra suppletiebehoefte (na een initiële toevoeging van 13.000 m^3) in het meest noordelijke deel van de Zachte Zeewering als gevolg van de windmolens beperkt of zelfs nihil zal zijn. Indien ervoor wordt gekozen om de toeslag van 40m^3/m^1 toch fysiek en op een meer definitieve/duurzame wijze in het profiel gecompenseerd dient te worden, dient aanvullend zand (te weten 40 m^3/m^1) te worden aangevuld in het zandige duin, dat onder normale omstandigheden (en zelfs frequente stormcondities) niet zal eroderen als gevolg van hoge waterstanden en golfwerking. Ondoordacht zand toevoegen in het zandige duin is niet mogelijk aangezien de vormgeving van het duin en de aansluiting met het stenig duin van de Harde Zeewering aan eisen is gebonden. In bijlage A is een overzicht gepresenteerd van de eisen waaraan het zandig duin qua vormgeving dient te voldoen.

In overleg met Havenbedrijf Rotterdam zijn de functionele eisen zoals gepresenteerd in bijlage A concreet gemaakt. De volgende ‘spelregels’ zijn afgeleid om te voldoen aan eisen met betrekking tot een vloeiende

overgang van de Harde- naar de Zachte Zeewering (EBVM eisen MV.BC.13.01, MV.BC.1-13.03.04 en MV.BC.1.13.03.04.01):

- Het zandig profiel ter plaatse van de overgang tussen de Harde en Zachte Zeewering (Kp3495) blijft ongewijzigd;
- Overgangen dienen horizontaal 1:7 of flauwer te zijn:
    - Kruinlijn landzijde maximaal 1:7 ten opzichte van de BinnenContourLijn (BCL);
    - Kruinlijn zeezijde maximaal 1:7 ten opzichte van de buitenkruinlijn van de Harde Zeewering (HZ);
- Kruinhoogteverloop mag niet steiler zijn dan 1:3;
- Het talud aan landzijde mag niet steiler zijn dan 1:3;
- De platberm tussen het fietspad en het duintalud dient in stand gehouden te worden;
- Het talud aan zeezijde is constant, onder een helling van 1:3;
- De maximale kruinhoogte is NAP+16,5 m.

Dit heeft geleid tot een versterkt duin conform de onderstaande figuur.



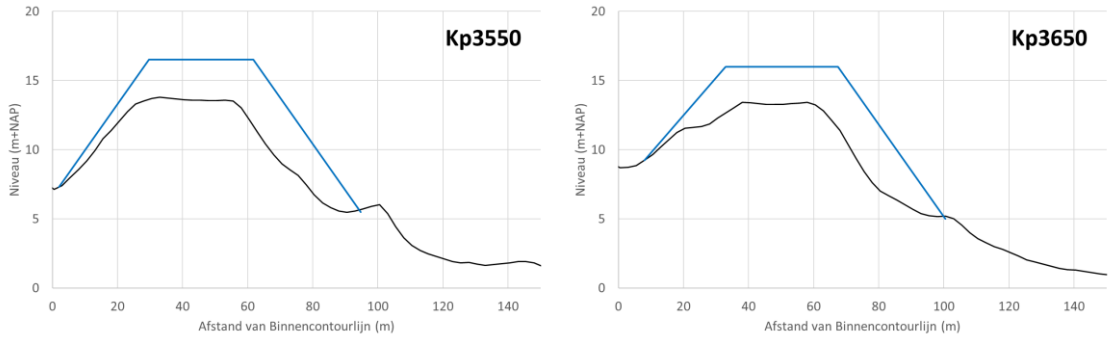
Figuur 9: Vormgeving van het versterkte duin

In Figuur 10 is voor een aantal profielen weergegeven hoe in 2019 een versterking van het meest noordelijke deel van de Zachte Zeewering is toegepast:

- Tussen Kp3500 en Kp3600 is een verhoging tot NAP+16,5 m toegepast. Het landwaartse- en zeewaartse talud is opgetrokken tot de maximale steilheid van 1:3. Het zeewaartse talud sluit aan op het voorduin op ongeveer NAP+5 m;
- Tussen Kp3500 en Kp3600 is een kleinere verhoging (tot NAP+16 m) toegepast, omdat langs deze sectie een kleinere versterking destijds afdoende was.

Er kan worden geconcludeerd dat het duin van het meest noordelijke deel van de Zachte Zeewering maximaal is opgerekt binnen de spelregels die er zijn. Extra zand toevoegen in het duinprofiel is hierdoor niet mogelijk. Binnen de spelregels zou mogelijk nog een zeewaartse verschuiving van het zeewaartse talud toegepast kunnen worden, maar dit is vanuit morfologisch oogpunt niet aanbevolen. Het versterkte duinprofiel zou dan immers bij relatief milde stormcondities al worden aangevallen door golven.

Op basis hiervan kan dus worden geconcludeerd dat toevoegen van 40 m^3/m^1 zand in het duin (teneinde elke discussie omtrent extra kustonderhoud te omzeilen) niet mogelijk is zonder opnieuw de discussie omtrent de vorm van het duin te voeren.



Figuur 10: Dwarsdoorsnede van het ontwerp van het versterkt duinprofiel voor Kp3550 en Kp3650

Conclusies

Er zijn plannen voor het plaatsen van windmolens op zowel de Harde- als de Zachte Zeewering van Maasvlakte 2. Langs de Zachte Zeewering zullen dit monopile constructies zijn met een diameter van ongeveer 5 meter. De monopiles zullen rond de waterlijn worden geplaatst. Er wordt verwacht dat monopiles van een dergelijke omvang geen effect zullen hebben op de grootschalige morfologie. Zeer lokaal kan enige invloed worden verwacht. Er heeft inmiddels overleg plaatsgevonden met Rijkswaterstaat en er is overeengekomen dat er ter compensatie van lokale effecten een extra zandbuffer van 40 m^3/m^1 aanwezig moet zijn langs de gehele Zachte Zeewering.

Arcadis is gevraagd om bij te dragen aan de standzekerheidsbeschouwing (door het uitvoeren van aanvullende berekeningen conform de keuringsmethodiek) en om mee te denken in mogelijke oplossingen om extra benodigd zand in het bestaande kustprofiel in te passen (dan wel als permanente aanpassingen in het duin, dan wel middels periodieke suppletie). Hieronder is de conclusie gepresenteerd voor elk van de 3 onderzoeksvragen:

1. **De bepaling van het effect van de windmolens op de jaarlijkse keuring**.
   Met Rijkswaterstaat is overeengekomen dat een aanvullend zandvolume van 40 m^3/m^1 gegarandeerd dient te worden ter compensatie van mogelijke negatieve effecten van de windmolens. In de keuringssystematiek is dit geïnterpreteerd als een extra toeslag (naast onzekerheden, langsverlies en 2D-effecten) tussen NAP en de kruin van het duin. Uit de keuring volgt dat er als gevolg van de windmolens een profiel gehandhaafd dient te worden waarbij (ten opzichte van het huidige te handhaven profiel) het afslagpunt ongeveer 3 m verder zeewaarts ligt;
2. **De bepaling van eventueel benodigde (onderhouds)suppletie voor standzekerheid**.
   In een denkbeeldige situatie is verondersteld dat de windmolens in Q2-2020 zijn geplaatst. Op basis van gemeten erosietrends is de suppletiebehoefte afgeleid voor een situatie met en zonder plaatsing van de windmolens. Conform het onderhoudscontract van Puma moet een onderhoudssuppletie de standzekerheid van het noordelijke deel van de Zachte Zeewering voor een duur van 2,35 jaar garanderen. Uit de nadere analyse volgt dat er, ter compensatie van de windmolens, aanvullend eenmalig 13,000 m^3 zand gesuppleerd dient te worden langs het meest noordelijke deel van de Zachte Zeewering. Dit extra zandvolume is ook van toepassing als de windmolens op een later moment worden geplaatst.
3. **Advisering over de (on)mogelijkheden met betrekking tot toevoeging van extra zand.**
   Tussen Q2-2018 en Q2-2019 is het duin van het meest noordelijke deel van de Zachte Zeewering versterkt om daarmee dit deel van de Zachte Zeewering standzekerder te maken. Door de duinversterking is minder zand op het strand en de vooroever nodig om toch aan de eisen met betrekking tot standzekerheid te voldoen. Door minder zand op het strand en de vooroever te suppleren, is het profiel makkelijker te onderhouden. De vorm van dit versterkte duin is overeengekomen met Havenbedrijf Rotterdam en laat binnen de huidige spelregels geen ruimte voor verdere versterking van het duin. Op basis hiervan kan dus worden geconcludeerd dat

toevoegen van 40 m^3/m^1 zand in het duin teneinde elke discussie omtrent extra kustonderhoud te omzeilen) niet mogelijk is zonder opnieuw de discussie omtrent de vorm van het duin te voeren. Dit volume kan wel in de vorm van een zandbanket op het strand worden gesuppleerd.

Het is nu de vraag of als gevolg van de instandhouding van deze windmolen-toeslag (te weten 3 m). De onderhoudsbehoefte in de toekomst gaat toenemen. Een instandhouding van een 3 m verder zeewaarts gelegen afslagpunt wordt vooralsnog als zeer gering gezien ten opzichte van de dimensies van het kustsysteem. Het wordt daarom verwacht dat dit geen invloed heeft op de erosietrend (blauwe stippellijn in Figuur 8) en er wordt verwacht dat de extra onderhoudsbehoefte als gevolg van compensatie voor de windmolens nihil zal zijn.

Bijlage A Eisen, gerelateerd aan de vormgeving van het zandig duin

Systeemeisen buitencontour (MV2.BC)

Eisenboom						
		Eis ID	**Titel en omschrijving**	**Bron**	**Bovenliggende eis**	**Onderliggende eis**
10	**Eisen aan de functionaliteit (gebruiksfase)**					
	11	***Functie eisen***				
	12	***Duurzaamheideisen***				
	13	***Raakvlakeisen***				
		MV.BC-13.01	**Intern raakvlak**			
			De aansluiting tussen de Harde Zeewering en de Zachte Zeewering moet zodanig worden vormgegeven dat de functies van beide zeeweringen over en weer niet nadelig worden beïnvloed.	PvE		MV.BC.1-13.03
	14	***Overige eisen***				
20	**Eisen aan de realisatie (bouwfase)**					
	21	***Realisatie eisen***				
	22	***Milieu- en veiligheidseisen***				
	23	***Eisen aan de oplevering***				
30	**Eisen aan beheer en onderhoud**					
	31	***Eisen aan monitoring en beheer***				
	32	***Onderhoudeisen***				

Eisen Zachte Zeewering (MV2.BC.2)

Eisenboom						
		Eis ID	**Titel en omschrijving**	**Bron**	**Bovenliggende eis**	**Onderliggende eis**
10	**Eisen aan de functionaliteit (gebruiksfase)**					
	11	***Functie eisen***				
	12	***Duurzaamheideisen***				
	13	***Raakvlakeisen***				
	14	***Overige eisen***				
		MV.BC.2-14.01	**Beperking hinder door stuivend zand**			
			De op de Zachte Zeewering gelegen secundaire weg en fietspad en de Inrichting van MV2, in het bijzonder de Infrabundel, moeten door middel van duurzame, preventieve maatregelen tot en met windkracht 7 Beaufort vrij blijven van de afzetting van (stuif)zand.	PvE	MV-14.03	
		MV.BC.2-14.01.01	**Ontwerpaspecten ter beperking van hinder door stuivend zand**			
			Bij de vormgeving van het duin moet rekening gehouden worden met beperking van stuivend zand.			
		MV.BC.2-14.01.02	**Maatregelen ter beperking van hinder door stuivend zand**			

			Maatregelen ter beperking van hinder door stuivend zand moeten worden gedefinieerd.			MV.BC.2-31.02
		MV.BC.2-14.01.02.01	**Tijdelijke maatregelen op het duin**			
			Op het duin moeten tijdelijke maatregelen genomen worden, tot duurzame vegetatie volgroeid is.	PUMA		
		MV.BC.2-14.01.02.02	**Helmgras op de kruin en de zeewaartse duinhelling**			
			Zeewaarts van het fietspad moet op de kruin en het zeewaartse talud van het duin helmgras of vergelijkbare vegetatie toegepast worden.	PUMA		
20	**Eisen aan de realisatie (bouwfase)**					
	21	***Realisatie eisen***				
	22	***Milieu- en veiligheidseisen***				
	23	***Eisen aan de oplevering***				
30	**Eisen aan beheer en onderhoud**					
	31	***Eisen aan Monitoring en beheer***				
		MV.BC.2-31.02	**Onderhoud maatregelen ten behoeve van hinder van stuivend zand**			
			Het functioneren van de maatregelen ter beperking van stuifhinder moet gedurende de Instelperiode worden gemonitord en indien nodig moet onderhoud worden uitgevoerd.	PUMA	MV.BC.2-14.01.02	
	32	***Onderhoudeisen***				
		MV.BC.2-32.02.02	**Voorkomen van klifvorming**			
			Steile afslagkanten en klifvorming (steiler dan 45 graden) moeten worden voorkomen, danwel na het ontstaan onverwijld worden afgevlakt.	PvE	MV.BC.2-11.03.02	

Eisen Harde Zeewering (MV2.BC.1)

Eisenboom						
		Eis ID	**Titel en omschrijving**	**Bron**	**Bovenliggende eis**	**Onderliggende eis**
10	**Eisen aan de functionaliteit (gebruiksfase)**					
	11	***Functie eisen***				
	13	***Raakvlakeisen***				
		MV.BC.1-13.03.01	**Voorkoming vermenging zand en granulair steen**			

			De vermenging van deklaag zand en deklaag breuksteen dient zoveel mogelijk te worden voorkomen	PUMA		
		MV.BC.1-13.03.04	**Aansluiting op Zachte Zeewering**			
			De zuidelijke beëindiging en de Zachte Zeewering moeten vloeiend op elkaar aansluiten	PUMA		
		MV.BC.1-13.03.04.01	**Vloeiende aansluiting op Zachte Zeewering**			
			Het meest zuidelijke profiel van de zuidelijke beëindiging moet qua vorm gelijk zijn aan het meest noordelijke profiel van de Zachte Zeewering	PUMA		
	14	***Overige eisen***				
20	**Eisen aan de realisatie (bouwfase)**					
	21	***Realisatie eisen***				
	23	***Eisen aan de oplevering***				
30	**Eisen aan beheer en onderhoud**					
	31	***Eisen aan monitoring en beheer***				
	32	***Onderhoudeisen***				