

Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II

Systemanalyses Waterveiligheid

Deelrapport Zandige waterkeringen kust Inschatting Waterveiligheidsopgave 3-5 meter zeespiegelstijging

Hoofdrapport met bijlagen



RWS INFORMATIE

Systemanalyse Waterveiligheid

Deelrapportage Zandige waterkeringen kust – Impact van 3 tot 5 meter zeespiegelstijging

Kennisprogramma Zeespiegelstijging – Spoor 2 Systemverkenningen

Resultaten van de Fase II berekeningen om de waterveiligheidsimpact van (versnelde) zeespiegelstijging op de huidige systeeminrichting waterveiligheid van de Nederlandse zandige kust bij een zeespiegelstijging van 3 t/m 5 meter.

Datum	12 januari 2024
Versie	1.0
Status	Definitief

Colofon

Deze publicatie maakt deel uit van het **Kennisprogramma Zeespiegelstijging**, een initiatief van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en de Deltacommissaris. Het programma levert kennis op over de gevolgen van zeespiegelstijging en hoe Nederland daarmee kan omgaan. Deze kennis wordt gebruikt bij de herijking van het Deltaprogramma in 2026.

Meer informatie over het kennisprogramma en een overzicht van alle publicaties staat op **kennisprogrammazeespiegelstijging.nl**.

Uitgegeven door Kennisprogramma Zeespiegelstijging - Spoor 2

In opdracht van Rijkswaterstaat WVL

Auteurs
M.m.v.

Informatie

Telefoon
E-mail

Datum 12 januari 2024
Versie 1.0
Status Definitief

Versiebeheer

0.1	Concept rapportage, ter discussie conclusies
0.2	Verwerking feedback op v0.1. Aangepast resultaten hoofdstuk met nieuwe resultaten voor geüpdatet waterstandverloop. Aangepast vergelijking Duros+/XBeach. Aanvullingen discussie. Nieuwe versie conclusie. Nieuwe versie Samenvatting & Summary Ter discussie: Samenvatting, discussie en conclusie
0.3	Verwerking feedback op v0.1. Nieuwe versie Samenvatting & Summary
0.4	Afronding tot concept definitief
1.0	Publicatieversie

Samenvatting

Dit rapport is onderdeel van het kennisprogramma zeespiegelstijging (KP ZSS) – spoor II Systeemverkenningen. Dit rapport bevat een inschatting van de waterveiligheidsopgave van de zandige kust bij een zeespiegelstijging van 3-5 meter. Ten opzichte van het eerder gepubliceerde rapport voor de [waterveiligheidsinschatting van 0-3 meter zeespiegelstijging](#) (Wilmink & Groenewegen, 2023), is voor deze analyse het empirische duinafslagmodel Duros+ vervangen door het numerieke afslagmodel XBeach. XBeach is meer geschikt om duinafslag te berekenen voor complexere profielen of bij een extremere mate van zeespiegelstijging. Ondanks de verbeterde mogelijkheden dienen de resultaten niet in absolute zin geïnterpreteerd te worden maar nadrukkelijk als een inschatting van de waterveiligheidsopgave die ontstaat bij een bepaalde mate van zeespiegelstijging.

In dit rapport zijn XBeach simulaties uitgevoerd voor verschillende maten van zeespiegelstijging (0, 3 en 5,4 meter). De hydraulische basisbelastingen zijn berekend op basis van de BOI-systematiek. Aanpassingen van de hydraulische belastingen als gevolg van zeespiegelstijging zijn gedaan zoals in Wilmink & Groenewegen (2023). Om de totale rekentijd behapbaar te houden is gekozen voor een selectie van 33 profielen waarvan is ingeschat dat ze samen een representatief beeld geven van de Nederlandse kust. Daarnaast zijn twee morfologische scenario's beschouwd: wel of niet meegroeien van de vooroever, strand en duinen. Ook is onderscheid gemaakt tussen locaties waar de duinen (boven 3 m+NAP) wel of niet kunnen meegroeien, afhankelijk van de aanwezigheid van kustbebouwing. Een belangrijke aanname van deze studie is dat het volledig meegroeien van de waterkering haalbaar is. Het wordt aanbevolen dat verder te onderzoeken. Het is onzeker of (1) de waterkeringen in hetzelfde tempo kunnen meegroeien als de zeespiegelstijging, en (2) of in gebieden met brede, zandige waterkeringen, de meer landwaarts gelegen delen van de waterkering op een natuurlijke manier voldoende kunnen meegroeien.

Op basis van de uitgevoerde analyses is te zien dat het laten meegroeien van de kust helpt om waterveiligheidsproblemen te voorkomen, zelfs tot en met ruim 5 meter zeespiegelstijging. De huidige voorkeursstrategie en daarin het huidige kustbeleid – meegroeien met zeespiegelstijging door middel van het uitvoeren van suppleties blijkt zeer effectief om waterveiligheidsopgaven in de toekomst te voorkomen. Kijkend naar de resultaten voor het scenario meegroeien, ontstaan problemen bij kustplaatsen waar de zeereep (waterkering) bebouwd is. Daar kunnen de duinen niet meegroeien. In het geval van 3 meter zeespiegelstijging worden, voor de in dit verslag geanalyseerde profielen, waterveiligheidsopgaven waargenomen bij Bergen, Egmond en Noordwijk aan Zee en Scheveningen. Bij 5 meter zeespiegelstijging worden bij alle geanalyseerde kustplaatsen met een bebouwde zeereep veiligheidsopgaven geconstateerd. Bij het scenario dat het gehele kustprofiel niet meegroeit met de mate van zeespiegelstijging, zullen bij zowel de berekende 3 als 5,4 meter zeespiegelstijging grote waterveiligheidsopgaven ontstaan. Bij kustplaatsen waar de duinen niet kunnen meegroeien, zou het meegroeien van de vooroever mogelijk kunnen helpen om waterveiligheidsopgaven te reduceren, omdat de inkomende golven gedempt worden voordat ze de waterkering bereiken.

Summary

This report provides an estimate of the impact of 3-5 meters sea level rise on the flood safety of the Dutch sandy coasts. For this analysis, the empirical dune erosion model Duros+ used in previous studies (i.e. Wilmink & Groenewegen, 2023) has been replaced with the numerical dune erosion model XBeach. XBeach is better suited for calculating dune erosion for complex profiles or for more extreme rates of sea level rise than Duros+. Despite improved capabilities in calculating dune erosion, the results presented in this report should be interpreted as an estimate of the flood safety assessment for various degrees of sea level rise.

XBeach simulations were performed for various levels of sea level rise (0, 3 and 5.4 meters). Hydraulic boundary conditions were selected based on the normative values used for flood safety investigations of the sandy coasts (BOI). The hydraulic boundary conditions have been adjusted for the effects of sea level rise as in Wilmink & Groenewegen (2023). To reduce the total calculation time, 33 profiles are selected that are estimated to give a representative picture of the Dutch coast. To account for morphological changes of the profiles as a result of climate change, two scenarios were considered: full growth or no growth of the foreshore, beach and dunes with respect to sea level rise. Depending on the presence of coastal infrastructure, a distinction is made between locations where the dunes (part of the profile that exceeds 3 m+NAP) can or cannot grow with respect to sea level rise. An important assumption in this study is that the natural growth of the flood defense has not been tested for feasibility. This remains a recommendation for further research. There currently are uncertainties regarding (1), whether natural growth of dunes can happen at the same pace as sea level rise and (2), particularly in areas containing wide sandy flood defenses, it is uncertain whether the more inland parts of the flood defenses can sufficiently in a natural manner.

Based on the analyses carried out in this research, it can be concluded that the growth of the coastal profile helps to prevent flooding problems, even up to and including over 5 meters of sea level rise. Continuing the preferred strategy fixed in the coastal policy - allowing for the natural growth of sandy flood defenses by means of nourishments – proves to be effective in reducing/preventing future flood safety hazards. The first problems will arise in places containing coastal infrastructure, where the dunes cannot grow with sea level rise. Given 3 meters of sea level rise this research observes, for the profiles studied in this research, safety concerns will arise at Bergen-, Egmond- and Noordwijk aan Zee and Scheveningen. If the sea level rises by 5 meters, all coastal towns included in this study will no longer meet the normative minimal safety standards in those areas. If the coastal profile does not grow with the rate of sea level rise, major flood safety concerns will arise at both 3 and 5.4 meters of sea level rise.

Inhoud

SAMENVATTING	2
SUMMARY	3
INHOUD	4
1 INLEIDING.....	6
1.1 Kennisprogramma Zeespiegelstijging	6
1.2 Achtergrond.....	6
1.3 Doelstelling	6
1.4 Leeswijzer	7
2 BESCHRIJVING METHODIEK.....	8
2.1 Inleiding.....	8
2.2 Toepassingsbereik Duinafslagmodellen XBeach en Duros+.....	8
2.3 Duinafslag en modellering in XBeach	9
2.4 Hydraulische Belastingen.....	10
2.5 Grensprofiel.....	13
3 KUSTPROFIELEN	15
3.1 Inleiding.....	15
3.2 Representatieve jaren	15
3.3 Profielselectie	15
3.4 Morfologische Scenario's en type profielen.....	17
4 RESULTATEN	18
4.1 Inleiding.....	18
4.2 Resultaten per regio	18
5 VERGELIJKING XBEACH EN DUROS+.....	36
5.1 Inleiding.....	36
5.2 Verdiscontering hydraulische belastingen XBeach en Duros+	36
5.3 Vergelijking gehanteerde hydraulische belastingen	38
5.4 Verschillen in veiligheidsopgaven.....	41
6 DISCUSSIE.....	46
6.1 Inschatting waterveiligheidsopgave versus werkelijkheid	46
6.2 Morfologische scenario's	47
6.3 Geen hydrodynamische aanpassingen voor getijden toegepast.....	48
6.4 Ontbreken uitbreiding en versterkingsopgave	48
6.5 Gebruik XBeach vs. Duros+	48
7 CONCLUSIES	50
8 REFERENTIES.....	51
BIJLAGE A HYDRAULISCHE BELASTINGEN.....	52
A.1 Vergelijking traject- en doorsnedeniveau.....	52
A.2 Effecten Zeespiegelstijging op hydraulische belasting.....	53
A.3 Vergelijking Hydraulische belasting XBeach vs Duros+	55
BIJLAGE B BESCHRIJVING GESELECTEERDE PROFIELEN	57
B.1 Wadden	57

B.2	Hollandkust (kustvakken 7-9)	58
B.3	Zuidwestelijke Delta (kustvakken 11 – 17)	61
BIJLAGE C	MORFOLOGISCHE AANPASSINGEN PROFIELEN	63
C.1	Verlengen van profielen	63
C.2	Aansluiting profielen bij diepwaterovergang	63
C.3	Aansluiting B-profielen bij duinovergang.....	63
C.4	Extra aanpassingen Scheveningen.....	64
BIJLAGE D	PROFIELDOORSNEDES XBEACH SIMULATIES	66
D.1	Referentiesituaties (0m zeespiegelstijging)	66
D.2	Meegroeien – 3m zeespiegelstijging.....	75
D.3	Meegroeien – 5m zeespiegelstijging.....	84
D.4	Niet Meegroeien – 3m zeespiegelstijging	93
D.5	Niet Meegroeien – 5m Zeespiegelstijging.....	102
BIJLAGE E	VERSCHILLEN XBEACH EN DUROS+	111
E.1	3m - Meegroeien	111
E.2	3m – Niet meegroeien.....	112

1 Inleiding

1.1 Kennisprogramma Zeespiegelstijging

Binnen spoor II (systeemverkenningen) van het *Kennisprogramma Zeespiegelstijging* (KP ZSS) heeft Rijkswaterstaat (RWS) de opdracht gekregen van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (Min. IenW) om de houdbaarheid en oprekbaarheid van de huidige voorkeursstrategieën te verkennen bij een stijgende zeespiegel. Hiertoe is een modelinstrumentarium voor waterveiligheidsberekeningen opgezet waarbij allereerst de waterstaatkundige effecten van zeespiegelstijging op de huidige watersystemen wordt bepaald. Er zal hierbij (klimaatscenario-onafhankelijk) gekeken worden naar de effecten van verschillende mate van zeespiegelstijging.

Dit document betreft het tweede deel van de Systeemanalyse Waterveiligheid zandige waterkeringen kust. In de eerste fase is een studie gedaan naar de waterveiligheidsopgave bij een zeespiegelstijging van 0 tot 3 meter (Wilmink & Groenewegen, 2023). In dit rapport wordt daar een studie voor een zeespiegelstijging van 3 tot 5,4¹ meter aan toegevoegd. Dit rapport vormt daarmee een eerste orde uitwerking van de impact van extreme zeespiegelstijging op de huidige systeeminrichting waterveiligheid van de Nederlandse zandige kust.

1.2 Achtergrond

In Wilmink & Groenewegen (2023) is de waterveiligheidsopgave bestudeerd met behulp van het empirische duinafslagmodel Duros+. Daarin is de werkmethode getest middels een "proof of principle" op 26 representatieve profielen (Groenewegen, 2021; Van Santen, 2021). Vervolgens is de studie uitgebreid naar alle raaien van de Nederlandse kust.

Hoewel Duros+ geschikt wordt geacht voor het bestuderen van de waterveiligheidsopgave voor 0 tot 3 meter zeespiegelstijging, is dit model niet geschikt bevonden voor 3 tot 5 meter zeespiegelstijging berekeningen. Daarom wordt in deze studie gebruikt gemaakt van het numerieke model XBeach. Omdat een XBeach simulatie significant meer tijd vereist dan Duros+, is in deze studie enkel gekeken naar een geselecteerd aantal raaien. De geselecteerde raaien bestaan onder andere uit 26 raaien beschreven in Van Santen (2021) waaraan een aantal kustplaatsen is toegevoegd waar mogelijk een impact verwacht wordt.

Omdat in deze studie t.o.v. Wilmink & Groenewegen (2023) verschillende modellen worden gebruikt (Duros+ en XBeach) wordt er in dit rapport ook ingegaan op de verschillen tussen de resultaten van beide modellen.

1.3 Doelstelling

Het doel van de Systeemanalyse Waterveiligheid zandige waterkeringen kust is het in beeld brengen van de waterveiligheidsopgave van de zandige kust ten gevolge van zeespiegelstijging. Aangezien de tijdstippen van optreden van de zeespiegelstijgingszichtwaarden waarnaar gekeken wordt ver in de toekomst liggen,

¹ In dit rapport wordt veelal gerefereerd naar 5,4 meter zeespiegelstijging als 5 meter zeespiegelstijging.

zijn er aanzienlijke onzekerheden in hoe Nederland er op dat moment uit zal zien. In de systeemanalyse wordt door middel van scenario's gekeken onder welke omstandigheden er wel of niet wordt voldaan aan de huidige waterveiligheidsnormen. Hiermee tracht dit rapport een globaal veiligheidsbeeld van de Nederlandse zandige waterkeringen onder zeespiegelstijging te geven. In Fase I (0-3 meter zeespiegelstijging), is voor de plekken waar een waterveiligheidsopgave werd geconstateerd, een inschatting gemaakt van de veiligheidsopgave om de waterkering weer aan de norm te laten voldoen. Een dergelijke uitwerking is in dit onderzoek niet uitgevoerd.

1.4 **Leeswijzer**

Hoofdstuk 2 beschrijft de gebruikte rekenmethodiek gevolgd door een overzicht van de geselecteerde profielen in hoofdstuk 3. De resultaten van de waterveiligheidsopgave worden beschreven in hoofdstuk 4. Hoofdstuk 4 bevat ook de vergelijking tussen de resultaten uit Duros+ en XBeach. Hoofdstuk 5 bevat een discussie gevolgd door conclusies in hoofdstuk 6.

2 Beschrijving methodiek

2.1 Inleiding

In dit onderzoek wordt het model XBeach toegepast om duinafslag te berekenen. Dit hoofdstuk geeft de motivatie voor de keuze voor XBeach, een beknopte beschrijving hoe XBeach werkt, de selectie van de hydraulische belastingen en een beschrijving van de beoordeling van duinprofielen.

2.2 Toepassingsbereik Duinafslagmodellen XBeach en Duros+

In de eerste fase van het onderzoek naar de waterveiligheidsopgave van de zandige kust (0-3 meter zeespiegelstijging) is gebruik gemaakt van het duinafslagmodel Duros+. Duros+ is een eenvoudig, empirisch balansmodel dat is ontwikkeld om de veiligheid van een duinwaterkering te kunnen beoordelen. Het voordeel is dat berekeningen weinig tijd kosten, waardoor op grote schaal berekeningen langs de hele Nederlandse kust kunnen worden uitgevoerd. De keerzijde is dat het toepassingsbereik van Duros+ beperkt is (Coumou, Steetzel, Velhorst, & Van der Heijden, 2023).

Duros+ is een empirisch model. Dit betekent dat fysische processen, zoals de hydrodynamische processen zoals ontwikkeling in de tijd, bodemeffecten en de interactie tussen hydraulische belastingen en de zandige waterkering niet expliciet worden meegenomen. In Duros+ wordt duinafslag op basis van een empirische relatie bepaald, afgeleid op basis van laboratorium omstandigheden. Voor kustprofielen met een afwijkend bodemprofiel (ten opzichte van het profiel gebruikt in laboratorium omstandigheden) zullen de rekenresultaten daarom minder nauwkeuring zijn (Wilmink & Groenewegen, 2023). Voorbeelden van dergelijke profielen zijn kustprofielen zonder regelmatig aflopend profiel, profielen met lange, ondiepe voorlanden en profielen met diepe vaargeulen.

XBeach is een numeriek model dat fysische processen wel meeneemt in de berekeningen. Dit betekent dat XBeach nauwkeurigere berekeningen kan maken voor complexere kustprofielen (meer afwijkend van de situatie die naar laboratorium omstandigheden is geschaald) wat het toepassingsbereik sterk vergroot (Coumou, Steetzel, Velhorst, & Van der Heijden, 2023). Het nadeel van XBeach is dat de vereiste rekentijd van een simulatie aanzienlijk groter is doordat de fysische processen uitgerekend worden. Het is daarom praktisch niet mogelijk om hetzelfde aantal simulaties uit te voeren als in fase I (Wilmink & Groenewegen, 2023) is gedaan.

Voor de berekeningen van de waterveiligheidsopgave van 3 tot en met 5 meter zal XBeach gebruikt worden. Hiervoor zijn twee redenen.

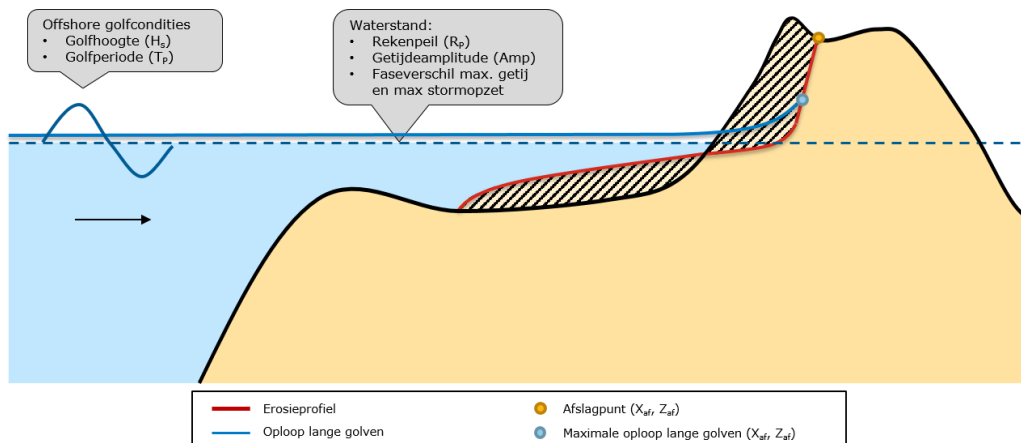
- Tijdens de uitvoering van fase I bevond XBeach nog in ontwikkeling en was nog niet geschikt om te worden toegepast in de formele waterveiligheidsbeoordeling in Nederland;
- de duinafslagberekeningen in de systeemanalyse van fase 1 voor extremere mate van zeespiegelstijging zaten tegen de grens van het toepassingsbereik van Duros+. Voor berekeningen voor 3 tot en met 5 meter zeespiegelstijging wordt Duros+ niet langer geschikt gevonden.

2.3 Duinafslag en modellering in XBeach

Het overgrote deel van de waterkeringen langs de kust in Nederland bestaat uit zandige waterkeringen (duinen). Hier wordt het achterland door de aanwezige duinen beschermd tegen overstromingen vanuit zee. Tijdens een storm vindt er erosie van de duinen plaats (duinafslag) als gevolg van de hydraulische belastingen vanuit zee. De hydraulische belastingen bestaan uit de volgende componenten:

- Hoge waterstand (rekenpeil) dat wordt gedreven door een combinatie van astronomisch getij en stormopzet (als gevolg van hoge windsnelheden);
- Extreme golven, die kunnen worden gekarakteriseerd door de significante golfhoogte (H_s) en de piekperiode (T_p)

Als gevolg van de hydraulische belastingen wordt zand van de duinen geërodeerd en zeewaarts getransporteerd naar lagere delen van het profiel. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 1. Hierbij wordt aangenomen dat de hoeveelheid geërodeerd zand uit de duinen gelijk is aan de hoeveelheid sedimentatie lager in het profiel. Met andere woorden: de hoeveelheid zand in het profiel blijft gelijk (gesloten zandbalans).



Figuur 1: Schematisering afslagmodel XBeach inclusief belangrijkste input, zoals hydraulische randvoorwaarden, als output (afslagpunt en oplooppunt lange golven).

Om de waterveiligheidsopgave voor de duinen te onderzoeken voor 3-5 meter zeespiegelstijging wordt gebruik gemaakt van XBeach (zie paragraaf 2.2). XBeach is een numeriek duinafslagmodel waarmee fysische processen in de kustzone worden doorgerekend om daarmee duinafslag gedurende de duur van een storm te berekenen. Het model simuleert onder andere het gedrag van golven, stroming, sedimenttransport en morfologische ontwikkeling in de kustzone (Steetzel, Coumou, Van Santen, & McCall, 2023). In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van de 1D toepassing van XBeach om de veiligheid van duinen op raainiveau te onderzoeken. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de XBeach instellingen die bij het BOI gehanteerd worden, de zogenoemde BOI-settings (McCall, et al., 2022).

De vereiste input voor XBeach bestaat uit hydraulische belastingen om de waterstand en golfeigenschappen te beschrijven. De hydraulische belastingen (zie Figuur 1) bestaan uit de waterstand (rekenpeil, R_p) en de golfeigenschappen significante golfhoogte (H_s) en piekperiode (T_p). Omdat XBeach de ontwikkeling van de waterstand en golven gedurende een storm simuleert, moet er ook informatie over de getijdeamplitude opgegeven worden. De duur van de storm en hoe de hydraulische belastingen zich gedurende de storm ontwikkelen zijn vastgesteld in de

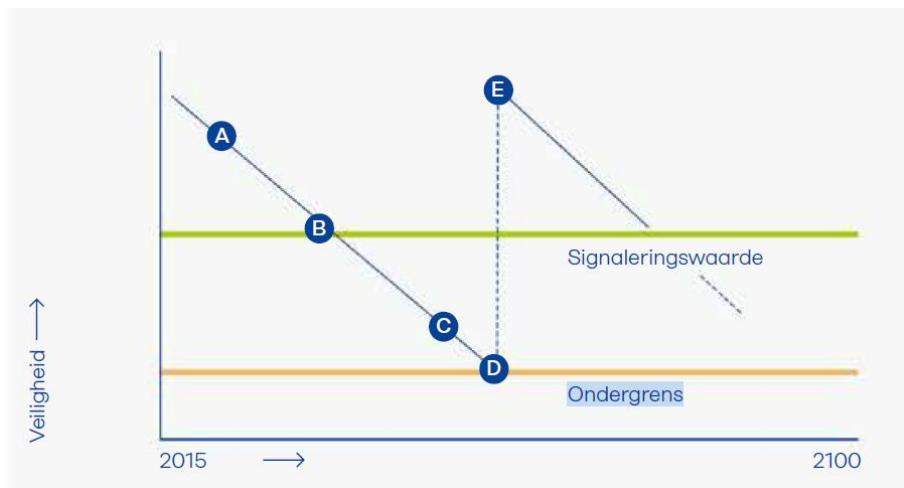
BOI-settings (McCall, et al., 2022). Tenslotte moeten de materiaaleigenschappen van het duin, zoals de korrelgrootte van het zand (D_{50}), worden opgegeven.

2.4 Hydraulische Belastingen

Een XBeach simulatie duurt ongeveer 300-1000 keer langer dan een Duros+ berekening, afhankelijk van de grootte en complexiteit van het bodemprofiel. Om de doorlooptijd van het project te beheersen is het daarom belangrijk een beperkte maar weloverwogen set situaties door te rekenen. Om die reden is besloten om enkel hydraulische belastingen situaties op basis van de ondergrenswaarde op doorsnedeniveau te hanteren.

2.4.1 Ondergrenswaarde

De ondergrenswaarde beschrijft de situatie van hydraulische belastingen waarbij de waterkering nog net veilig wordt beoordeeld (Kok, Jongejan, Nieuwjaar, & Tanczos, 2017), zie Figuur 2. Op die manier kan de beoordeeld worden bij welke mate van zeespiegelstijging de waterkering nog voldoet aan de minimale sterkte-eis.



Figuur 2: Illustratie van de verhouding tussen Ondergrenswaarde en Signaleringswaarde (Kok, Jongejan, Nieuwjaar, & Tanczos, 2017)

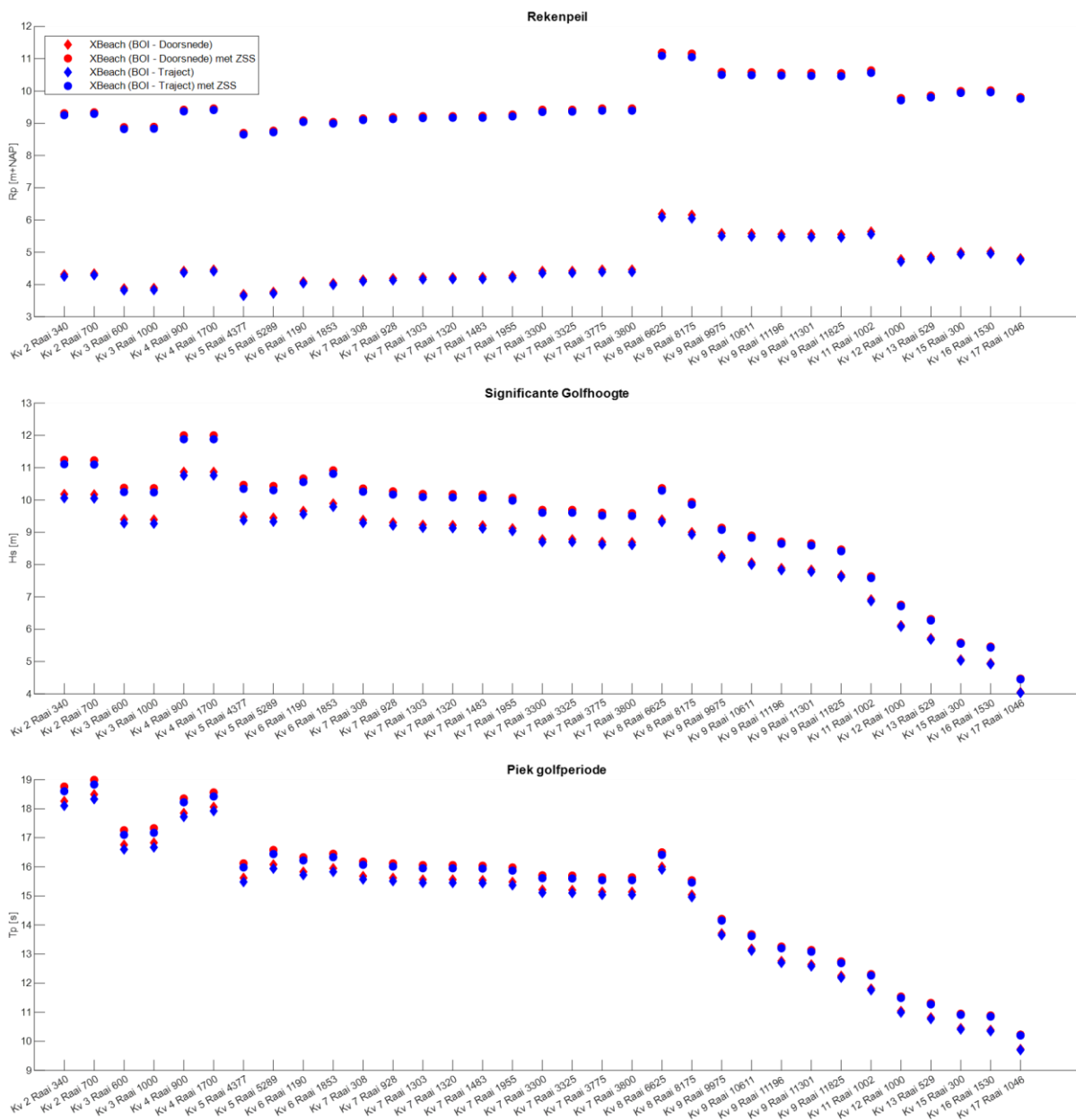
2.4.2 Hydraulische basisrandvoorwaarden uit BOI

Tussen de hydraulische belastingen in het BOI (met XBeach) en het oudere WBI (met Duros+) zit een verschil, zowel op traject- als doorsnedeniveau. Om die reden dient een keuze gemaakt te worden voor de gehanteerde hydraulische belastingen voor het kennisprogramma zeespiegelstijging om de vergelijkbaarheid met de in fase 1 uitgevoerde berekeningen te waarborgen. Voor de tweede fase van de waterveiligheidsopgave zandige kust is gekozen om de belastingen voor het BOI te hanteren, om twee redenen:

1. Voor XBeach is extra informatie over de getijden (amplitude en faseverschil) vereist en worden verschillende aannames gemaakt om de ontwikkeling in de tijd van de belasting gedurende een storm te simuleren. Voor het BOI zijn de parameters voor de getijden afgeleid zodat ze consequent zijn met de andere hydraulische belastingen uit het verleden. Om die reden is het niet mogelijk om dezelfde belastingen als in Wilink & Groenewegen (2023) te hanteren, en wordt er dus met de belastingen uit het BOI gewerkt;

2. XBeach simuleert de fysische interactie tussen de bodem en de golfcondities. De hydraulische belastingen voor het BOI zijn daarop afgestemd. Voor het WBI zijn voor het Deltagebied aanpassingen gedaan aan de hydraulische belastingen om de reducerende effecten van zandbanken door te rekenen. De rekenwaardes van de hydraulische belastingen zijn daarom niet consistent.

Daarnaast moet er een keuze gemaakt worden voor het uitvoeren van een beoordeling op traject- of doorsnedeniveau. Figuur 3 en Tabel 2 (laatste genoemde in Bijlage 8A.1) laten zien dat de rekenwaardes tussen de belastingen op traject en doorsnedeniveau niet groot zijn. Een exacte berekening van het falen van een



Figuur 3: Vergelijking Hydraulische randvoorwaarden op traject (blauw) en doorsnedeniveau (rood) voor de waterstand (rekenpeil – boven), golfhoogte (H_s – midden) en golfperiode (T_p – onder) in de situatie zonder en met 5 m zeespiegelstijging.

duindoorsnede valt buiten de scope van dit onderzoek. De kleine verschillen tussen de hydraulische belastingen op traject- en doorsnedeniveau zijn daarom als niet kritisch beschouwd. Er is gekozen om de belastingen op doorsnedeniveau te hanteren, vanwege twee redenen:

1. Hydraulische belastingen op doorsnedeniveau zijn hoger dan op trajectniveau (zie Figuur 3 en Tabel 2 in Bijlage 8A.1). Dit komt door het lengte-effect dat is toegepast om hydraulische belastingen op trajectniveau te berekenen (lengte-effect factor 1,2). Het gebruik van hogere hydraulische belastingen zal leiden tot conservatievere resultaten;
2. In fase 1 (Wilmink & Groenewegen, 2023) zijn hydraulische belastingen op doorsnedeniveau gehanteerd. Het hanteren van hydraulische belastingen op doorsnedeniveau zal de consistentie met de gehanteerde methodes in fase 1 zoveel mogelijk waarborgen.

Een uitgebreide vergelijking tussen de hydraulische belastingen gebruikt in XBeach en Duros+ is gegeven in Hoofdstuk 5.

2.4.3 Toeslagen Zeespiegelstijging

Naast de verandering van de waterstand als gevolg van zeespiegelstijging, kunnen er ook veranderingen van de maatgevende golfcondities verwacht worden. In dit onderzoek worden dezelfde aanpassingen van de hydraulische belastingen gehanteerd als in Wilmink & Groenewegen (2023). Samenvattend worden de volgende aannames gemaakt ten aanzien van de hoogwaterstanden en golfkarakteristieken in het geval van zeespiegelstijging:

- De hoogwaterstanden tijdens extreme omstandigheden worden opgetild met de zeespiegelstijging (Arns, et al., 2017);
- De golfhoogte wordt verondersteld met 2% per meter zeespiegelstijging toe te nemen, ten opzichte van de initiële golfcondities (Arns, et al., 2017);
- De golfperiode wordt op basis van (Wegman & Nicolai, 2018) geacht 0,1s per meter zeespiegelstijging toe te nemen.

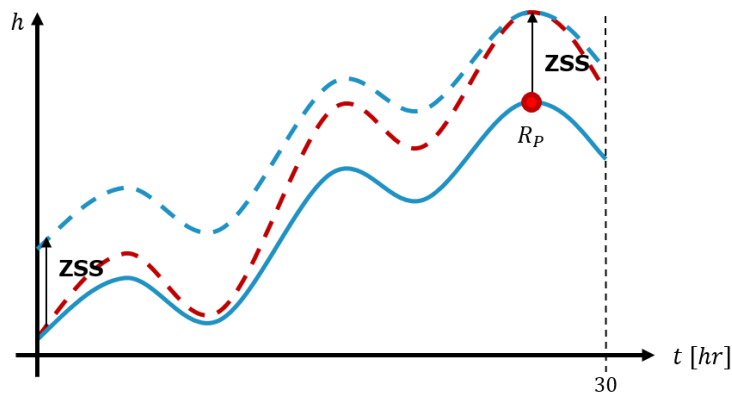
De hydraulische belastingen zijn berekend voor 3 en 5,4 meter zeespiegelstijging. Op basis van een literatuur onderzoek is er geen reden gevonden om aan te nemen dat er veranderingen van de getijden verwacht kunnen worden die relevant zijn voor de veiligheid van waterkeringen tijdens normatieve condities als gevolg van zeespiegelstijging. Er is om die reden ook geen toeslag voor de getijdenamplitude toegepast.

2.4.4 Aanpassingen getijden en waterstand in XBeach

Speciale aandacht moet worden besteed aan het aanpassen van het waterstandsverloop als gevolg van zeespiegelstijging. Zoals gezegd in paragraaf 2.4.3, is het rekenpeil opgehoogd met de mate van zeespiegelstijging. Op basis van het opgegeven rekenpeil en getijdenamplitude modelleert XBeach het waterstandsverloop tot aan de piek van de storm.

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van het XBeach model dat is geïntegreerd in MorphAn. Indien in MorphAn het startpeil van de simulatie niet wordt gecorrigeerd voor zeespiegelstijging, zal MorphAn een onjuist verloop van de waterstand opstellen. Het aanpassen van het rekenpeil heeft namelijk enkel betrekking tot de waterstand tijdens de piek van de storm. Het startpeil zal onveranderd blijven. Dit resulteert in een waterstandsverloop waarbij de waterstand te laag begint (ongeveer

1 m+NAP, afhankelijk van getijdenamplitude) en te steil stijgt. Dit is geïllustreerd door de rode stippellijn in Figuur 4. Om dit te voorkomen, moet de beginwaterstand ook worden verhoogd. In dit onderzoek wordt de waterstand aangepast door het complete waterstandsverloop, zoals dat is berekend in MorphAn op te tillen met de mate van zeespiegelstijging. Dit is geïllustreerd door de blauwe stippellijn in figuur 4.



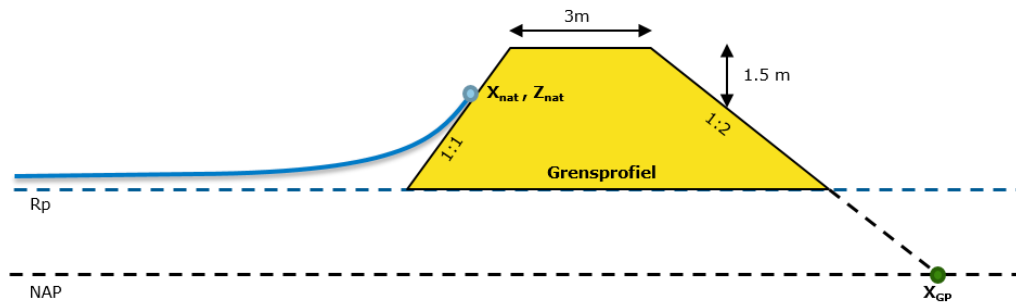
Figuur 4: Illustratie van het aanpassen van het waterstandsverloop. Belangrijk is dat alvorens een XBeach berekening uit te voeren, niet alleen de waterstand tijdens de piek van de storm aan te passen, maar gedurende de hele storm.

2.5 Grensprofiel

De output van XBeach beschrijft het kustprofiel aan het einde van een storm. Om te beoordelen of een kustprofiel voldoet, wordt gebruik gemaakt van een grensprofiel (Steetzel, Coumou, Van Santen, & McCall, 2023). Het grensprofiel beschrijft het minimale profiel wat nog aanwezig moet zijn aan het einde van een storm ten behoeve van faalmechanismen die niet door XBeach gemodelleerd worden maar wel kunnen optreden (Steetzel, Coumou, Van Santen, & McCall, 2023). In het afslagprofiel kunnen twee belangrijke punten worden geïdentificeerd (Zie ook Figuur 1, hoofdstuk 2.3):

- Afslagpunt (X_{af}, Z_{af}): Het punt waar het erosieprofiel het originele kustprofiel snijdt;
- Natte punt (X_{nat}, Z_{nat}): Het maatgevende golfoplooppunt voor de lange golven.

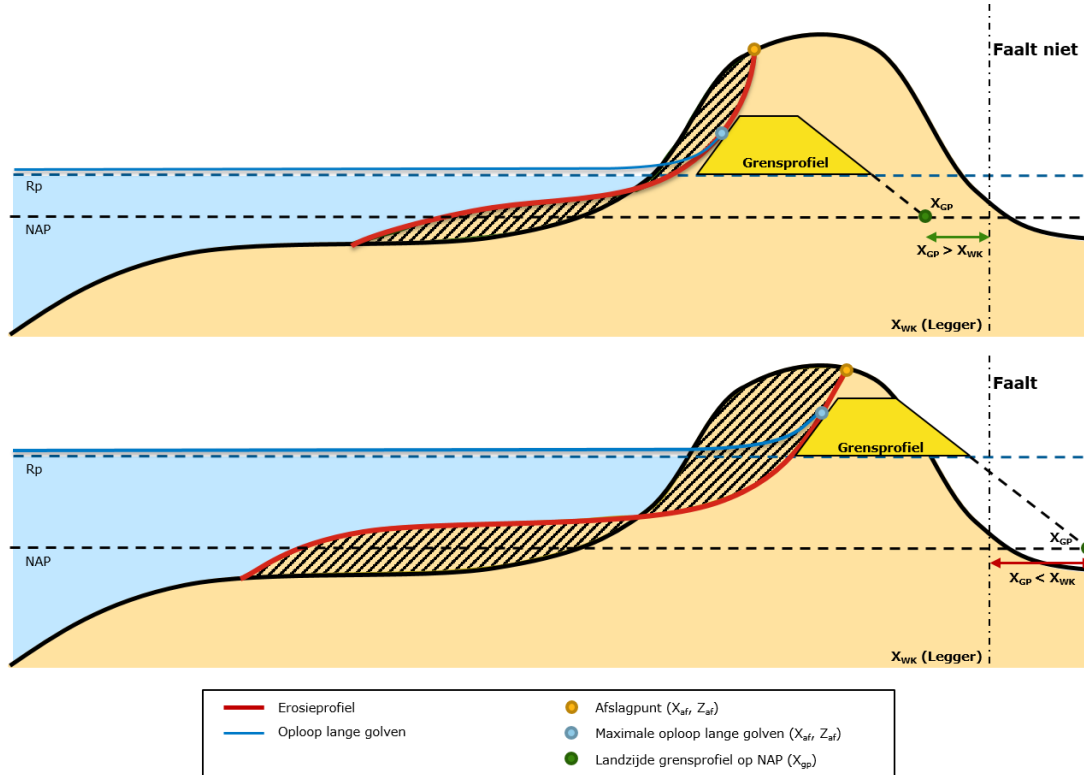
De basisgeometrie van het grensprofiel is schematisch weergegeven in Figuur 5. Daarbij valt te zien dat de dimensies van het grensprofiel een functie zijn van de ophoop van de lange golven. Meer informatie over de basisgeometrie van het grensprofiel staat in Steetzel, Coumou, Van Santen, & McCall (2023).



Figuur 5: Basisgeometrie grensmodel zoals gehanteerd in het BOI

Het grensprofiel wordt ingepast in het duinprofiel dat nog aanwezig is landwaarts van het door XBeach berekende afslagprofiel. Extrapolatie van de landzijde van het grensprofiel naar het referentieniveau NAP leidt tot de bepaling van het "landwaartse punt van het grensprofiel (X_{gp})". Of de waterkering wel of niet voldoet wordt bepaald van de locatie van X_{gp} ten opzichte van de legger (X_{wk}). De legger bepaalt de juridisch vastgestelde landwaartse begrenzing van de waterkering. Er kunnen nu 2 situaties worden onderscheiden (zie Figuur 6):

- Als $X_{gp} \geq X_{wk}$: Grensprofiel kan worden ingepast in het resterende duinprofiel. Er kan worden geconcludeerd dat de waterkering niet faalt bij opgegeven hydraulische belasting;
- Als $X_{gp} < X_{wk}$: Grensprofiel kan niet worden ingepast. Conclusie is dat de waterkering (mogelijk) faalt bij opgegeven hydraulische belastingen.



Figuur 6: Beoordeling waterveiligheid van zandige waterkering aan de hand van het grensprofielmodel

3 Kustprofielen

3.1 Inleiding

Een afslagberekening in XBeach kost significant meer tijd dan in Duros+. Het is daarom praktisch niet uitvoerbaar om hetzelfde aantal berekeningen uit te voeren als in fase 1 is gedaan. Om de vereiste rekentijd behapbaar te houden, is besloten om met een selectie van JarKus-raaien te werken. Dit hoofdstuk beschrijft de selectie van de kustprofielen voor deze studie. Daarnaast worden de toegepaste morfologische veranderingen toegelicht.

3.2 Representatieve jaren

In fase 1 (Wilmink & Groenewegen, 2023) is met behulp van R-t diagrammen (verandering van het afslagpunt in de tijd) voor alle JarKus-raaien in de studie de representatieve jaren berekend. Hiervoor zijn per JarKus-raaien tenminste 15 berekeningen nodig. Voor een soortgelijke berekening in XBeach is te veel rekentijd vereist. Daarom is aangenomen dat de representatieve jaren berekend in fase 1 ook representatief zijn in deze studie.

3.3 Profielselectie

Het vertrekpunt voor de selectie van de profielen is om ze beperkt, maar ook zo representatief mogelijk te houden voor de gehele Nederlandse kust. Op deze manier blijft de vereiste rekentijd behapbaar. Er is besloten om met de 26 representatieve profielen van de Nederlandse kust uit Van Santen (2021) te beginnen en de selectie uit te breiden met een aantal kustplaatsen waar mogelijk een impact verwacht wordt. Een overzicht van alle geselecteerde profielen is gegeven in Tabel 1. Een beschrijving van de geselecteerde profielen is bijgevoegd in 8Bijlage B.

3.3.1 Aanvullende profielen bij kustplaatsen

De 26 profielen zijn aangevuld met een aantal profielen bij kustplaatsen waar mogelijk een impact verwacht wordt. De kustplaatsen in kwestie en bijbehorende profielnummers zijn hieronder kort toegelicht (van Noord naar Zuid):

- Callantsoog: De duinen bij Callantsoog zijn een bekende zwakke schakel in het verleden. Derhalve gekozen om mee te nemen in deze studie. Er is gekozen voor raaien 1303 en 1320 (kustvak 7), aangezien dit de laagste duinen zijn of de duinen met de minste breedte en daarmee als zwakste schakel worden ingeschat. Zowel raaien 1303 en 1320 zijn type B profielen (zie paragraaf 3.4 voor een toelichting voor de typen profielen);
- Bergen aan Zee: Er is voor gekozen om raai 3300 en 3325 (kustvak 7) toe te voegen, aangezien deze raaien worden ingeschat als zwakste schakels bij Bergen aan Zee. Beide raaien vormen een type B profiel;
- Egmond aan zee: Hoewel de selectie van 26 representatieve profielen al een raai bij Egmond aan Zee bevat, is ervoor gekozen om daar een extra raai aan toe te voegen. Gekozen voor raai 3800 aangezien deze raai de laagste duinen bij Egmond aan Zee bevatten, en daarmee als zwakste schakel worden ingeschat. Raai 3800 (kustvak 7) is een type B profiel. Raai 3800 bij Egmond aan Zee wordt bestudeerd naast raai 3775 die al aan de selectie van Van Santen (2021) was toegevoegd;

- Kijkduin: Vergelijkbaar met voorgaande kustplaatsen is ervoor gekozen om de zwakste schakel in te schatten waar de duinen het laagst zijn, namelijk raai 10611 (kustvak 9). Dit is een type B profiel;
- Monster: Raai 11301 (Kustvak 9) is ingeschat als zijn de zwakste schakel bij Monster. Deze raai is een Type A profiel.

Tabel 1: Overzicht geselecteerde profielen langs de Nederlandse kust.

Kustvak	Raai	Scenario	jaar	Ondergrens [jr]	Opmerkingen
2 - Schiermonnikoog	340	A	2015	1000	Van Santen (2011)
	700	A	2013	1000	Van Santen (2011)
3 - Ameland	600	A	2007	300	Van Santen (2011)
	1000	A	2010	300	Van Santen (2011)
4 - Terschelling	900	A	2008	3000	Van Santen (2011)
	1700	A	2011	3000	Van Santen (2011)
5 - Vlieland	4377	A	2007	300	Van Santen (2011)
	5289	A	2009	300	Van Santen (2011)
6 - Texel	1190	A	2017	1000	Van Santen (2011)
	1853	A	2009	1000	Van Santen (2011)
7 - Noord-Holland	308	A	2020	1000	Van Santen (2011)
	928	A	2018	1000	Van Santen (2011)
	1303	B	2014	1000	Callantsoog
	1320	B	2014	1000	Callantsoog
	1483	A	2015	1000	Van Santen (2011)
	1955	A	2010	1000	Van Santen (2011)
	3300	B	2011	1000	Bergen aan Zee
	3325	B	2015	1000	Bergen aan Zee
	3775	B	2009	1000	Egmond aan Zee - Van Santen (2011)
8 - Rijnland	3800	B	2014	1000	Egmond aan Zee
	6625	B	2016	30000	Zandvoort - Van Santen (2011)
8 - Rijnland	8175	B	2010	30000	Noordwijk aan Zee - Van Santen (2011)
	9975	B	2017	10000	Scheveningen - Van Santen (2011)
9 - Delfland	10611	B	2012	10000	Kijkduin
	11196	A	2007	10000	Monster - Van Santen (2011)
	11301	A	2018	10000	Monster
	11825	A	2008	10000	Hoek van Holland - Van Santen (2011)
11 - Voorne	1002	A	2006	10000	Van Santen (2011)
12 - Goeree	1000	A	2017	1000	Van Santen (2011)
13 - Schouwen	529	A	2012	1000	Van Santen (2011)
15 - Noord-Beveland	300	A	2012	1000	Van Santen (2011)
16 - Walcheren	1530	B	2019	1000	Domburg - Van Santen (2011)
17 - Zeeuws Vlaanderen	1046	A	2007	300	Van Santen (2011)

3.4 **Morfologische Scenario's en type profielen**

In dit onderzoek wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende morfologische scenario's. Op hoofdlijnen wordt er onderscheid gemaakt tussen 'Volledig Meegroeien' (ook wel 'Meegroeien' genoemd in dit rapport) en 'Niet Meegroeien.' Een uitgebreide toelichting van deze meegroeiscenario's is gegeven in Wilmink & Groenewegen (2023).

- Volledig Meegroeien: Het profiel stijgt boven de diepwatergrens (NAP-10m) met dezelfde mate als de zeespiegelstijging. Dat betekent een profielverhoging van 1 meter bij 1 meter zeespiegelstijging;
- Niet Meegroeien. Dit betekent dat het profiel hetzelfde blijft, ongeacht de mate van zeespiegelstijging.

Naast de meegroeiscenario's wordt er onderscheid gemaakt tussen twee typen profielen. Dit onderscheid wordt gemaakt op basis van de aanname of de duinen (profiel gelegen boven NAP+3m) wel of niet kunnen meegroeien door de mogelijke aanwezigheid van bebouwing op de duinen. Voor meer informatie over de typen profielen, zie Wilmink & Groenewegen (2023).

- A profielen: kustprofielen kunnen meegroeien met de mate van zeespiegelstijging over de gehele lengte boven de diepwater grens (NAP-10m in het originele profiel);
- B profielen: Ter plaatse van bebouwde kustzones (kustplaatsen) en locaties met hoge statische duinen wordt de aangenomen dat hier het profiel boven de NAP +3m niet meegroeit met de mate van zeespiegelstijging, ongeacht het toegewezen meegroeiscenario.

4 Resultaten

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de methode, beschreven in hoofdstuk 2, toegepast op de Nederlandse zandige kust om de waterveiligheidsopgave bij een zeespiegelstijging van 3 tot 5.4 meter in kaart te brengen. De profieldoorsnedes van de waterveiligheid analyses voor de verschillende maten van zeespiegelstijging en morfologische scenario's, voor alle raaien, zijn terug te vinden in bijlage C.

In dit hoofdstuk worden de resultaten besproken die met behulp van XBeach berekend zijn. Eerder, in Fase I, is een berekening uitgevoerd voor 3 meter zeespiegelstijging met Duros+. Een vergelijkingsstudie tussen de resultaten voor 3 meter, berekend met XBeach en Duros+, is gegeven in Hoofdstuk 5.

4.2 Resultaten per regio

In deze paragraaf worden de resultaten per regio besproken. Vanwege het beperkte aantal raaien waarvoor berekeningen zijn uitgevoerd (slechts 33 in vergelijking met ruim 1500 raaien in fase 1) worden de resultaten per regio besproken. Daarbij wordt onderscheid gemaakt in 3 regio's:

1. Wadden: Bestaat uit de kustvakken 2 (Schiermonnikoog) tot en met 6 (Texel). Kustvak 1 (Rottum) is buiten beschouwing gelaten;
2. Hollandse kust: Bestaat uit de kustvakken 7 (Noord-Holland) tot en met 9 (Delfland);
3. Zuidwestelijke Delta: Bestaat uit de kustvakken 11 (Voorne) tot en met 17 (Zeeuws-Vlaanderen). De kustvakken 10 (Maasvlakte) en 14 (Neeltje Jans) zijn buiten beschouwing gelaten.

De resultaten worden beschreven naar indeling van de morfologische scenario's. Daarbij wordt per regio eerst de referentiesituatie (0 meter zeespiegelstijging) besproken. Daarna worden de resultaten voor de scenario's Meegroeien en Niet Meegroeien, voor zowel 3 als 5 meter zeespiegelstijging besproken.

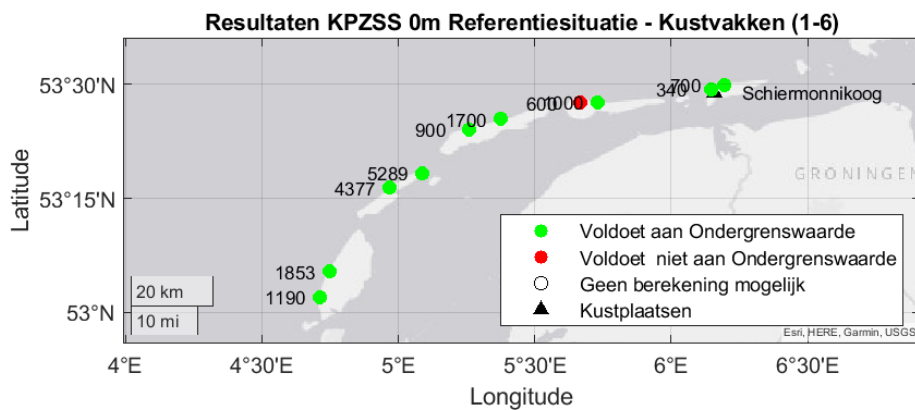
4.2.1 Wadden

4.2.1.1 Referentiesituatie (0 meter Zeespiegelstijging)

De oordelen voor de referentiesituatie (0m ZSS) zijn weergegeven in Figuur 7. Op basis van deze analyse geldt dat, behalve raai 600 op Ameland, alle berekende kustprofielen op de Waddeneilanden voldoende sterk zijn om te voldoen aan de ondergrenswaarde op doorsnedeniveau.

Op Schiermonnikoog (kustvak 2) valt te zien dat voor raai 340 het grensprofiel nog net voor de leggergrens kan worden ingepast, zie Bijlage D.1. Bij raai 700 kan het grensprofiel in de eerste duinenrij worden ingepast, terwijl de leggergrens zich pas in de tweede duinenrij bevindt (- 1600 m+RSP).

Hoewel voor raai 1000 op Ameland (kustvak 3) het grensprofiel kan worden ingepast, is raai 600 de enige geanalyseerde raai in het waddegebied dat niet voldoet aan de ondergrenswaarde. Hoewel beide duinenrijen (zie Bijlage D.1) vrijwel



Figuur 7: Overzicht van resultaten in kustvakken 1-6 voor de referentiesituatie (0 meter zeespiegelstijging)

intact blijven, en er weinige erosie plaatsvindt, leidt de relatief hoge oploop van de lange golven ertoe dat er geen grensprofiel ingepast kan worden.

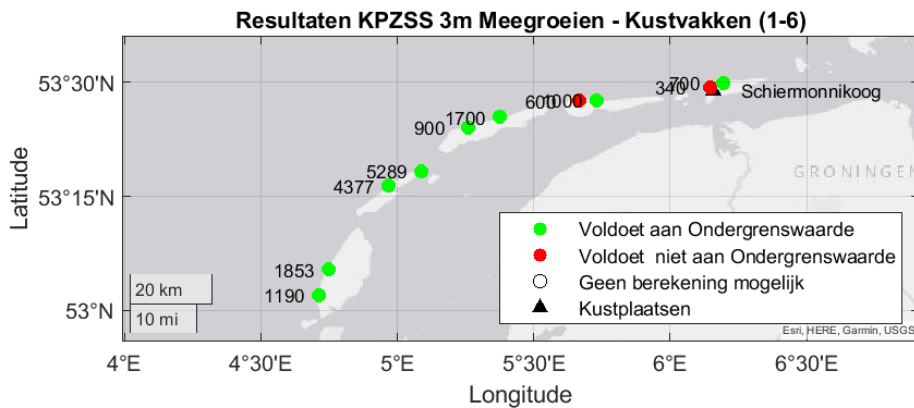
Bij beide raaien op Terschelling (kustvak 4) is er voldoende duinvolume om een grensprofiel in te passen. Echter bij raai 1700 kan dit pas gebeuren in de tweede duinenrij, als resultaat van de relatief hoge oploop van de lange golven in de eerste duinenrij (zie Bijlage D.1). Op Vlieland (kustvak 5) beschikken beide onderzochte raaien over voldoende volume om een grensprofiel in te passen. Op Texel (kustvak 6) beschikken de eerste duinenrijen over voldoende volume om een grensprofiel in te passen, hoewel de leggergrenzen zich pas in de tweede of derde duinenrij bevinden (zie Bijlage D.1).

4.2.1.2 Volledig Meegroeien

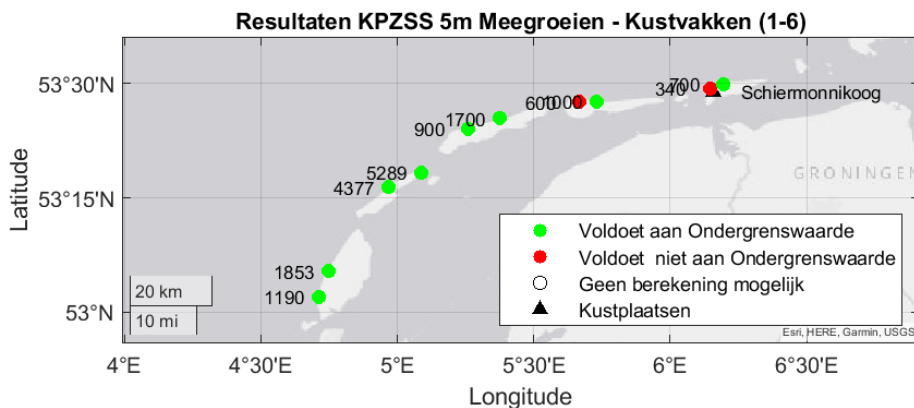
In deze paragraaf wordt gekeken naar de rekenresultaten voor het Waddengebied voor het scenario dat de duinen volledig meegroeien met de zeespiegelstijging. Zowel de situaties voor 3 als 5.4 meter zeespiegelstijging worden geanalyseerd. Kijkend naar Figuur 9, kan worden geconcludeerd dat ten opzichte van de referentiesituatie, alleen raai 340 op Schiermonnikoog niet langer aan de ondergrenswaarde voldoet. Hoewel er wel een grensprofiel kan worden ingepast, ligt het landwaartse punt van het grensprofiel (X_{gp}) voorbij de leggergrens (zie Bijlage 8D.2). Dit is niet geheel opvallend, aangezien het landwaartse punt voor de referentiesituatie van raai 340 al vlak voor de leggergrens lag.

Bij de overige raaien zijn vergelijkbare resultaten te vinden als voor de referentiesituatie. Voor raai 600 op Ameland kan geen grensprofiel worden ingepast ten gevolge van de hoge oploop van lange golven. Bij de overige raaien beschikken de duinen over voldoende volume om een grensprofiel in te kunnen passen, indien deze duinen kunnen meegroeien met de zeespiegelstijging.

Ook voor het geval van 5.4 meter zeespiegelstijging, waarbij de duinen volledig meegroeien met de zeespiegelstijging, zijn vergelijkbare resultaten te zien als voor de referentiesituatie en voor 3 meter zeespiegelstijging (volledig meegroeien). Raaien 340 en 600 in respectievelijk kustvakken 2 en 3 voldoen niet aan de ondergrenswaarden, terwijl de overige, geanalyseerde raaien in het Waddengebied dat wel doen. Opnieuw zijn hiervoor de zelfde verklaringen te vinden. Voor raai 340 kan een grensprofiel worden ingepast, maar ligt het landwaartse punt (X_{GP}) voorbij de leggergrens. Bij raai 600 kan er geen grensprofiel worden ingepast als resultaat van de hoge golfoploop van de lange golven. Dat de resultaten vergelijkbaar zijn



Figuur 9: Overzicht resultaten in kustvakken 1-6 voor 3m zeespiegelstijging voor het scenario Meegroeien.



Figuur 9: Overzicht resultaten in kustvakken 2-6 voor 5.4m zeespiegelstijging voor het scenario Meegroeien.

met de referentiesituatie is te verklaren door het feit dat met het ophogen van de kustprofielen met dezelfde mate van zeespiegelstijging een vergelijkbare situatie ontstaat als in de referentiesituatie. Enkel de offshore golfkarakteristieken zijn hoger dan in de referentiesituatie.

4.2.1.3 Niet Meegroeien

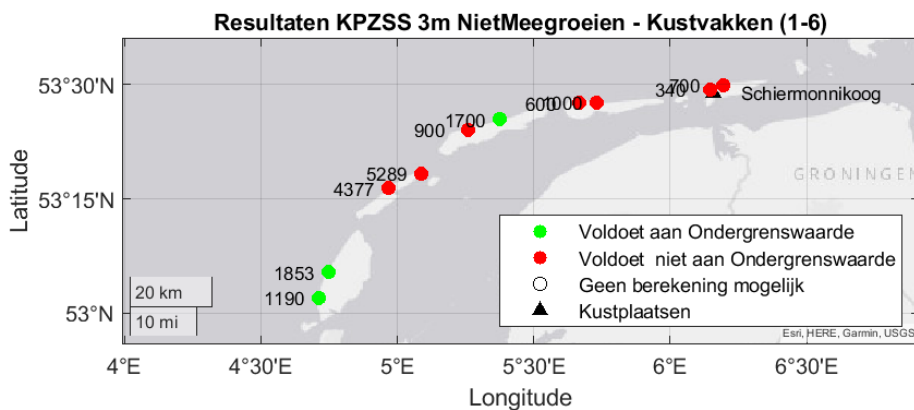
In deze paragraaf worden de resultaten geanalyseerd voor het scenario waarin de duinen niet kunnen meegroeien met de zeespiegelstijging, voor zowel 3 als 5.4 meter zeespiegelstijging. De overzichten van de resultaten zijn te vinden in Figuur 110 en Figuur 11.

Figuur 110 laat zien dat ten opzichte van de referentiesituatie en het scenario Meegroeien, een groot aantal raaien niet langer aan de ondergrenswaarde voldoet. Voor raai 340 op Schiermonnikoog kan er nog wel een grensprofiel ingepast worden, maar het landwaartse punt van het grensprofiel ligt voorbij de leggergrens (zie Bijlage D.4). Voor raai 700 (Schiermonnikoog) leidt het hoge rekenpeil ertoe dat beide duinenrijen worden weggespoeld. Dat gebeurt ook voor raai 600 op Ameland. Bij raai 100 op Ameland zullen de duinen niet compleet bezwijken, maar leidt de hoge golfoploop er toe dat er geen grensprofiel meer kan worden ingepast, zie Bijlage D.4.

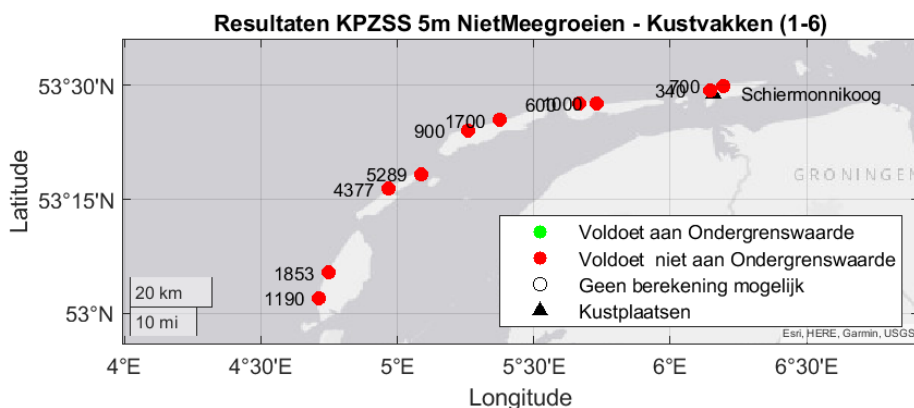
Raai 900 op Terschelling voldoet niet langer aan de ondergrenswaarde omdat er vanwege de hoge golfoploop geen grensprofiel kan worden ingepast (zie Bijlage

D.4). Raai 1700 voldoet nog wel. Bij beide bestudeerde raaien op Vlieland (kustvak 5) zullen de duinen wegspoelen als gevolg van de verhoogde hydraulische belastingen. Beide raaien op Texel (kustvak 6) voldoen nog aan de ondergrenswaarden. Bij beide raaien kan er nog een grensprofiel worden ingepast. Een kanttekening moet bij raai 1853 geplaatst worden. Kijkend naar Bijlage D.4, kan gezien worden dat het oplooppunt van de lange golven zich achter de tweede duinenrij bevindt. Echter laat het erosieprofiel zien dat er vrijwel geen erosie van de tweede duinenrij plaatsvindt, en dat de erosie gelimiteerd blijft tot de eerste duinenrij. Hoe het oplooppunt van de lange golven achter de tweede duinenrij is komen te liggen, is niet verder onderzocht in deze studie. Het grensprofiel dat in de laatste duinenrij gelegen is, is bovendien kleiner in vergelijking met andere profielen (slechts $8 \text{ m}^3/\text{m}$).

Kijkend naar de resultaten voor 5.4 meter zeespiegelstijging (Figuur 11), kan gezien worden dat geen enkel profiel nog aan de ondergrenswaarde voldoet. Raaien 340 (Schiermonnikoog), 1000 (Ameland), 900 en 1700 (beiden Terschelling), 4377 en 5289 (beiden Vlieland) en 1190 (Texel) zullen worden weggespoeld als resultaat van de hydraulische belastingen (zie de figuren in Bijlage C.5). Bij raaien 700 en 1000 op respectievelijk Schiermonnikoog en Ameland zal het rekenpeil tot zelfs boven de duintoppen uitkomen. Alleen bij raai 1853 (Texel) kan nog een grensprofiel in de laatste duinenrij worden ingepast. Echter bevindt het landwaartse punt (X_{GP}) zich voorbij de leggergrens, waardoor het profiel niet aan de ondergrenswaarde voldoet.



Figuur 110: Overzicht resultaten in kustvakken 1-6 voor 3m zeespiegelstijging voor het scenario Niet Meegroeien.



Figuur 11: Overzicht resultaten in kustvakken 1-6 voor 5.4m zeespiegelstijging voor het scenario Niet Meegroeien.

4.2.2 *Hollandse kust (kustvakken 7-9)*

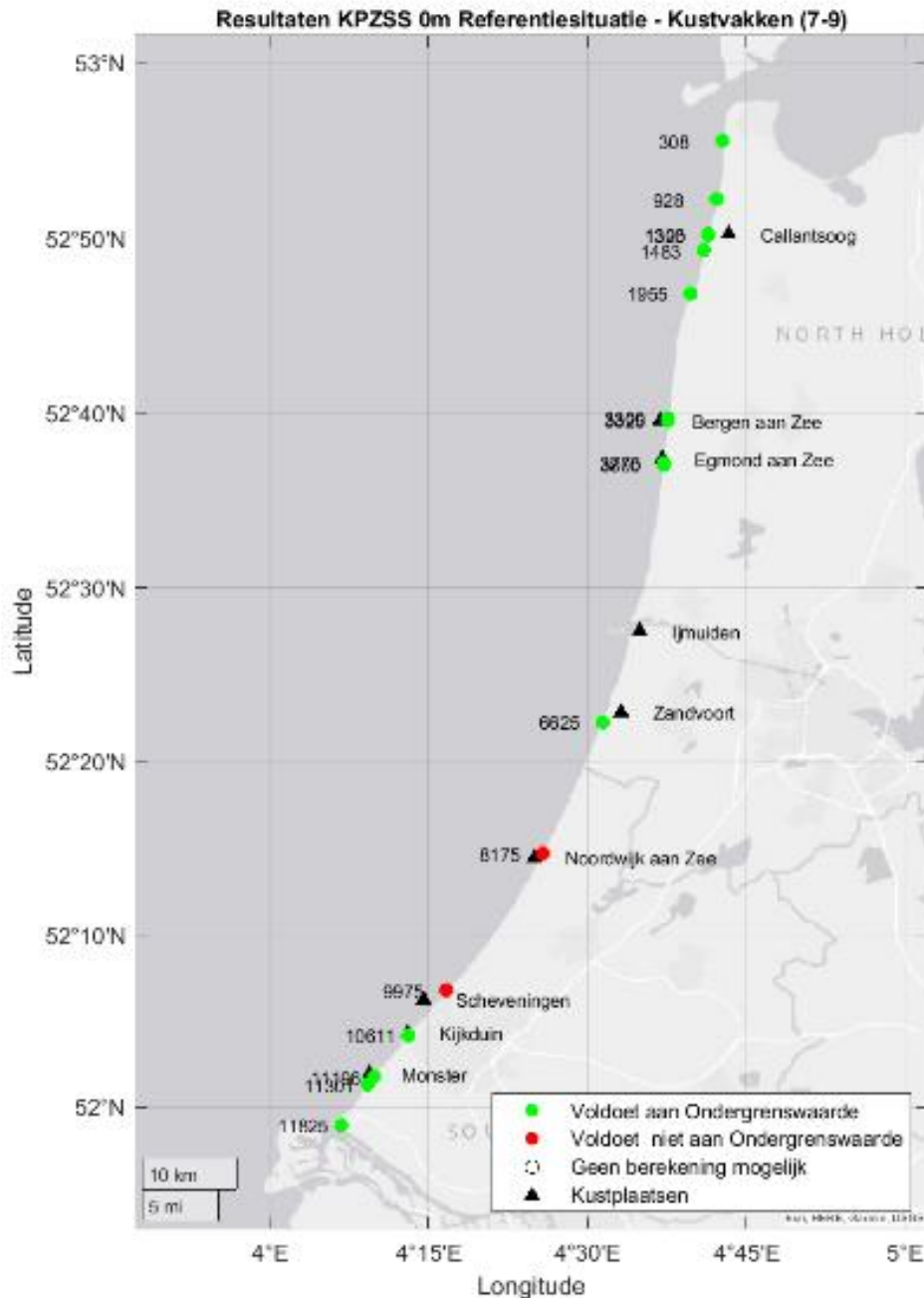
Deze paragraaf bevat de resultaten voor de analyses uitgevoerd voor de Hollandse kust (kustvakken 7 tot en met 9).

4.2.2.1 Referentiesituatie (0 meter zeespiegelstijging)

Kijkend naar Figuur 12 kan gezien worden dat voor de referentiesituatie de meeste profielen voldoen aan de ondergrenswaarde. Zeker de duinen in de profielen in het noorden van kustvak 7 (raaien 308 t/m 1955) beschikken over voldoende volume om een grensprofiel in te kunnen passen. Verder naar het zuiden, bij Bergen aan Zee (raaien 3300 en 3325), zijn verschillende resultaten te zien. De duinen van de meer noordelijke raai (3300) beschikken over voldoende zandvolume voor het grensprofiel. Echter bij de zuidelijke raai (3325) kan het grensprofiel maar nipt worden ingepast. Zie hierbij ook de figuren in Bijlage 8D.1. Dit komt mede doordat de zeewaartse duinenrij relatief laag is (minder dan NAP+10m in vergelijking met NAP+12m voor raai 3300) en dat het hoge duinmassief zich achter de leggergrens bevindt, zie Bijlagen 8D.1. Bij Egmond aan Zee (raaien 3375 en 3800) zijn vergelijkbare resultaten als bij Bergen aan Zee te zien. De hogere duinen van raai 3775 beschikken over ruim voldoende volume voor het grensprofiel, terwijl bij de lagere duinen van 3800 het grensprofiel maar nipt kan worden ingepast. Dit is terug te vinden in de bijgevoegde figuren in Bijlage 8D.1.

In kustvak 8 valt op dat raai 8175 (bij Noordwijk aan Zee) al in de referentiesituatie niet aan de ondergrenswaarde voldoet. De duinen zijn hier relatief laag als gevolg van de aanwezige kustbebouwing. Dit leidt ertoe dat zelfs zonder zeespiegelstijging al een veiligheidsopgave berekend wordt. In de meer uitgebreide wettelijke veiligheidsbeoordeling, waar deze situatie ook daadwerkelijk als hybride dijk-in-duin is beoordeeld, voldoet deze locatie wel.

In kustvak 9 valt op dat het profiel bij Scheveningen (raai 9975) in de referentiesituatie reeds niet aan de ondergrenswaarde voldoet. Raai 9975 doorkruist de boulevard bij Scheveningen, wat betekent dat de duinen in deze regio relatief laag zijn. In de meer uitgebreide wettelijke beoordeling is deze locatie wel als veilig beoordeeld. De overige profielen (bij Kijkduin, Monster en Hoek van Holland) voldoen in deze analyse aan de ondergrenswaarde.



Figuur 12: Overzicht van resultaten in kustvakken 7-9 voor 3m zeespiegelstijging de referentiesituatie (0m zeespiegelstijging).

4.2.2.2 Meegroeien

In deze paragraaf worden de resultaten voor de Hollandse kust beschreven voor het scenario waarin de duinen volledig mee kunnen groeien met de zeespiegelstijging. Dit zal worden gedaan voor zowel 3 als 5.4 meter zeespiegelstijging. Overzichten van de resultaten zijn weergegeven in Figuur 13 en Figuur 14.

Figuur 13 laat zien dat voor 3 meter zeespiegelstijging veel overeenkomsten zijn met de referentiesituatie, en dat een groot deel van de profielen nog steeds aan de ondergrenswaarde voldoet, ondanks de sterke mate van zeespiegelstijging.

De profielen in het noorden van kustvak 7 (raaien 308 tot en met 1995) zullen nog steeds aan de ondergrenswaarde voldoen. Dit kan onder andere verklaard worden doordat deze profielen A-profielen zijn, wat betekent dat de duinen volledig meegroeien met de mate van zeespiegelstijging. Bij Bergen aan Zee (3300 en 3325) en Egmond aan Zee (3375 en 3800) is te zien dat de profielen met een hoge eerste duin nog steeds voldoen, terwijl de lagere duinen niet langer aan de ondergrenswaarde voldoen. Alle 4 de profielen bij Bergen en Egmond aan Zee zijn B-profielen, wat betekent dat de duinen (alles boven NAP +3m) niet mee zullen groeien. Echter, bij de hoge duinen (profielen 3300 en 3375) is voldoende sterkte aanwezig om de sterke mate van zeespiegelstijging aan te kunnen, terwijl dat niet het geval is bij profielen 3325 en 3800.

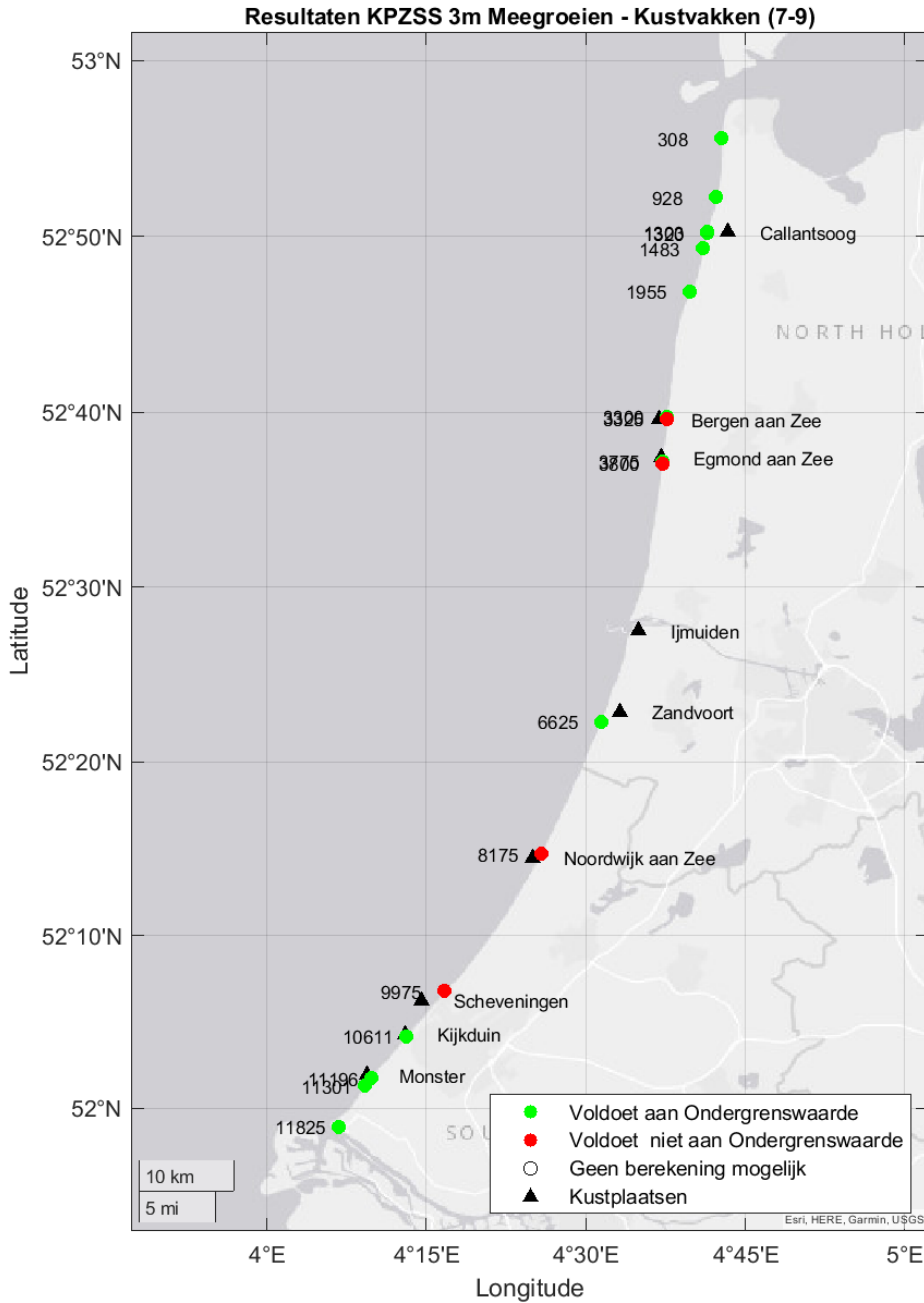
Kijkend naar Kustvak 8 kan gezien worden dat de profielen bij Zandvoort nog aan de ondergrenswaarde voldoet. Ondanks dat profiel 6625 een B-profiel betreft, is er voldoende sterkte aanwezig om 3 meter zeespiegelstijging aan te kunnen, zie Figuur 13. Kijkend naar Noordwijk aan Zee, valt op dat bij 3 meter zeespiegelstijging het rekenpeil tot aan de top van de duinen staat, zie Bijlage 8D.2. Dit betekent dat het duinprofiel bij de hydraulische belasting zal worden weggespoeld.

Kijkend naar kustvak 9 (Delfland), zijn er geen verschillen met de referentiesituatie. Raai 9975 (Scheveningen) voldeed al niet aan de ondergrenswaarde in de referentiesituatie voor deze studie. Bij 3 meter zeespiegelstijging komt het rekenpeil tot op de kruin van de duinen, zie Bijlage 8D.2. Kijkduin (raai 10611) is een B-profiel, maar beschikt over voldoende sterkte om 3 meter zeespiegelstijging aan te kunnen, zie Bijlage 8D.2. De overige profielen, bij Monster en hoek van Holland, kunnen volledig meegroeien met de mate van zeespiegelstijging, waardoor zij ook over voldoende sterkte beschikken om aan de ondergrenswaarde te blijven voldoen.

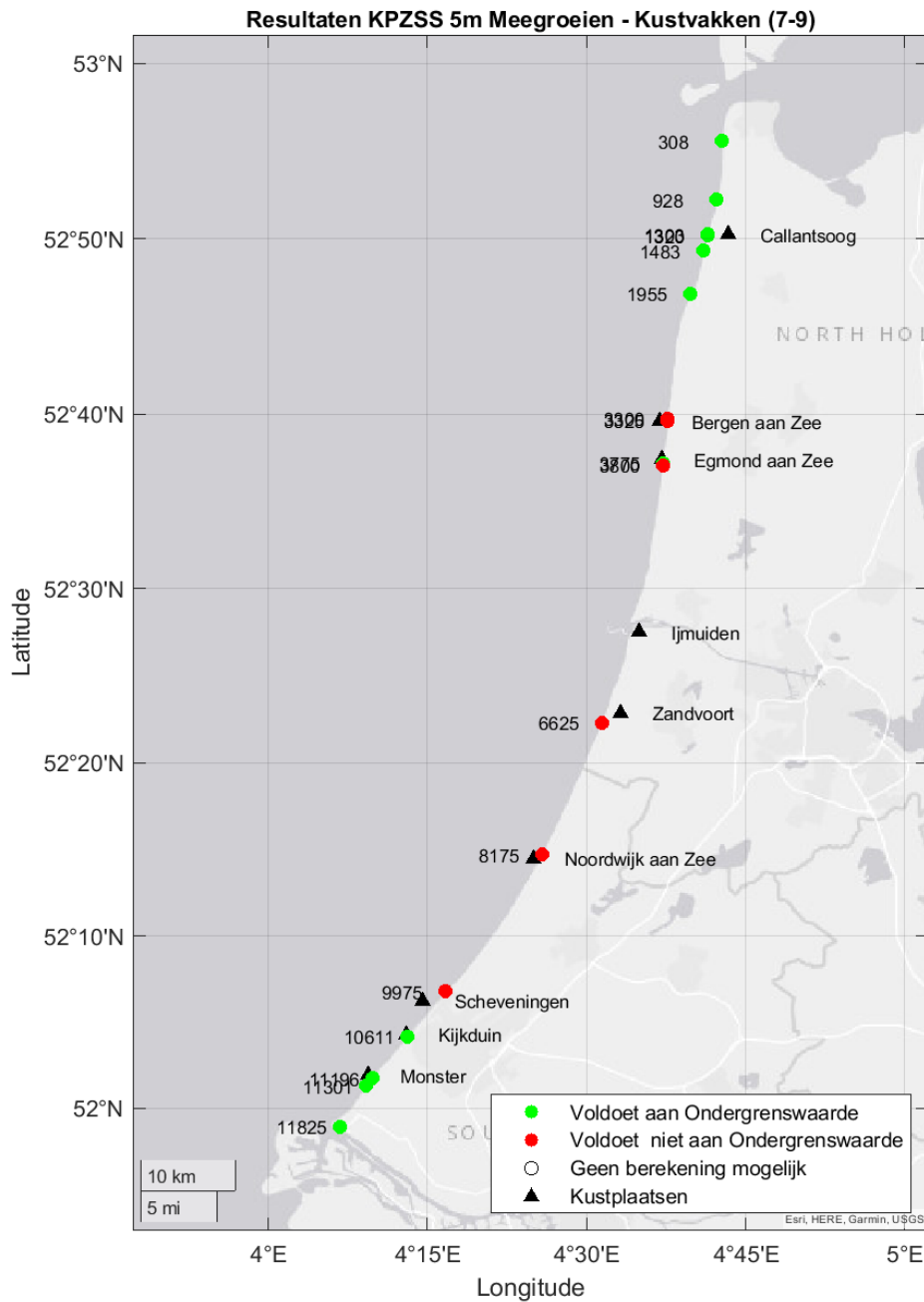
Kijkend naar de resultaten voor 5.4 meter zeespiegelstijging (Figuur 14), valt te zien dat de A profielen in het noorden van kustvak 7 (rondom Julianadorp) en in het zuiden van kustvak 9 (bij Monster en Hoek van Holland) nog steeds aan de ondergrenswaarde voldoen. Dit kan onder andere verklaard worden doordat bij deze profielen de duinen kunnen meegroeien met de zeespiegelstijging. Kijkend naar de profielen bij Bergen aan Zee (Bijlage D.3), kan worden gezien dat voor profiel 3325 het rekenpeil boven de kruin van de eerste duinenrij uitsteekt. Bij profiel 3300 kan, ondanks het feit dat een relatief groot deel van de duinen overeind blijft, geen grensprofiel meer worden ingepast (zie Bijlage 8D.3). Bij zowel profiel 3300 als 3325 bevindt zich een groot duinmassief achter Bergen aan Zee. Echter bevindt dit duinmassief zich achter de leggergrens, waardoor er geen grensprofiel zeewaarts van de leggergrens kan worden ingepast. Vergelijkbare resultaten zijn er voor Egmond aan Zee, waar voor raai 3800 het rekenpeil zich boven de kruin van de duinen bevindt (zie Bijlage 8D.3). Voor raai 3775 kan een alternatief grensprofiel worden ingepast, waardoor dit profiel, zelfs bij 5 meter zeespiegelstijging, aan de ondergrenswaarde kan blijven voldoen.

Bij Zandvoort (kustvak 8, raai 6625), zal een groot deel van het duinprofiel overeind blijven, zie Figuur 14 en Bijlage 8D.3. Desondanks kan er geen grensprofiel worden ingepast, vanwege de hoge oploop van de lange golven. Bij Noordwijk aan Zee steekt het rekenpeil nu ver boven de kruin van de duinen uit, evenals bij Scheveningen (profiel 9975). Het profiel bij Kijkduin voldoet bij 5.4 meter

zeespiegelstijging nog steeds aan de ondergrenswaarde, ondanks dat het een B-profiel is. Dit komt doordat er voldoende sterkte in het profiel aanwezig is om een alternatief grensprofiel in te passen, zie Bijlage 8D.3. De overige profielen van kustvak 9 zullen bij 5.4m zeespiegelstijging (Meegroeien) nog steeds aan de ondergrenswaarde voldoen.



Figuur 13: Overzicht resultaten in kustvakken 7-9 voor 3m zeespiegelstijging voor het scenario Meegroeien.



Figuur 14: Overzicht resultaten in kustvakken 7-9 voor 5.4m zeespiegelstijging voor het scenario Meegroeien.

4.2.2.3 Niet Meegroeien

In deze paragraaf zullen de resultaten voor de Hollandkust worden besproken voor het scenario waar de duinen niet meegroeien met de mate van zeespiegelstijging. Dit zal gedaan worden voor zowel 3 als 5.4 meter zeespiegelstijging. De overzichten van de resultaten zijn weergegeven in Figuur 15 en Figuur 16. De profieldoorsnedes zijn te vinden in Bijlagen 8D.4 en 8D.5.

Kijkend naar Figuur 15, kan gezien worden dat bij 3 meter zeespiegelstijging een grote waterveiligheidsopgave ontstaat. De 4 meest noordelijke profielen in Noord Holland (kustvak 7, profielen 308 t/m 1320) voldoen nog steeds aan de ondergrenswaarde, maar profielen 1483 en 1955 niet meer. Bij profiel 1483 zal de eerste duinenrij compleet worden weggespoeld, en lopen de lange golven dusdanig ver op de tweede duinenrij, dat er geen grensprofiel kan worden ingepast. Vergelijkbaar met profiel 1483, zal ook bij profiel 1955 de eerste duinenrij compleet wegspoelen. De tweede duinenrij bevat genoeg volume om een alternatief grensprofiel in te passen. Echter komt het landwaartse punt van dit grensprofiel achter de leggergrens te liggen, waardoor dit profiel niet aan de ondergrenswaarde voldoet. Dit is ook weergegeven in Bijlage 8D.4.

Kijkend naar de resultaten voor 3 meter zeespiegelstijging, laten de profielen van Bergen en Egmond aan Zee laten dezelfde resultaten zien als voor het scenario meegroeien. Dit betekent dat de profielen met de hogere zeewaartse duinen wel aan de ondergrenswaarde voldoen, en de profielen met de lagere zeewaartse duinen niet. Dit is te verklaren doordat de 4 profielen bij Bergen aan Zee en Egmond aan Zee allemaal B-profielen zijn, wat betekent dat de profielen boven NAP+3m niet meegroeien met de mate van zeespiegelstijging, ongeacht er wordt gekeken naar het wel of niet meegroeien van de duinen. De profielen beschikken in het scenario Niet Meegroeien dus over vergelijkbare sterkte-eigenschappen als voor het scenario Volledig Meegroeien.

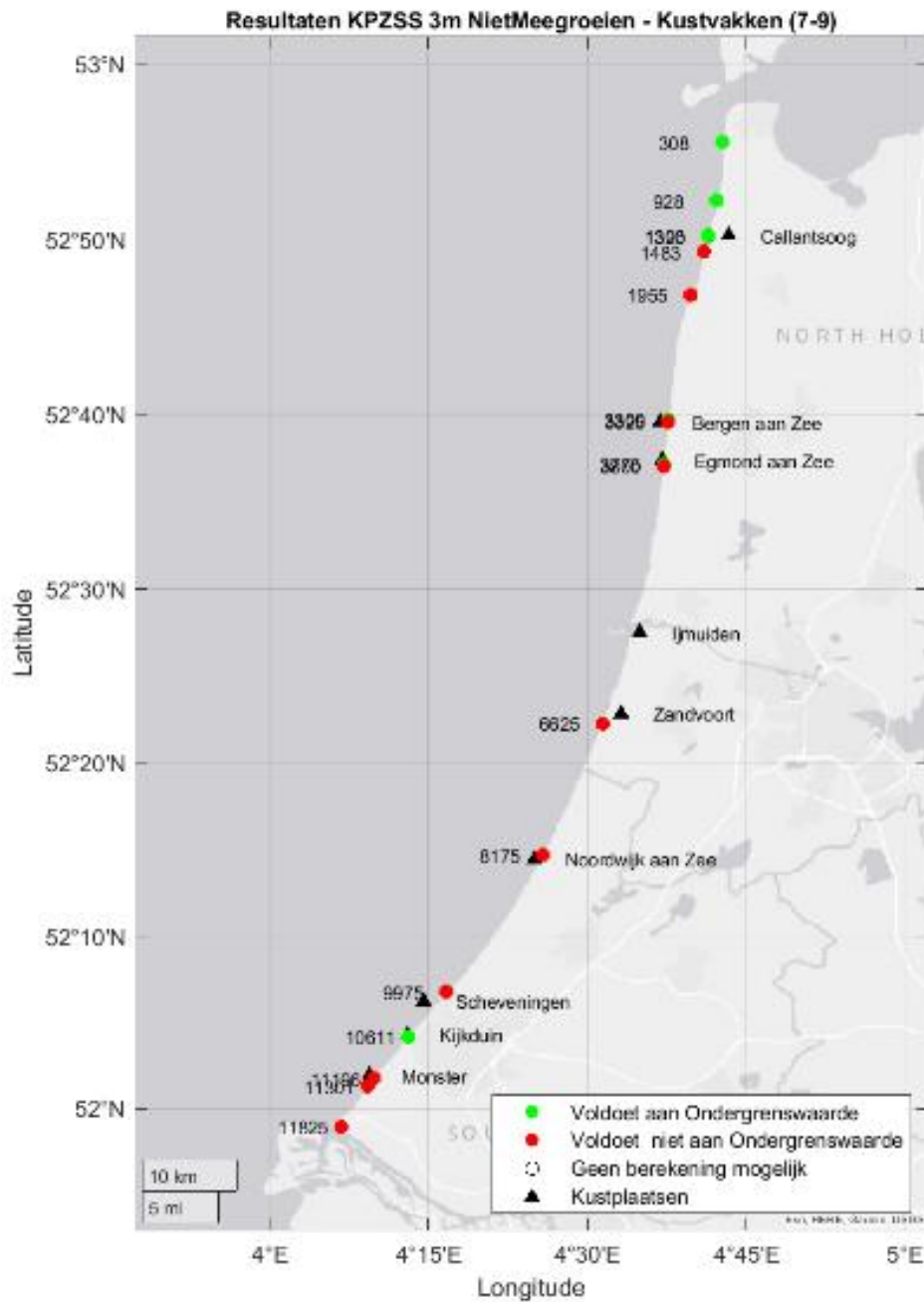
Het profiel bij Zandvoort (Kustvak 8) zal bij 3 meter zeespiegelstijging en Niet meegroeien niet langer voldoen aan de ondergrenswaarde, ondanks het feit dat de profielen over ongeveer dezelfde sterkte-eigenschappen beschikt als voor het scenario volledig meegroeien (eigenschappen van een B-profiel). Dit verschil kan mogelijk worden verklaard door het meegroeien van de vooroever. Hierdoor worden de inkomende golven gedempt, waardoor het totale erosievolume minder zal zijn voor het scenario Meegroeien dan voor Niet Meegroeien.

Kijkend naar kustvak 9, is te zien dat de profielen bij Monster (11196 en 11301) niet langer voldoen aan de ondergrenswaarde als het duinprofiel niet kan meegroeien met de zeespiegelstijging. Bij profielen Monster kan door de hoge golfoploop van de lange golven geen (alternatief) grensprofiel worden ingepast, zie Figuur 15 en de Figuren bijgevoegd in Bijlage 8D.4. Bij Hoek van Holland (profiel 11825) zal het duinprofiel volledig worden weggespoeld als gevolg van de hydraulische belastingen bij 3 meter zeespiegelstijging.

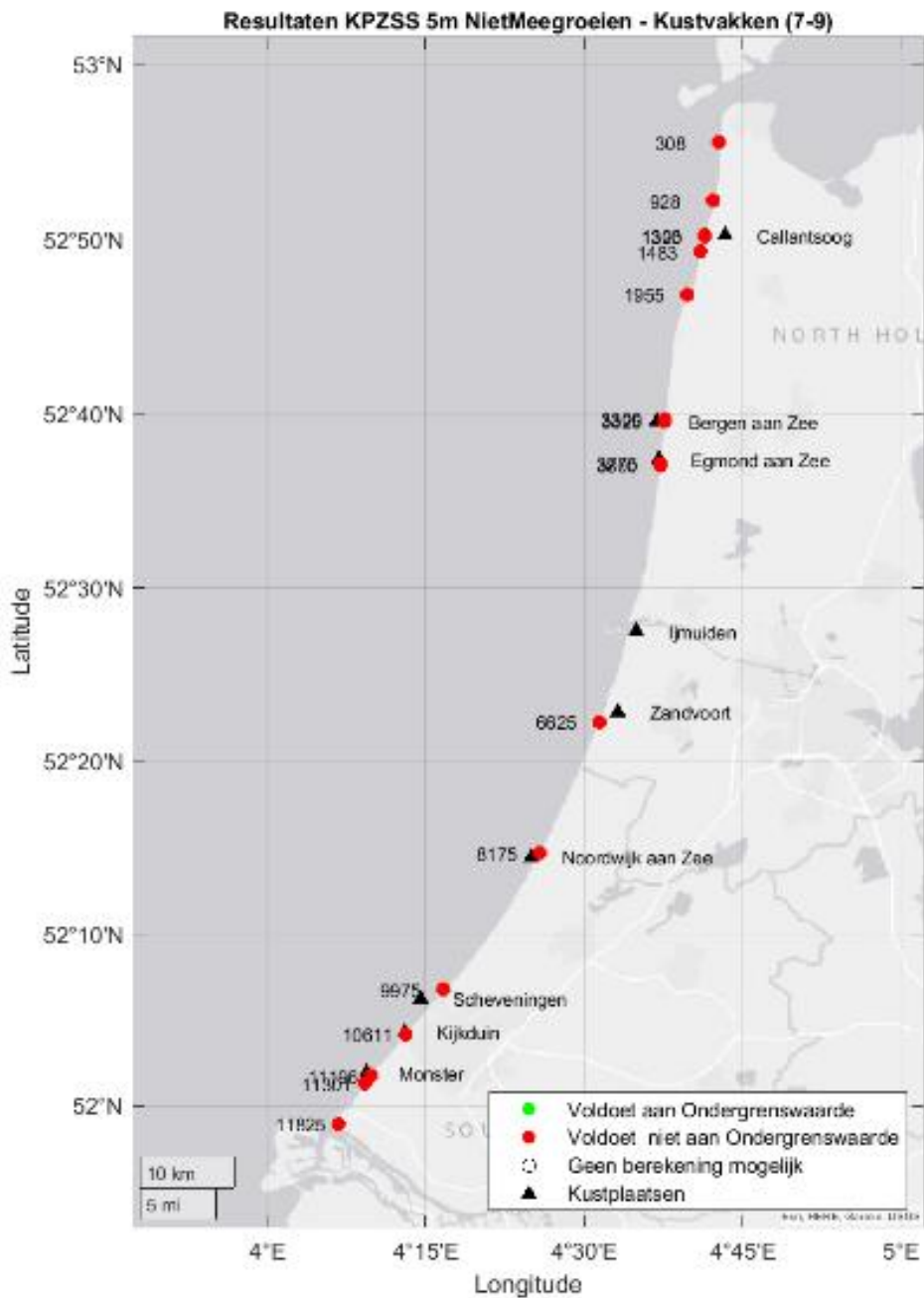
Kijkend naar de resultaten voor 5.4 meter zeespiegelstijging (Figuur 16) zal geen enkel van de geanalyseerde profielen aan de ondergrenswaarde voldoen. Bij profiel 308 zal de eerste duinenrij worden weggespoeld als gevolg van de hydraulische belastingen. De lange golven zullen vervolgens bij de tweede duinenrij dusdanig hoog oplopen dat er geen grensprofiel kan worden ingepast. Bij de overige raaien in de kop van Noord-Holland (t/m profiel 1955) zullen bij 5.4 meter zeespiegelstijging de complete profielen voor de leggergrens weg worden weggespoeld bij de opgegeven hydraulische belastingen. Bij de profielen bij Bergen en Egmond aan Zee

kan er in de landwaartse duinen nog een grensprofiel worden ingepast. Echter liggen deze duinen achter de leggergrens, waardoor deze profielen theoretisch niet voldoen.

Ook in Rijnland (kustvak 8) en Scheveningen (kustvak 9, profiel 9975) zullen de duinen bij 5.4 meter zeespiegelstijging compleet worden geroedeerd. Bij Kijkduin (raai 10611) zal een groot deel van het duinprofiel overeind blijven. Echter, door de hoge golfoploop kan er geen grensprofiel worden ingepast. Bij de overige profielen in kustvak 9, bij Monster en Hoek van Holland valt te zien dat het rekenpeil tot aan de kruin van de duinen komt, waardoor de duinprofielen volledig zullen eroderen bij hydraulische condities op ondergrenswaarde.



Figuur 155: Overzicht resultaten in kustvakken 7-9 voor 3m zeespiegelstijging voor het scenario Niet Meegroeien.



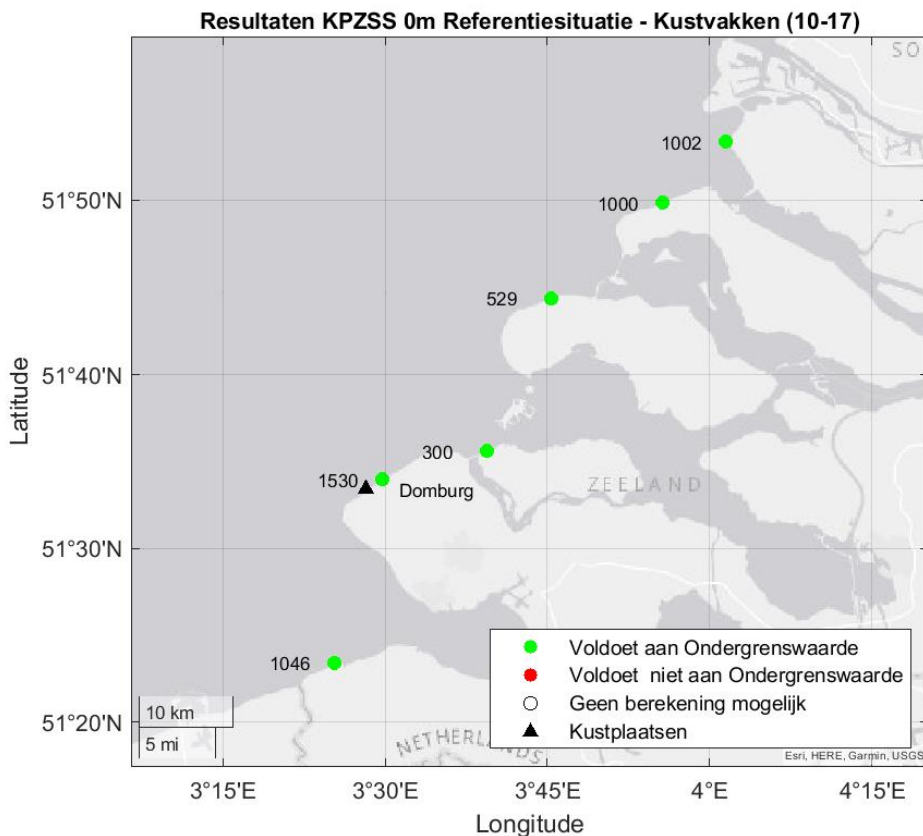
Figuur 166: Overzicht resultaten in kustvakken 7-9 voor 5.4m zeespiegelstijging voor het scenario Niet Meegroeien.

4.2.3 Zuidwestelijke Delta

In deze paragraaf wordt gekeken naar de resultaten voor de Zuidwestelijke Delta (kustvakken 11 tot en met 17). De kustvakken 10 (Maasvlakte II) en 14 (Neeltje Jans) zijn daarbij buiten beschouwing gelaten.

4.2.3.1 Referentiesituatie (0m meter zeespiegelstijging)

In deze paragraaf zullen de resultaten voor de referentiesituatie voor kustvakken 11 tot en met 17 beschreven worden. Figuur 17 laat zien dat alle profielen in deze regio in de referentiesituatie aan de ondergrenswaarde voldoen. Bij Schouwen (kustvak 13) en Noord-Beveland (kustvak 15) zal de eerste duinenrij bezwijken en het grensprofiel pas in de achterliggende duinenrij kan worden ingepast. Dit is ook weergegeven in Bijlage 8D.1.

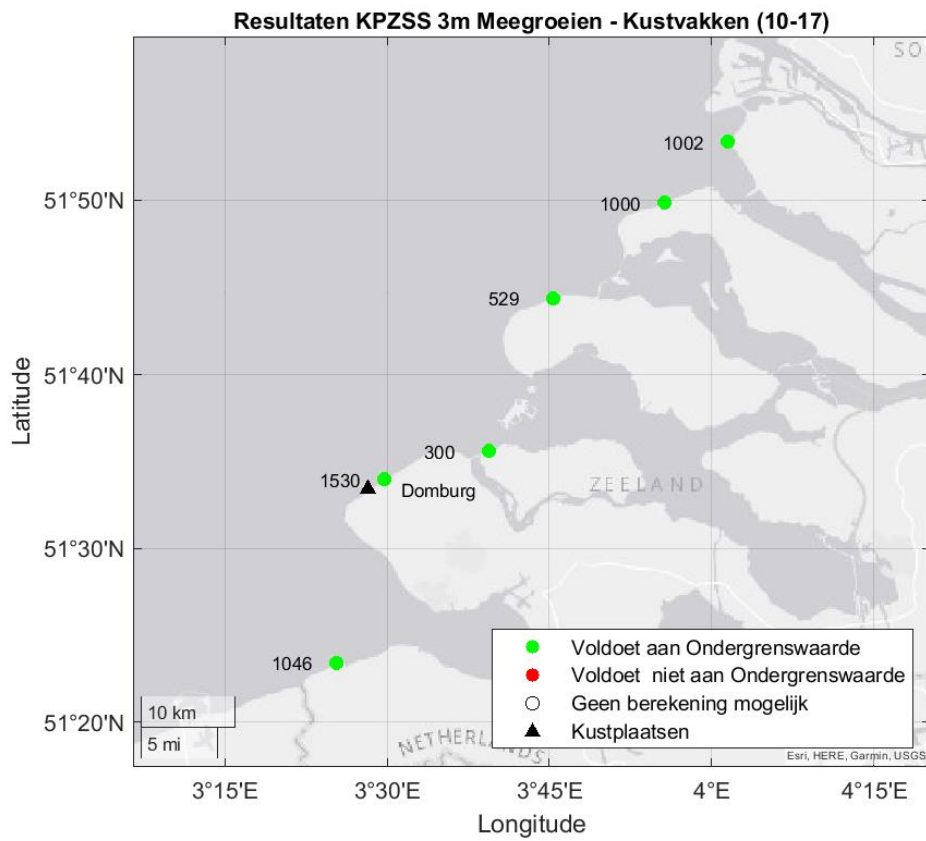


Figuur 17: Overzicht resultaten in kustvakken 10-17 voor de referentiesituatie (0m zeespiegelstijging)

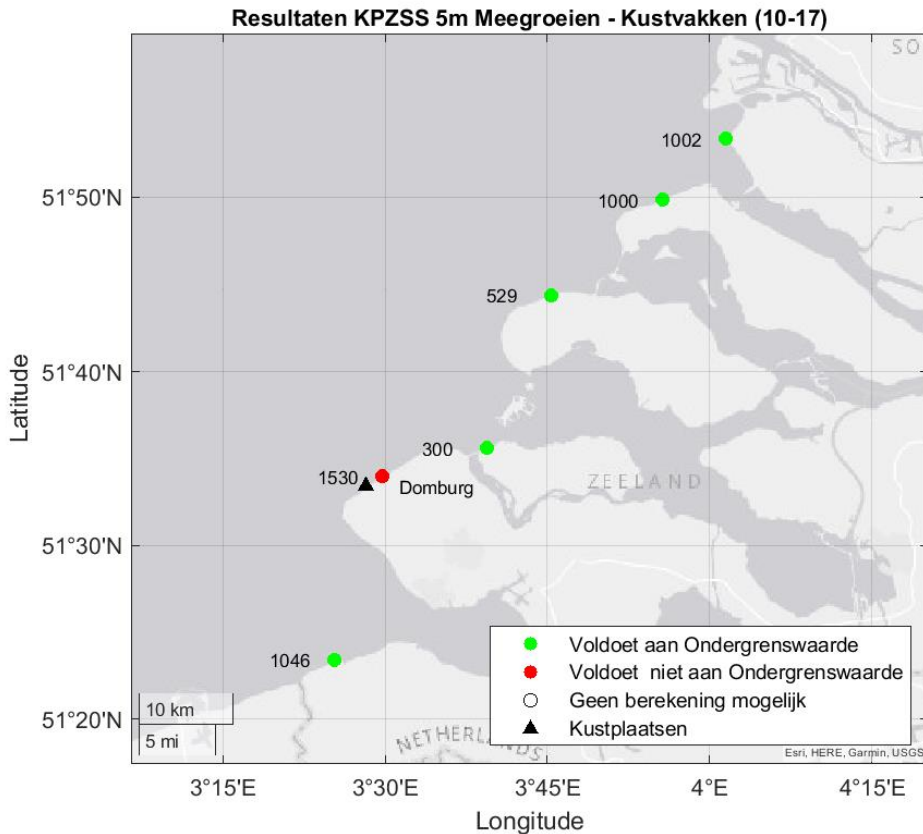
4.2.3.2 Meegroeien

In deze paragraaf worden de resultaten voor het scenario Meegroeien beschreven voor zowel 3 als 5.4 meter zeespiegelstijging. Figuur 18 en Figuur 19 laten de overzichten van de oordelen voor het scenario Meegroeien zien. Kijkend naar Figuur 18, kan worden gezien dat voor 3 meter zeespiegelstijging, als de duinprofielen kunnen meegroeien met de mate van zeespiegelstijging, alle profielen voldoen aan de ondergrenswaarde. Ook profiel 1530 in kustvak 16 (Domburg), het enige B-profiel geanalyseerd in deze regio, bevat voldoende sterkte om de mate van zeespiegelstijging aan te kunnen. De bijbehorende erosieprofielen zijn bijgevoegd in Bijlage 8D.2.

Kijkend naar de resultaten voor 5.4 meter zeespiegelstijging, kan worden opgemerkt dat alleen het profiel bij Domburg niet meer aan de ondergrens voldoet. Bij de overige profielen zorgt het meegroeien van de duinen ervoor dat er voldoende sterkte in de profielen zit om de mate van zeespiegelstijging aan te kunnen. Bij Domburg staat het rekenpeil tot na genoeg op de kruin van de duin, waardoor de waterkering compleet zal eroderen tijdens een storm.



Figuur 18: Overzicht resultaten in kustvakken 10-17 voor 3m zeespiegelstijging voor het scenario Meegroeien.



Figuur 19: Overzicht resultaten in kustvakken 10-17 voor 5.4m zeespiegelstijging voor het scenario Meegroeien.

4.2.3.3 Niet Meegroeien

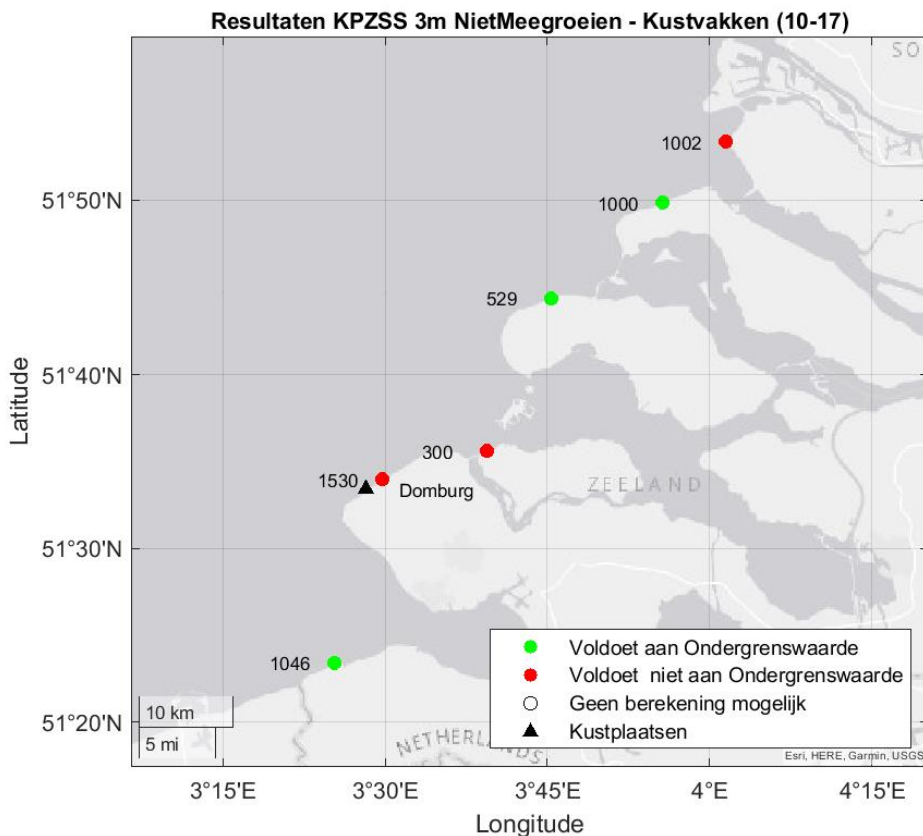
In deze paragraaf zullen de resultaten voor het scenario Niet Meegroeien besproken worden voor zowel 3 als 5.4 meter zeespiegelstijging. Kijkend naar Figuur 20 is te zien dat er grotere waterveiligheidsopgaven ontstaan dan voor het scenario Meegroeien. Vergeleken met het scenario Volledig Meegroeien voldoen de profielen 1002 (kustvak 11, Voorne), 300 (kustvak 15, Noord Beveland) en 1530 (kustvak 16 – Walcheren) niet langer aan de ondergrenswaarden.

Eerst zullen de resultaten voor 3 meter zeespiegelstijging besproken worden. De profieldoorsnede in Bijlage 8D.4 laat zien dat bij Profiel 1002 in kustvak 11, het rekenpeil vrijwel tot aan de kruin van de waterkering zal komen te staan. Dit heeft als gevolg dat de duin compleet zal worden weggespoeld bij de opgegeven hydraulische belasting. Profiel 1000 in kustvak 12 en profiel 528 in kustvak 13 beschikken over voldoende sterkte om comfortabel een grensprofiel in te kunnen passen.

Voor profiel 300 in kustvak 15 zal het rekenpeil zo hoog komen te staan dat de waterstand tot boven de eerste duinenrij uitsteekt. Bij de tweede duinenrij zal de lange golfloop dusdanig hoog zijn dat er geen grensprofiel kan worden ingepast.

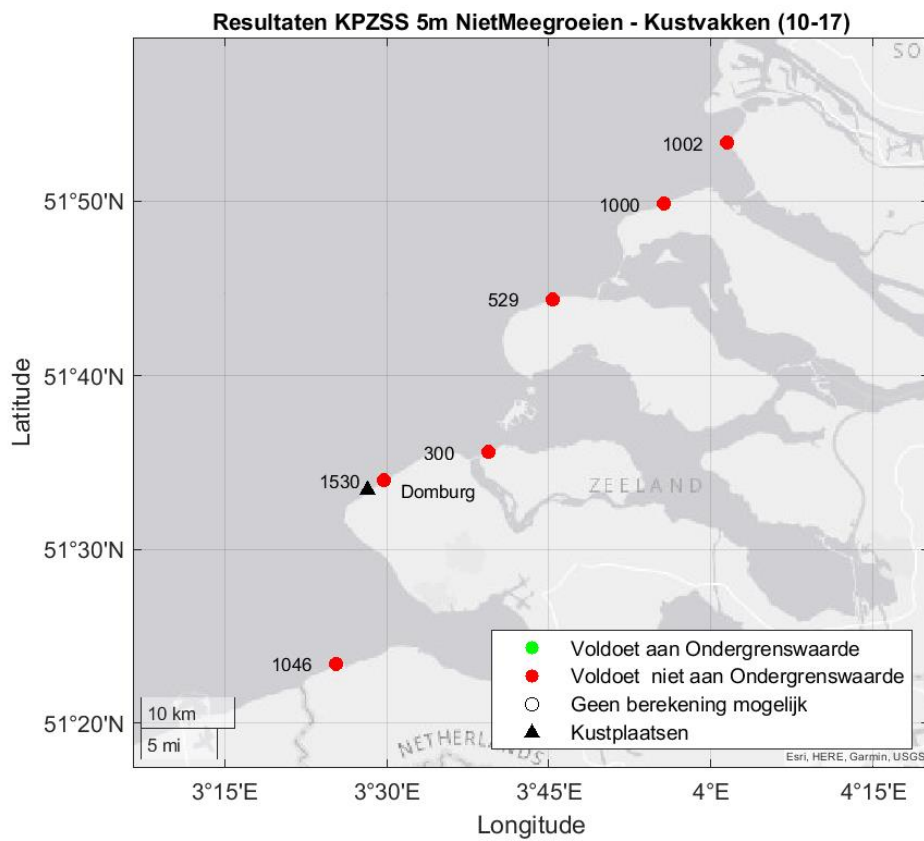
Het profiel bij Domburg (profiel 1530 in kustvak 16) voldoet niet meer. Aangezien het een B-profiel betreft, is het landwaartse profiel vergelijkbaar met de situatie waarin het profiel wel mee kan groeien. Het feit dat het profiel niet langer voldoet aan de hydraulische belasting die bij de ondergrenswaarde gelden, kan worden

verklaard doordat in het scenario meegroeien de vooroever wel meegroeit, waardoor de golfcondities meer demping zullen ondervinden. Hierdoor is de totale duinafslag groter in de situatie Niet Meegroeien, en kan het grensprofiel niet langer worden ingepast. Tenslotte beschikt het profiel 1046 in Zeeuws Vlaanderen over voldoende sterkte, waardoor ook bij 3 meter zeespiegelstijging een grensprofiel kan worden ingepast.



Figuur 20: Overzicht resultaten in kustvakken 10-17 voor 3m zeespiegelstijging voor het scenario Niet Meegroeien.

Kijkend naar de resultaten voor 5.4 meter zeespiegelstijging (Figuur 211), kan worden geconcludeerd dat geen van de geanalyseerde profielen nog aan de ondergrenswaarde voldoet. Bij alle geanalyseerde profielen in de Zuidwestelijke Delta staat het rekenpeil tegen de kruin van de duin (zie Bijlage 8D.5), waardoor deze compleet zullen eroderen als gevolg van de geldende hydraulische belasting op ondergrensniveau.



Figuur 211: Overzicht resultaten in kustvakken 10-17 voor 5.4m zeespiegelstijging voor het scenario Meegroeien.

5 Vergelijking XBeach en Duros+

5.1 Inleiding

In deze fase van het onderzoek naar de waterveiligheidsopgave van de zandige kust is gebruik gemaakt van het duinafslagmodel XBeach. Dit in tegenstelling tot de eerste fase, waar gebruik is gemaakt van Duros+. Duros+ is niet geschikt gevonden voor een veiligheidsoordeel bij een van zeespiegelstijging van meer dan 3 meter (zie ook Hoofdstuk 2). Naast de verschillen in de modelformulering zijn er verschillen waarop de hydraulische belastingen zijn verdisconteerd. Tijdens fase I zijn de hydraulische belastingen afgeleid volgens het WBI. Omdat in deze studie gebruik is gemaakt van XBeach, zijn de belastingen volgend uit het BOI gehanteerd.

Om een beeld te vormen van de verschillen en overeenkomsten tussen de resultaten uit XBeach en Duros+, is een korte vergelijkingsstudie uitgevoerd. Deze vergelijkingsstudie wordt in dit hoofdstuk gepresenteerd.

5.2 Verdiscontering hydraulische belastingen XBeach en Duros+

Voor XBeach zijn nieuwe rekenregels afgeleid waarmee de rekenwaardes van de hydraulische belastingen voor XBeach bepaald kunnen worden (Coumou, Steetzel, Velhorst, & Van der Heijden, 2023). Deze paragraaf geeft een beknopte beschrijving van de verschillen in rekenregels en de effecten op de daaropvolgende hydraulische belastingen zoals gebruikt in Duros+ en XBeach.

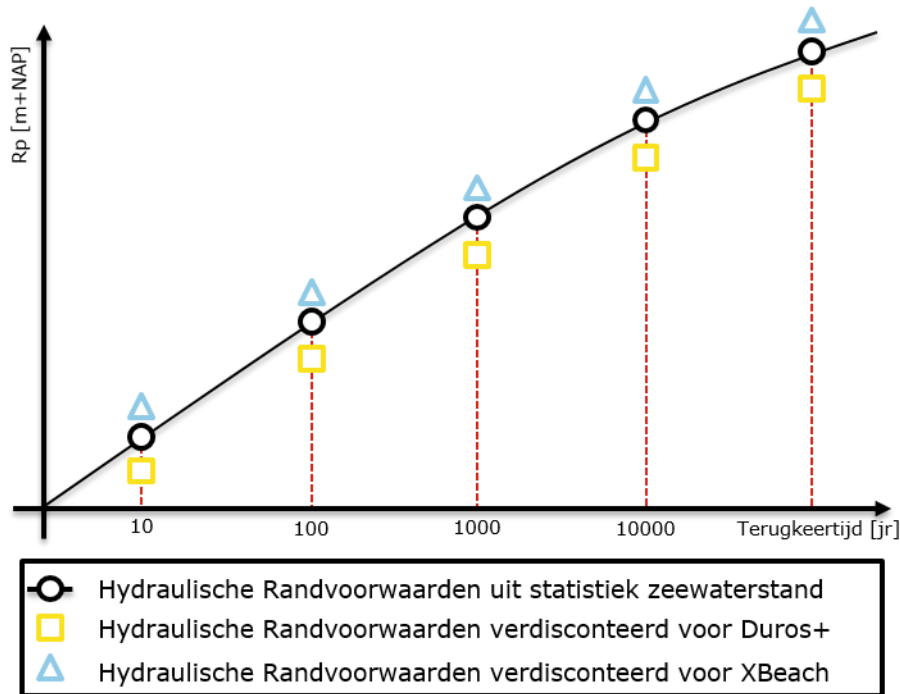
Het rekenpeil (R_p), de waterstand tijdens de piek van de storm, wordt gedefinieerd als de waterstand bij een beschouwde overschrijdingskans van de positie van het afslagpunt (Coumou, Steetzel, Velhorst, & Van der Heijden, 2023). Voor zowel XBeach als Duros+ wordt gebruik gemaakt van dezelfde statistiek voor de waterstand om de rekenwaarde van R_p te bepalen. De rekenwaardes van R_p worden vervolgens als volgt berekend:

- Voor Duros+ wordt het rekenpeil gedefinieerd als de waterstand bij een overschrijdingsfrequentie minus $1/3e$ deel van de decimeringshoogte van de waterstand;
- Voor XBeach wordt R_p gedefinieerd als de waterstand bij een overschrijdingsfrequentie plus een fractie van de decimeringshoogte bij de gegeven overschrijdingsfrequentie. Deze fractie is een functie van de beschouwde overschrijdingsfrequentie;

Zodoende zijn de rekenwaardes voor het rekenpeil in XBeach per definitie hoger van voor Duros+ (Coumou, Steetzel, Velhorst, & Van der Heijden, 2023). Dit is geïllustreerd in Figuur 22. De reden hierachter is de manier waarop de modelonzekerheden zijn meegenomen in XBeach en Duros+. In Duros+ werden de modelonzekerheden verdisconteerd door met een toeslagvolume te rekenen op de berekende afslag. In XBeach wordt aangenomen dat door een fractie van de decimeringshoogte bij de waterstand op te tellen de modelonzekerheden voldoende verdisconteerd worden (Coumou, Steetzel, Velhorst, & Van der Heijden, 2023).

Naast de waterstand zijn de golfcondities (significante golfhoogte (H_s) en piekperiode (T_p)) om de voor de mate van duinafslag tijdens een storm te berekenen. Voor zowel XBeach als Duros+ zijn de rekenwaardes voor de significante golfhoogte gedefinieerd als een functie van de waterstand en daarmee van het

rekenpeil. De golfperiode is in beide gevallen gedefinieerd als functie van de golfhoogte (Coumou, Steetzel, Velhorst, & Van der Heijden, 2023). Aangezien het rekenpeil voor XBeach hoger is dan voor Duros+, zijn daardoor de rekenwaarden voor H_s en T_p ook wat hoger (Coumou, Steetzel, Velhorst, & Van der Heijden, 2023)



Figuur 22: Illustratie van de verschillen waarop het rekenpeil wordt verdisconteerd in het BOI en het WBI.

Opgemerkt wordt dat XBeach een stormverloop doorrekent, terwijl Duros+ het afslagprofiel van een storm bepaalt op basis van enkel de condities tijdens de piek van de storm. Om het stormverloop te bepalen zijn voor XBeach extra parameters nodig. Deze parameters zijn hieronder beknopt beschreven.

- Voor het verloop van de waterstand en het rekenpeil is extra informatie nodig over de getijden (amplitude). Daarnaast zijn aannames gedaan over de duur van de storm en het faseverschil tussen de piek van de stormopzet en de piek van het astronomisch getij;
- Voor het stormverloop van de golfcondities zijn aannames gedaan over de groei van de significante golfhoogte en piekperiode gedurende de duur van de storm.

Als laatste dienen er nog enkele verschillen opgemerkt te worden in de gehanteerde korrelgroottes in Duros+ en XBeach. In XBeach is de rekenwaarde voor de korrelgrootte gelijk aan de D_{50} . In Duros+ werd de rekenwaarde voor de korrelgrootte bepaald aan de hand van zowel de lokale gemiddelde D_{50} als de standaarddeviatie van de lokale D_{50} . Dit zorgt ervoor dat de korrelgrootte in XBeach groter is, dan voor Duros+ (Coumou, Steetzel, Velhorst, & Van der Heijden, 2023).

Naast de algemene verdiscontering van de hydraulische belastingen verschilt de manier waarop de belastingen van trajectniveau naar doorsnedeniveau worden vertaald tussen het BOI en het WBI. In het BOI wordt enkel een lengte-effect factor toegepast (factor gelijk aan 1.2), terwijl er in het WBI lengte-effect en een faalkansvergroting worden toegepast.

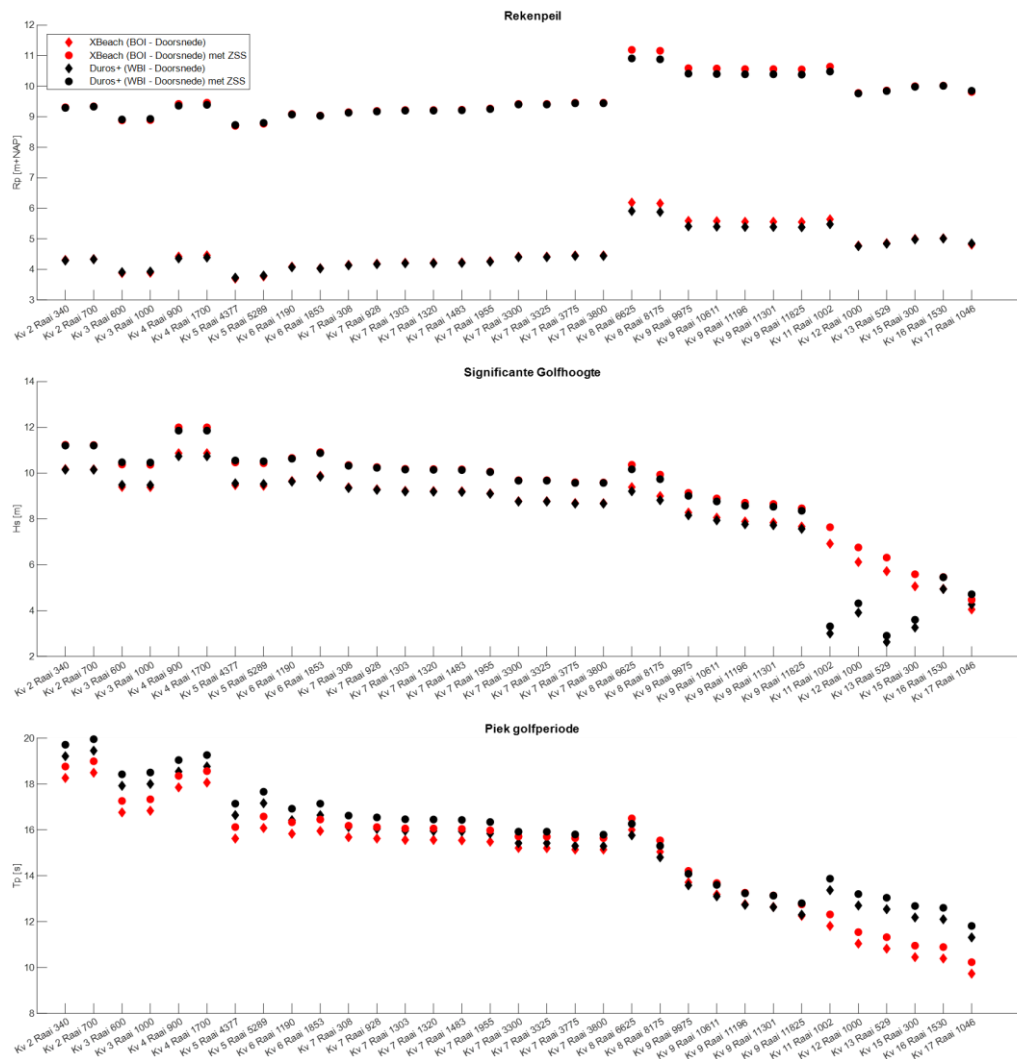
5.3 Vergelijking gehanteerde hydraulische belastingen

In deze paragraaf wordt een kwantitatieve vergelijking gemaakt tussen de hydraulische belasting op ondergrenswaarde voor de geselecteerde kustprofielen in dit onderzoek. Er wordt hierbij gekeken naar de hydraulische belasting op doorsnedeniveau zoals gebruikt in XBeach (berekend volgens BOI) en Duros+ (berekend volgens WBI en gebruikt in fase I). De verschillen tussen de rekenwaarden voor hydraulische belastingen in het BOI en WBI zijn weergegeven in Figuur 23. De gepresenteerde hydraulische belasting zijn ook terug te vinden in Bijlage A.3.

Kijkend naar de rekenwaarden voor het rekenpeil (Figuur 233-boven en Bijlage A.3), kan worden geconcludeerd dat de verschillen tussen het BOI en WBI klein zijn, in de orde van enkele centimeters. De rekenwaarden zijn over het algemeen hoger voor het BOI dan voor het WBI. De kwantitatieve verschillen zijn iets groter voor de Rijnland (8) en Delfland (9), omdat daar de geldende ondergrens hoger is dan voor de andere kustvakken (zie Tabel 1). De verschillen in het rekenpeil zijn conform de manier waarop de rekenwaarden voor het rekenpeil zijn verdisconteerd (zie paragraaf 5.2).

Kijkend naar de rekenwaarden voor de significante golfhoogte (Figuur 233-midden en Bijlage A.3), kan worden gezien dat de rekenwaarden voor het BOI hoger zijn dan door het WBI. Dit is conform de verschillen in verdiscontering van de hydraulische belasting. De verschillen tussen de rekenwaarden van de significante golfhoogte liggen in de orde van enkele centimeters, en zijn maximaal 15 centimeter (zie Figuur 23) in de Delfland kust.

Als laatste worden de rekenwaarden voor piekperiode vergeleken. Opvallend is dat de rekenwaardes van de piekperiodes in het WBI hoger zijn dan voor het BOI, in tegenstelling tot wat er in Coumou et al. (2023) beschreven staat. Verder laat Figuur 233 (midden en onder) zien dat voor de kusttraaien 11 t/m 17 (Voorne t/m Zeeuws Vlaanderen) grote verschillen tussen de rekenwaarden voor significante golfhoogte en piekperiode zijn. Deze verschillen komen doordat in het WBI de golfcondities zijn aangepast zijn om zo rekening te houden met het hydrodynamische effecten van zandbanken op de golfcondities. Het empirische karakter van Duros+ leidt ertoe dat deze hydrodynamische effecten niet worden doorgerekend. Aangezien XBeach deze effecten wel doorrekent, is het binnen het



Figuur 23: Vergelijking gehanteerde Hydraulische randvoorwaarden in fase I (randvoorwaarden afgeleid m.b.v. WBI, berekeningen uitgevoerd met Duros+) en tijdens dit onderzoek (fase II, randvoorwaarden afgeleid volgens BOI, berekeningen uitgevoerd met XBeach). Rand

BOI niet langer nodig om de offshore golfcondities aan te passen. Algemene verschillen afslag XBeach en Duros+

In deze paragraaf worden de verschillen tussen de afslagpunten en erosievolumes (X_{af} en R in respectievelijk XBeach en Duros+) zoals berekend met XBeach en Duros+ vergeleken. Andere parameters, zoals toeslagvolume, ophooppunten van de lange golven, toeslagvolumes en grensprofielen worden niet besproken omdat deze parameters niet consistent zijn tussen XBeach en Duros+. Figuur 244 laat de verschillen tussen afslagpunten en afslagvolumes voor de referentiesituatie (0 meter zeespiegelstijging) zien. De figuren voor 3 en 5 meter zeespiegelstijging zijn terug te vinden in 8Bijlage E.

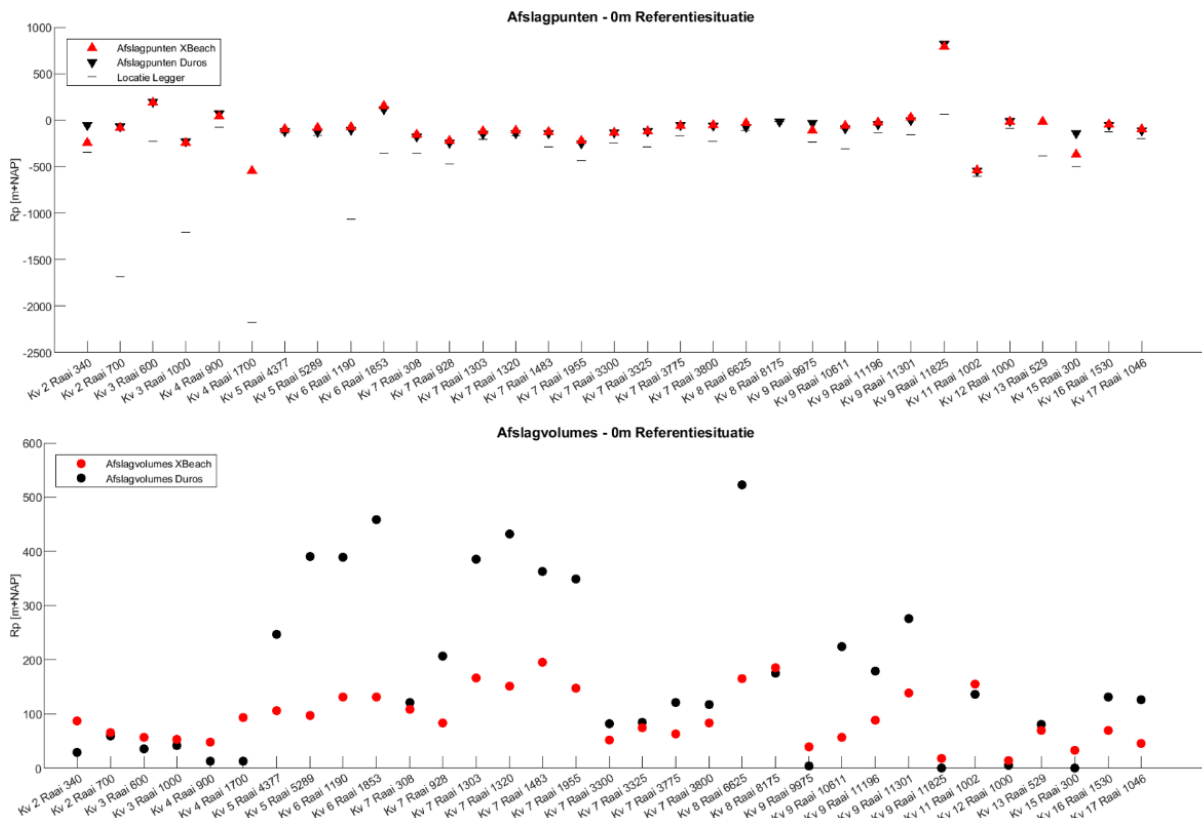
Voor de geanalyseerde profielen in het Waddengebied (kustvakken 2-6) zijn verschillende resultaten waar te nemen. Op Schiermonnikoog, Ameland en Terschelling geldt dat over het algemeen dat de afslagpunten berekend door Duros+ verder zeewaarts liggen dan voor XBeach. Dit resulteert dan ook in hogere afslagvolumes voor XBeach (zie Figuur 244). Voor Profiel 340 op Schiermonnikoog is

het verschil groter dan voor andere profielen, omdat de eerste duinenrij wel bezwijkt in XBeach, maar niet in Duros+. Op de eilanden Vlieland en Texel is het tegenovergestelde effect waarneembaar. De afslagpunten in XBeach liggen verder zeewaarts, resulterend in lagere erosievolumes. De verschillen in afslagpunten en erosievolumes op de Waddeneilanden zijn consistent met de bevindingen in (Coumou, Steetzel, Velhorst, & Van der Heijden, 2023).

Voor de kustvakken langs de Hollandkust (7-9) is voornamelijk minder afslag berekend met XBeach dan met Duros+. De afslagpunten liggen verder zeewaarts en de erosievolumes zijn lager voor XBeach. Uitzondering hier zijn de profielen bij Noordwijk (8175) en Scheveningen (9975). De gevonden verschillen zijn consequente met de conclusies getrokken in (Coumou, Steetzel, Velhorst, & Van der Heijden, 2023).

De lage duinen bij Noordwijk inclusief aanwezige boulevard maken een definitieve vergelijking tussen XBeach en Duros+ voor dit profiel moeilijk. Voor Scheveningen geldt dat er in Wilminck & Groenewegen (2023) een ander profiel is gebruikt, waar de bebouwing in de kustzone niet is weggehaald. Dit maakt een definitieve conclusie rondom de verschillen tussen XBeach en Duros+ rondom dit profiel onmogelijk.

Langs de Zuidwestelijke Delta (kustvakken 11-17, met uitzondering van 14) tonen de resultaten een wisselend beeld van meer of minder afslag met XBeach. Het profiel in Voorne (kustvak 11) en Noord-Beveland (kustvak 15) laten meer erosie met XBeach zien dan met Duros+. De profielen bij Goeree (12), Schouwen (13),



Figuur 244: Verschillen in afslagresultaten voor 0m zeespiegelstijging tussen XBeach en Duros+. Boven laat de verschillen tussen afslagpunten zien, onder de verschillen tussen erosievolumes.

Walcheren (16) en Zeeuws-Vlaanderen (17) laten een gunstiger beeld zien voor XBeach dan voor Duros+.

Opvallend in de Zuidwestelijke Delta is het verschil in erosie voor profiel 300 in kustvak 15 (zie Figuur 244). De berekening in XBeach laat zien dat de eerste en tweede duinenrij doorbreken bij hydraulische belasting op ondergrenswaarde. De Duros+ berekeningen in laten zien dat de eerste duinenrij niet bezwijkt (Wilmink & Groenewegen, 2023).

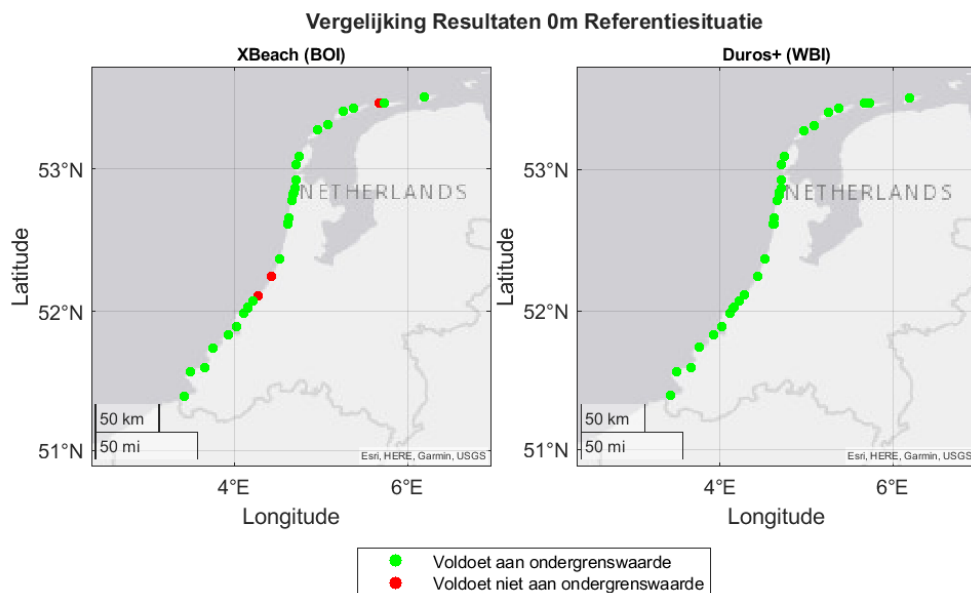
5.4 Verschillen in veiligheidsopgaven

In deze paragraaf worden de veiligheidsresultaten volgend uit XBeach en Duros+ met elkaar vergeleken. De verschillen tussen XBeach en Duros+ worden per morfologisch scenario beschreven. Er wordt enkel gekeken naar de referentiesituatie (0m zeespiegelstijging) en naar 3 meter zeespiegelstijging, omdat Duros+ niet gebruikt is voor berekeningen voor 5 meter zeespiegelstijging.

5.4.1 Referentiesituatie (0m zeespiegelstijging)

Kijkend naar Figuur 255, kan worden geconcludeerd dat op grote lijnen de resultaten tussen XBeach en Duros+ vergelijkbaar zijn. De enige verschillen zijn te vinden bij profiel Ameland (kustvak 3, profiel 600), Noordwijk aan Zee (kustvak 6, profiel 8175) en Scheveningen (kustvak 9 - profiel 9975). Waar deze profielen volgens Duros+ nog voldoen aan de ondergrenswaarde, geeft XBeach aan dat deze profielen niet aan de ondergrenswaarde voldoen.

Voor profiel 600 op Ameland valt het verschil te verklaren doordat het berekende afslagpunt in Duros+ verder zeewaarts ligt (zie Figuur 244). Dit heeft als resultaat dat het grensprofiel wel ingepast kan worden in het afslagprofiel van Duros+, maar niet voor het profiel in XBeach. De berekeningen in XBeach laten zien dat de toppen van de duinen bij Noordwijk en Scheveningen al bezwijken in de referentiesituatie.



Figuur 255: Vergelijking rekenresultaten voor de referentiesituatie (0m Zeespiegelstijging). Links de resultaten zoals berekend met XBeach. Rechts de resultaten zoals berekend met Duros+.

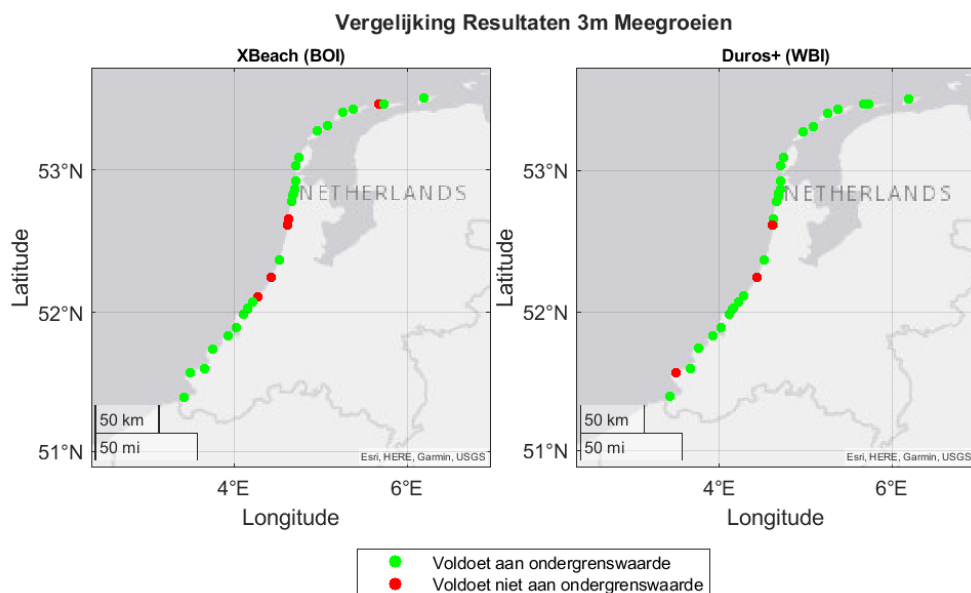
Hierdoor ligt het berekende oplooppunt van de lange golven ver landinwaarts en kan er geen grensprofiel worden ingepast. De berekeningen in Duros+ resulteren in een afslagpunt dat verder zeewaarts ligt, waardoor het grensprofiel wel kan worden ingepast. Een kanttekening dient geplaatst te worden bij de resultaten van Scheveningen. Voor dit onderzoek is het profiel van Scheveningen aangepast (zie Bijlage C) in verband met de bebouwing dat in het verlengde profiel was opgenomen. Voor de berekeningen in Duros+ zijn deze stappen niet uitgevoerd, waardoor voor de gebruikte profielen die in XBeach en Duros+ verschillen.

5.4.2 Meegroeien (3m zeespiegelstijging)

Figuur 266 laat zien dat XBeach en Duros+ vergelijkbare resultaten geeft voor 3 meter zeespiegelstijging waarin de profielen kunnen meegroeien met de mate van zeespiegelstijging. Er zijn verschillen te vinden bij de profielen van Ameland en Scheveningen die vergelijkbaar zijn bij 0m zeespiegelstijging.

Daarnaast zijn er verschillen te zien op Schiermonnikoog. Zo voldoet profiel 340 (kustvak 2) volgens Duros+ aan de ondergrenswaarde, waar dat niet het geval is voor XBeach. 8Bijlage E laat zien dat het afslagpunt in Duros+ veel verder zeewaarts ligt dan voor XBeach. Volgens de berekeningen in XBeach (Zie Bijlage 8D.2) breekt de eerste duinenrij, waardoor het afslagpunt, natte punt, en daarmee het grensprofiel pas in de tweede duinenrij worden ingepast. Het landwaartse punt van het grensprofiel (X_{gp}) komt daarmee achter de leggergrens te liggen. Bij Duros+ ligt het afslagpunt verder zeewaarts, waardoor het grensprofiel comfortabel voor de leggergrens kan worden ingepast.

In Noord-Holland (kustvak 7) zijn verschillen waarneembaar bij Bergen aan Zee (profielen 3300 en 3325) en Egmond aan Zee (profielen 3375 en 3800). Duros+ geeft aan dat de profielen 3300, 3325 en 3800 voldoen aan de ondergrenswaarde en dat enkel profiel 3800 bij Egmond aan Zee niet aan de ondergrenswaarde voldoet. De resultaten in XBeach geven aan dat ook profiel 3325 niet aan de



Figuur 266: Vergelijking rekenresultaten voor 3m Zeespiegelstijging in de situatie waarin het kustprofiel meegroeit met de mate van zeespiegelstijging. Links de resultaten zoals berekend met XBeach. Rechts de resultaten zoals berekend met Duros+.

ondergrenswaarde voldoet (zie Figuur 13). Dit verschil is het resultaat van het feit dat het afslagpunt in Duros+ verder zeewaarts ligt vergeleken met XBeach, en daarom het grensprofiel voor de leggergrens kan worden ingepast.

De resultaten van zowel XBeach als Duros+ laten bij Noordwijk (kustvak 8 - profiel 8175) zien dat dit profiel bij 3m zeespiegelstijging niet aan de ondergrenswaarde voldoet. Dit is niet verassend gegeven het feit dat het rekenpeil in deze situatie dicht tegen de kruin van de duin staat, wat er toe leidt dat voor beide afslagmodellen de duinen zullen bezwijken.

Als laatste zijn er verschillen te zien bij Domburg (kustvak 16, profiel 1530). Het afslagpunt ligt verder zeewaarts in Duros+. Dit betekent dat het grensprofiel niet zeewaarts van de leggergrens kan worden ingepast in Duros+. Dit resultaat is consequent met de bevindingen in Paragraaf 0, waar beschreven staat dat dit profiel in Duros+ meer erosie vertoont dan XBeach.

5.4.3 Niet meegroeien (3m zeespiegelstijging)

Als laatste zal er worden gekeken naar de resultaten in XBeach en Duros+ voor de situatie waarin de kustprofielen niet meegroeien met de mate van zeespiegelstijging. Figuur 34 laat zien dat volgens beide afslagmodellen de waterveiligheidsopgave in deze situatie groot zal zijn. Echter zijn er in de verschillende regio's een aantal verschillen op te merken.

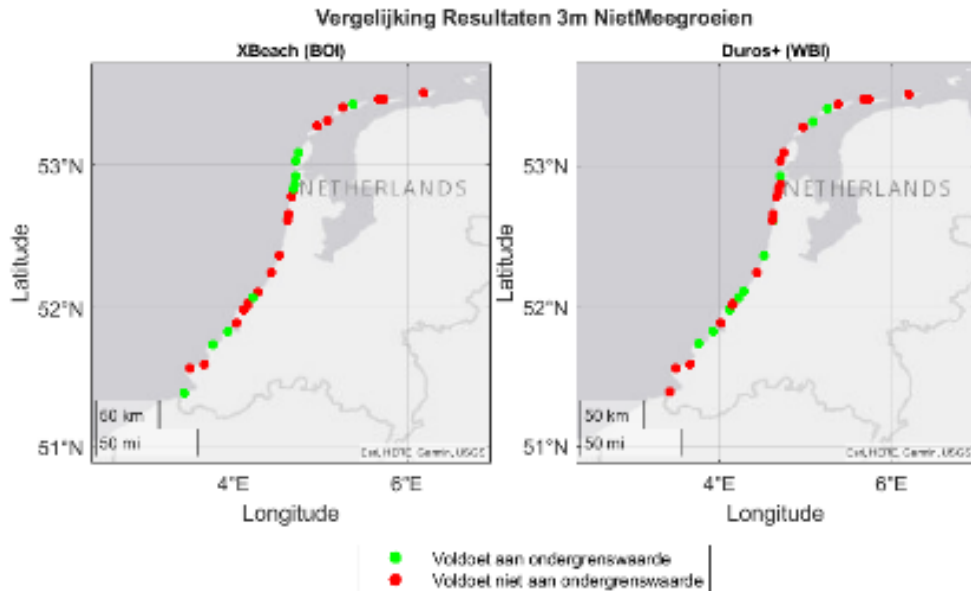
De resultaten op de Waddeneilanden Schiermonnikoog t/m Vlieland (kustvakken 2 t/m 5) zijn gunstiger in Duros+ dan in XBeach. Met name profiel 340 op Schiermonnikoog en profiel 5289 op Vlieland voldoen volgens Duros+ nog aan de ondergrenswaarde, waar dit niet het geval is voor XBeach. Voor Schiermonnikoog is dat te verklaren door het feit dat ook in de referentiesituatie XBeach meer erosie laat zien dan Duros+, zie paragraaf 0. Bij de resultaten van profiel 5289 van Duros+ moet een kanttekening worden geplaatst. Hoewel Figuur 2727 laat zien dat dit profiel volgens Duros+ aan de ondergrenswaarde voldoet, laat 8Bijlage E zien dat er geen waarden voor het afslagpunt of afslagvolume berekend zijn door Duros+. In fase 1 is dit al toegewezen aan het empirische karakter van Duros+. Het model is slecht toepasbaar in regio's met brede duingebieden. Voor vrijwel de gehele kust van Vlieland zullen in dit scenario veiligheidsopgaven ontstaan (Wilmink & Groenewegen, 2023).

Daarnaast zijn er verschillen te zien langs de kust van Texel. De berekeningen in XBeach geven gunstigere resultaten dan Duros+. Duros+ geeft zelfs geen waarden voor het afslagpunt en erosievolume (8Bijlage E). De verschillen kunnen op verschillende manieren verklaard worden:

- XBeach resulteert in afslagpunten die verder zeewaarts liggen ten opzichte van Duros+, zie paragraaf 0;
- De waterkeringen op Texel bestaan veelal uit meerdere, achter elkaar geplaatste duinen. Het empirische karakter van Duros+ maakt het ongeschikt voor berekeningen met brede duingebieden.

XBeach laat ook gunstigere resultaten zien dan Duros+ in de kop van Noord-Holland. Waar Duros+ nog wel aangeeft dat profiel 308 voldoet aan de ondergrenswaarde, is dit niet meer het geval voor 928, 1303 en 1320. Deze resultaten zijn consequent met de bevindingen in Paragraaf 0.

Bij Zandvoort (profiel 6625), waar de waterkering opnieuw bestaat uit een breed duingebied, voldoet de waterkering wel aan de ondergrensaarde volgens Duros+, maar niet volgens XBeach. Daarbij moet de kanttekening worden geplaatst dat Bijlage E laat zien dat het afslagpunt in Duros+ achter de leggergrens ligt. Dit hoort per definitie te resulteren in een onveilig resultaat, aangezien het grensprofiel niet zeewaarts van de leggergrens ingepast kan worden. Het is onduidelijk hoe de Duros+ simulatie een veilig resultaat kan geven.



Figuur 2727: Vergelijking rekenresultaten voor 3m Zeespiegelstijging in de situatie waarin het kustprofiel niet kan meegroeien met de mate van zeespiegelstijging. Links de resultaten zoals berekend met XBeach. Rechts de resultaten zoals berekend met Duros+.

Kijkend naar het kustvak Delfland (9), is te zien dat Duros+ over het algemeen gunstigere resultaten geeft dan XBeach. Dit gebeurt onder andere bij de profielen van Scheveningen (9975), en Hoek van Holland (11825). Voor Scheveningen kan dit worden toegewezen aan het feit dat de bebouwing is meegenomen in de Duros+ berekening. Voor Hoek van Holland is dit verschil moeilijker te verklaren. Bijlage D laat zien dat Duros+ geen afslagpunt voor dit profiel gevonden heeft, en dat het totale afslagvolume kleiner is dan voor het scenario waarin de duinen wel mee kunnen groeien. Het is dus mogelijk dat deze simulatie buiten het toepassingsbereik van Duros+ valt, en daarom resulteert in een veilig resultaat.

Als laatste wordt er ingezoomd op te resultaten in Zeeuws Vlaanderen. XBeach resulteert daar in een veilig resultaat, in tegenstelling tot Duros+. Dit is consequent met de resultaten in Paragraaf 0, waar XBeach ook minder afslag liet zien dan Duros+ voor dit kustvak.

5.4.4 Conclusies

Bovenstaande resultaten laten zien dat, met name in de referentiesituatie en het scenario meegroeien, de verschillen in resultaten tussen XBeach en Duros+ klein zijn. Eventuele verschillen zijn te verklaren aan de hand van de bevindingen in Paragraaf 0.

Voor het scenario Niet Meegroeien zijn de verschillen groter, en vaak tegenstrijdig met de bevindingen in Paragraaf 0. Ook zijn er Duros+ resultaten die tegenstrijdig

zijn (Oordeel is dat de waterkering voldoet aan de ondergrenswaarde terwijl de rekenresultaten in Bijlage D geen resultaten geven). Dit ondersteunt de conclusie dat bij simulaties met een scenario waarin de profielen niet meegroeien met zeespiegelstijging en complexe duingebieden het toepassingsbereik van Duros+ niet toereikend is.

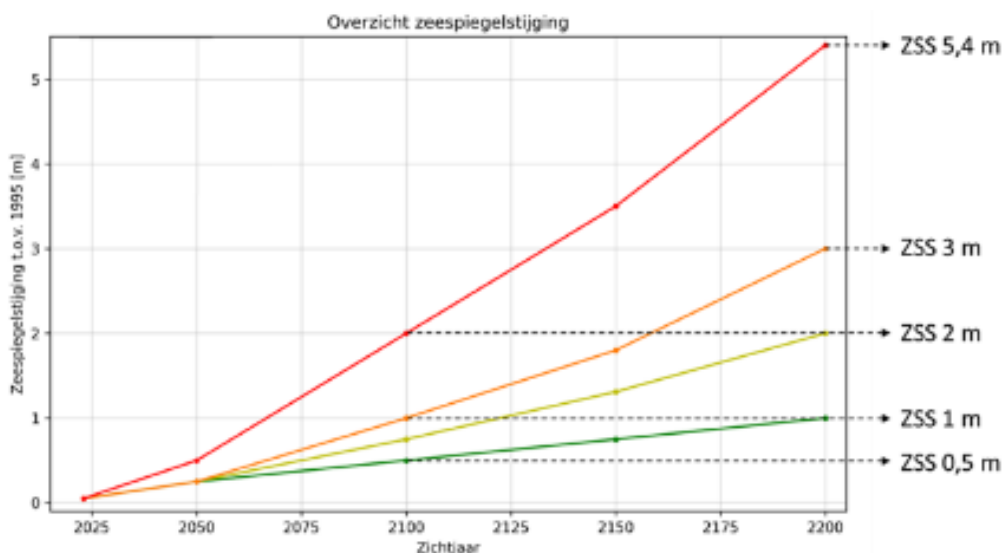
6 Discussie

6.1 Inschatting waterveiligheidsopgave versus werkelijkheid

De uitgevoerde analyse betreft een inschatting van de waterveiligheidsopgave als gevolg van extreme mate van zeespiegelstijging (3 - 5,4 meter). Hoewel de BOI-systematiek zoveel mogelijk is gevolgd, kan deze analyse nadrukkelijk niet gebruikt worden als wettelijke beoordeling van duinwaterkeringen bij extreme mate van zeespiegelstijging. Volgens de in het Kennisprogramma Zeespiegelstijging gehanteerde tijdlijnen zal een zeespiegelstijging van 3 meter niet voor 2130 plaatsvinden, en zal de meest extreme zeespiegelstijging van 5,4 meter niet voor 2200 plaatsvinden (zie Figuur 28, (Zethof & Stijnen, 2023)). In deze studie zijn aannames gemaakt die mogelijk voor een deel geen recht zullen doen aan de werkelijke situatie bij 3 tot 5,4 meter zeespiegelstijging. Deze aannames bevatten onder andere:

- De huidige voorkeursstrategie blijft gedurende de gehele tijdshorizon van het kennisprogramma zeespiegelstijging gehanteerd;
- De ligging van de kustlijn blijft onveranderd ten opzichte van de huidige situatie;
- Waterveiligheidseisen/ondergrenswaarden blijven onveranderd ten opzichte van de huidige situatie;
- Pragmatische keuzes die zijn gemaakt ten behoeve van een landelijk uniformiteit van de analyse, inclusief diverse scenario berekeningen en veranderingen in hydrodynamische processen die voor een deel geen recht doen aan de lokale situatie, of waar de gebruikte methodiek buiten het toepassingsbereik ingezet is.

De gehanteerde aannames en rekeninstellingen vormen daarmee mogelijk een incorrecte weergave van de situatie die zal gelden bij een zeespiegelstijging van 3 tot 5,444 meter. De resultaten in dit onderzoek moeten dan ook niet worden



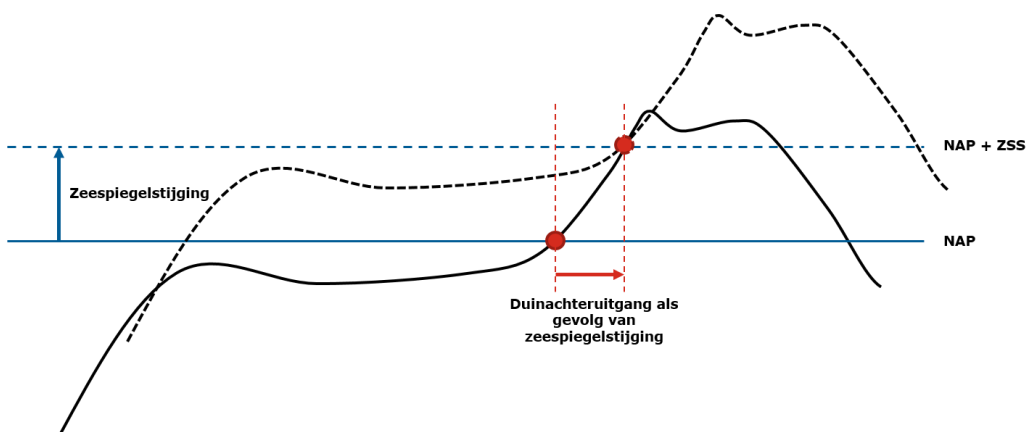
Figuur 28: Overzicht tijdlijnen voor verschillende mate van zeespiegelstijging gehanteerd in het Kennisprogramma Zeespiegelstijging.

geïnterpreteerd als de daadwerkelijke veiligheidsopgave maar enkel als een eerste orde inschatting.

6.2 Morfologische scenario's

In de studie naar de waterveiligheidsopgave worden morfologische scenario's gehanteerd waarvan experts denken dat dat de uiterste realistische scenario's/ontwikkelingen zullen zijn voor het kustfundament ten behoeve van waterveiligheidsberekeningen. Over de waarschijnlijkheid van deze scenario's, of tussenliggende opties, worden geen uitspraken gedaan. Op dit punt zal thema zandige kust van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging meer inzicht gaan verschaffen.

Een kustprofiel zal zich van nature aanpassen aan een nieuwe zeespiegel door erosie van duinen om daarmee een evenwichtssituatie te vinden. Dit gaat gepaard met een landwaartse verplaatsing van de kustlijn indien de gehele kust niet 1 op 1 meegroeit met de zeespiegelstijging², zie figuur 31. In deze analyse is het kustprofiel simpelweg verticaal verhoogd of constant gehouden afhankelijk van het morfologische scenario. Het aanpassen van het kustprofiel bij niet volledig meegroeien scenario's is niet meegenomen. Dit zal leiden tot een reguliere kustachteruitgang van ongeveer 60-300 meter (20-100 * ZSS) bij 3 meter zeespiegelstijging. In het geval van 5 meter zeespiegelstijging zal de kustachteruitgang zelfs 100-500 meter bedragen. In die scenario's zal bij de interpretatie van de resultaten de significante kustachteruitgang nog verdisconteerd moeten worden. Hier bovenop dient nog rekening te worden gehouden met voldoende waterkerend vermogen van het kustprofiel. De uitgevoerde waterveiligheidsberekeningen voor het morfologische scenario 'niet meegroeien' zijn daarmee een onderschatting van wat in werkelijkheid mag worden verwacht in deze situatie.



Figuur 292: Illustratie die weergeeft hoe duinachteruitgang plaatsvindt bij zeespiegelstijging indien het kustprofiel dezelfde vorm blijft houden.

Ook is het belangrijk te melden dat Volledig Meegroeien van het kustprofiel over de complete lengte waarschijnlijk niet zonder enige menselijke inspanning / actieve sturing zal plaatsvinden. Op dit moment groeien de duinen in de praktijk vooral mee aan de zeezijde. Om ook meer landwaarts gelegen duinen te laten groeien – zoals de huidige voorkeursstrategie beoogt (volledig meegroeien van de kust / het

² De huidige Voorkeursstrategie van het Deltaprogramma is dat het gehele kustfundament meegroeit met zeespiegelstijging.

kustfundament met zeespiegelstijging) - zijn aanvullende maatregelen nodig. Daarbij rijst de vraag of de duinen snel genoeg natuurlijk kunnen meegroeien bij de extremere zeespiegelstijging van 3 tot 5.4 meter. Dit geldt met name in brede duingebieden waar het grensprofiel landwaarts kan liggen, groeien de duinen in de huidige beheerpraktijk niet/minder mee met de zeespiegelstijging. Dit betekent dat de resultaten voor het scenario Meegroeien een onderschatting geven van de daadwerkelijke veiligheidsopgave, met name in de gebieden met uitgestrekte duingebieden of bij extremere mate van zeespiegelstijging. Welke maatregelen voldoende effectief zijn om de duinprofielen mee te laten groeien, is een aanbeveling voor verder onderzoek.

6.3 **Geen hydrodynamische aanpassingen voor getijden toegepast**

In deze studie zijn enkele veranderingen op de hydraulische belastingen toegepast om de effecten van zeespiegelstijging op de hydrodynamische processen door te rekenen. Op basis van beschikbare literatuur zijn effecten bepaald van zeespiegelstijging op het rekenpeil, significante golfhoogte en die piekgolfperiode. In deze studie zijn geen aanpassingen bepaald voor het getijdeamplitude. Enerzijds omdat de beschikbare literatuur geen eenduidig antwoord gaf over de effecten van zeespiegelstijging, en anderzijds omdat deze studie geen exacte beoordeling van de zandige waterkeringen betreft. Dat zeespiegelstijging geen invloed heeft op de getijdenamplitude is echter onwaarschijnlijk.

Voor een eventuele verdiepende studie van de veiligheidsopgave is het waardevol om meer informatie over de effecten van zeespiegelstijging op de getijden te hebben. De getijdenamplitude is een belangrijke parameter voor duinafslag aangezien het invloed heeft op de ontwikkeling van de waterstand gedurende een storm. Informatie over de ontwikkeling van het waterniveau is belangrijk omdat het een beter beeld geeft over de ontwikkeling van de duinerosie gedurende de storm.

6.4 **Ontbreken uitbreiding en versterkingsopgave**

In fase 1 (Wilmink & Groenewegen, 2023) is een uitgebreide studie gedaan waarbij de veiligheidsopgave langs de Nederlandse, zandige kust is berekend voor 0-3 meter zeespiegelstijging en 3 morfologische scenario's. Vanwege de tijdsbeperkingen die XBeach met zich meebrengt, is een dergelijke uitbreiding voor de Nederlandse kust in deze studie niet uitgevoerd. Deze studie geeft slechts een (extreem) globaal beeld van de veiligheidsopgave bij extreme mate van zeespiegelstijging. Lokale variaties in de veiligheidsopgave, zijn niet in beeld gebracht.

In fase 1 is naast een berekening van de veiligheid van de zandige waterkeringen ook een versterkingsopgave uitgerekend indien de waterkering niet voldoet. In deze studie is een dergelijke studie niet uitgevoerd.

6.5 **Gebruik XBeach vs. Duros+**

Voor het onderzoek naar de waterveiligheidsopgave zandige kust bij 3 - 5.4 meter zeespiegelstijging is gebruikt gemaakt van het afslagmodel XBeach. Dit in tegenstelling tot fase 1, waarin Duros+ gebruikt is.

In Wilmink & Groenewegen (2023) waren beperkingen geconstateerd met betrekking tot het gebruik van Duros+ voor het berekenen van de waterveiligheidsopgave met zeespiegelstijging. Deze beperkingen omvatten onder

andere duinafslagberekeningen in complexe kustgebieden met meerdere duinenrijen en afwijkende vooroevers t.o.v. de Hollandse kust. Met name in gebieden met complexe afslagberekeningen als gevolg van achterloopsheid treden problemen met Duros+. Ook was geconstateerd dat berekeningen voor 3 meter zeespiegelstijging tegen de grens van het toepassingsbereik van Duros+ zaten. Om die reden is onder andere besloten om Duros+ niet te gebruiken voor de berekeningen voor 3 - 5,4 meter zeespiegelstijging.

Zoals beschreven in Hoofdstuk 2 heeft XBeach een breder toepassingsbereik dan Duros+. De numerieke aard van het model stelt het in staat om ook berekeningen uit te voeren voor profielen die afwijken van de Hollandkust. Hiermee is het mogelijk om een goed beeld te krijgen van de waterveiligheidsopgave bij extreme mate van zeespiegelstijging.

De keerzijde van XBeach is het feit dat een berekening significant meer tijd vereist dan Duros+. De rekentijd stijgt bovendien naarmate het model complexer wordt. Dit maakt het niet mogelijk om hetzelfde volume aan simulaties uit te voeren als in Wilmink & Groenewegen (2023) is gedaan. Een uitbreiding voor de complete Nederlandse kust is daarmee buiten beschouwing gelaten in dit onderzoek. In de toekomst kan een uitbreiding voor de Nederlandse kust meerwaarde bieden om de totale veiligheidsopgave bij 3 - 5,4 meter zeespiegelstijging in kaart te brengen.

7 Conclusies

Op basis van de uitgevoerde analyses is te zien dat het laten meegroeien van de kust goed helpt om waterveiligheidsproblemen te voorkomen, zelfs tot en met ruim 5 meter zeespiegelstijging. Dit kan worden verklaard door het feit dat de situatie bijna niet verandert indien het profiel kan meegroeien, omdat het aangrijppunt van de waterstand op duinen bij een storm relatief niet/nauwelijks verandert. Enkel nemen de golfbelastingen toe als resultaat van een hogere zeespiegel, waardoor het afslagvolume zal toenemen. De huidige voorkeursstrategie en daarin het huidige kustbeleid – meegroeien met zeespiegelstijging door middel van het uitvoeren van kustfundament-, vooroever- en strandsuppleties – blijkt zeer effectief om waterveiligheidsopgaven in de toekomst te voorkomen. Daarbij moet wel de aantekening worden gemaakt dat de duinen voldoende moeten kunnen meegroeien over de gehele (waterkerende) breedte van het duingebied.

Daarnaast blijkt dat ook bij de kustplaatsen waarin de duinen (gedeelte van profiel boven 3 m+NAP) niet kunnen meegroeien, het uitvoeren van suppleties op de vooroever en kustfundament effectief kan zijn om waterveiligheidsopgaven te verminderen, maar niet geheel voorkomen. Dit komt doordat de verhoogde vooroever de inkomende golven dempt en daarmee het totale afslagvolume vermindert ten opzichte van de situatie zonder meegroeiend profiel. Dit effect is met name evident bij de profielen van Zandvoort en Domburg.

Op plaatsen met kustbebouwing, waar de duinen niet kunnen meegroeien, zullen eerste problemen ontstaan. Hierbij springen vooral de onderzochte locaties Noordwijk en Scheveningen in het oog, waar volgens de XBeach simulaties de profielen in de referentiesituatie niet aan de ondergrenswaarde voldoen. Kijkend naar de resultaten voor 3 meter zeespiegelstijging, komen er veiligheidsopgaven voor Bergen aan Zee en Egmond aan Zee bij, ongeacht of het profiel meegroeit met de mate van zeespiegelstijging. Bij 5 meter zeespiegelstijging worden bij alle geanalyseerde kustplaatsen veiligheidsopgaven geconstateerd.

Indien de kustprofiel niet meegroeit met de mate van zeespiegelstijging, zullen bij zowel 3 als 5,4 meter zeespiegelstijging grote waterveiligheidsopgaven ontstaan. Bij 3 meter zeespiegelstijging zullen langs vrijwel de hele Nederlandse kust waterveiligheidsopgaven ontstaan. Slechts op lokale plekken, zoals in de kop van Noord-Holland, Kijkduin en enkele plekken in de Zuidwestelijke Delta zullen de profielen nog voldoen aan de ondergrenswaarde. Bij 5,4 meter zeespiegelstijging zullen langs de gehele Nederlandse kust waterveiligheidsopgaven ontstaan.

8 Referenties

- Arns, A., Dangendorf, S., Jensen, J., Talke, S., Bender, J., & Pattiaratchi, C. (2017). Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights. *Sci. Rep.* 7, 40171; doi: 10.1038/srep40171.
- Coumou, L., Steetzel, H., Velhorst, R., & Van der Heijden, S. (2023). *Verschil- en consequentieanalyse nieuw beoordelings- en ontwerpinstrumentarium voor zandige waterkeringen*. Utrecht: Rijkswaterstaat.
- Diermanse, F., Lam, K., & Knoeff, H. (2016). *Assemblageprotocol WBI2017*. Expertisenetwerk waterveiligheid. (2007). *Technisch Rapport Duinafslag*.
- Groenewegen, M. (2021). *KP-ZSS. Proof of Principle Zandige Kust - Concept-rapport*. Utrecht: Rijkswaterstaat.
- Kok, M., Jongejan, R., Nieuwjaar, M., & Tanczos, I. (2017). *Grondslagen voor hoogwaterbescherming*. Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat & Expertise Netwerk Waterveiligheid.
- McCall, R., De Bakker, A., Quataert, E., De Goede, R., De Vet, L., De Ridder, M., . . . Roelvink, D. (2022). *BOI Standaard instellingen - Kalibratie van de XBeach model parameters*. Utrecht: Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat, & Deltares. (2023). *Sedimentbehoefte Nederlands kustsysteem bij toegenomen zeespiegelstijging*. Utrecht: Rijkswaterstaat.
- Rosiati, J., Dean, R., & Walton, T. (2013). *The modified Bruun Rule extended for landward transport*.
- Steetzel, H., Coumou, L., Van Santen, R., & McCall, R. (2023). *Technische Leidraad Katern Zandige Waterkeringen - BOI Zandige Waterkeringen*. WVL - Hoogwaterveiligheid. Utrecht: Rijkswaterstaat.
- Taal, M., Quataert, E., Van der Spek, A., Huisman, B., Elias, E., Bing Wang, Z., & Vermeer, N. (2023). *Sedimentbehoefte Nederlands kustsysteem bij toegenomen zeespiegelstijging*. Utrecht: Rijkswaterstaat.
- Van Santen, R. (2021). *BOI Zandige Keringen - Selectie representatieve kustprofielen*.
- Wegman, C. N. (2018). *Impact zeespiegelstijging op HBN en golven. Memo HKV PR3706.20*.
- Wegman, C., & Nicolai, R. (2018). *Impact zeespiegelstijging op HBN en golven*. HKV.
- Wilmink, R., & Groenewegen, M. (2023). *Systeemanalyse Waterveiligheid - Deelrapportage Zandige waterkeringen kust*. Utrecht: Rijkswaterstaat.
- Zethof, M., & Stijnen, J. (2023). *Systeemanalyse Waterveiligheid - Bovenregionaal synthesesrapport*. Utrecht: Rijkswaterstaat.

Bijlage A Hydraulische Belastingen

De volgende paragrafen bevatten tabellen met hydraulische belastingen die worden behandeld in dit rapport

A.1 Vergelijking traject- en doorsnedeniveau

Tabel 2: Vergelijking van hydraulische belastingen op traject en doorsnedeniveau voor de geanalyseerde profielen in dit onderzoek. Alle hydraulische belastingen zijn voor de ondergrens geldend voor desbetreffende raai.

Kustvak	Raai	BOI – ondergrenswaarde op trajectniveau zonder zeespiegelstijging			BOI – ondergrenswaarde op Doorsnedeniveau zonder zeespiegelstijging		
		R_p [m+NAP]	H_s [m]	T_p [s]	R_p [m+NAP]	H_s [m]	T_p [s]
2	340	4.25	10.06	18.10	4.31	10.18	18.26
2	700	4.29	10.05	18.33	4.34	10.17	18.49
3	600	3.82	9.28	16.60	3.88	9.40	16.76
3	1000	3.83	9.27	16.67	3.89	9.39	16.83
4	900	4.37	10.76	17.72	4.42	10.87	17.85
4	1700	4.41	10.76	17.92	4.46	10.87	18.06
5	4377	3.65	9.37	15.48	3.70	9.48	15.62
5	5289	3.72	9.33	15.94	3.77	9.45	16.08
6	1190	4.04	9.56	15.72	4.09	9.66	15.83
6	1853	3.99	9.79	15.83	4.04	9.89	15.95
7	308	4.10	9.29	15.57	4.15	9.38	15.68
7	928	4.13	9.21	15.51	4.19	9.30	15.62
7	1303	4.16	9.14	15.45	4.22	9.23	15.56
7	1320	4.17	9.13	15.45	4.22	9.22	15.56
7	1483	4.17	9.12	15.44	4.23	9.21	15.54
7	1955	4.21	9.04	15.37	4.27	9.12	15.48
7	3300	4.35	8.70	15.11	4.42	8.78	15.21
7	3325	4.36	8.70	15.10	4.42	8.78	15.20
7	3775	4.39	8.62	15.04	4.46	8.70	15.14
7	3800	4.39	8.61	15.04	4.46	8.69	15.14
8	6625	6.09	9.32	15.91	6.19	9.39	16.00
8	8175	6.05	8.93	14.96	6.16	9.00	15.04
9	9975	5.50	8.22	13.65	5.59	8.28	13.71
9	10611	5.49	8.00	13.12	5.58	8.06	13.18
9	11196	5.48	7.83	12.70	5.56	7.89	12.76
9	11301	5.47	7.78	12.58	5.56	7.84	12.64
9	11825	5.46	7.62	12.19	5.55	7.67	12.25
11	1002	5.56	6.87	11.76	5.64	6.92	11.81
12	1000	4.71	6.08	10.99	4.78	6.12	11.04
13	529	4.80	5.68	10.77	4.86	5.72	10.82
15	300	4.94	5.03	10.41	5.00	5.06	10.45
16	1530	4.96	4.92	10.35	5.02	4.95	10.39
17	1046	4.76	4.03	9.70	4.81	4.05	9.73

A.2 Effecten Zeespiegelstijging op hydraulische belasting

De volgende tabellen bevatten hydraulische belasting aangepast voor de maten van zeespiegelstijging behandeld in dit onderzoek. Tabel 3 geeft de hydraulische belasting voor 3 meter zeespiegelstijging, Tabel 4 voor 5,4 meter zeespiegelstijging

Tabel 3: Vergelijking van de hydraulische belasting met de hydraulische belasting aangepast voor 3m zeespiegelstijging voor de raaien geanalyseerd in dit onderzoek. Alle hydraulische belasting zijn voor de ondergrenswaarde geldend voor desbetreffende raai.

Kustvak	Raai	BOI – ondergrenswaarde op Doorsnedeniveau zonder zeespiegelstijging			BOI – ondergrenswaarde op Doorsnedeniveau met 3 m zeespiegelstijging		
		R_p [m+NAP]	H_s [m]	T_p [s]	R_p [m+NAP]	H_s [m]	T_p [s]
2	340	4.31	10.18	18.26	7.31	10.80	18.56
2	700	4.34	10.17	18.49	7.34	10.79	18.79
3	600	3.88	9.40	16.76	6.88	9.98	17.06
3	1000	3.89	9.39	16.83	6.89	9.96	17.13
4	900	4.42	10.87	17.85	7.42	11.54	18.15
4	1700	4.46	10.87	18.06	7.46	11.54	18.36
5	4377	3.70	9.48	15.62	6.70	10.06	15.92
5	5289	3.77	9.45	16.08	6.77	10.03	16.38
6	1190	4.09	9.66	15.83	7.09	10.25	16.13
6	1853	4.04	9.89	15.95	7.04	10.50	16.25
7	308	4.15	9.38	15.68	7.15	9.95	15.98
7	928	4.19	9.30	15.62	7.19	9.87	15.92
7	1303	4.22	9.23	15.56	7.22	9.79	15.86
7	1320	4.22	9.22	15.56	7.22	9.78	15.86
7	1483	4.23	9.21	15.54	7.23	9.77	15.84
7	1955	4.27	9.12	15.48	7.27	9.68	15.78
7	3300	4.42	8.78	15.21	7.42	9.32	15.51
7	3325	4.42	8.78	15.20	7.42	9.32	15.50
7	3775	4.46	8.70	15.14	7.46	9.23	15.44
7	3800	4.46	8.69	15.14	7.46	9.22	15.44
8	6625	6.19	9.39	16.00	9.19	9.96	16.30
8	8175	6.16	9.00	15.04	9.16	9.55	15.34
9	9975	5.59	8.28	13.71	8.59	8.79	14.01
9	10611	5.58	8.06	13.18	8.58	8.55	13.48
9	11196	5.56	7.89	12.76	8.56	8.37	13.06
9	11301	5.56	7.84	12.64	8.56	8.32	12.94
9	11825	5.55	7.67	12.25	8.55	8.14	12.55
11	1002	5.64	6.92	11.81	8.64	7.34	12.11
12	1000	4.78	6.12	11.04	7.78	6.49	11.34
13	529	4.86	5.72	10.82	7.86	6.07	11.12
15	300	5.00	5.06	10.45	8.00	5.37	10.75
16	1530	5.02	4.95	10.39	8.02	5.25	10.69
17	1046	4.81	4.05	9.73	7.81	4.30	10.03

Tabel 4: Vergelijking van de hydraulische belasting met de hydraulische belasting aangepast voor 5,4m zeespiegelstijging voor de raaien geanalyseerd in dit onderzoek. Alle hydraulische belasting zijn voor de ondergrenswaarde geldend voor desbetreffende raai.

Kustvak	Raai	BOI – ondergrenswaarde op Doorsnedeniveau zonder zeespiegelstijging			BOI – ondergrenswaarde op Doorsnedeniveau met 5,4 m zeespiegelstijging		
		R_p [m+NAP]	H_s [m]	T_p [s]	R_p [m+NAP]	H_s [m]	T_p [s]
2	340	4.31	10.18	18.26	9.71	11.33	18.80
2	700	4.34	10.17	18.49	9.74	11.32	19.03
3	600	3.88	9.40	16.76	9.28	10.46	17.30
3	1000	3.89	9.39	16.83	9.29	10.45	17.37
4	900	4.42	10.87	17.85	9.82	12.10	18.39
4	1700	4.46	10.87	18.06	9.86	12.10	18.60
5	4377	3.70	9.48	15.62	9.10	10.55	16.16
5	5289	3.77	9.45	16.08	9.17	10.52	16.62
6	1190	4.09	9.66	15.83	9.49	10.75	16.37
6	1853	4.04	9.89	15.95	9.44	11.01	16.49
7	308	4.15	9.38	15.68	9.55	10.44	16.22
7	928	4.19	9.30	15.62	9.59	10.35	16.16
7	1303	4.22	9.23	15.56	9.62	10.27	16.10
7	1320	4.22	9.22	15.56	9.62	10.26	16.10
7	1483	4.23	9.21	15.54	9.63	10.25	16.08
7	1955	4.27	9.12	15.48	9.67	10.15	16.02
7	3300	4.42	8.78	15.21	9.82	9.77	15.75
7	3325	4.42	8.78	15.20	9.82	9.77	15.74
7	3775	4.46	8.70	15.14	9.86	9.68	15.68
7	3800	4.46	8.69	15.14	9.86	9.67	15.68
8	6625	6.19	9.39	16.00	11.59	10.45	16.54
8	8175	6.16	9.00	15.04	11.56	10.02	15.58
9	9975	5.59	8.28	13.71	10.99	9.21	14.25
9	10611	5.58	8.06	13.18	10.98	8.97	13.72
9	11196	5.56	7.89	12.76	10.96	8.78	13.30
9	11301	5.56	7.84	12.64	10.96	8.72	13.18
9	11825	5.55	7.67	12.25	10.95	8.54	12.79
11	1002	5.64	6.92	11.81	11.04	7.70	12.35
12	1000	4.78	6.12	11.04	10.18	6.81	11.58
13	529	4.86	5.72	10.82	10.26	6.37	11.36
15	300	5.00	5.06	10.45	10.40	5.63	10.99
16	1530	5.02	4.95	10.39	10.42	5.51	10.93
17	1046	4.81	4.05	9.73	10.21	4.51	10.27

A.3 Vergelijking Hydraulische belasting XBeach vs Duros+

Onderstaande tabellen bevatten vergelijkingen voor de hydraulische belasting gebruikt in XBeach en Duros+. Hydraulische belasting zijn hier alleen berekend voor 0 en 3 meter zeespiegelstijging.

Tabel 5: Vergelijking hydraulische belasting gebruikt tijdens de berekeningen in XBeach (links) en Duros+ (rechts). Onderstaande waarden zijn zonder effecten van zeespiegelstijging.

Kustvak	Raai	BOI – ondergrenswaarde op Doorsnedeniveau zonder zeespiegelstijging. Gebruikt in de berekeningen met XBeach			WBI – ondergrenswaarde op Doorsnedeniveau zonder zeespiegelstijging. Gebruikt in de berekeningen met Duros+		
		R_p [m+NAP]	H_s [m]	T_p [s]	R_p [m+NAP]	H_s [m]	T_p [s]
2	340	4.31	10.18	18.26	4.29	10.15	19.21
2	700	4.34	10.17	18.49	4.33	10.15	19.45
3	600	3.88	9.40	16.76	3.91	9.49	17.92
3	1000	3.89	9.39	16.83	3.93	9.48	18.00
4	900	4.42	10.87	17.85	4.36	10.74	18.54
4	1700	4.46	10.87	18.06	4.39	10.74	18.76
5	4377	3.70	9.48	15.62	3.73	9.56	16.64
5	5289	3.77	9.45	16.08	3.80	9.53	17.16
6	1190	4.09	9.66	15.83	4.07	9.63	16.42
6	1853	4.04	9.89	15.95	4.03	9.85	16.64
7	308	4.15	9.38	15.68	4.13	9.35	16.12
7	928	4.19	9.30	15.62	4.17	9.27	16.04
7	1303	4.22	9.23	15.56	4.20	9.20	15.96
7	1320	4.22	9.22	15.56	4.20	9.19	15.95
7	1483	4.23	9.21	15.54	4.21	9.18	15.93
7	1955	4.27	9.12	15.48	4.25	9.10	15.84
7	3300	4.42	8.78	15.21	4.40	8.76	15.42
7	3325	4.42	8.78	15.20	4.40	8.76	15.42
7	3775	4.46	8.70	15.14	4.44	8.67	15.30
7	3800	4.46	8.69	15.14	4.44	8.67	15.29
8	6625	6.19	9.39	16.00	5.91	9.21	15.76
8	8175	6.16	9.00	15.04	5.88	8.82	14.80
9	9975	5.59	8.28	13.71	5.41	8.16	13.58
9	10611	5.58	8.06	13.18	5.40	7.94	13.10
9	11196	5.56	7.89	12.76	5.39	7.77	12.73
9	11301	5.56	7.84	12.64	5.39	7.73	12.63
9	11825	5.55	7.67	12.25	5.38	7.57	12.30
11	1002	5.64	6.92	11.81	5.48	3.00	13.37
12	1000	4.78	6.12	11.04	4.76	3.91	12.70
13	529	4.86	5.72	10.82	4.84	2.63	12.54
15	300	5.00	5.06	10.45	4.98	3.26	12.18
16	1530	5.02	4.95	10.39	5.01	4.94	12.10
17	1046	4.81	4.05	9.73	4.85	4.27	11.31

Tabel 6: Vergelijking hydraulische belasting gebruikt tijdens de berekeningen in XBeach (links) en Duros+ (rechts). Onderstaande waarden zijn voor 3m zeespiegelstijging.

Kustvak	Raai	BOI – ondergrenswaarde op Doorsnedeniveau met 3m zeespiegelstijging. Gebruikt in de berekeningen met XBeach			WBI – ondergrenswaarde op Doorsnedeniveau met 3m zeespiegelstijging. Gebruikt in de berekeningen met Duros+		
		R_p [m+NAP]	H_s [m]	T_p [s]	R_p [m+NAP]	H_s [m]	T_p [s]
2	340	7.31	10.80	18.56	7.29	10.77	19.51
2	700	7.34	10.79	18.79	7.33	10.77	19.75
3	600	6.88	9.98	17.06	6.91	10.07	18.22
3	1000	6.89	9.96	17.13	6.93	10.06	18.30
4	900	7.42	11.54	18.15	7.36	11.40	18.84
4	1700	7.46	11.54	18.36	7.39	11.40	19.06
5	4377	6.70	10.06	15.92	6.73	10.15	16.94
5	5289	6.77	10.03	16.38	6.80	10.11	17.46
6	1190	7.09	10.25	16.13	7.07	10.22	16.72
6	1853	7.04	10.50	16.25	7.03	10.45	16.94
7	308	7.15	9.95	15.98	7.13	9.92	16.42
7	928	7.19	9.87	15.92	7.17	9.84	16.34
7	1303	7.22	9.79	15.86	7.20	9.76	16.26
7	1320	7.22	9.78	15.86	7.20	9.75	16.25
7	1483	7.23	9.77	15.84	7.21	9.74	16.23
7	1955	7.27	9.68	15.78	7.25	9.66	16.14
7	3300	7.42	9.32	15.51	7.40	9.30	15.72
7	3325	7.42	9.32	15.50	7.40	9.30	15.72
7	3775	7.46	9.23	15.44	7.44	9.20	15.60
7	3800	7.46	9.22	15.44	7.44	9.20	15.59
8	6625	9.19	9.96	16.30	8.91	9.77	16.06
8	8175	9.16	9.55	15.34	8.88	9.36	15.10
9	9975	8.59	8.79	14.01	8.41	8.66	13.88
9	10611	8.58	8.55	13.48	8.40	8.43	13.40
9	11196	8.56	8.37	13.06	8.39	8.25	13.03
9	11301	8.56	8.32	12.94	8.39	8.20	12.93
9	11825	8.55	8.14	12.55	8.38	8.03	12.60
11	1002	8.64	7.34	12.11	8.48	3.18	13.67
12	1000	7.78	6.49	11.34	7.76	4.15	13.00
13	529	7.86	6.07	11.12	7.84	2.79	12.84
15	300	8.00	5.37	10.75	7.98	3.46	12.48
16	1530	8.02	5.25	10.69	8.01	5.24	12.40
17	1046	7.81	4.30	10.03	7.85	4.53	11.61

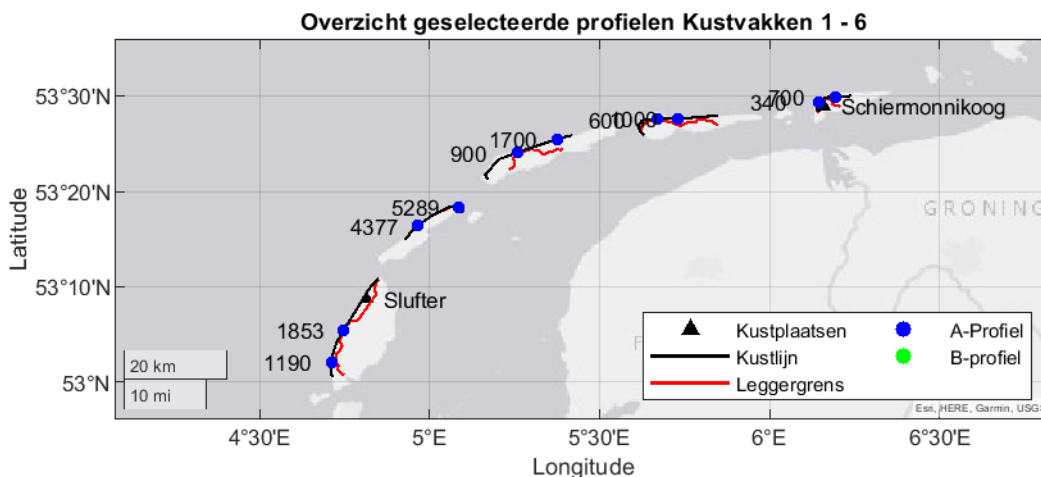
Bijlage B Beschrijving geselecteerde profielen

In de paragrafen hieronder worden de kustvakken en geselecteerde raaien voor dit onderzoek besproken.

B.1 Wadden

De eerste regio betreft de Waddeneilanden (Schiermonnikoog, Ameland, Terschelling, Vlieland en Texel), ofwel kustvakken 2 tot en met 6. Voor alle beschouwde Waddeneilanden geldt dat er geen bebouwing in de duinenrij is. Daarom wordt aangenomen dat alle profielen kunnen worden gekarakteriseerd als A-profielen, en dus kunnen meegroeien met het strand en de vooroever met de mate van Zeespiegelstijging. In de paragrafen hieronder worden de profielen op de Waddeneilanden verder toegelicht.

Voor Schiermonnikoog (kustvak 2) geldt dat de legger in het oostelijk deel van de eiland verder landwaarts ligt in vergelijking met het westelijk deel van het eiland (zie Figuur 30). Beide profielen (340 en 700) worden bovendien gekenmerkt door ondiepe vooroevers die zich ver in zeewaartse richting strekken. Kijkend naar de beschouwde profielen, is te zien dat profiel 340 uit meerdere duinenrijen bestaat. De zeewaarts gelegen duinenrij is relatief laag (ongeveer NAP+5m). Daarachter ligt een bredere duinenrij die bovendien een stuk hoger is (ongeveer NAP+15m). De Legger van profiel 340 is gepositioneerd in de hoge landwaartse duinenrij. Profiel 700 ligt ten oosten van profiel 340 en bestaat uit een dubbele duinenrij waarvan de zeewaartse duinenrij een stuk hoger (NAP+10m) en breder in vergelijking met profiel 340. De tweede duinenrij ligt bovendien een stuk verder landwaarts dan bij profiel 340, met als effect dat de legger voor profiel 700 ook verder landwaarts ligt.



Figuur 30: Overzicht geselecteerde profielen in de Waddenregio (Kustvakken 1-6)

Op Ameland (kustvak 3) is de legger in het westen relatief in zeewaartse richting te vinden (zie Figuur 30), terwijl die in het oosten verder landwaarts ligt. Evenals op Schiermonnikoog, kenmerken de geselecteerde profielen zich door meerdere duinenrijen en uitgestrekte, ondiepe vooroevers. In tegenstelling tot Schiermonnikoog zijn de duinen op Ameland minder hoog. Profiel 600 heeft een dubbele duinenrij waarvan de zeewaartse duinen de hoogste piek heeft (ongeveer NAP+8m). Daarachter ligt een smallere, lagere duinenrij waarachter de legger

gevonden kan worden. Profiel 1000 ligt ten oosten van profiel 600 en wordt gekenmerkt door een smallere maar hogere duinenrij (NAP+12m) dan in profiel 600. Daarachter ligt een serie lage duinen in landwaartse richting. Omdat profiel 1000 verder naar het oosten ligt, is de legger ook verder landwaarts te vinden.

Terschelling (kustvak 4) kent net als voorgaande eilanden geen kustplaatsen in de zeeoever. Wel staan er lokaal enkele huizen op het duin bij Midsland aan Zee. Desondanks worden de duinen aangenomen volledig mee te kunnen groeien met de vooroever en het strand. Terschelling heeft een gedeelte aan duinwaterkeringen die in de zeeoever liggen, maar ook grote delen niet (zie Figuur 30). Vergelijkbaar met de profielen van Ameland en Schiermonnikoog, beschikt Terschelling over meerdere duinenrijen en uitgestrekte vooroevers. Profiel 900 ligt in de zeeoever (zie Figuur 30), en beschikt over meerdere duinenrijen met pieken die allemaal in de orde van NAP+10m liggen. De legger is dicht achter de eerste duinenrij te vinden (zie Figuur 30). Profiel 1700 ligt verder naar het oosten, wat betekent dat de legger verder landwaarts ligt dan bij profiel 900 (zie Figuur 30). De duinenrijen in dit profiel zijn te verdelen in 2 delen, waarvan het landwaartse deel uit een drietal duinen bestaat met toppen in de orde van NAP+10 m. Zeewaarts liggen twee lagere duinen (zie Figuur 30).

Op Ameland zijn vergelijkbare profielen te vinden als op de eerder beschreven Waddeneilanden. Verschil is dat de vooroevers korter zijn dan bij Schiermonnikoog en Ameland en dat ze steiler aflopen. Profiel 4377 ligt ten westen, en bestaat in tegenstelling tot de overige profielen uit een enkele, smalle en relatief hoge duin (NAP+12m) waarachter direct de legger te vinden is. Profiel 5289 bestaat uit een hoge duinenrij (NAP+15m) in zeewaartse richting met twee lagere duinenrijen in landwaartse richting (zie Figuur 30). De legger van profiel 5289 ligt in de eerste duinenrij. Bovendien wordt profiel 5289 gekarakteriseerd door een diepe geul voor de kust.

De aanname van volledig kunnen meegroeien is met name op de eilanden Schiermonnikoog, Ameland, Terschelling en Vlieland niet realistisch. Met name in de brede duingebieden zullen de meer landwaarts gelegen waterkeringen, zonder aanvullende maatregelen, niet of nauwelijks op een natuurlijke manier meegroeien met de mate van zeespiegelstijging. Voor Terschelling geldt dat uit wettelijke beoordelingen volgt dat er bij beperkte mate van zeespiegelstijging al wateropgaven zullen ontstaan.

Ook voor Texel geldt dat de duinwaterkering niet wordt onderbroken door kustplaatsen. De duinen op dit stuk worden dan ook geacht volledig mee te kunnen groeien met de vooroever en strand. De Legger is op grote delen van het eiland zeewaarts, maar ook verder landwaarts te vinden. De geselecteerde profielen bestaan uit een profiel met een meer landwaarts (profiel 1190) en een meer zeewaarts gepositioneerde legger (profiel 1853). Beide profielen beschikken over relatief korte vooroevers vergeleken met de andere Waddeneilanden. Profiel 1190 beschikt over een enkele, smalle maar hoge duinenrij (NAP+17m) met daarachter enkele lage duinenrijen. Profiel 1853 beschikt daarentegen uit meerdere duinenrijen die iets lager liggen dan profiel 1190. De legger van profiel 1853 ligt in de laatste duinenrij van het profiel (zie Figuur 30).

B.2 Hollandkust (kustvakken 7-9)

Het kustvak 7 (Noord-Holland) kent een aantal locaties waar kustplaatsen dicht aan zee liggen. Op deze locaties is de kust slechts in beperkte mate in staat mee te

groeien (smalle duinenregels volledig opgesloten tussen zee en bebouwing, alsmede plaatsen waar kustboulevards gelegen zijn). Deze locaties worden in dit rapport aangeduid als B-locaties en zijn in de scenario analyse gelimiteerd tot het meegroeien van enkel het zeewaarts gelegen profiel. De kustplaatsen in kustvak 7 in kwestie zijn te vinden bij Callantsoog (1303 en 1320), Bergen aan zee (3300 en 3325) en Egmond aan zee (3775 en 3800). Daarnaast bevat kustvak 7 nog enkele A-profielen, gelegen ten noorden en ten zuiden van Callantsoog, zie Figuur 31. In de paragrafen hieronder worden de B-profielen rondom de kustplaatsen verder toegelicht.

De profielen bij Callantsoog zijn te beschrijven als een smalle, relatief hoge duinstrook. Profiel 1303 bevat de lagere duinen van de twee geselecteerde profielen, met kruinen tot 18 m+NAP (zie Figuur 31). De hogere duinen bij profiel 1320, strekken tot 22 m+NAP (zie Figuur 31). Callantsoog ligt direct achter deze smalle duinstrook. Om deze reden is de leggergrens direct achter de duinen gesitueerd voor zowel profiel 1303 als 1320.

De profielen 330 en 3325 bij Bergen aan Zee bevatten relatief lage duinen in zeewaartse richting, en een hoog duinmassief in landwaartse richting. Omdat Bergen aan Zee tussen de lage, zeewaartse duinen en het hoge duinmassief ligt, is de ligger ook zeewaarts te vinden, en biedt het hoge duinmassief geen aanvullende sterkte. Profiel 3325 bevat de lage duinen, met kruinen die slechts strekken tot ongeveer 10 m+NAP. De duinen bij profiel 3300 zijn hoger, en strekken tot 15 m+NAP.

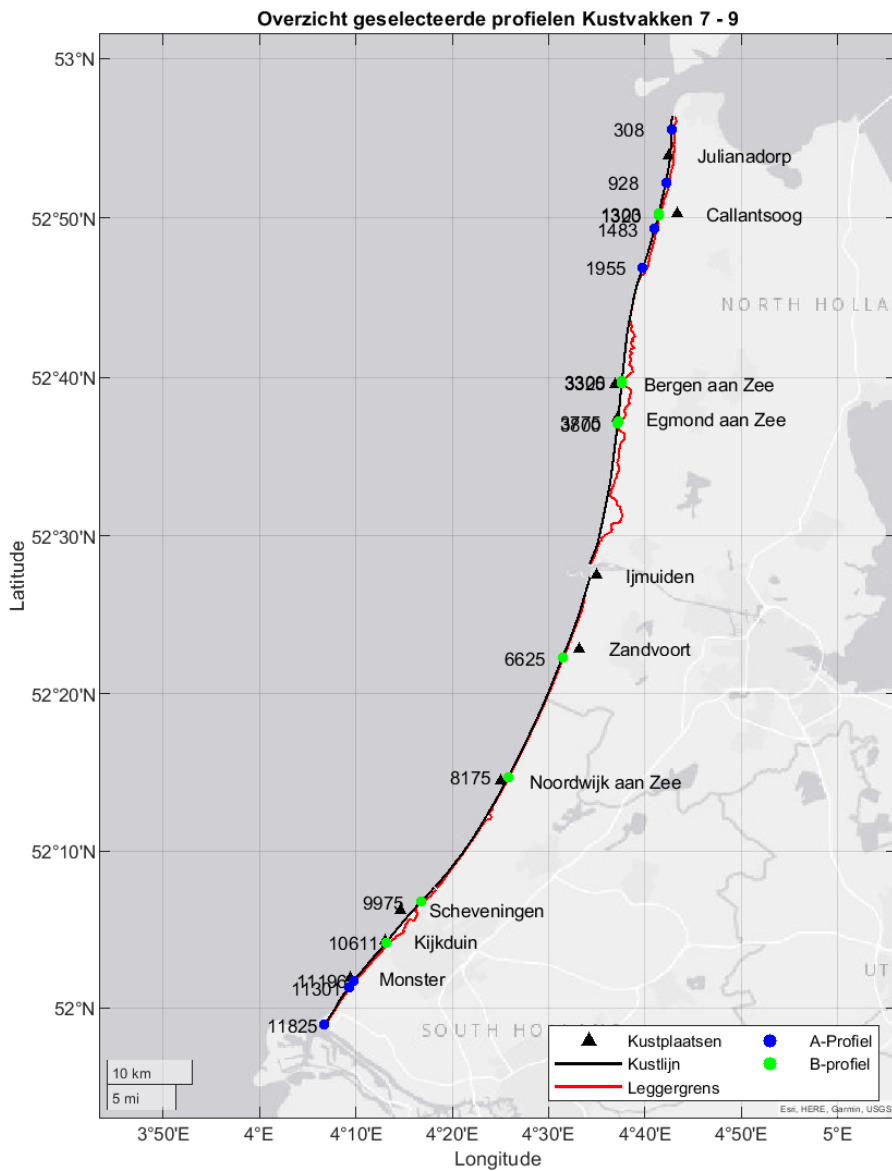
De duinen bij Egmond aan Zee zijn vergelijkbaar met de duinen bij Bergen aan Zee. De profielen worden gekenmerkt door een lage duinenrij in zeewaartse richting en een hoog duinmassief landwaarts, waar Egmond aan zee tussenin ligt. Opnieuw is er gekozen om een profiel met relatief lage duinen (3800) en een profiel met relatief hoge duinen (3775) aan de analyse toe te voegen.

Het kustvak van Rijnland (kustvak 8) kenmerkt zich afwisselend door zeer brede duingebieden afgewisseld met bekende kustplaatsen tussenin. Opvallend aan deze kustplaatsen is de zeer beperkte hoogte van de waterkeringen. Dit is het resultaat van de aanwezige boulevards, duinen of hybride waterkeringen aldaar. Voor het kustvak Rijnland zijn twee profielen geselecteerd. Het eerste profiel is profiel 6625 bij Zandvoort wat, ondanks de aanwezige bebouwing, wordt gekenmerkt door een relatief hoge duinenrij (tot en met 16 m+NAP). Door de aanwezige bebouwing is de legger relatief ver zeewaarts te vinden. Het tweede profiel betreft profiel 8175 bij Noordwijk aan Zee. Dit profiel bevat een lage waterkering (slechts 8 m+NAP) vanwege de aanwezige boulevard. De legger is om dezelfde reden direct achter deze duinenrij te vinden (zie Figuur 31).

Het kustvak van Delfland (kustvak 9) lijkt erg op dat van Rijnland. Echter zijn hier minder kustplaatsen met lage waterkeringen aanwezig (enkel Scheveningen). Daarnaast vormt alleen Kijkduin nog een onderbreking van de reguliere duinwaterkeringen die potentieel mee zouden kunnen groeien met zeespiegelstijging. De profielen van Scheveningen (9975) en Kijkduin (10611) zijn dan ook de enige geselecteerde B-profielen in kustvak 9. Profiel 9975 wordt gekenmerkt door een lage waterkering (tot slechts 8 m+NAP). Ondanks het feit dat profiel 10611 een B-profiel betreft, wordt het gekenmerkt door een hoge, brede duinenrij (tot 16 m+NAP) waarachter de bebouwing terug te vinden is. Naast bovengenoemde B-profielen, zijn er voor kustvak 9 nog 3 A-profielen geselecteerd. Dit betreft 2 profielen bij Monster (11196 en 11301), ten zuiden van de zandmotor.

Profiel 11196 bestaat uit een enkele, hoge, relatief smalle duinenrij, terwijl profiel 11301 uit een breder duinmassief met 3 kruinen bestaat. De zandmotor is niet meegenomen in deze analyse, vanwege de complexe geometrie.

Omdat de belangrijkste waterkeringen in de kustvakken 7 tot en met 9 verder zeewaarts liggen dan het geval is bij de Waddeneilanden, wordt aangenomen dat het scenario Meegroeien voor de Hollandkust een stuk realistischer is dan voor de Waddeneilanden.



Figuur 31: Overzicht geselecteerde profielen in kustvakken 7-9.

B.3 Zuidwestelijke Delta (kustvakken 11 – 17)

Het gebied van de Zuidwesterlijke Delta bestaat uit kustvakken 11 (Voorne) tot en met 17 (Zeeuws-Vlaanderen), met uitzondering van kustvak 14 (Neeltje Jans). De kustvakken 10 (Maasvlakte) en 14 (Neeltje Jans) zijn daarbij buiten beschouwing gelaten. Voor elk van de kustvakken in dit gebied is slechts naar 1 profiel gekeken.

Voorne heeft geen kustplaatsen in de zeereep liggen. Het kustvak is nog steeds aan verandering onderhevig door de afsluiting van het Haringvliet. Hierdoor bouwt er langzaam een ondiepte voor de kust van Voorne op die behoorlijk wat golfenergie kan dempen. Het geselecteerde profiel (1002) kenmerkt zich dan ook door een ver uitgestrekte, ondiepe vooroever. De waterkering wordt gekenmerkt door een smalle duinenrij die tot ongeveer 11 m+NAP strekt. De legger is in de duinenrij terug te vinden.

Ook het kustvak van Goeree is nog steeds onderhevig aan veranderingen veroorzaakt door enerzijds het afsluiten van het Haringvliet in het Noorden en anderzijds het afsluiten van de Grevelingen in het Zuiden (middels de Brouwersdam). Het kustvak kent in het Noorden een smalle zeereep welke naar het westen toe onderbroken wordt door het Flauwe Werk (zeedijk). Zuidwestelijk van het Flauwe Werk is er een redelijk brede zeereep aanwezig. Vergelijkbaar met profiel 1002 (kustvak 11), kan profiel 1000 op Goeree worden gekenmerkt door een ondiepe, uitgestrekte vooroever. De waterkering wordt gekenmerkt door een dubbele duinenrij, waarvan de zeewaartse duinenrij de hoogste is (tot 14 m+NAP). De legger is tussen beide duinenrijen gesitueerd.

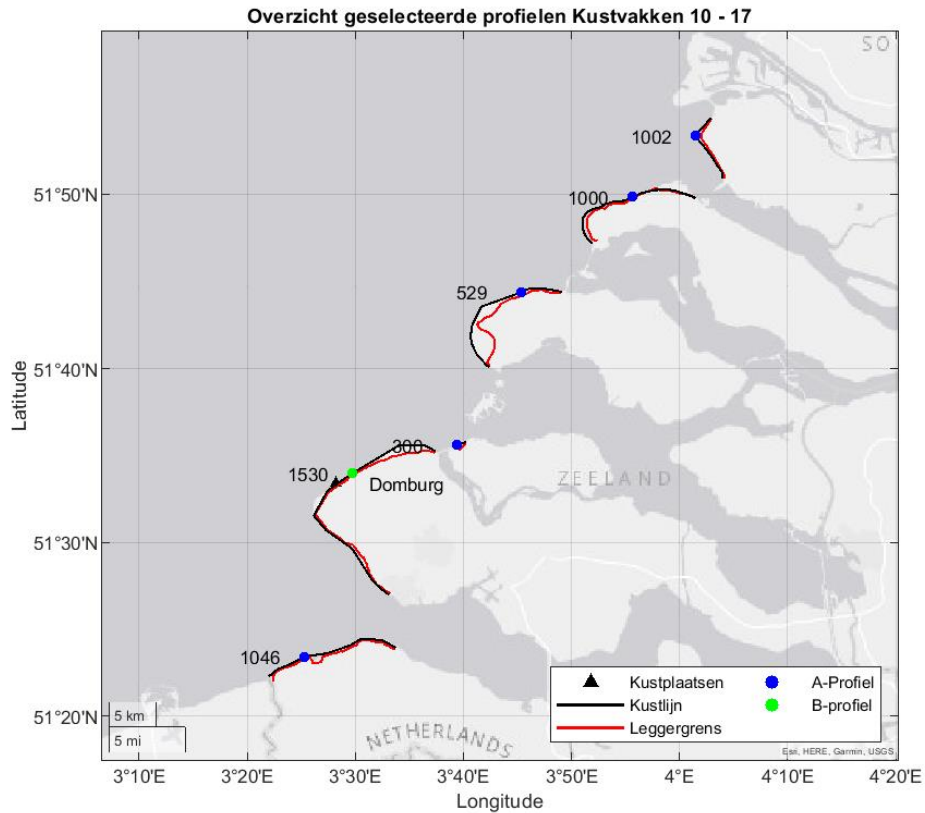
Het eiland en kustvak Schouwen (kustvak 13) kenmerkt zich door een enkele smalle zeereep in het Noorden en uitlopende en brede(re) duingebieden naar het Zuidwesten. Op Schouwen zijn geen dorpen of steden gelegen in de zeereep. Het geselecteerde profiel (529) is daarom ook een A-profiel. De waterkering is gekenmerkt door een smalle, hoge duinenrij waarachter de legger gesitueerd is. Daarvoor ligt een uitgestrekte, ondiepe vooroever die wordt onderbroken door een vaargeul (zie Figuur 32).

Het geanalyseerde profiel (300) van Noord-Beveland bestaat uit een lange vooroever, onderbroken door een diepe vaargeul vlak voor de kust. Daarachter ligt een dubbele duinenrij, waarvan de zeewaartse duinenrij slechts 5 m+NAP hoog is. De hogere duinenrij daarachter strekt tot 10 m+NAP. Noord-Beveland wordt vervolgens van Walcheren gescheiden door de Veerse Gatdam.

Op Walcheren is er in het Noorden een breed duinmassief aanwezig dat overgaat in een smalle enkele zeereep, dikwijls onderbroken met kustplaatsen in de zeereep als Domburg en Zoutelande en campings/bungalowparken gelegen in de zeereep. Bij Zoutelande wordt de kust beschermd door een harde kering. Ook is er op de Westkop van Walcheren, ter bescherming van Westkapelle een zeedijk aanwezig (Westkapelse Zeedijk). Voor Walcheren zijn dus ook diverse gebieden met B-profielen. Het geanalyseerde profiel (1530) op Walcheren betreft een B-profiel bij de kust van Domburg. Het bestaat uit een ver uitgestrekte, ondiepe vooroever. De waterkering bestaat uit een smalle, maar hoge duinreep. De top van de waterkering bevindt zich op ongeveer 14 m+NAP.

Het laatste kustvak is kustvak 17 (Zeeuws Vlaanderen). Het kustvak Zeeuws-Vlaanderen loopt van Breskens richting de Belgische grens en de Vlaamse kust. Het kustvak kenmerkt zich door een duinenkust afgewisseld met een zeedijk bij

Breskens en een bebouwde (zandige) kustzone bij Cadzand. De duinenkust tussen Breskens en Cadzand betreft veelal een enkele duinregel als waterkering. Het geanalyseerde profiel (1046) betreft een type A profiel, met een hoge waterkering (kruin van de duinen komt tot 13 m+NAP).



Figuur 32: Overzicht geselecteerde profielen in kustvakken 10 - 17. Met uitzondering van de kustvakken 10 (Maasvlakte II) en 14 (Neeltje Jans).

Bijlage C Morfologische aanpassingen profielen

In deze bijlage worden aanvullende morfologische veranderingen van de profielen beschreven die zijn toegepast tijdens het opstellen van de XBeach modellen.

C.1 Verlengen van profielen

Alvorens het toepassen van de morfologische aanpassingen wordt er gecontroleerd of het nodig is om de geselecteerde profielen aan de land- en zeezijde te verlengen. Oudere JarKus-raaien beschikken vaak over minder informatie van het profiel dan nieuwere JarKus-raaien. Het verlengen van de profielen is om twee redenen wenselijk:

1. Aan de landzijde is profielverlenging gewenst om een beter beeld te krijgen van de aanwezige sterkte van de duinen;
2. Aan de zeezijde is verlenging gewenst om de interactie tussen de golven en de bodem in XBeach beter te kunnen simuleren.

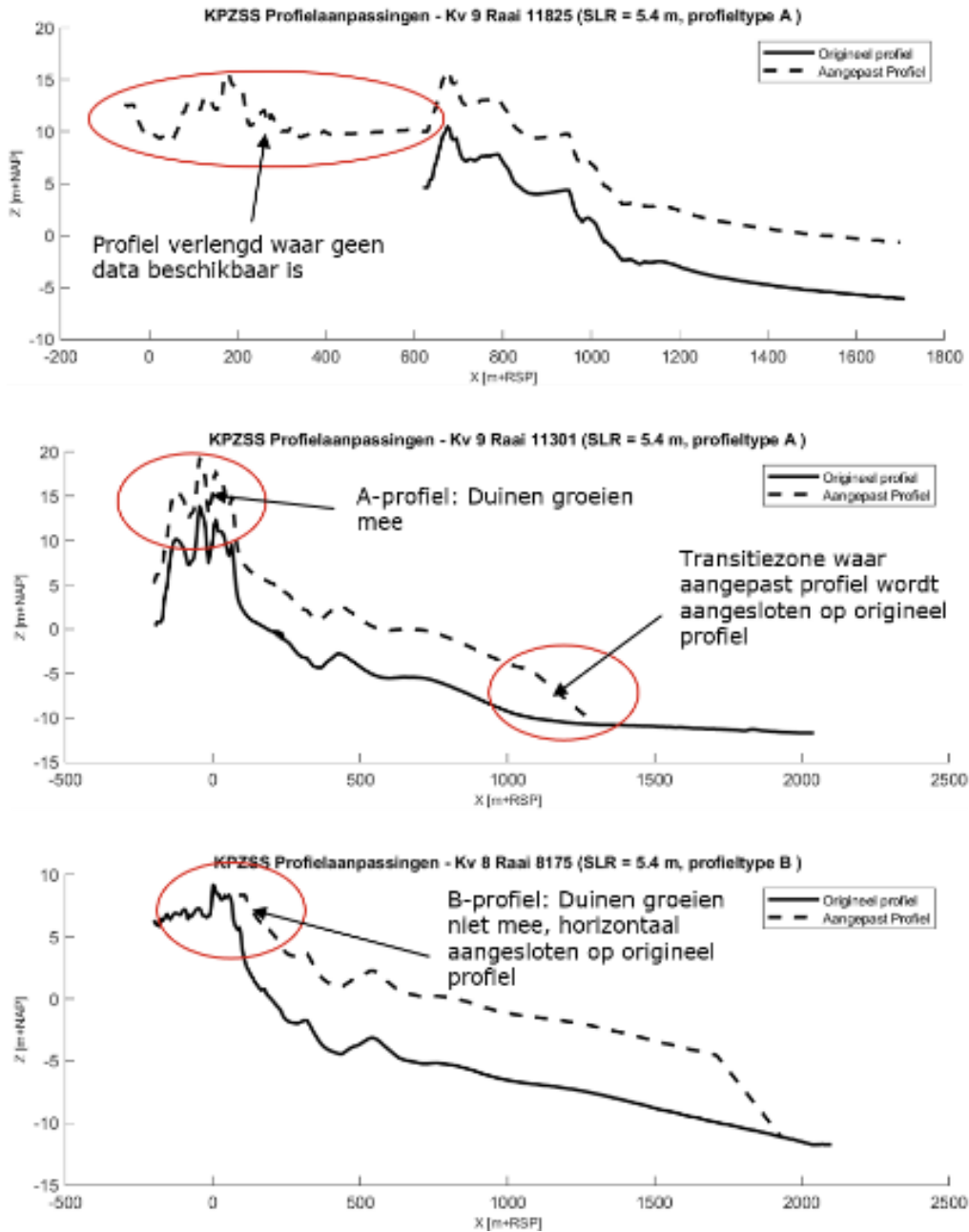
Een voorbeeld van een verlengd profiel is weergegeven in Figuur (boven).

C.2 Aansluiting profielen bij diepwaterovergang

In Wilmink & Groenewegen (2023) zijn de profielen "afgeknipt" bij de overgang naar diepwater (NAP-10m). Dit was mogelijk omdat Duros+ geen lange golven berekent en ook de fysische interactie tussen golven en bodem niet simuleert. Voor een studie in XBeach is het niet mogelijk om de kustprofielen op een dergelijke manier af te knippen omdat XBeach wel de hydrodynamische interactie tussen golven en bodem simuleert. Bij de overgang van de actieve zone naar diep water (NAP – 10m) wordt een transitiezone ingevoerd gebaseerd op een vergelijkbare methode gehanteerd bij het KP-ZSS thema zandige kust (Taal, et al., 2023). In deze transitiezone wordt de aangepaste actieve zone van het profiel over een horizontale afstand van 200 meter aangesloten op het originele profiel. Zie Figuur (midden) voor een illustratie.

C.3 Aansluiting B-profielen bij duinovergang

Omdat bij B-profielen de duinen niet mee groeien, kan er een discontinuïteit ontstaan in het profiel bij de overgang tussen de actieve zone en de duinen (NAP+3m in de originele profielen). Om deze discontinuïteit te voorkomen, wordt het profiel bij deze overgang als horizontaal aangenomen. Zie Figuur (onder) voor een illustratie.



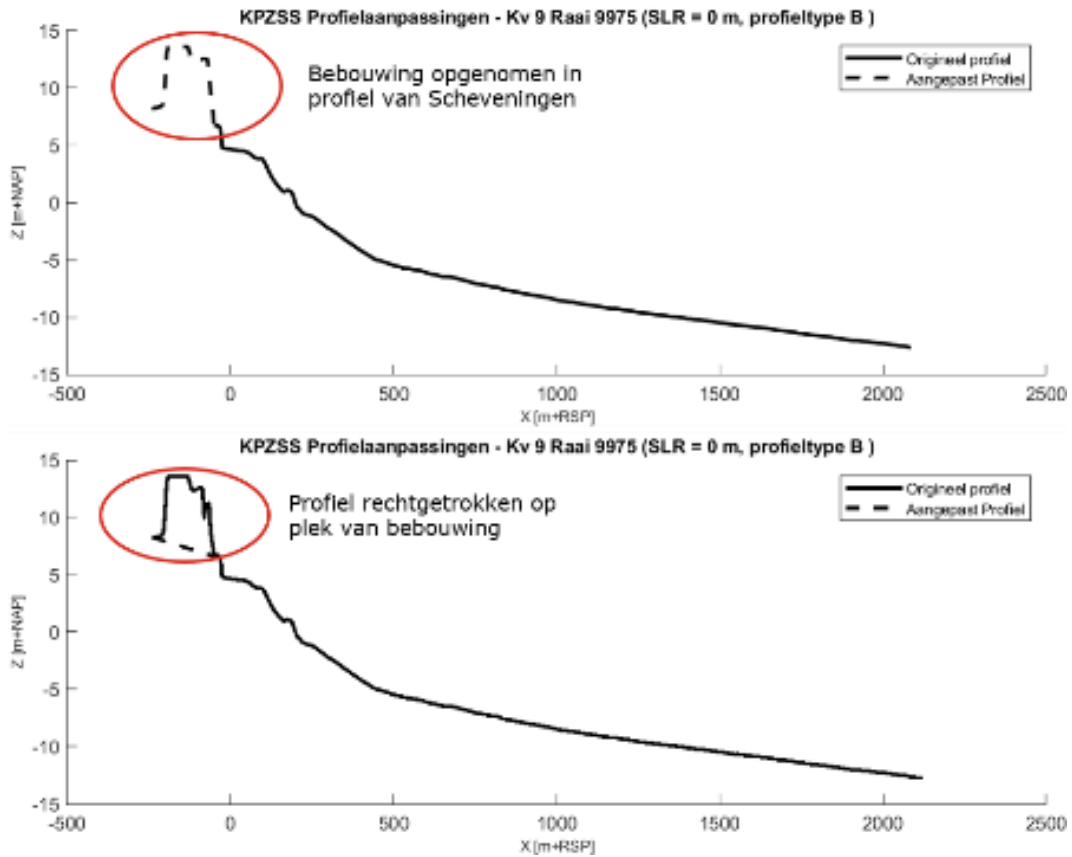
Figuur 36: Voorbeelden van de morfologische aanpassingen. Locaties van de profielen zijn Hoek van Holland (boven), Monster (midden) en Noordwijk aan Zee (onder).

C.4 Extra aanpassingen Scheveningen

Naast de algemene aanpassingen van de profielen, dient er extra aandacht besteed te worden aan het profiel van Scheveningen (kustvak 9 – profiel 9975). Bij het verlengen van het profiel aan de landzijde, is daarbij de bebouwing op de pier opgenomen in het profiel, zie Figuur . De bebouwing valt met name op door de verticale sprongen in het profiel. XBeach maakt geen onderscheid tussen duinen en

bebouwing, dus zal de bebouwing meegenomen worden in de sterkte van het profiel wat tot onbetrouwbare resultaten zal leiden.

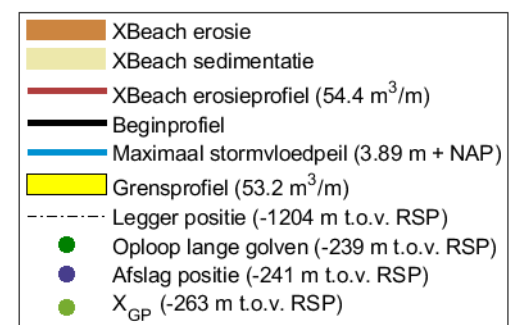
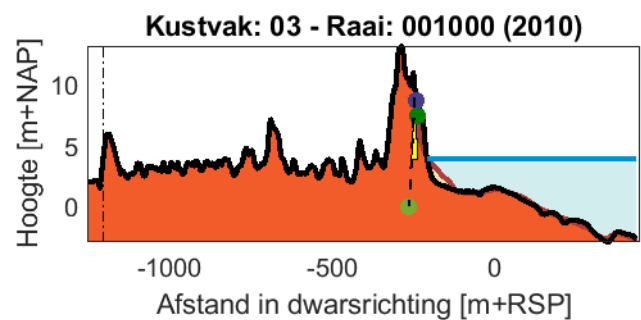
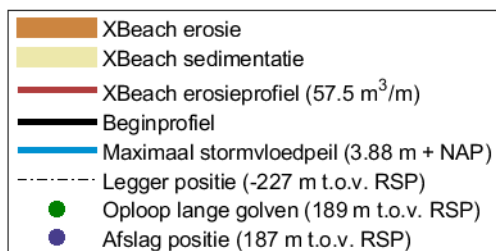
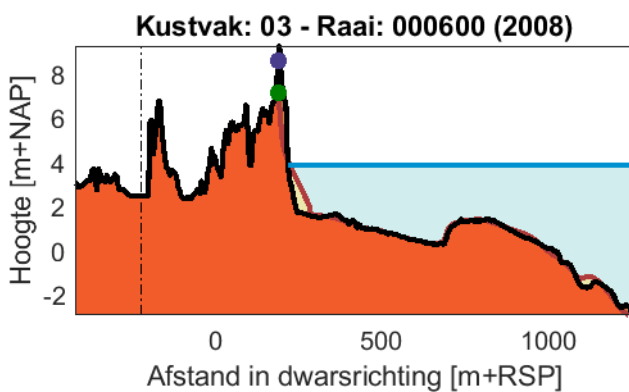
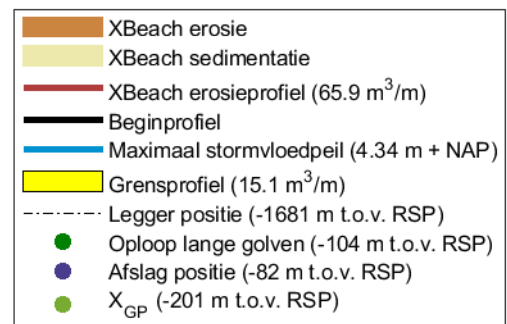
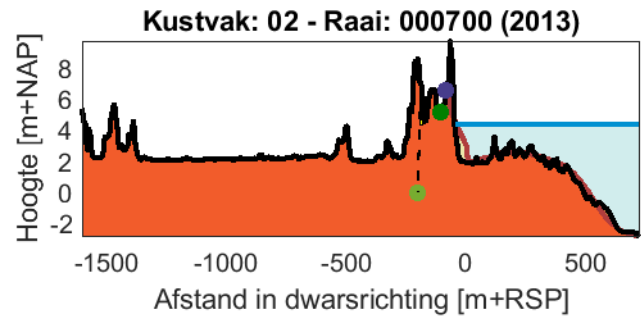
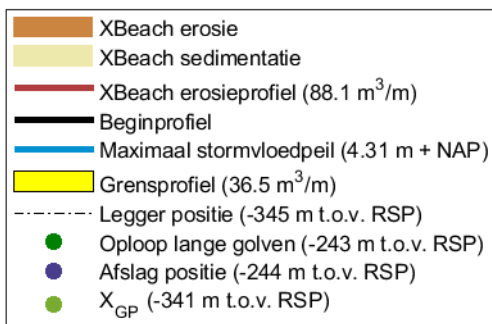
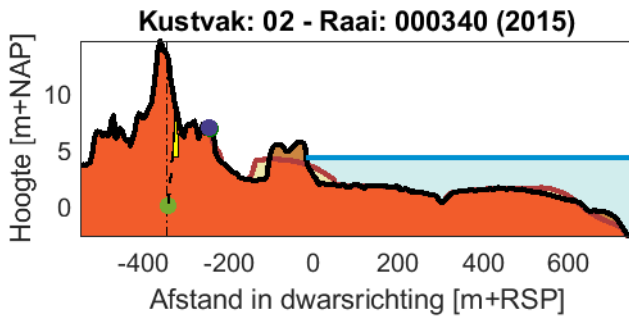
Om die reden dient de bebouwing weggehaald te worden uit het profiel. Dat is gedaan door het profiel aan de zeezijde en landzijde van de bebouwing met elkaar te verbinden door middel van lineaire interpolatie, en de tussen gelegen profielpunten van de bebouwing te verwijderen, zie Figuur .

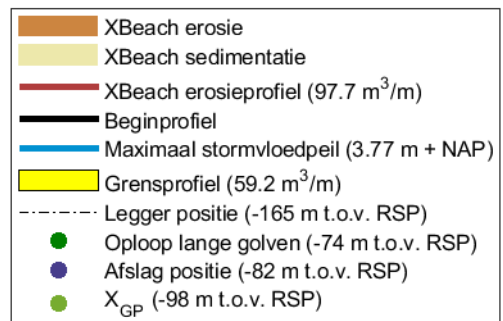
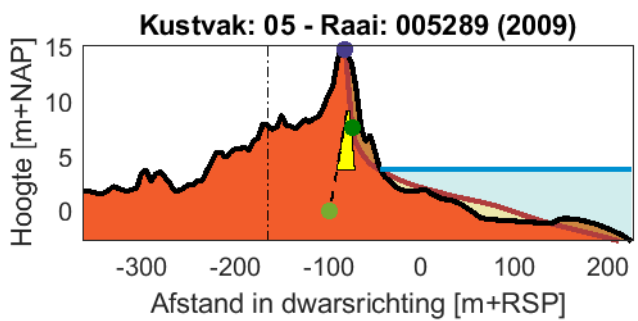
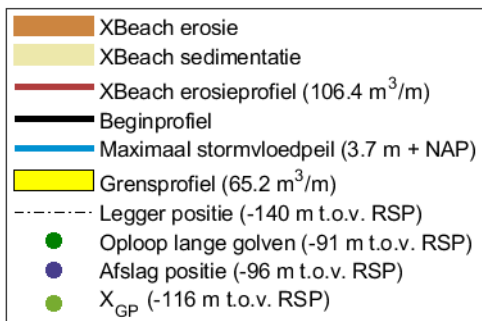
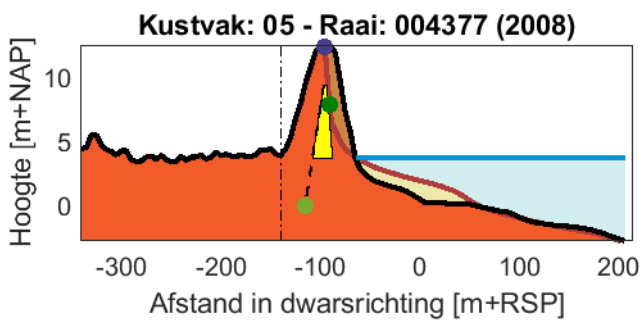
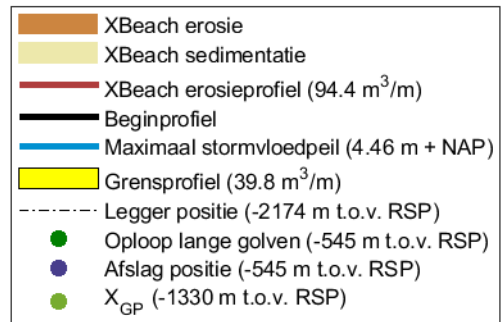
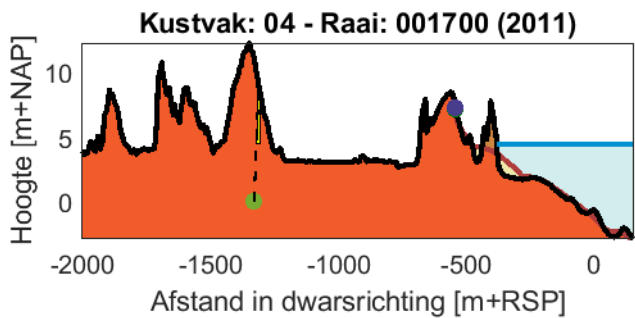
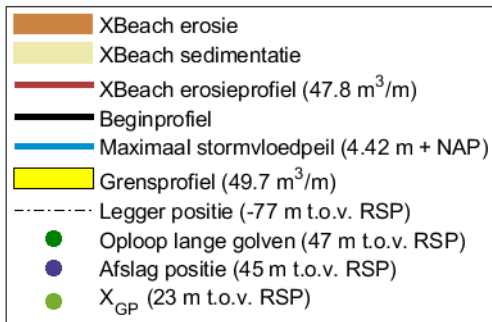
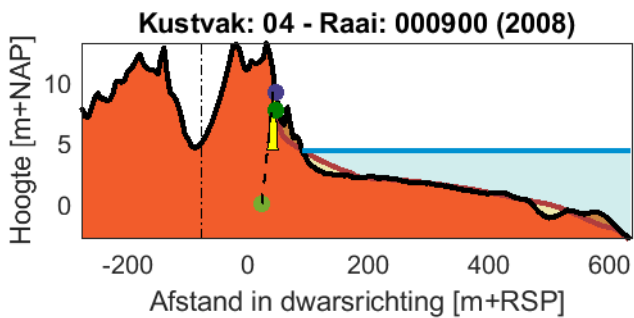


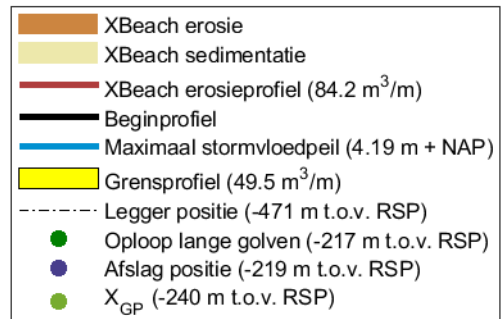
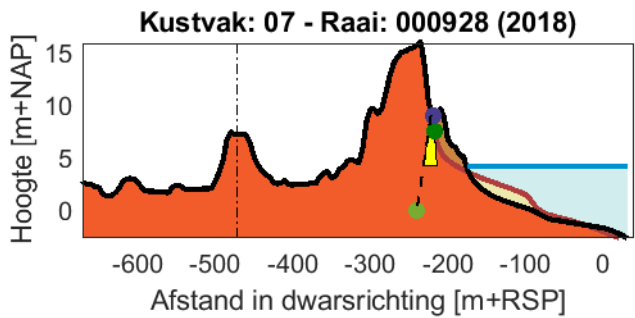
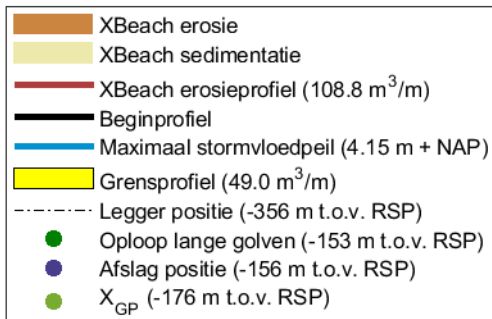
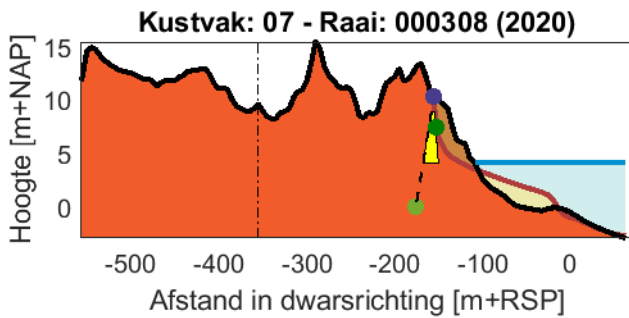
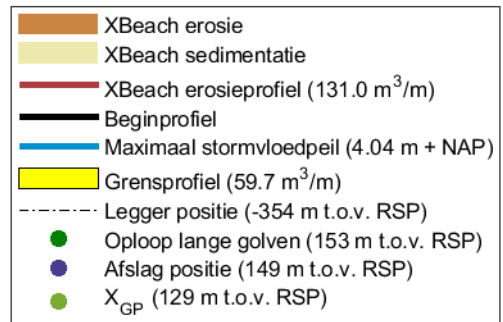
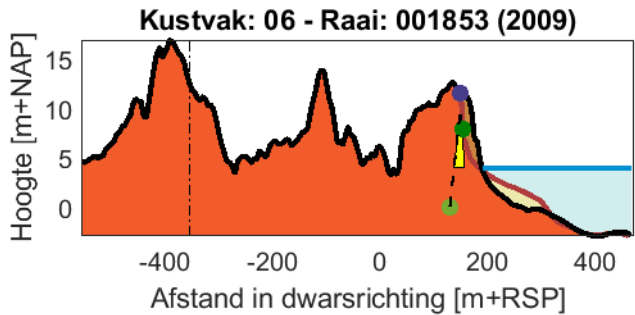
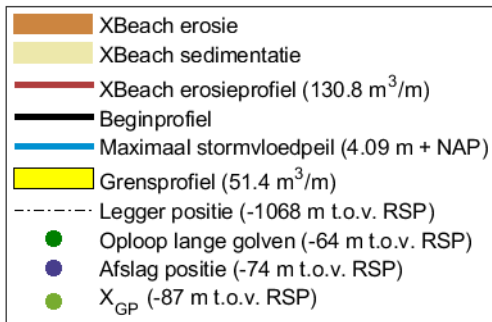
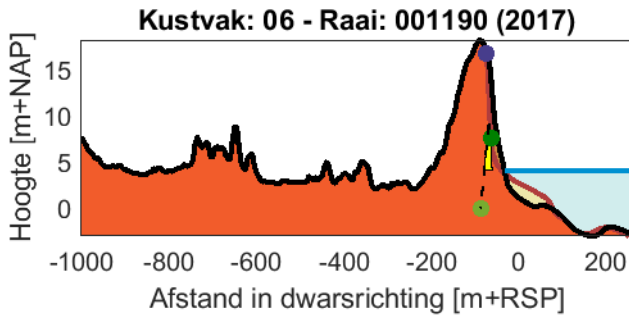
Figuur 37: Profielaanpassingen bij profiel van Schevevingen (kustvak 9 - profiel 9975). Boven laat het profiel zijn na verlenging met AHN data. Onder laat het profiel na verwijdering van de bebouwing zien.

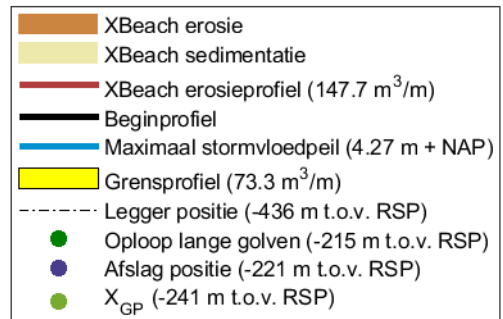
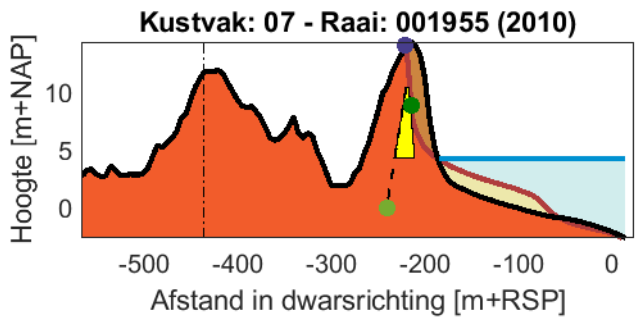
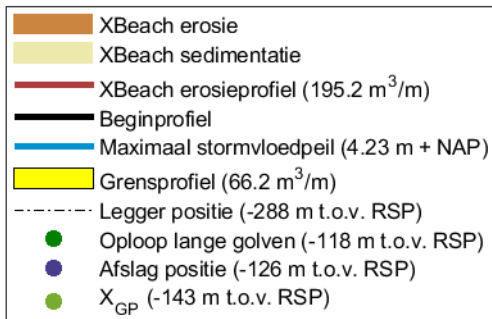
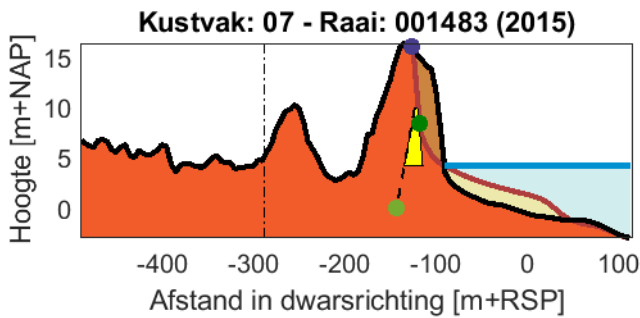
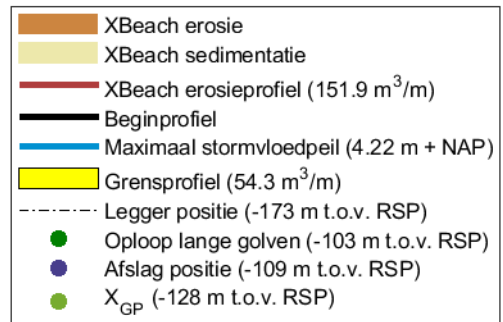
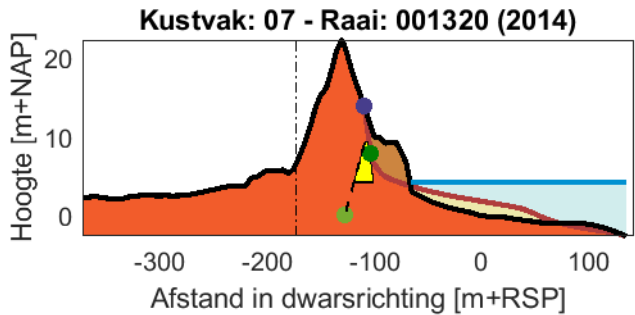
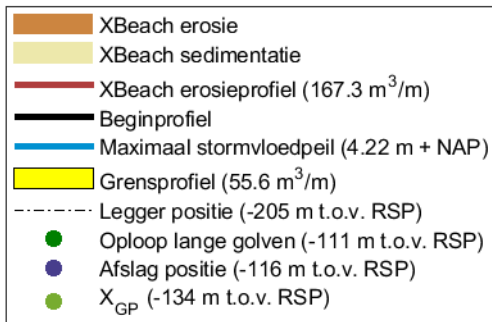
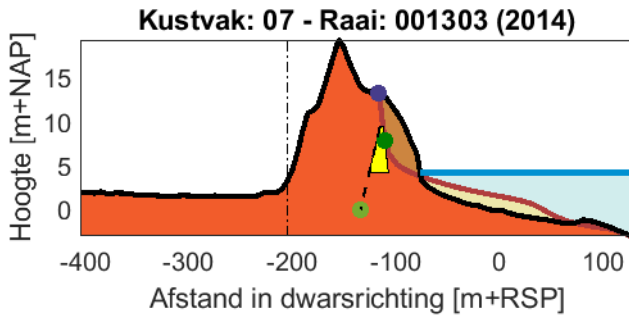
Bijlage D Profieldoorsneden XBeach Simulaties

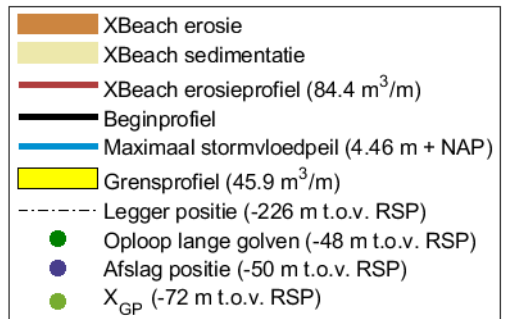
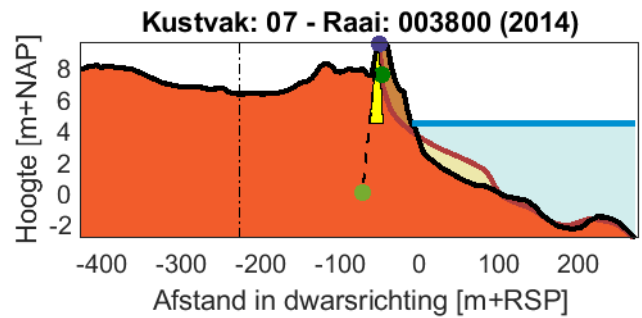
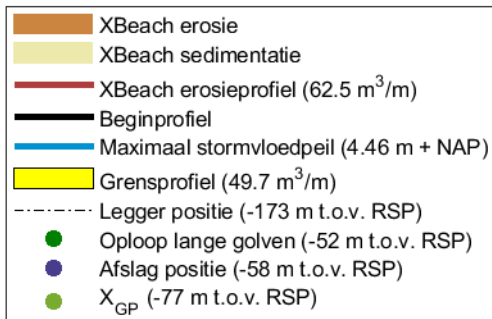
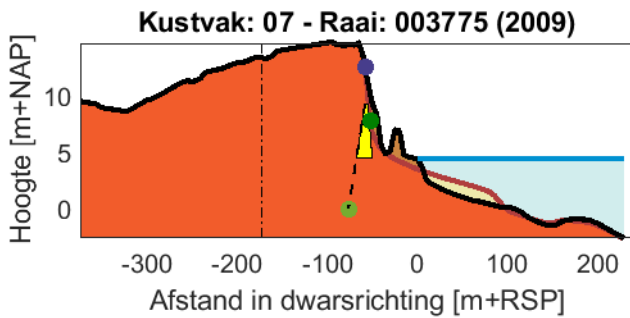
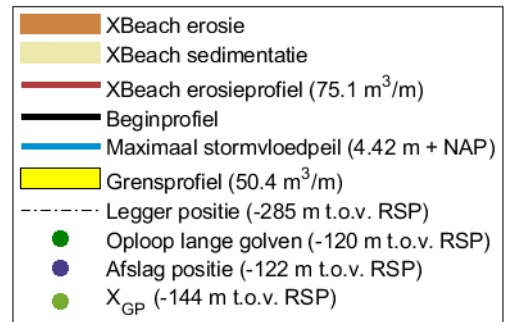
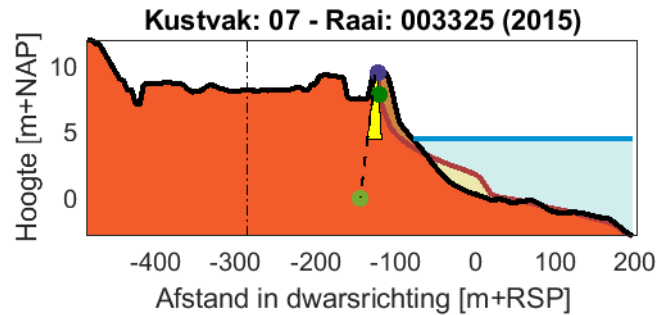
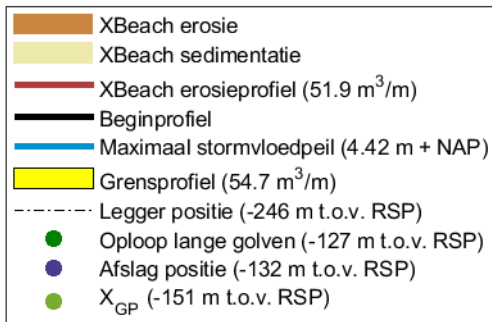
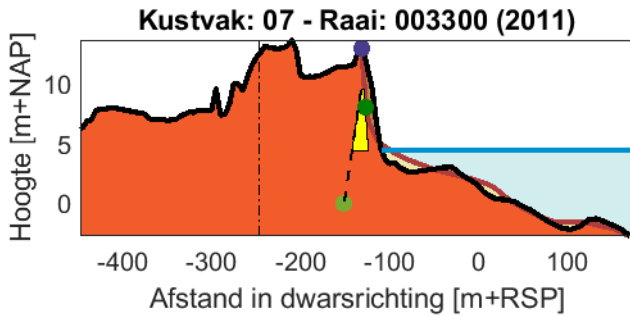
D.1 Referentiesituaties (0m zeespiegelstijging)

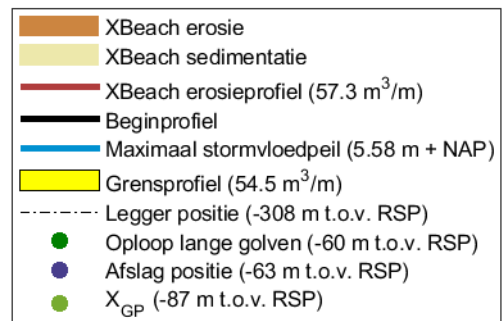
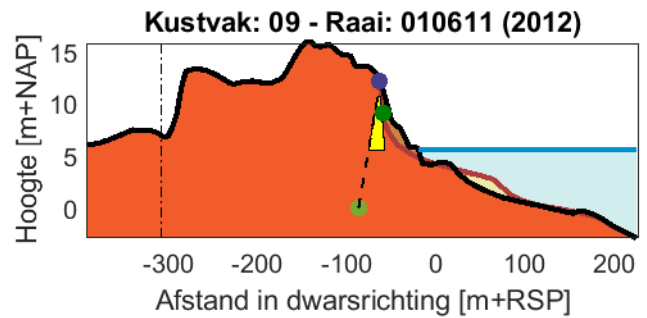
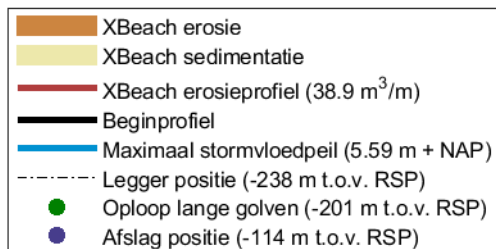
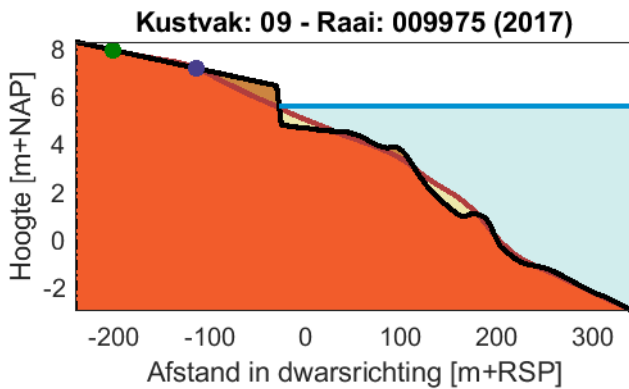
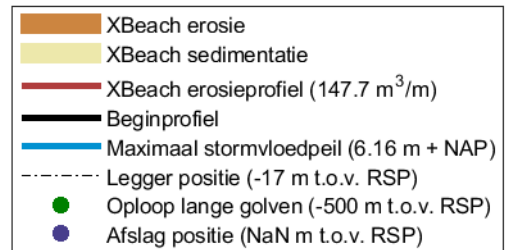
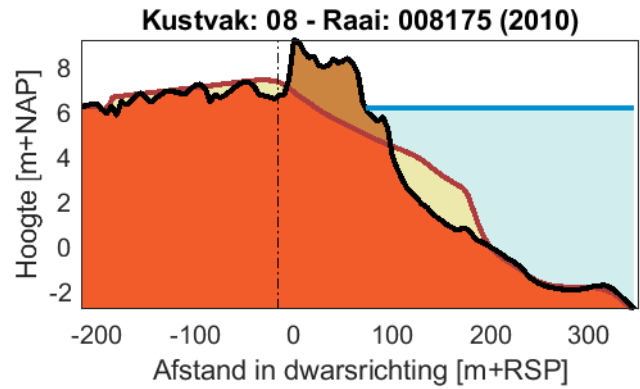
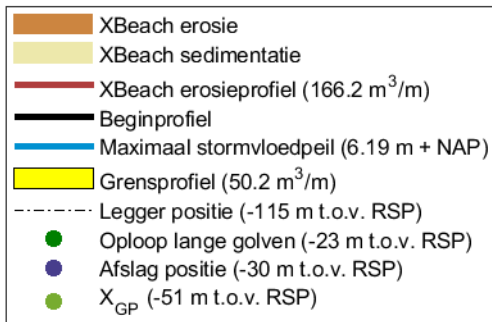
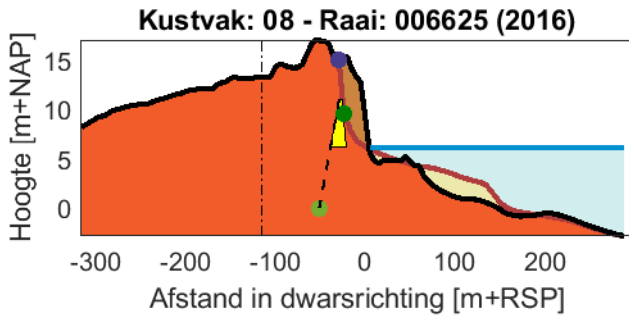


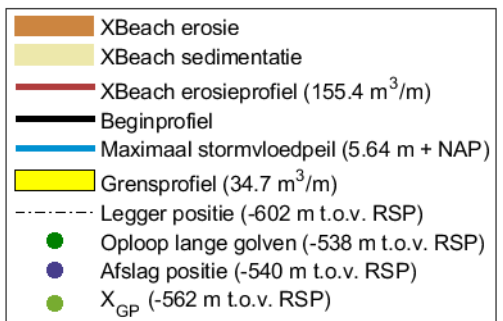
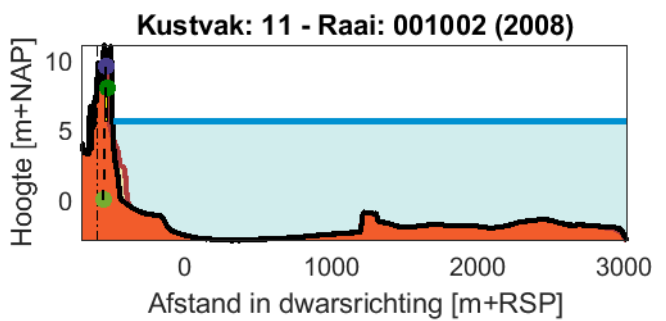
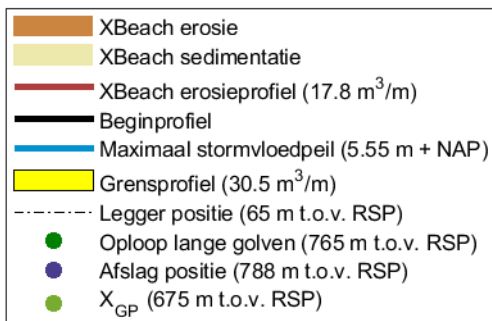
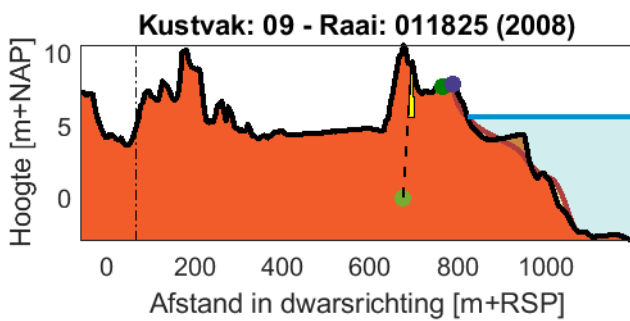
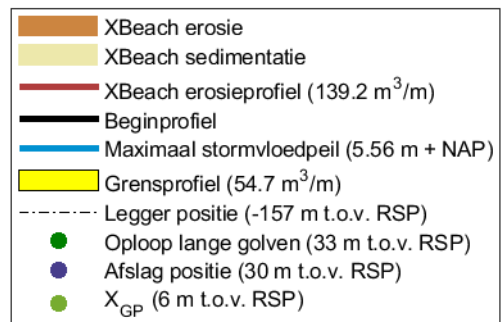
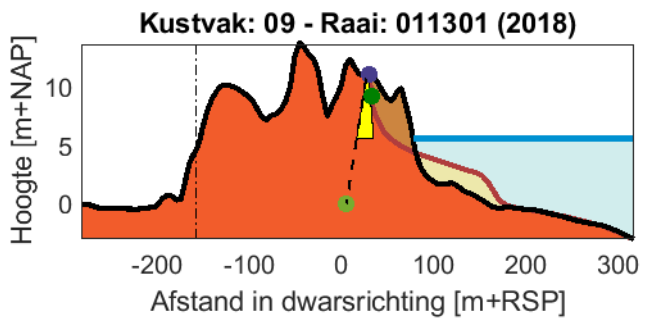
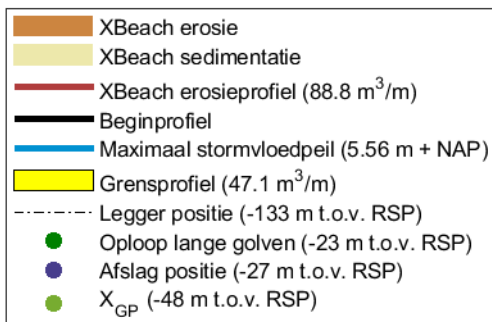
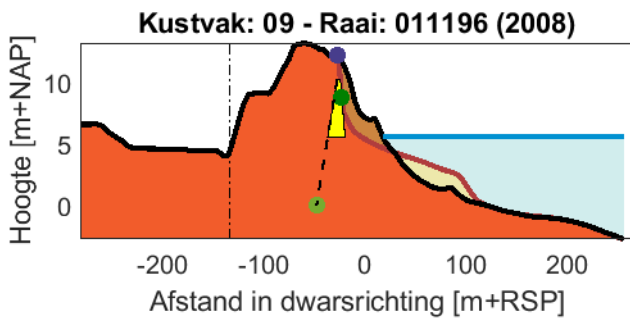


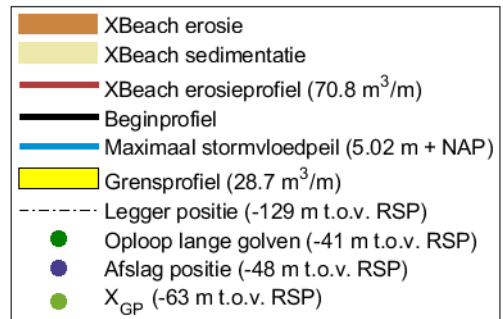
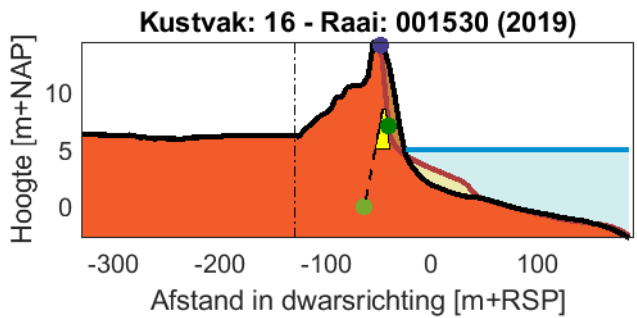
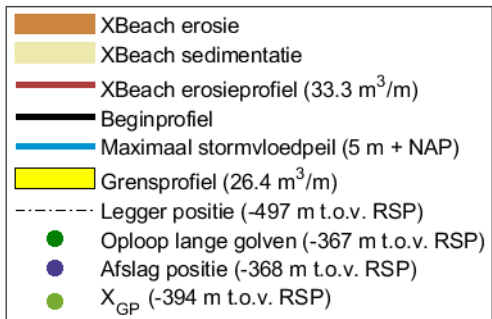
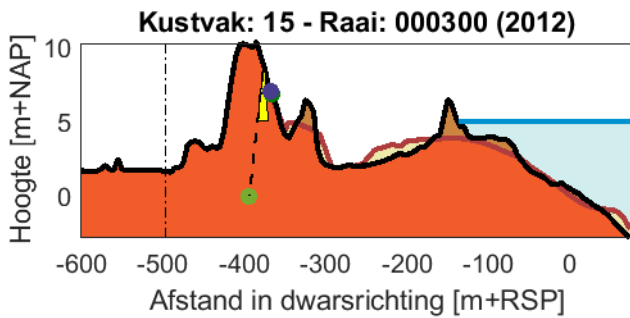
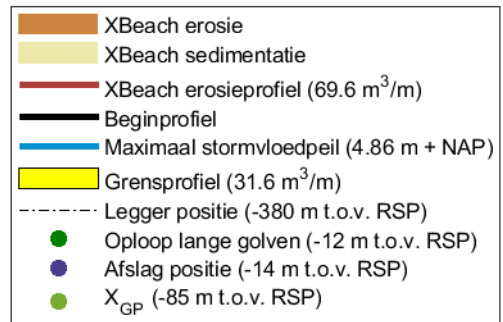
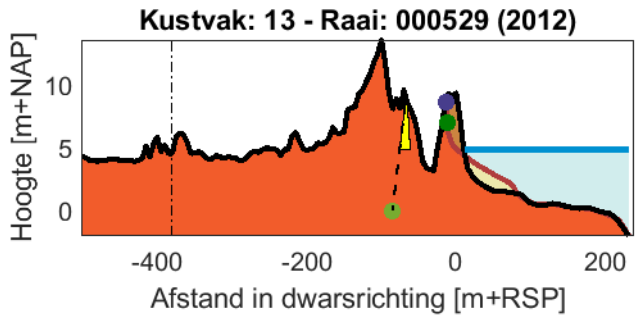
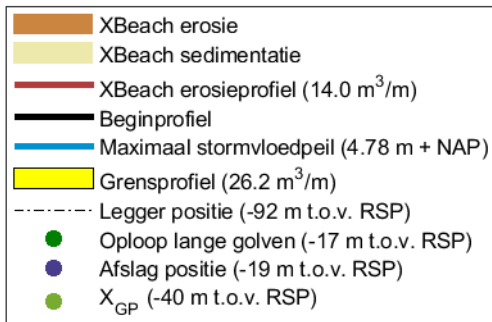
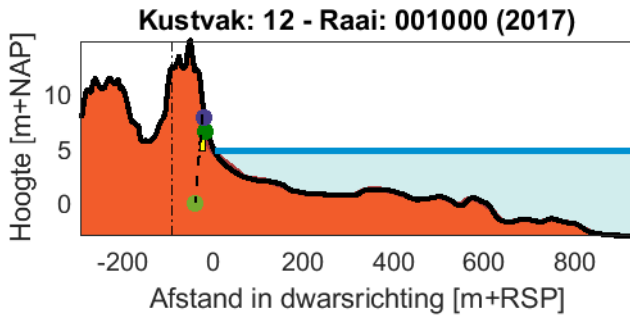


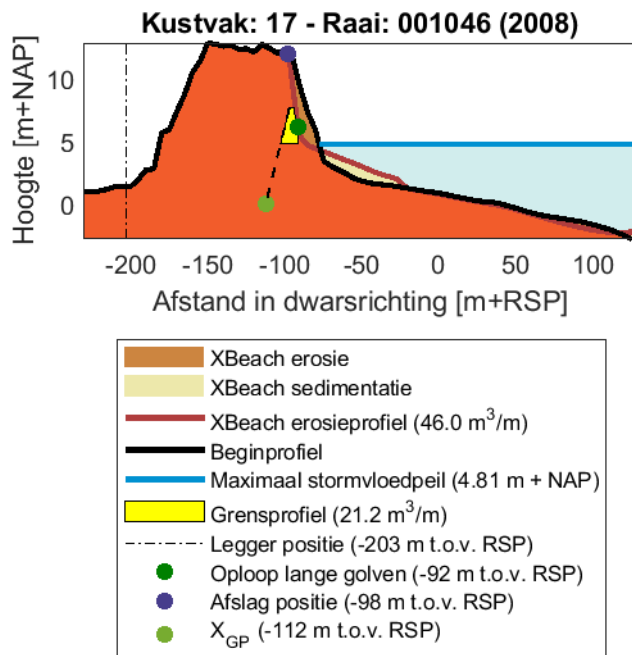




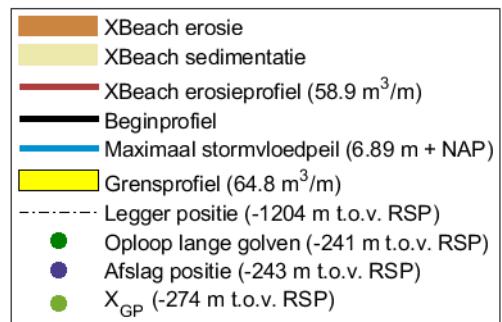
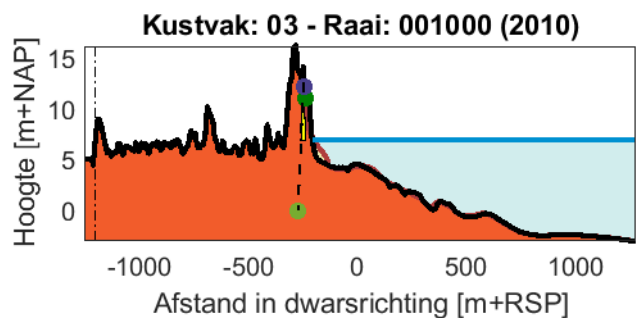
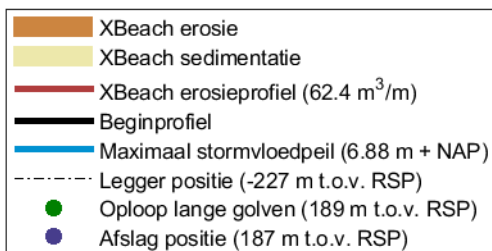
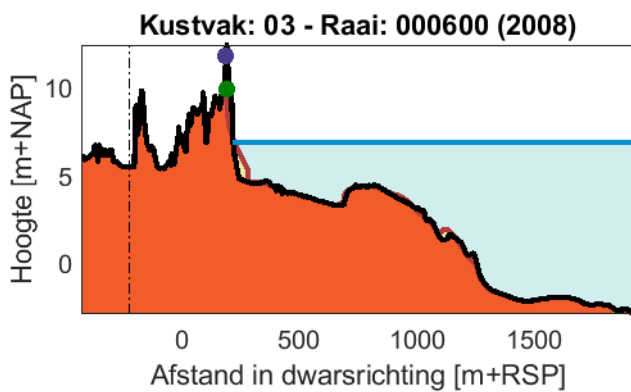
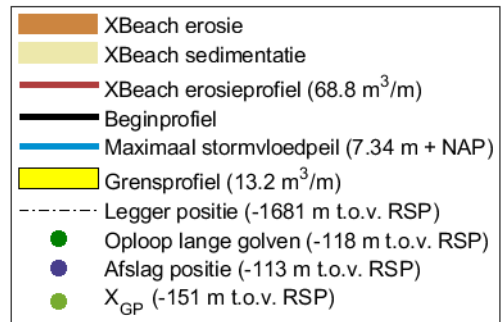
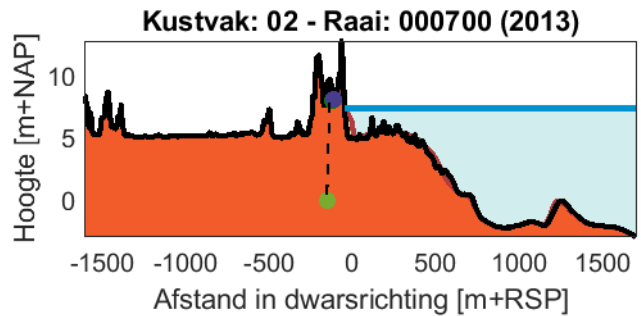
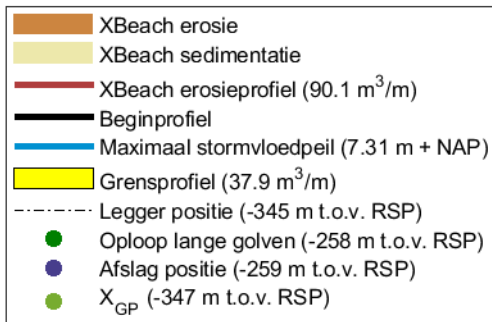
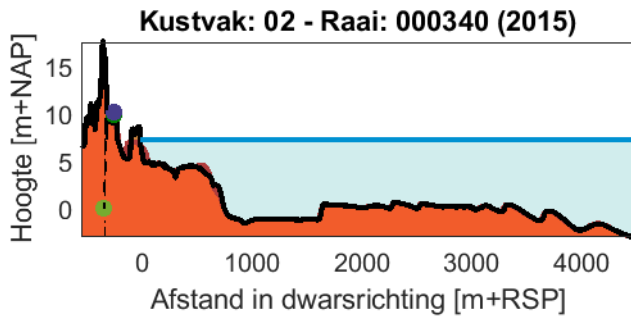


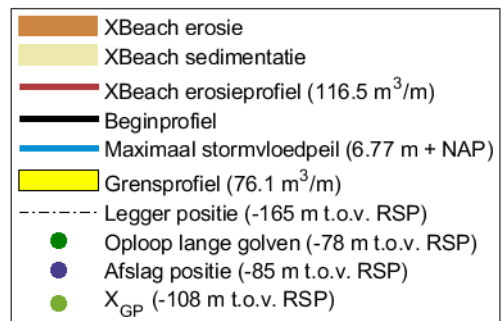
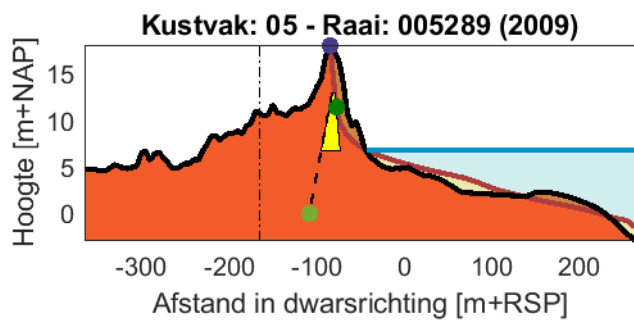
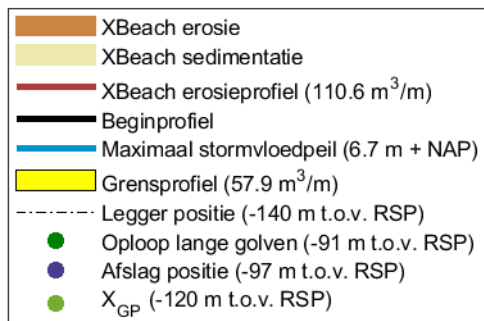
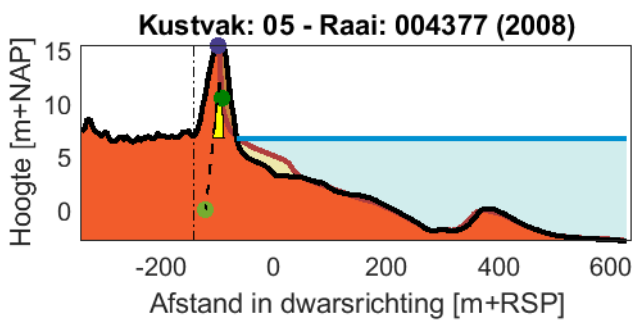
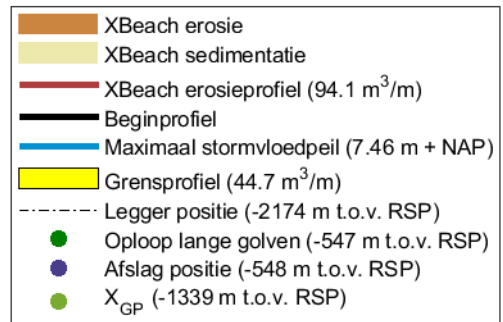
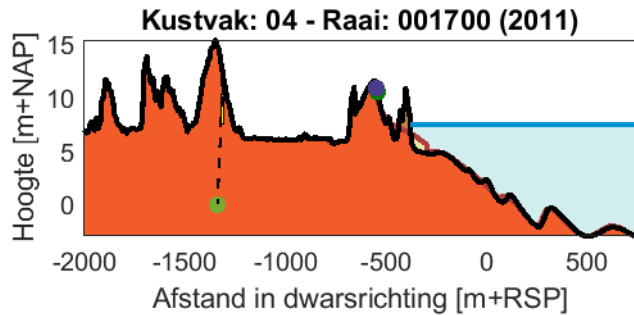
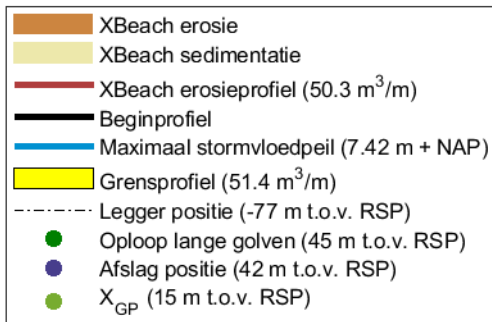
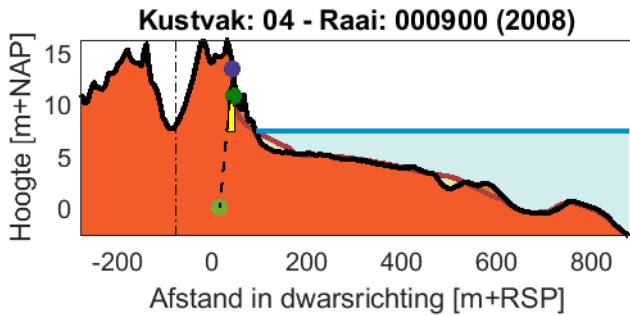


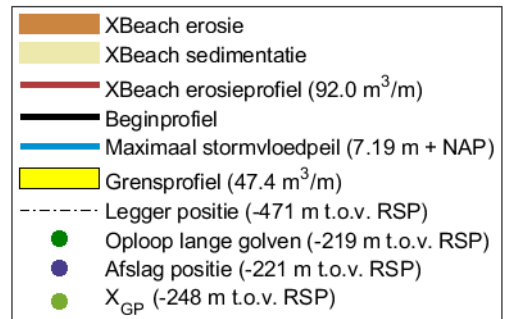
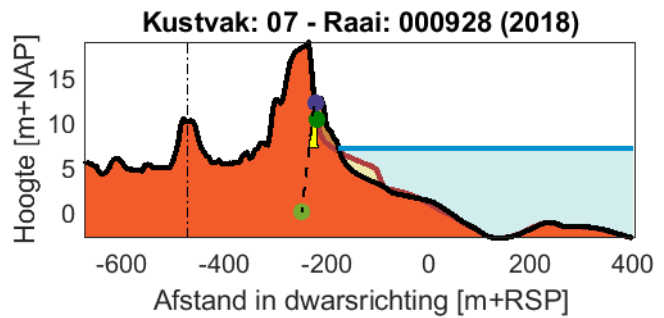
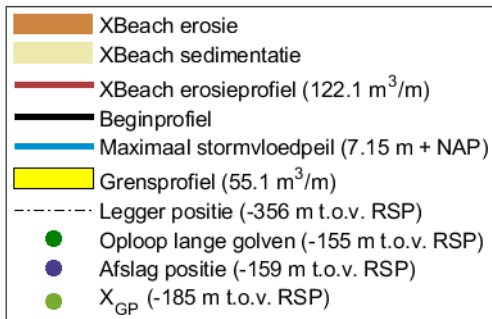
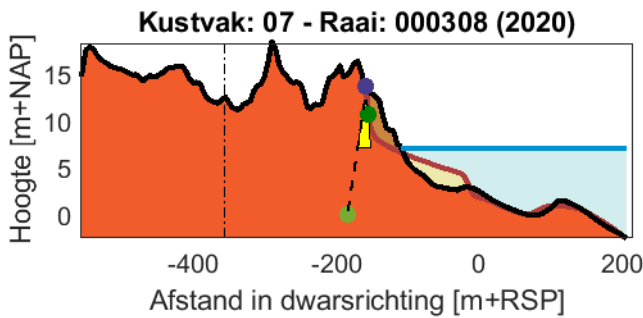
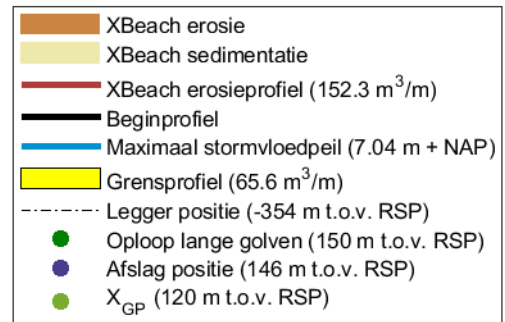
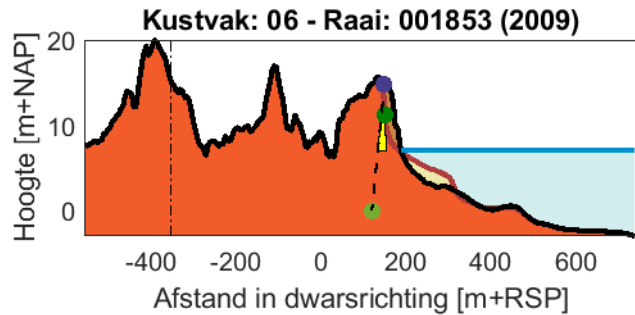
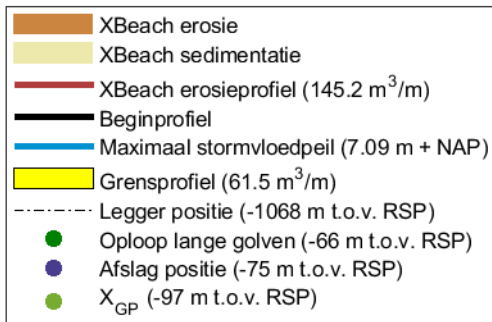
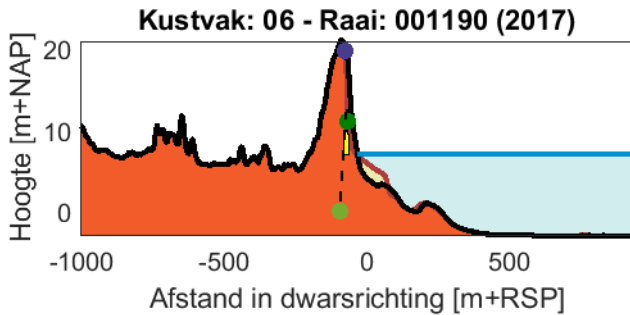


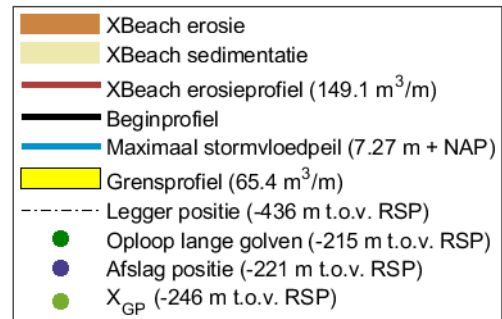
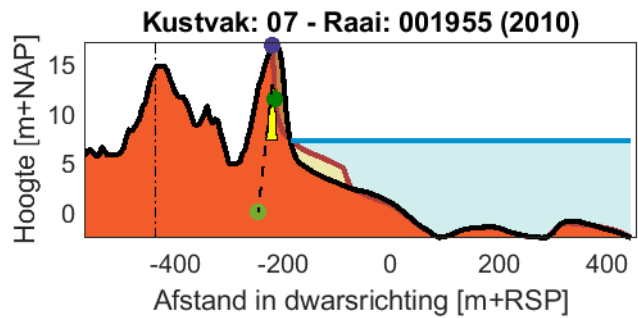
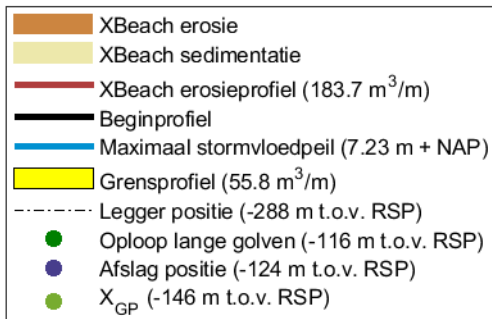
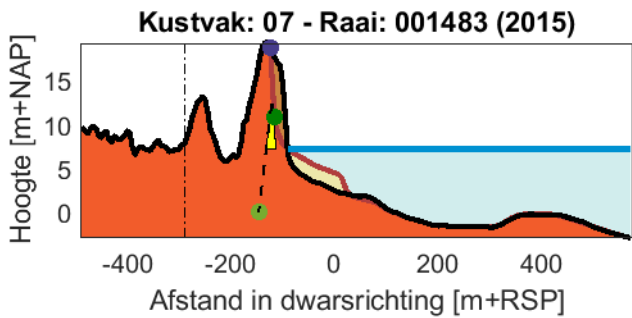
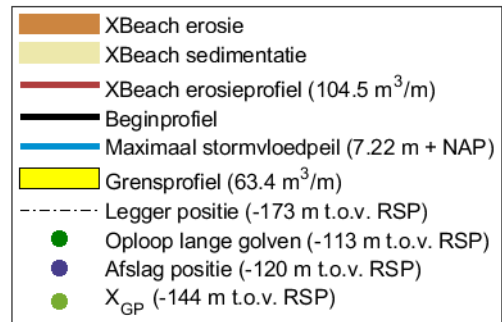
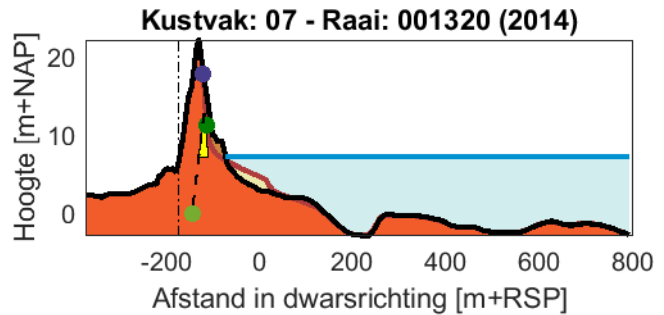
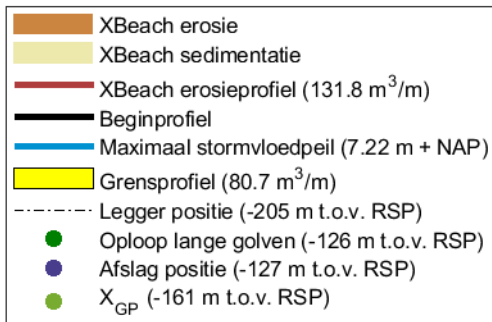
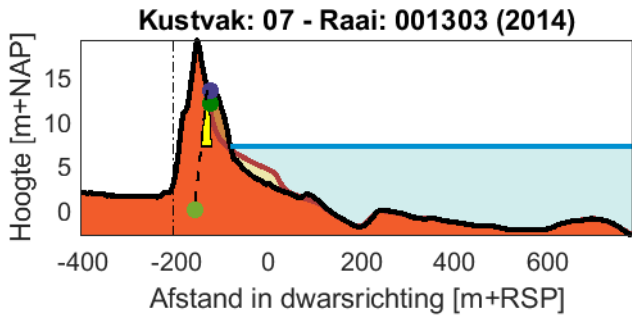


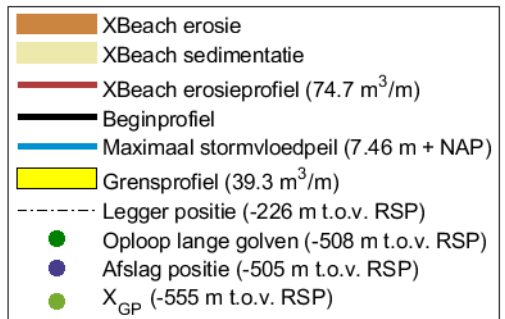
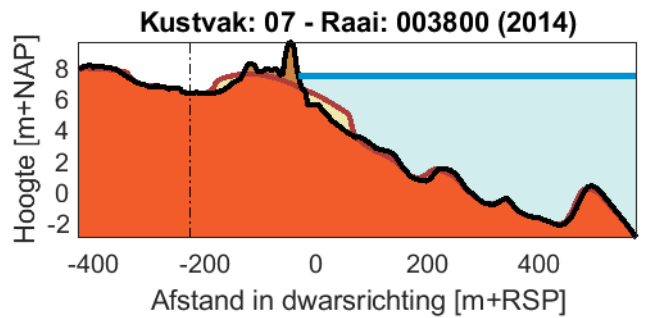
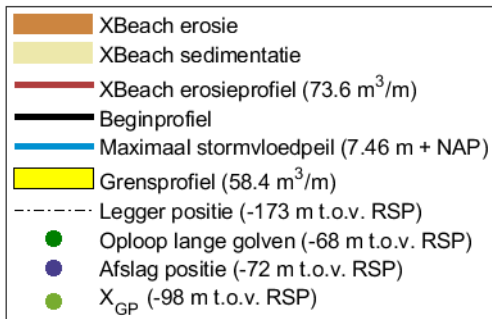
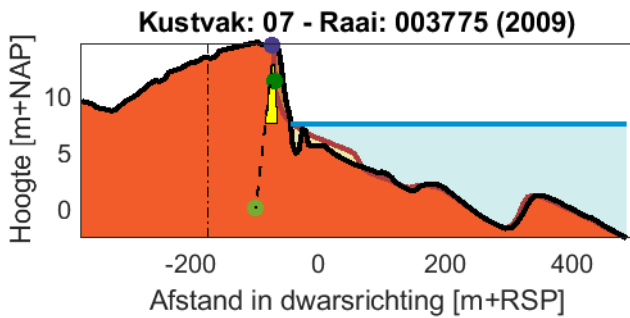
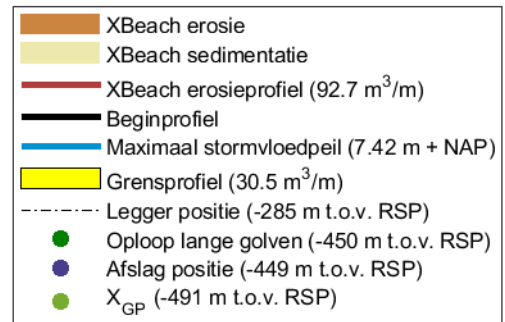
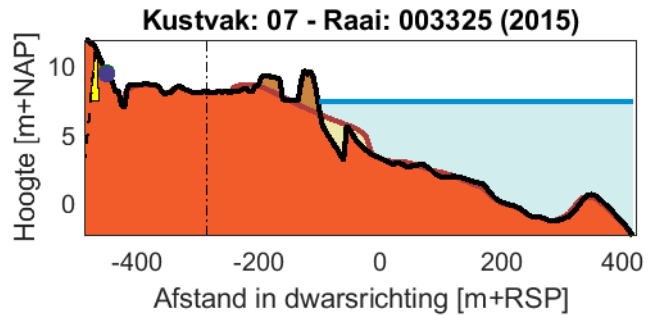
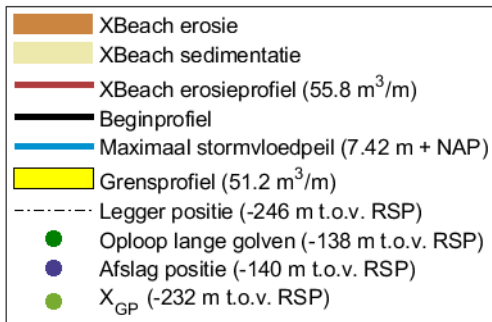
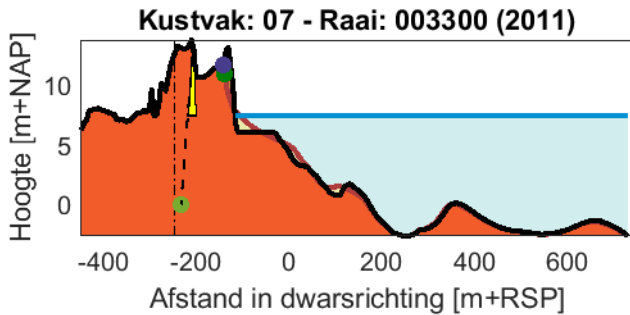
D.2 Meegroeien – 3m zeespiegelstijging

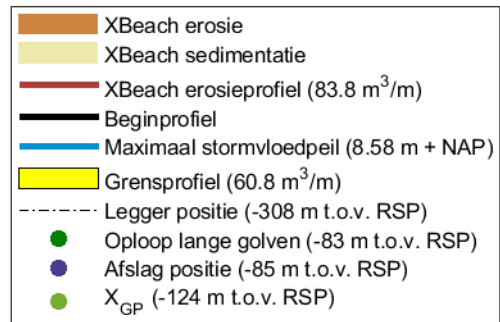
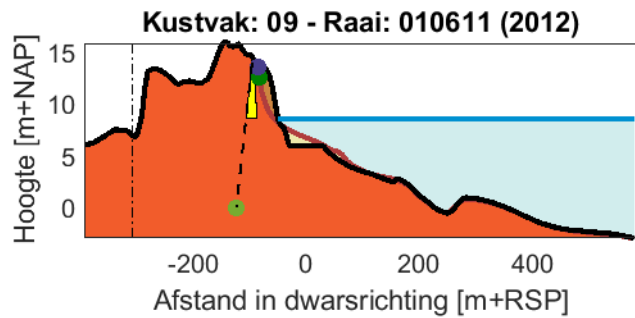
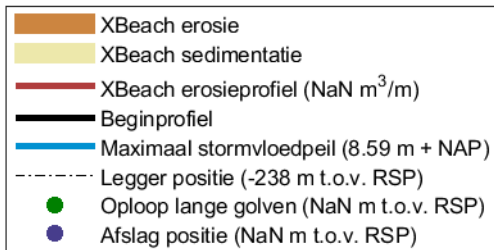
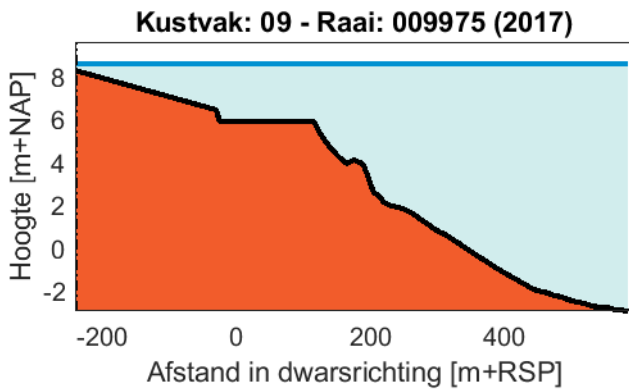
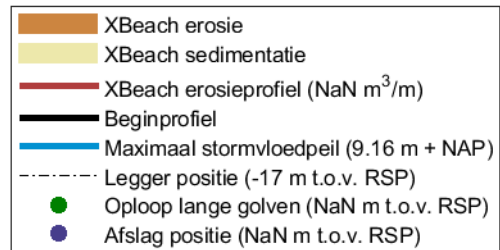
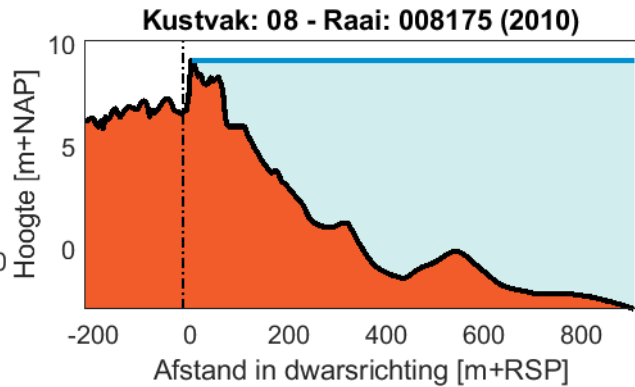
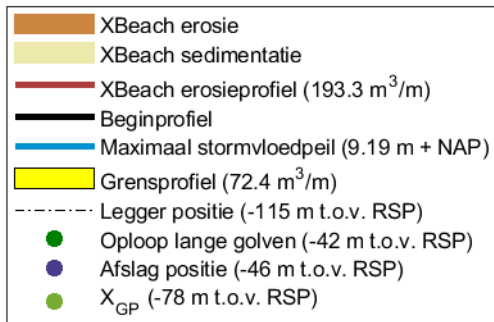
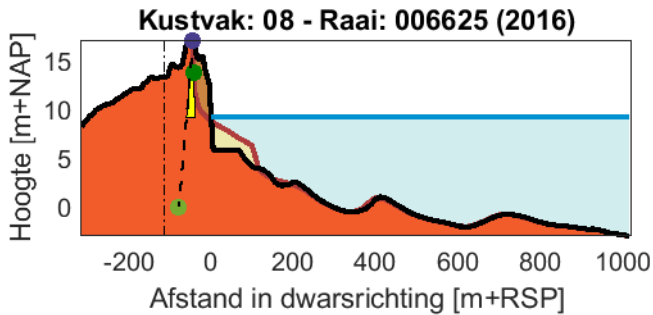


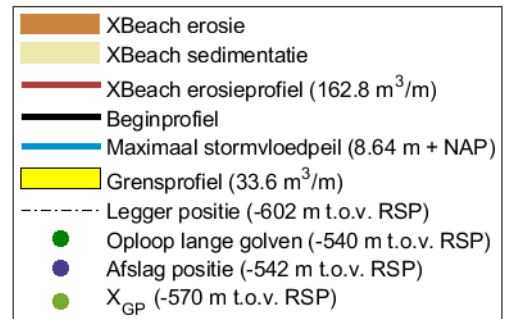
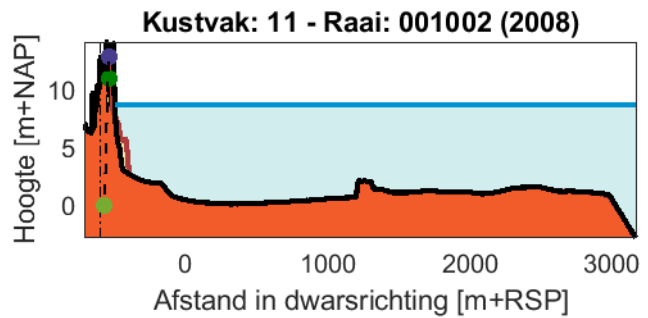
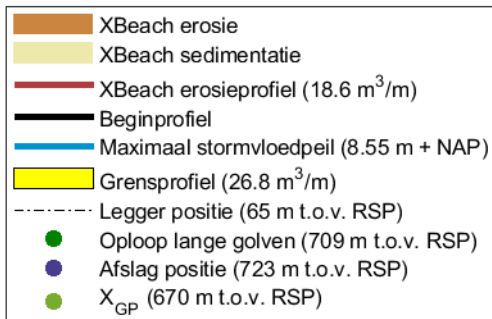
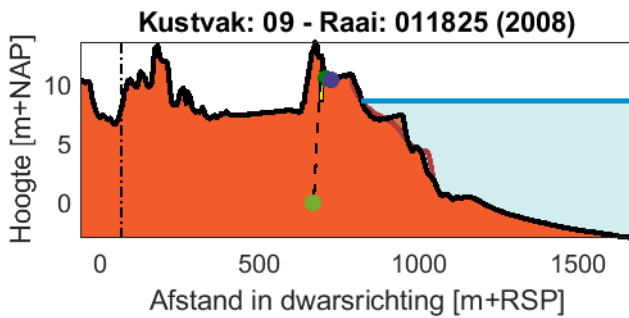
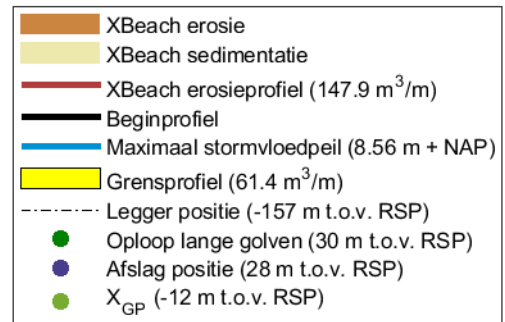
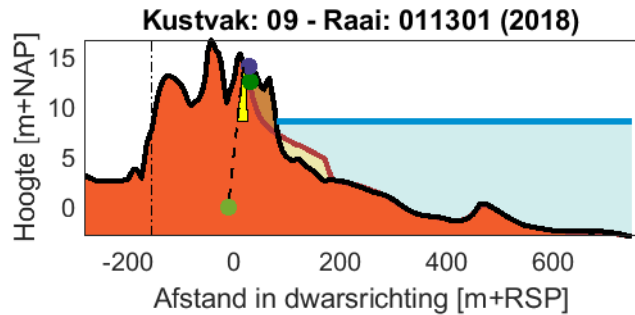
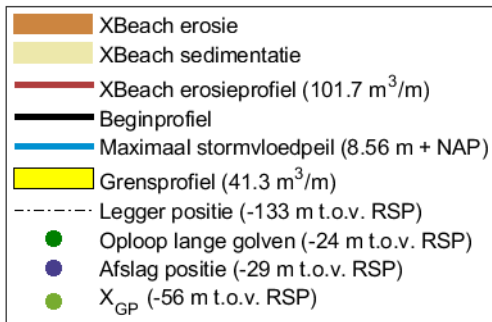
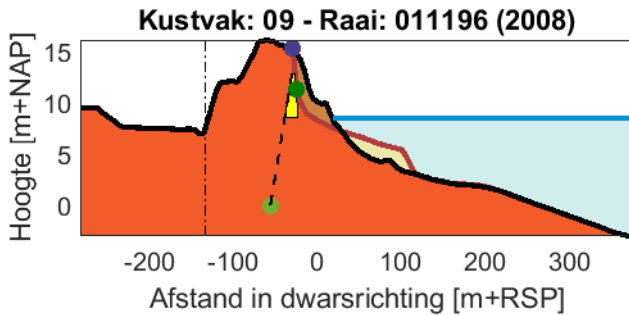


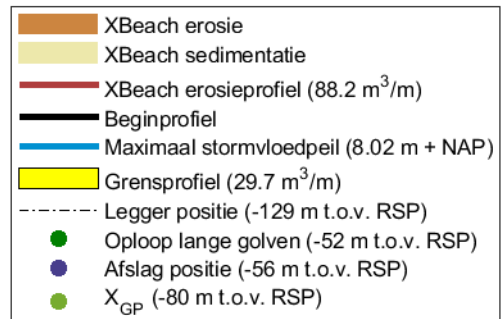
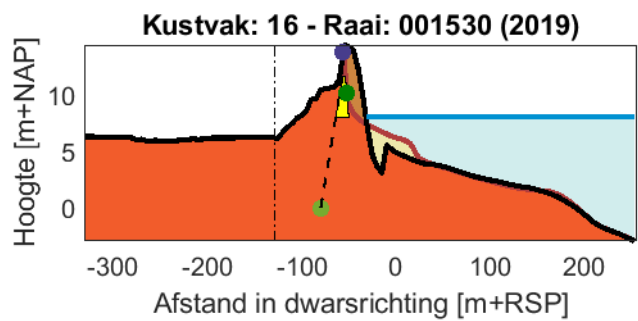
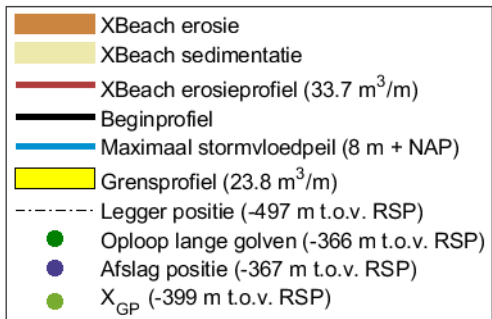
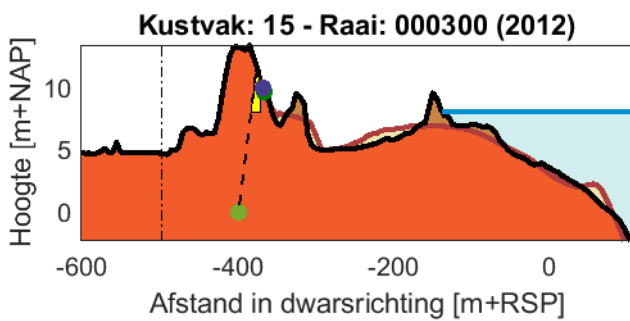
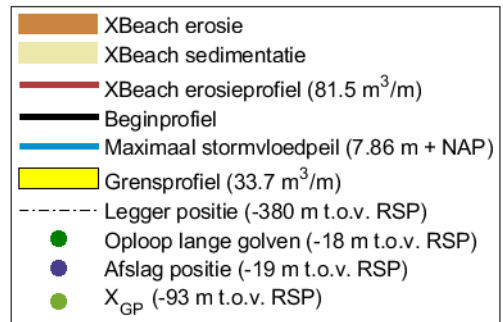
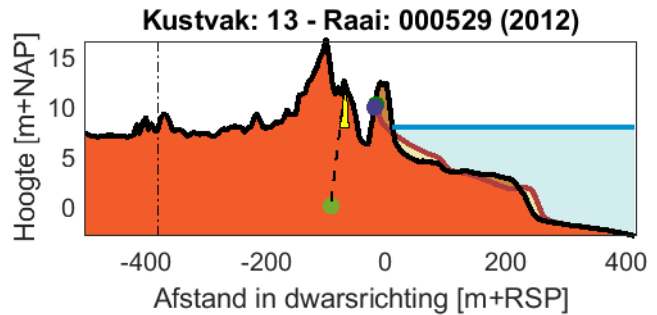
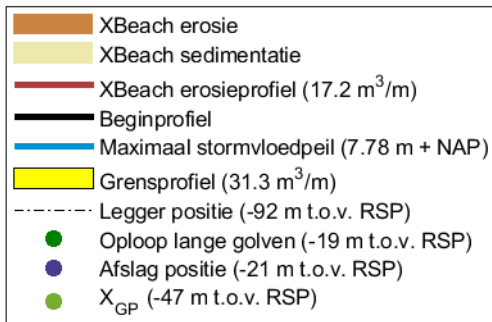
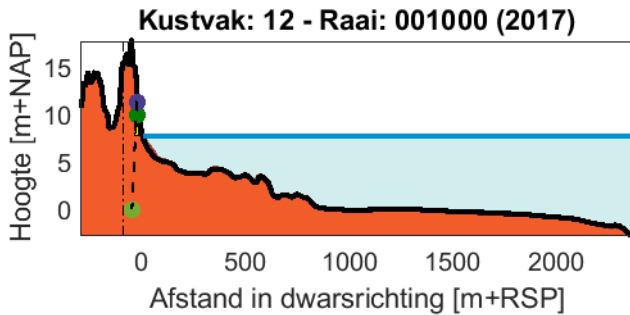


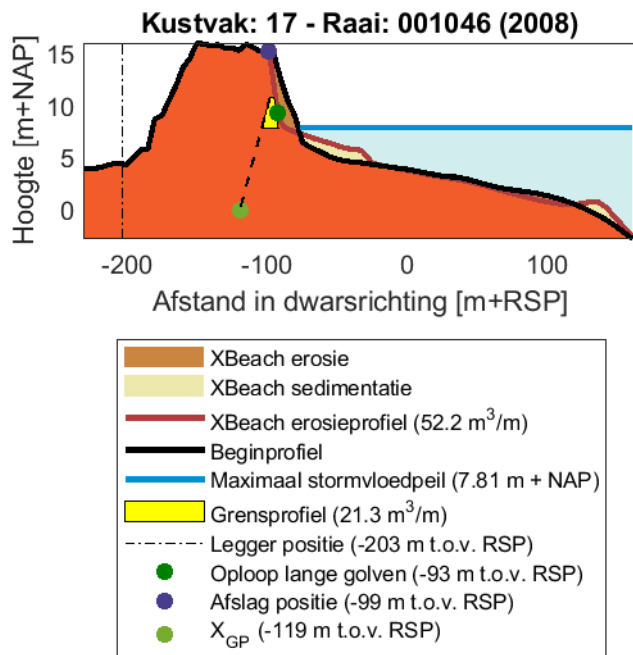




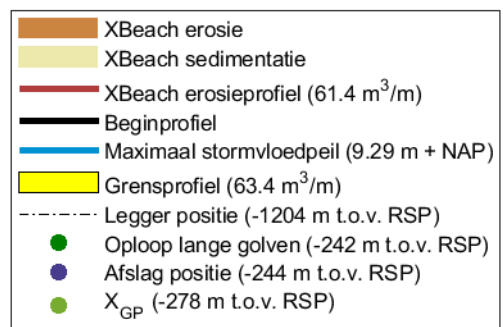
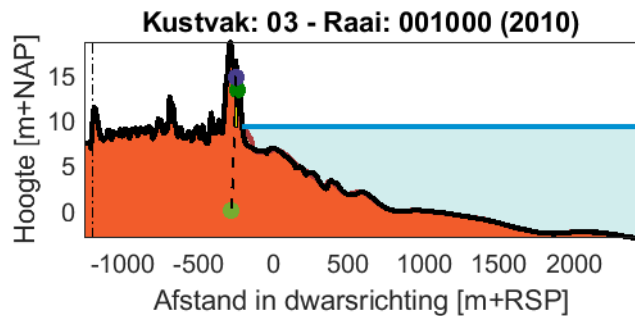
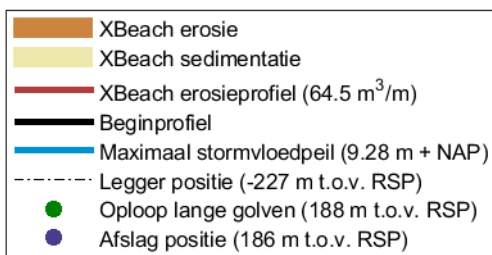
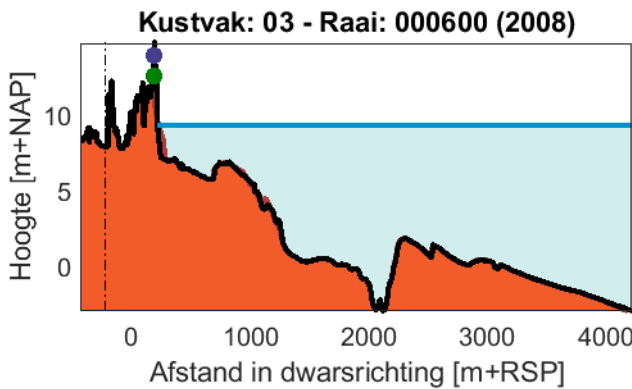
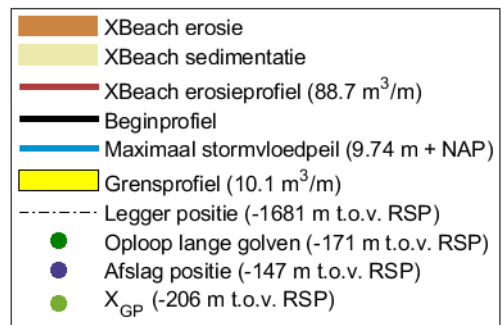
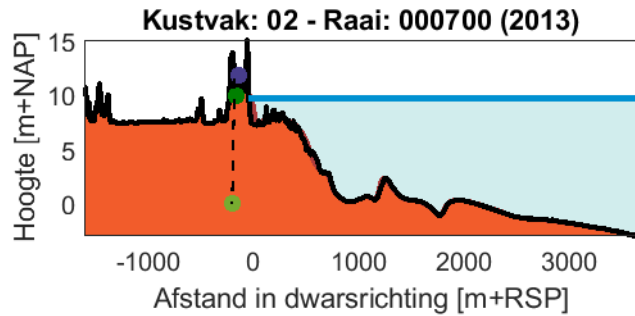
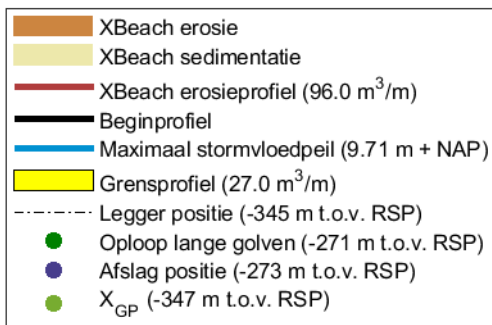
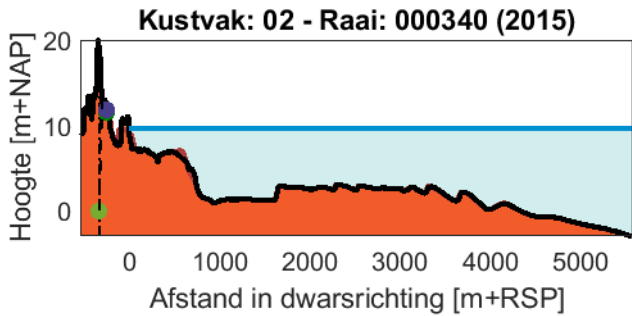


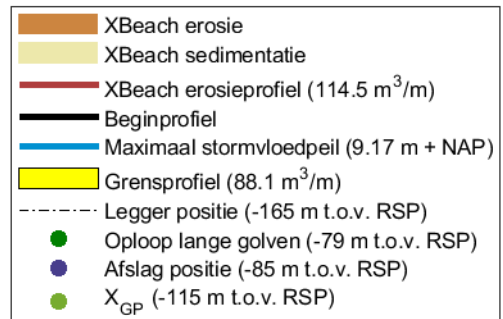
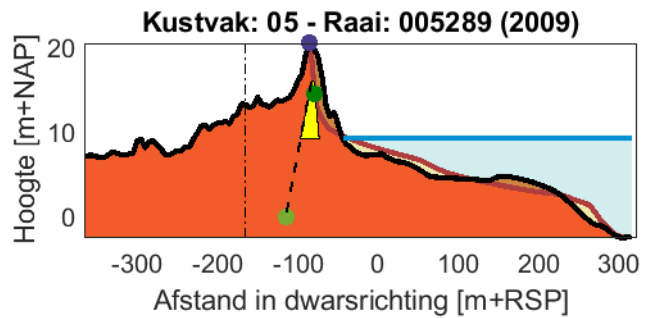
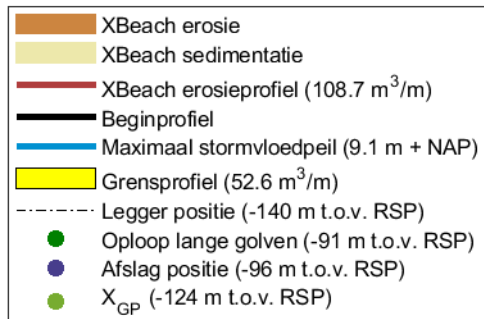
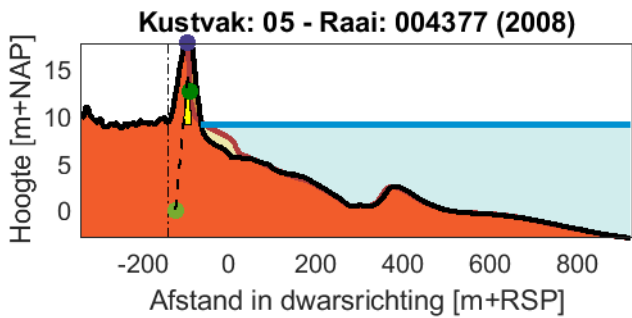
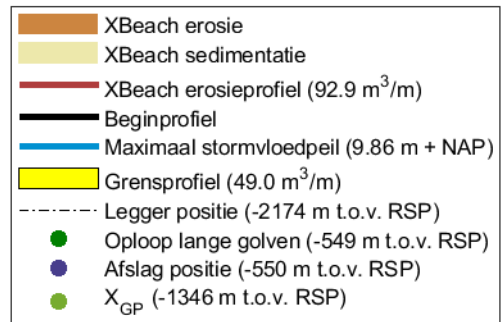
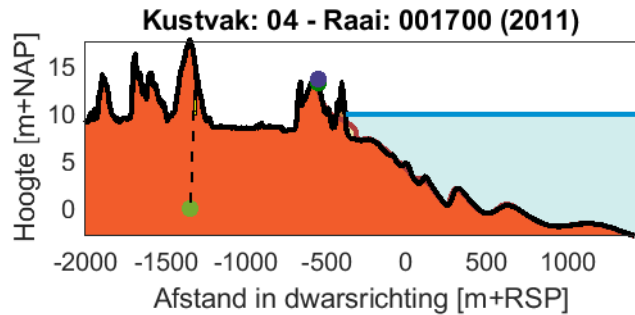
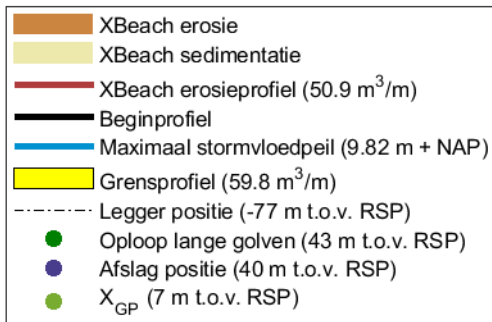
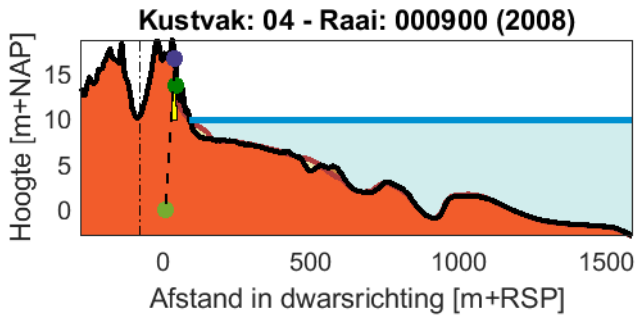


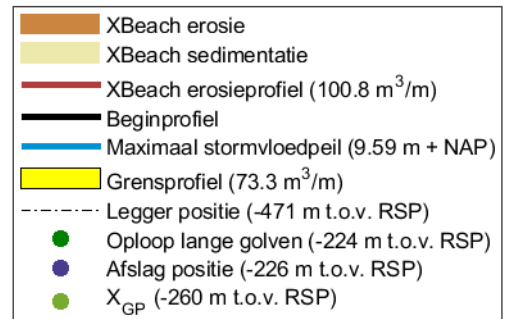
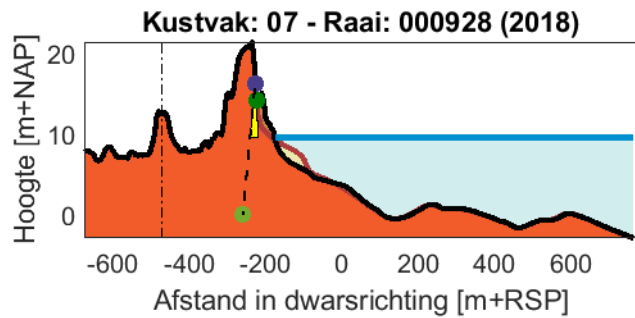
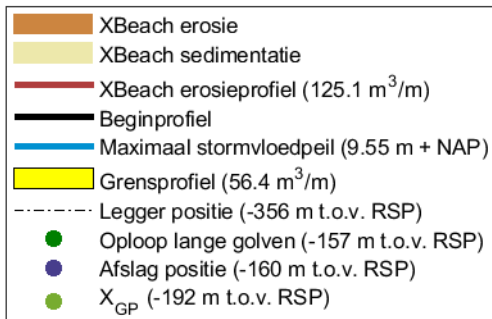
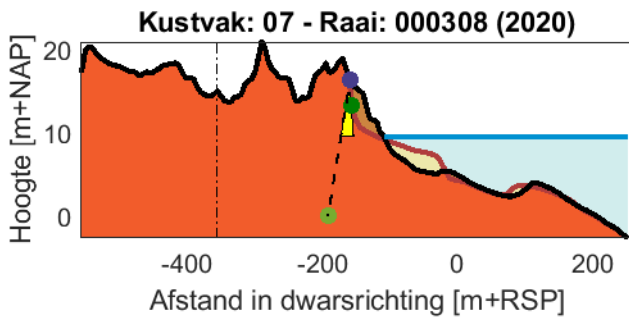
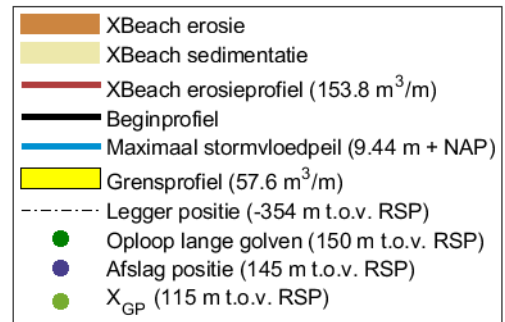
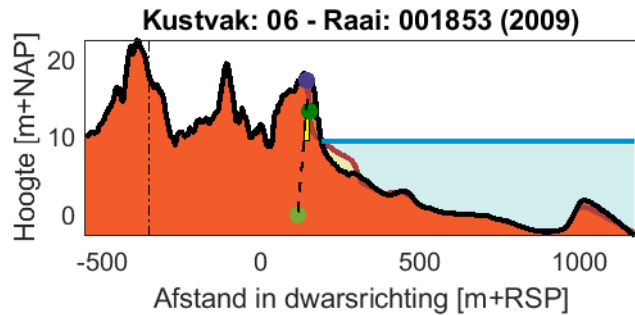
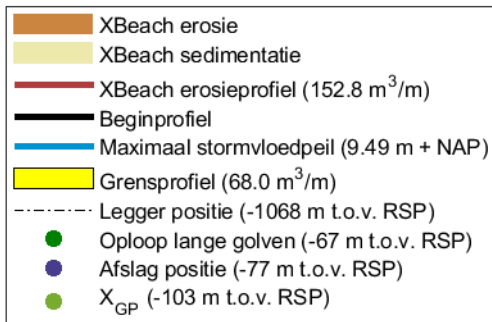
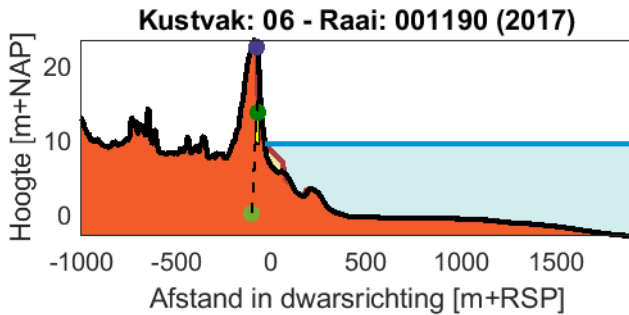


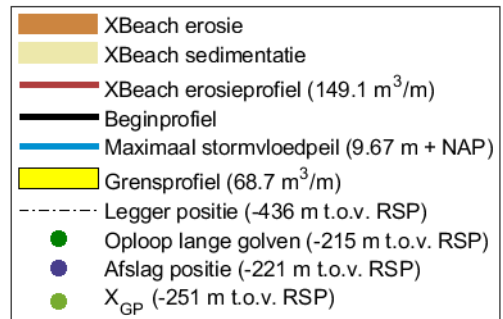
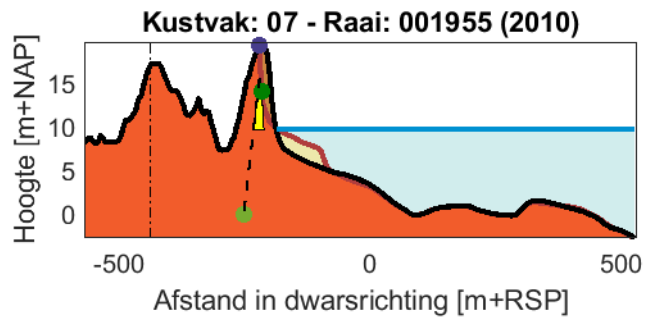
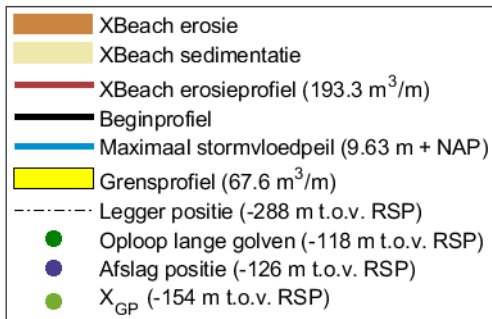
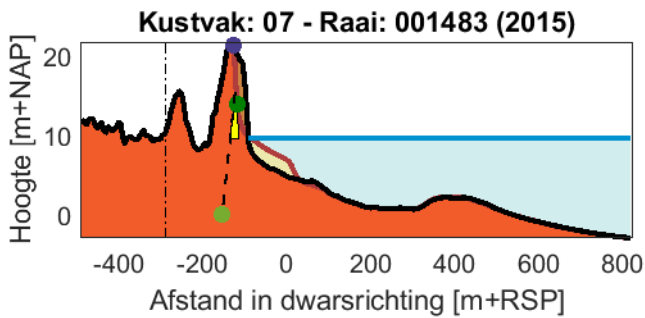
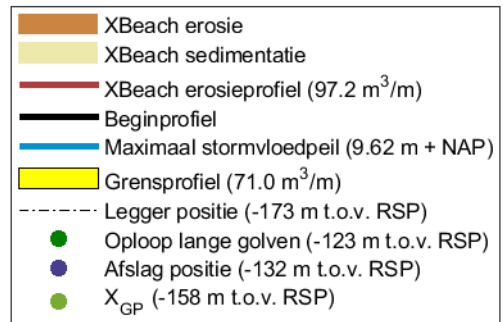
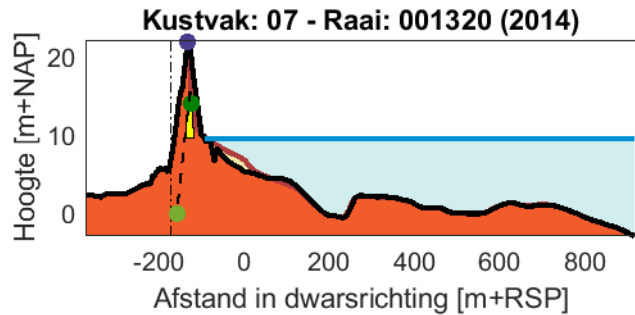
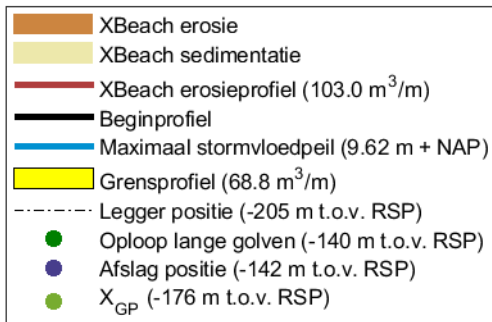
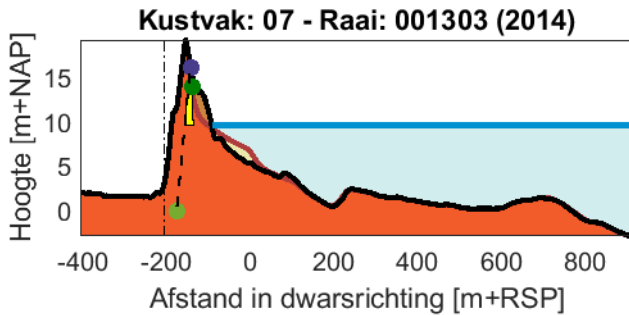


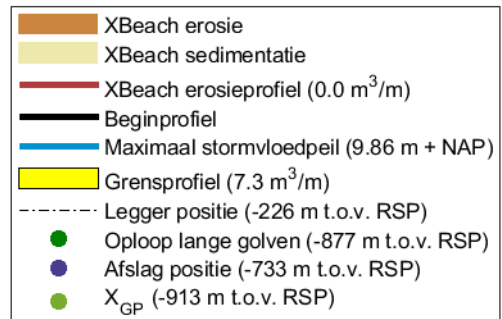
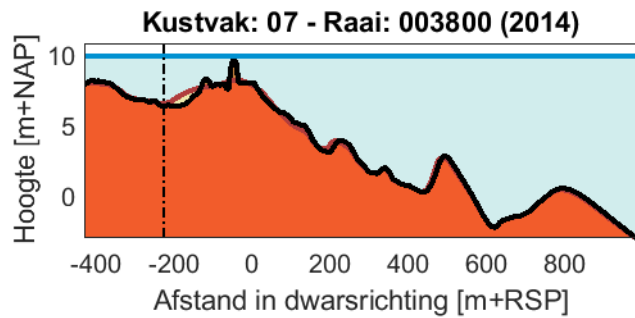
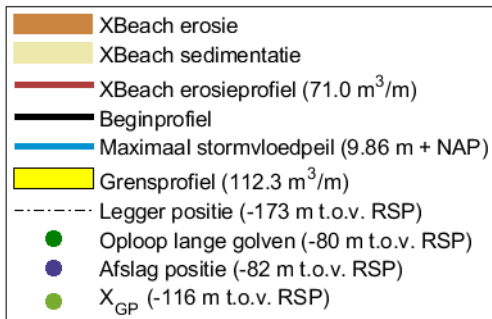
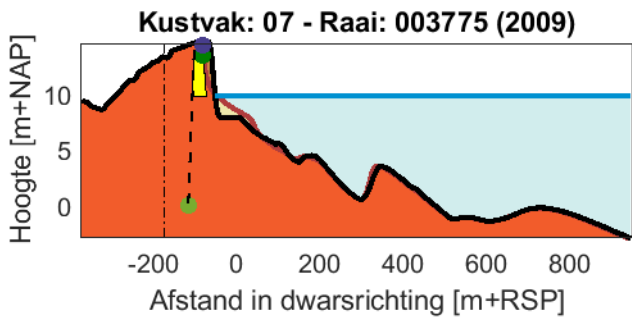
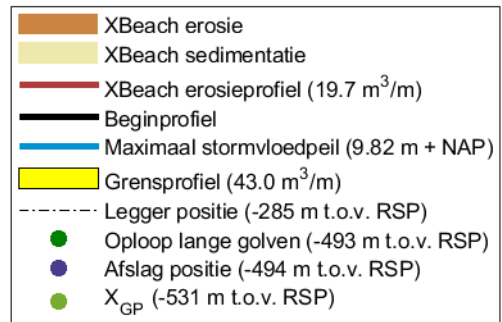
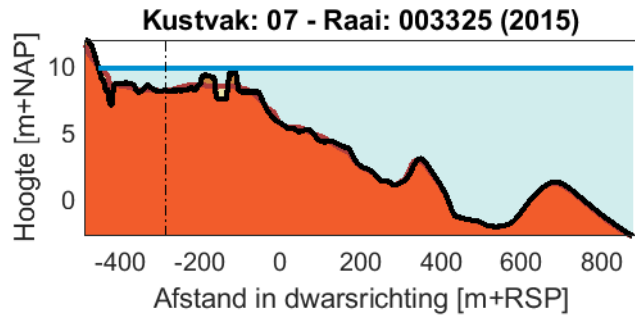
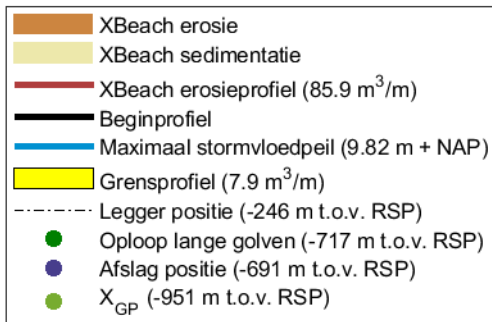
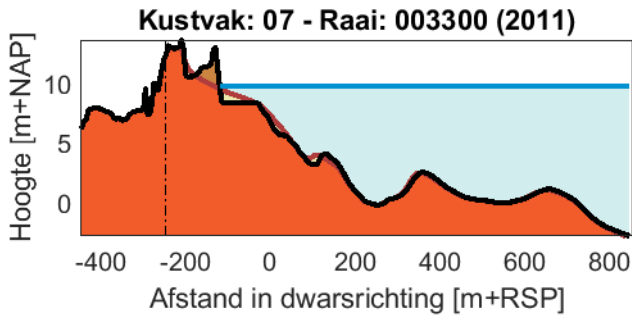
D.3 Meegroeien – 5m zeespiegelstijging

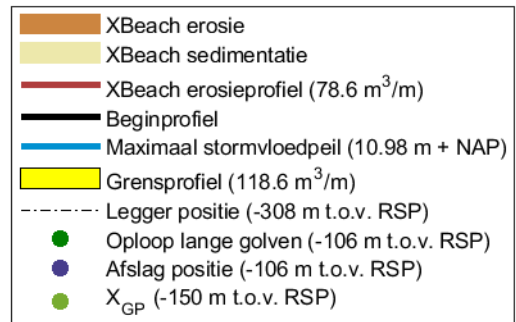
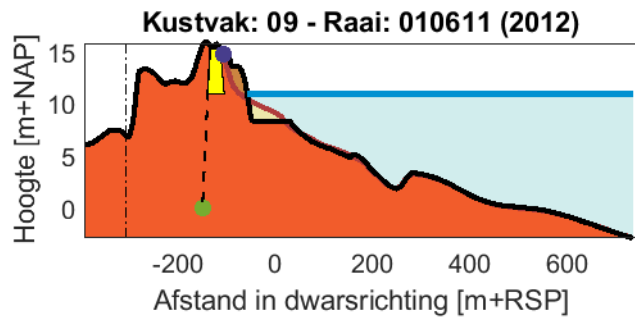
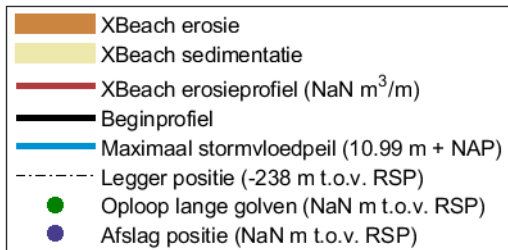
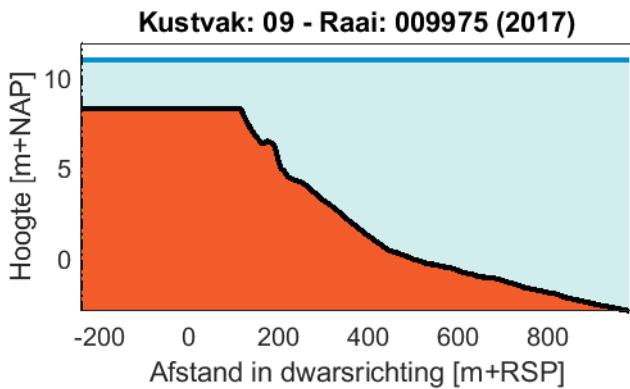
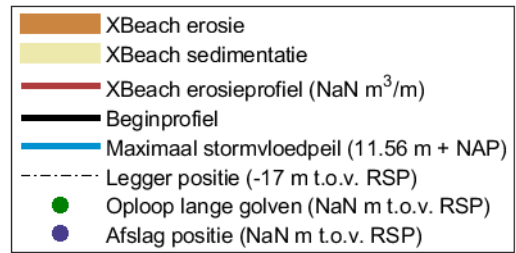
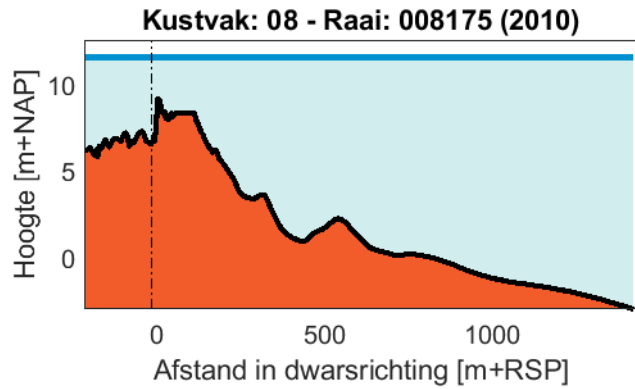
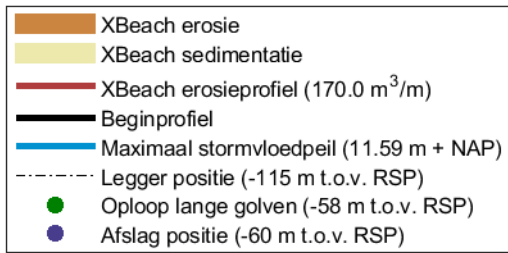
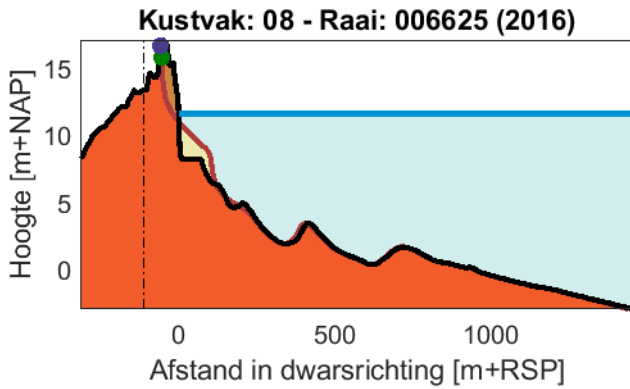


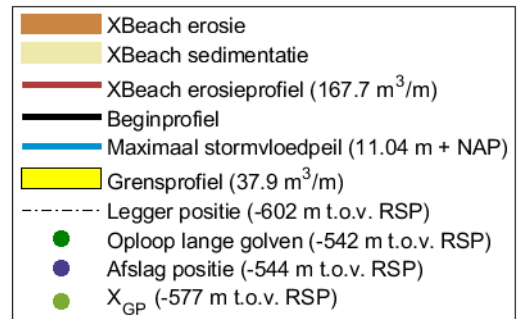
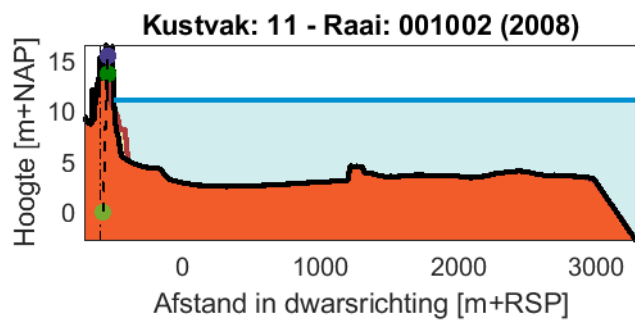
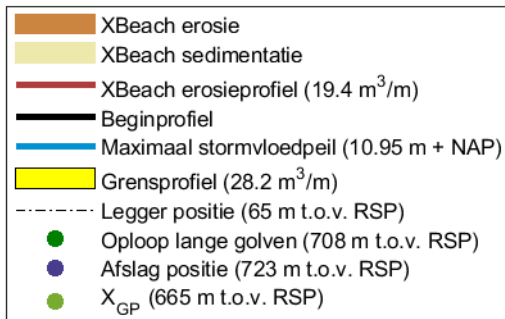
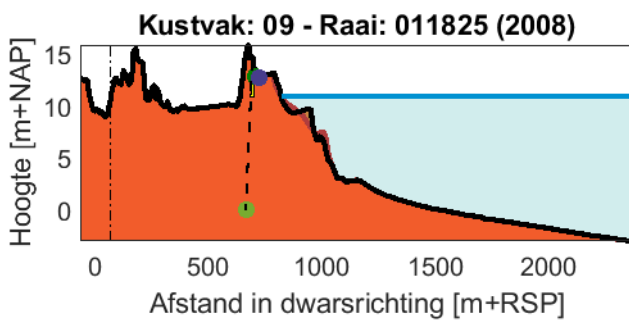
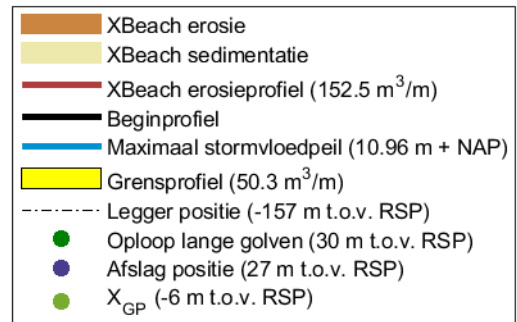
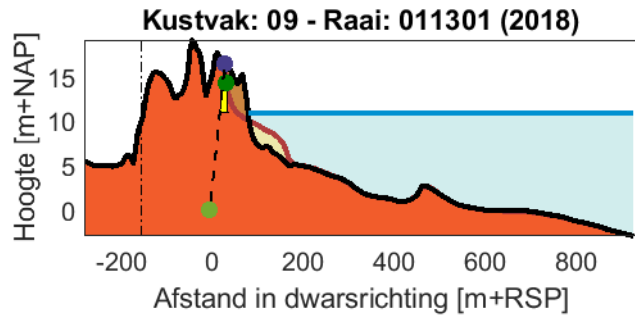
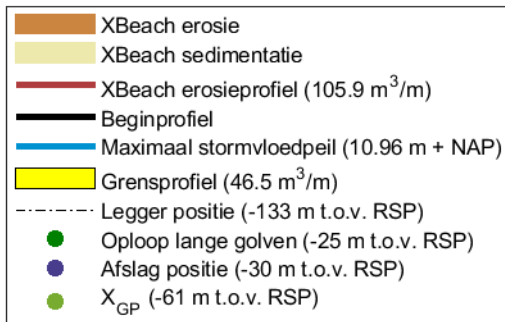
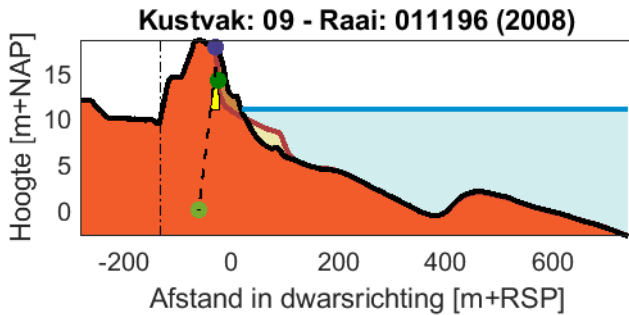


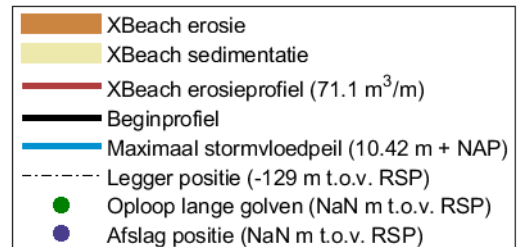
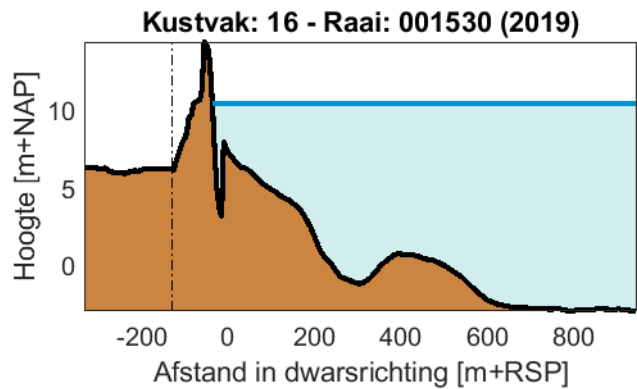
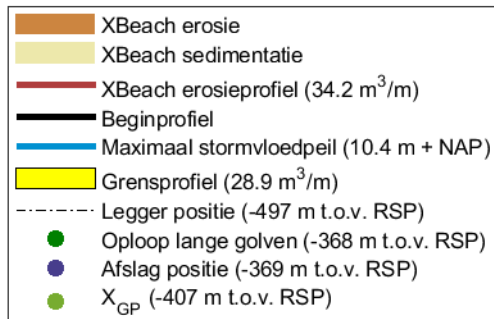
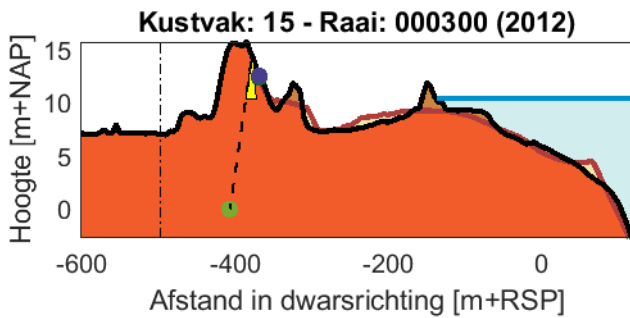
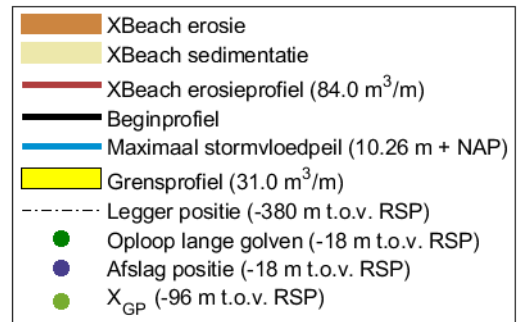
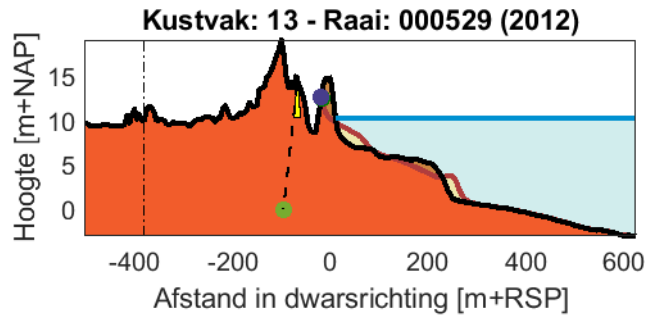
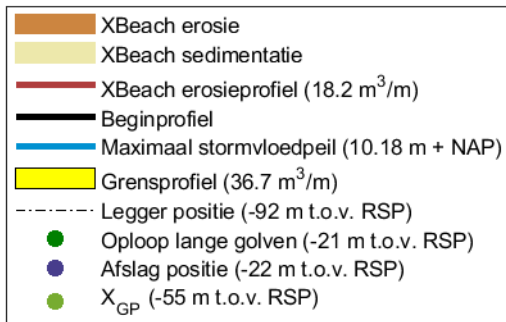
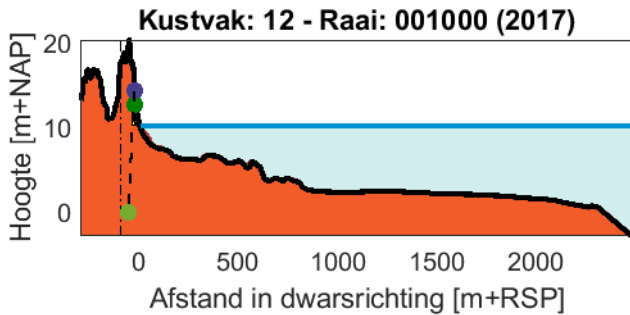


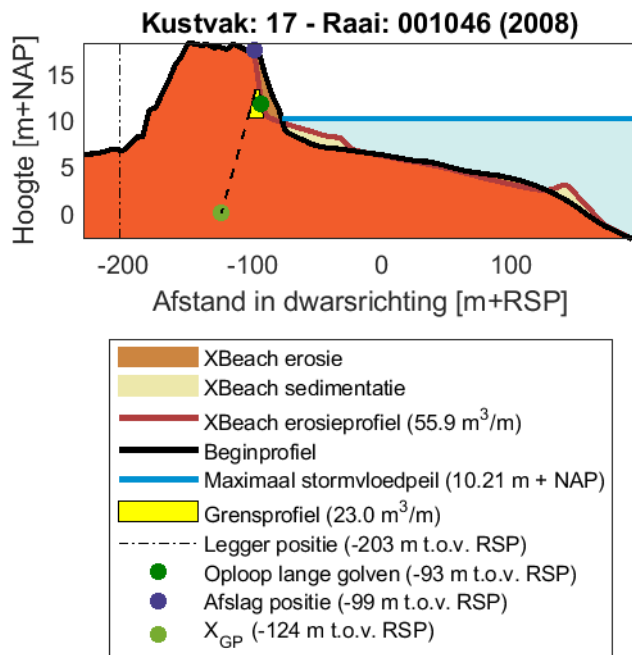




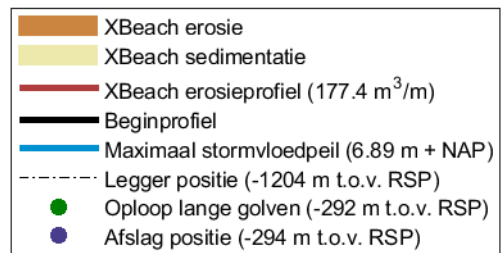
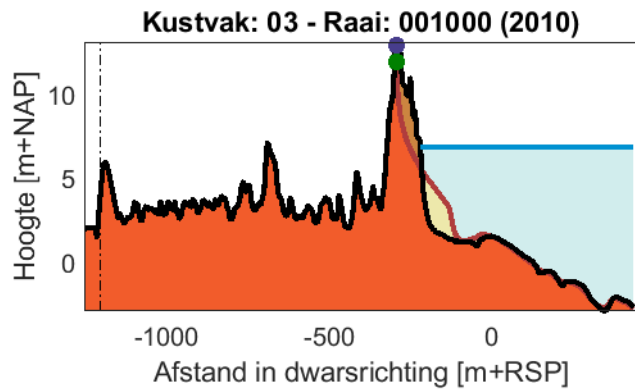
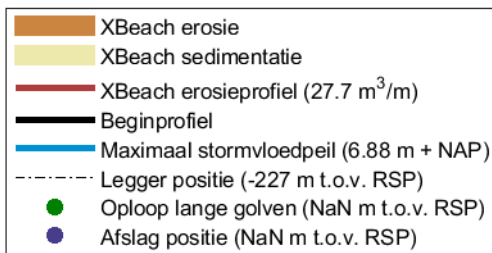
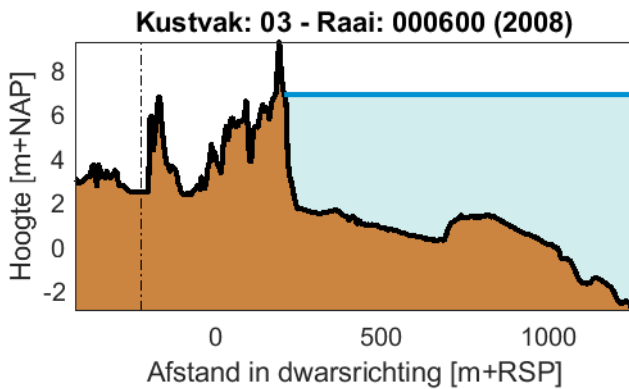
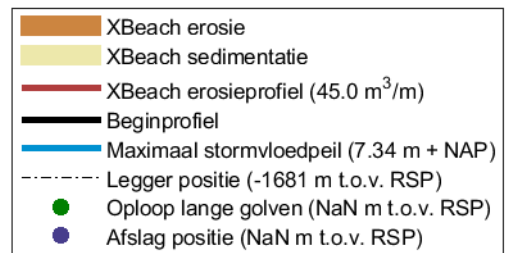
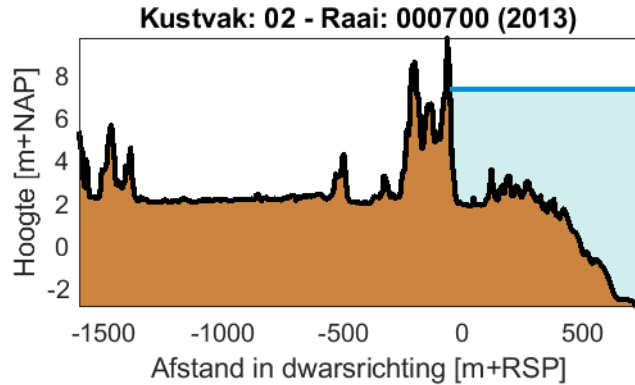
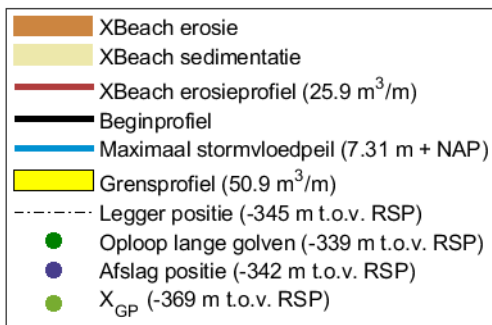
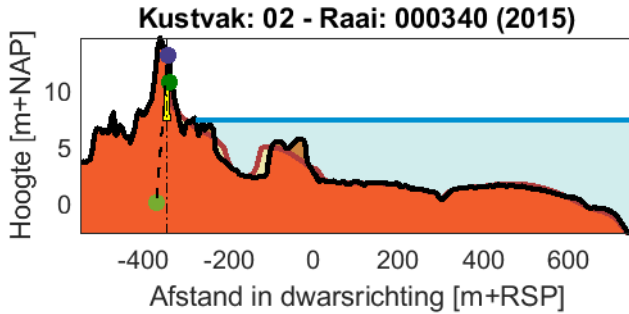


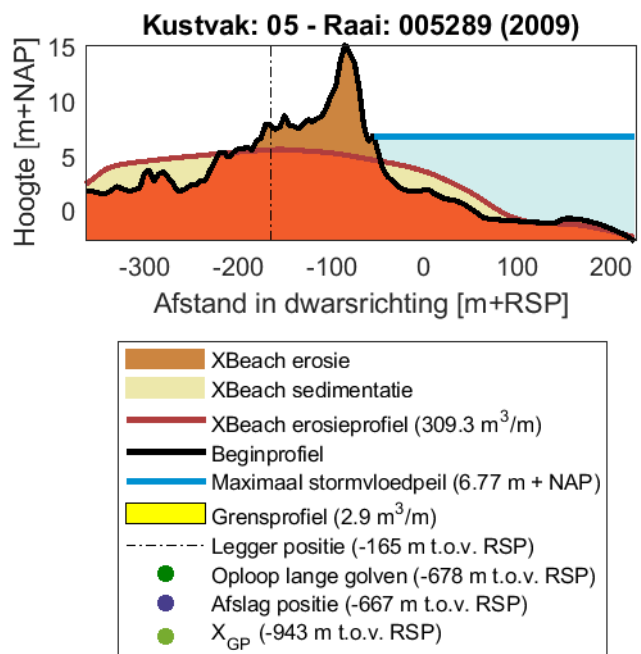
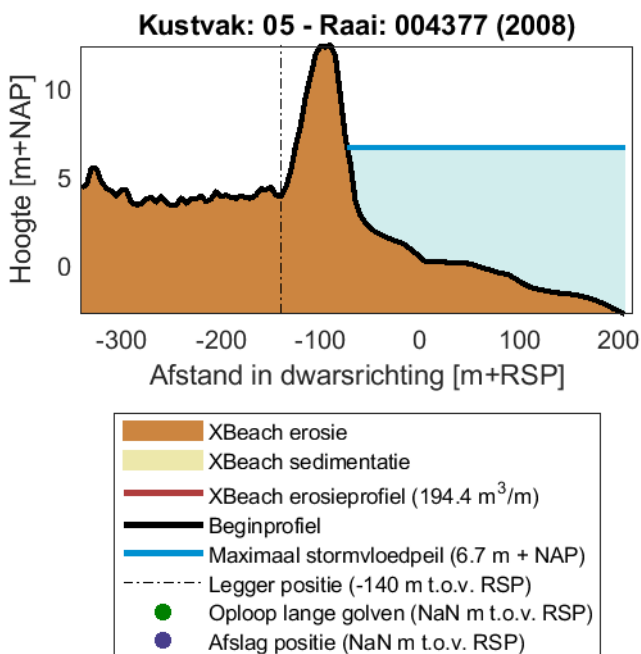
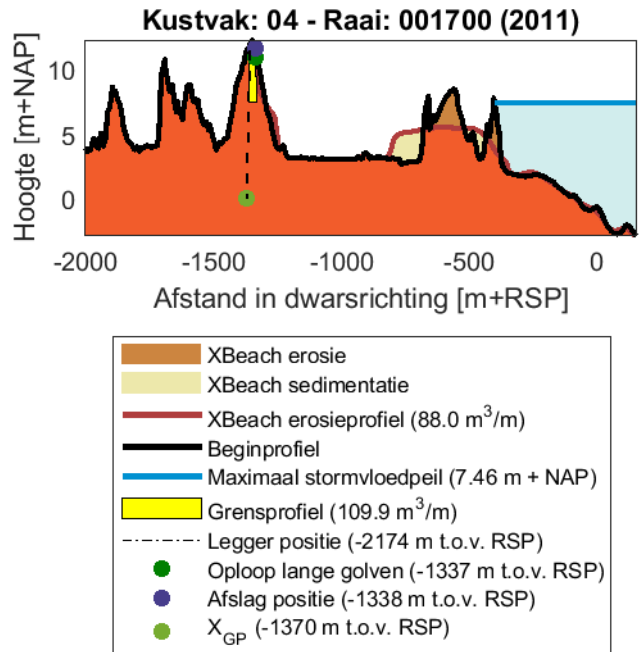
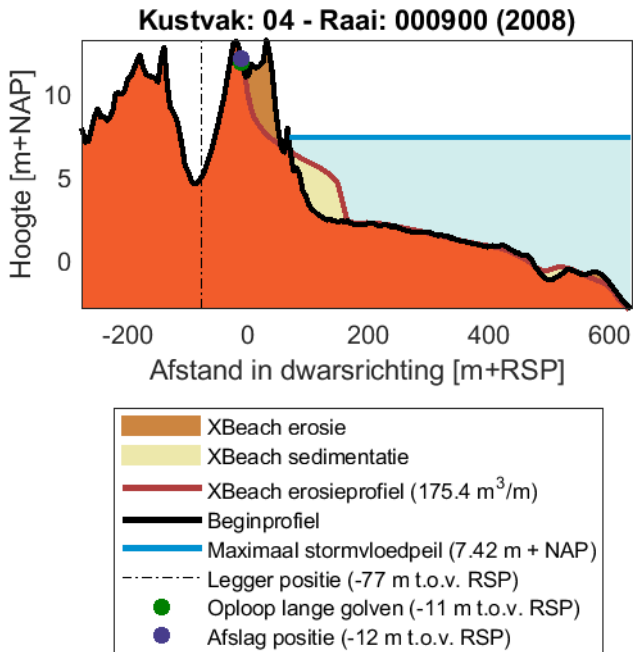


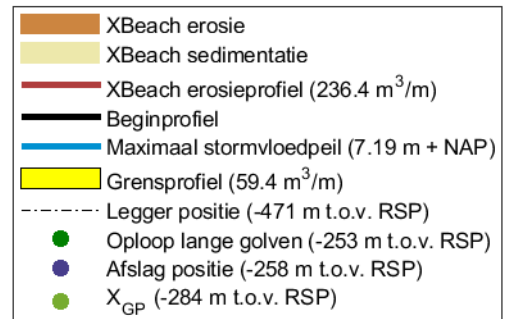
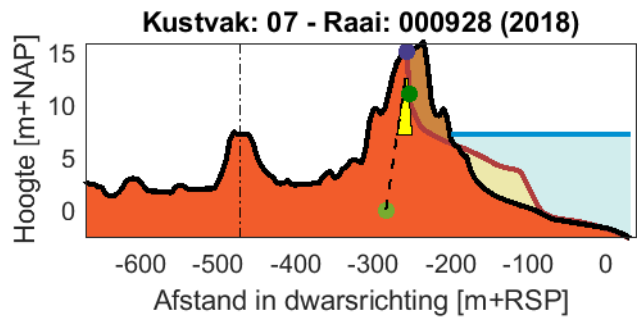
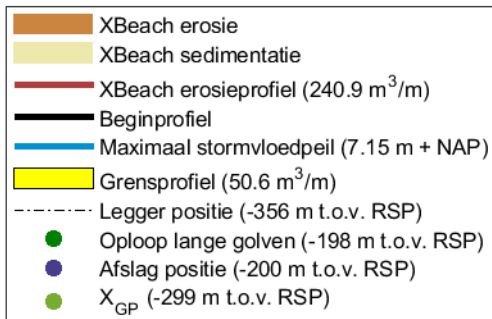
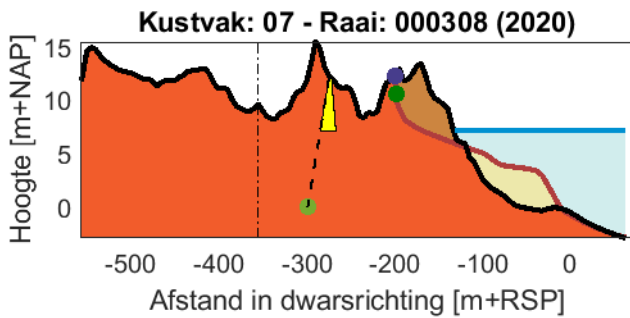
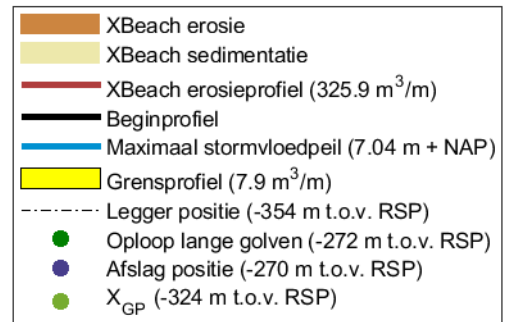
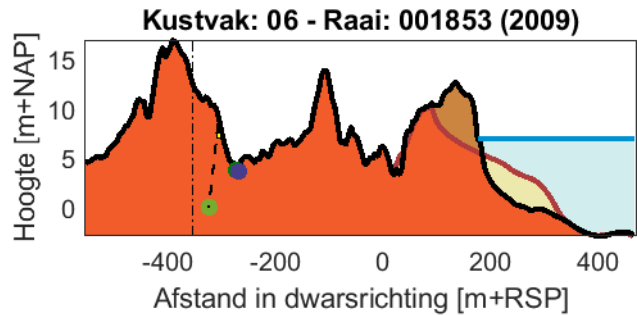
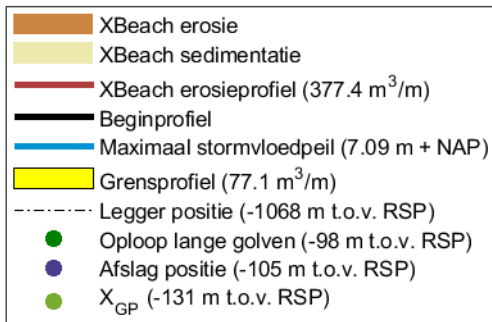
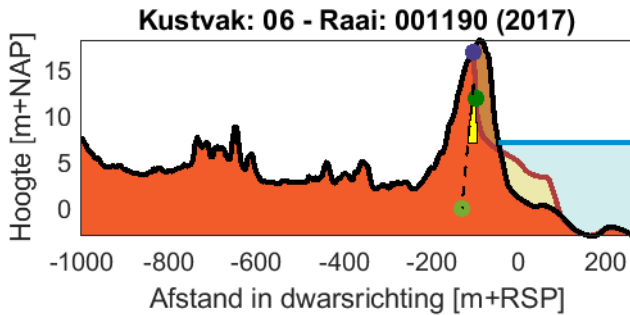


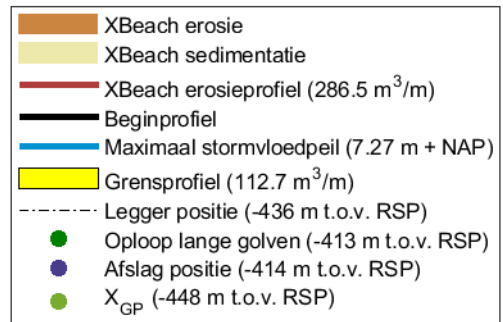
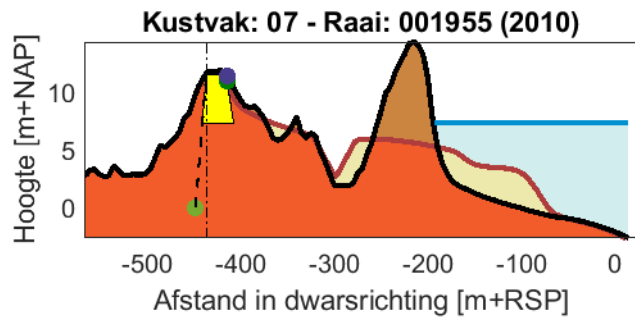
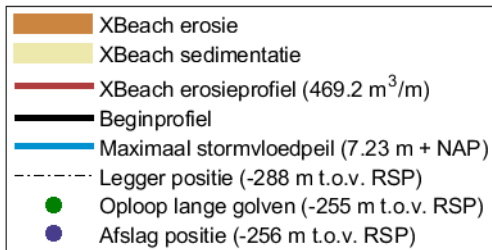
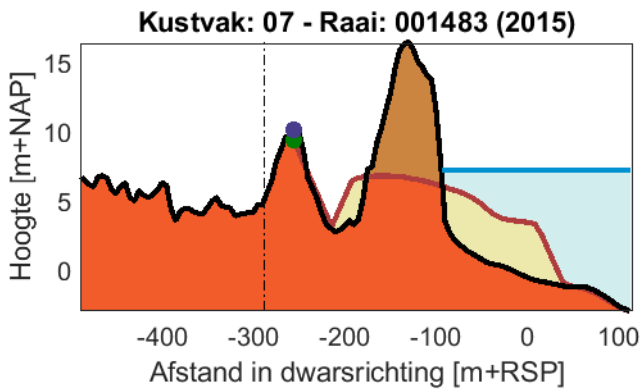
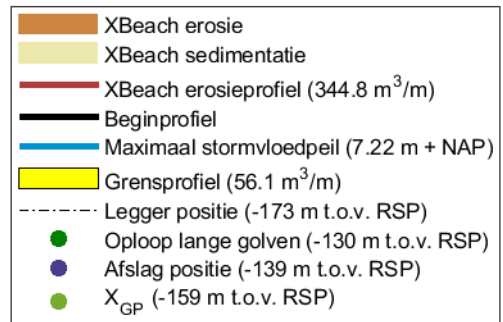
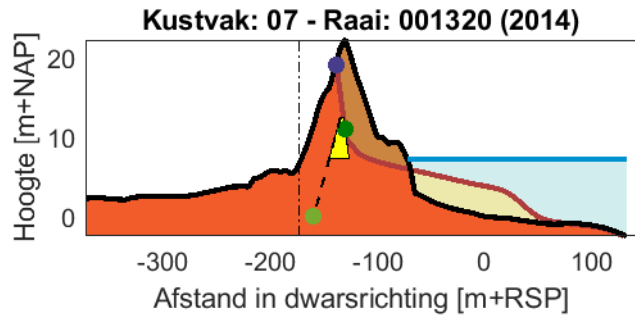
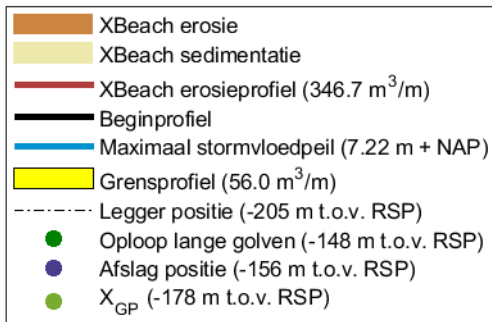
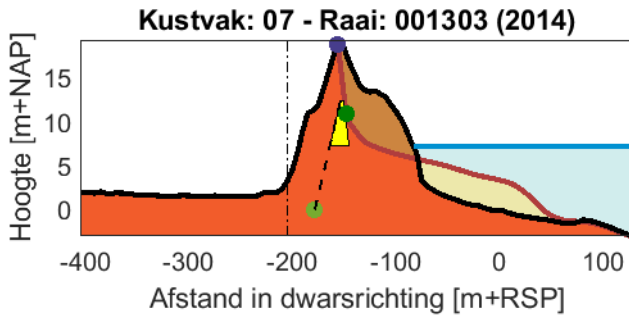


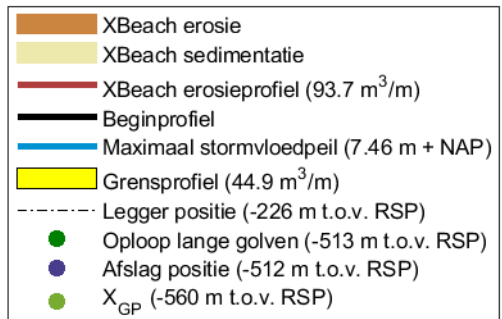
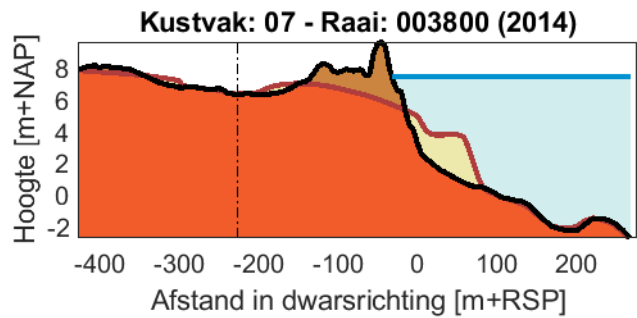
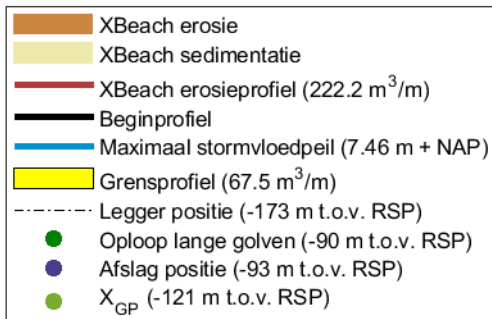
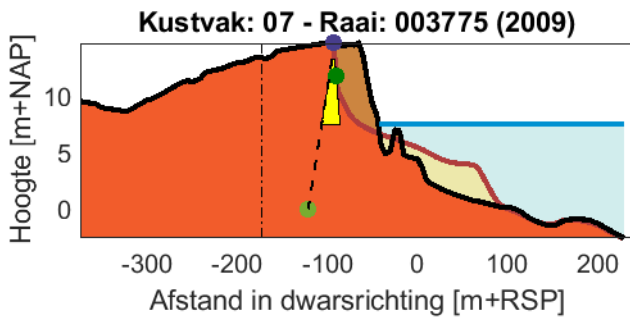
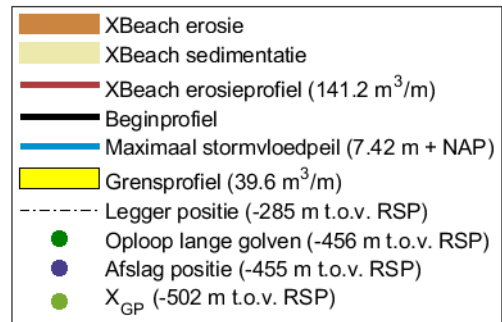
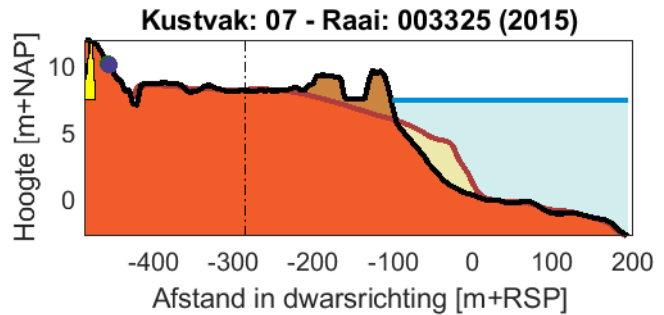
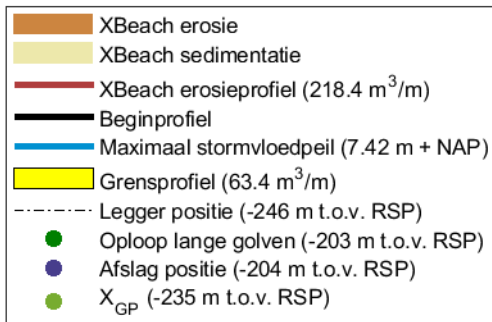
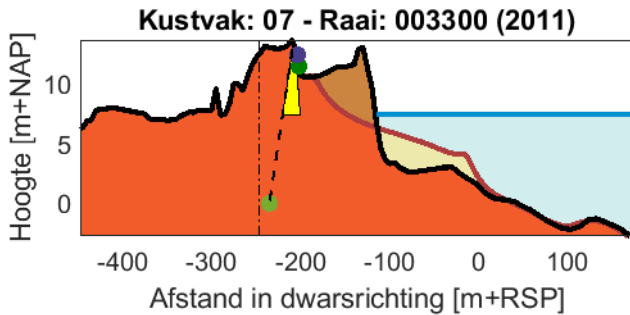
D.4 Niet Meegroeien – 3m zeespiegelstijging

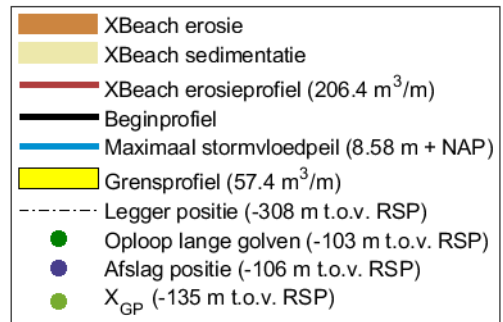
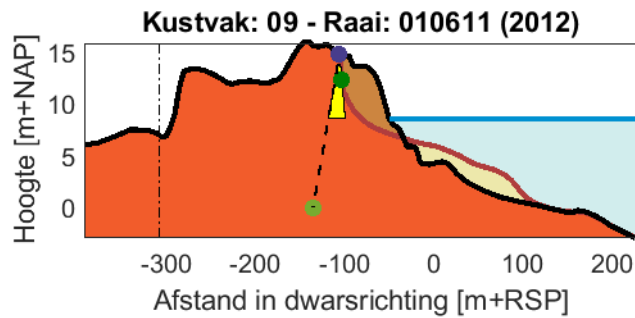
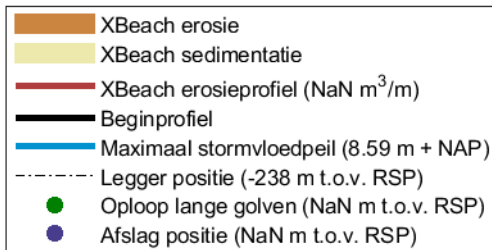
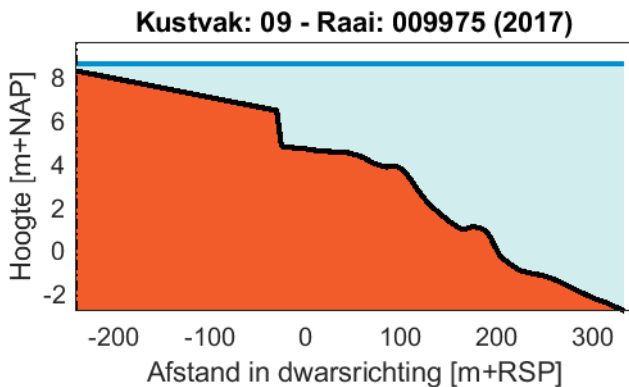
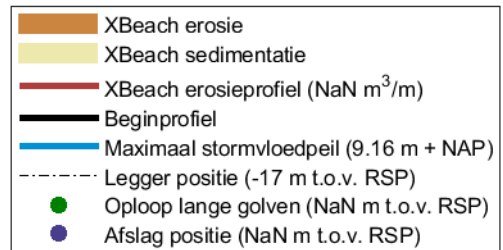
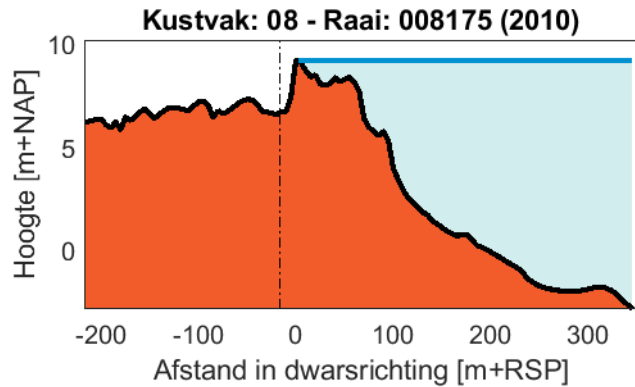
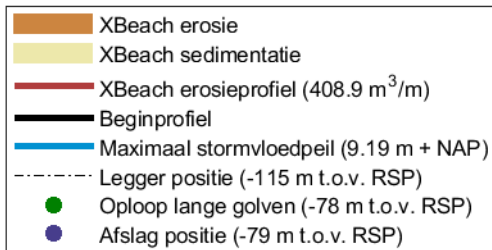
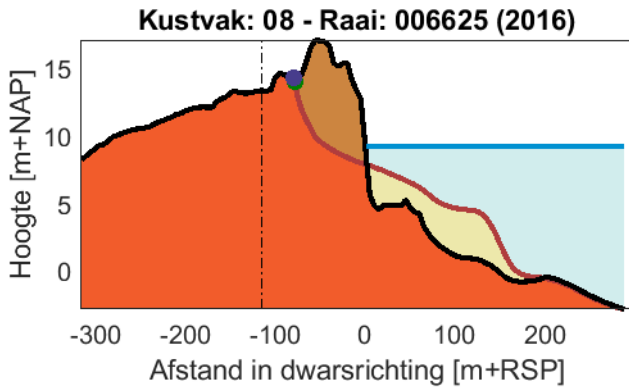


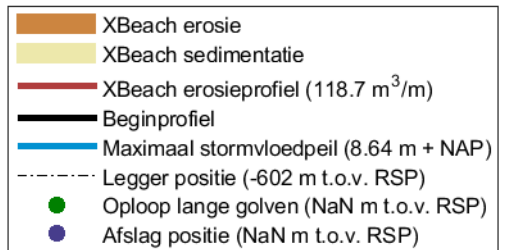
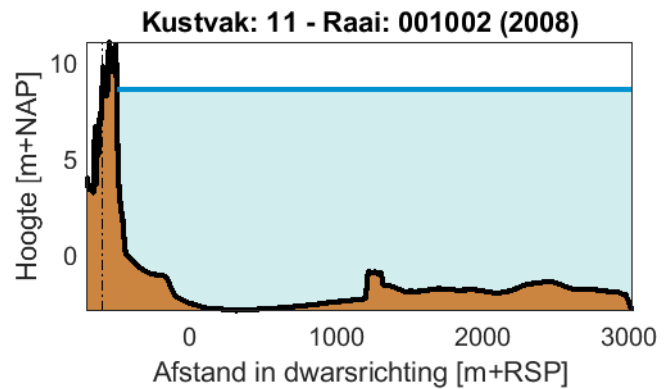
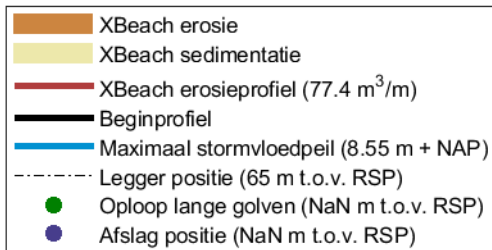
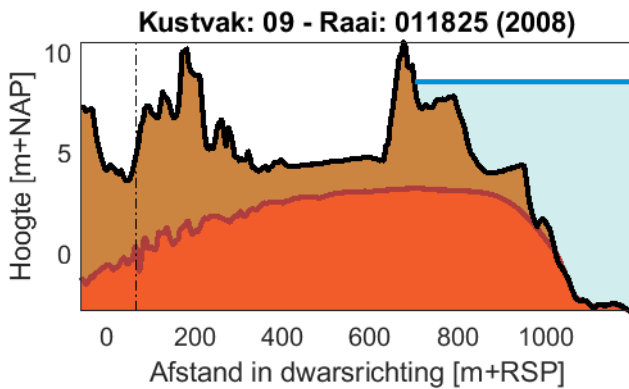
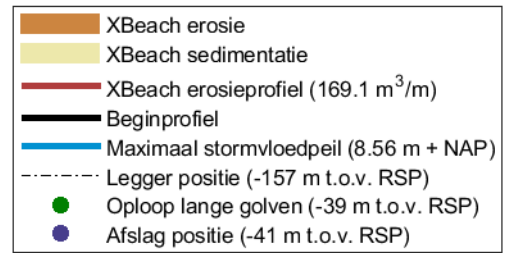
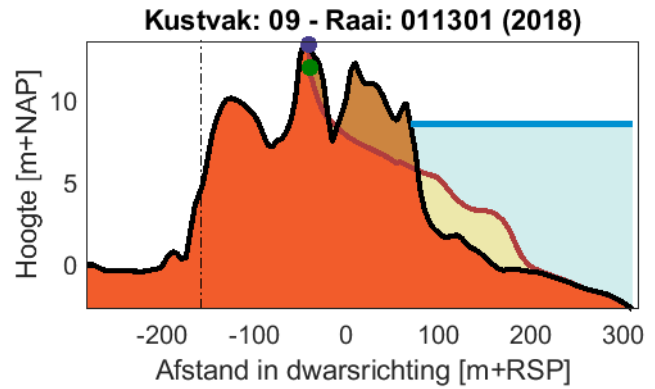
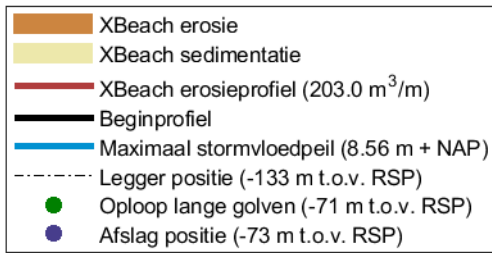
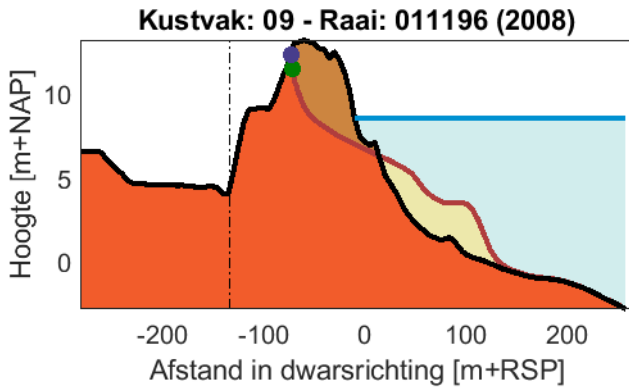


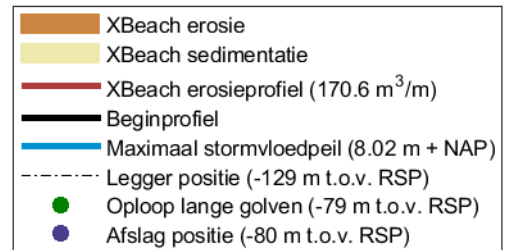
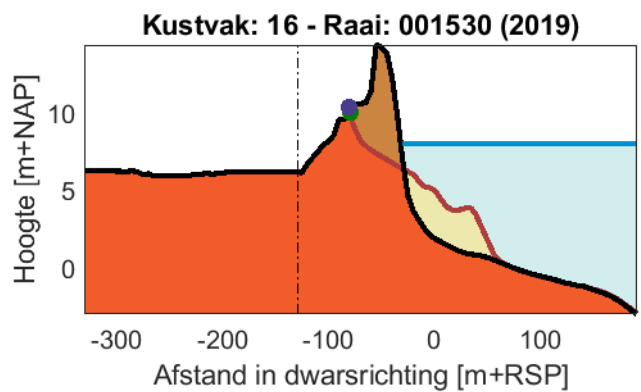
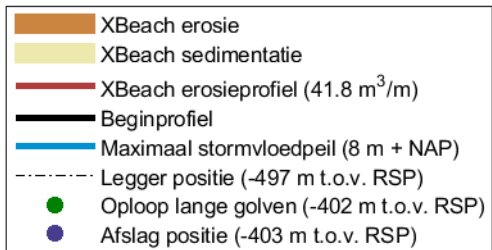
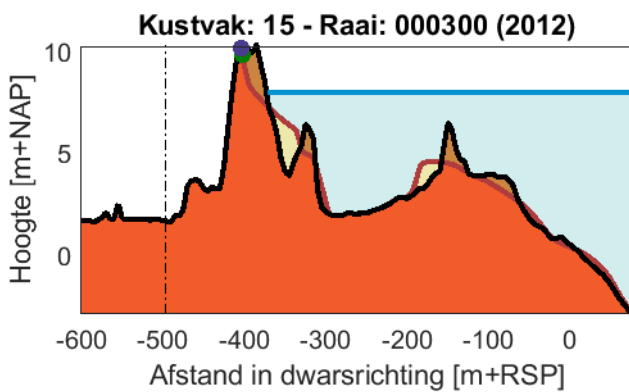
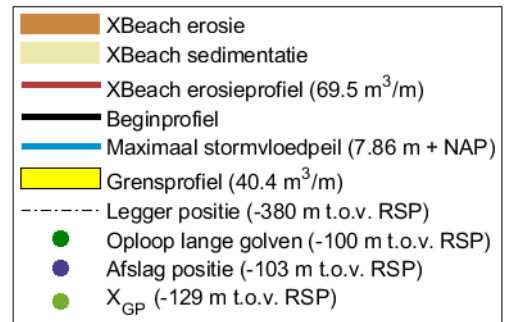
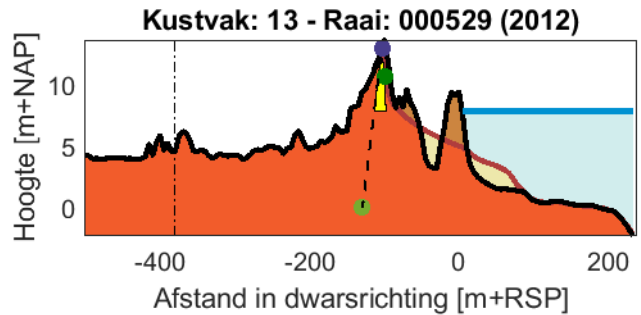
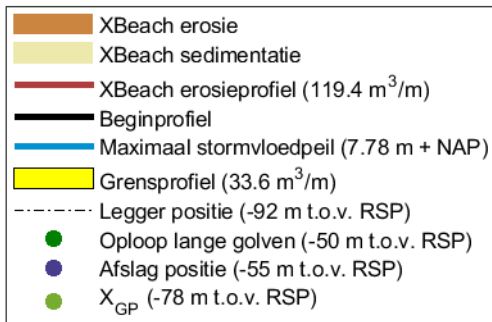
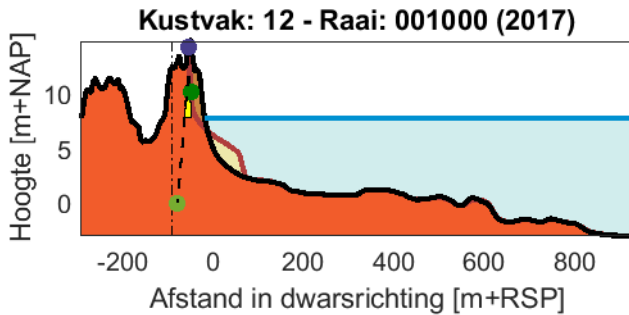


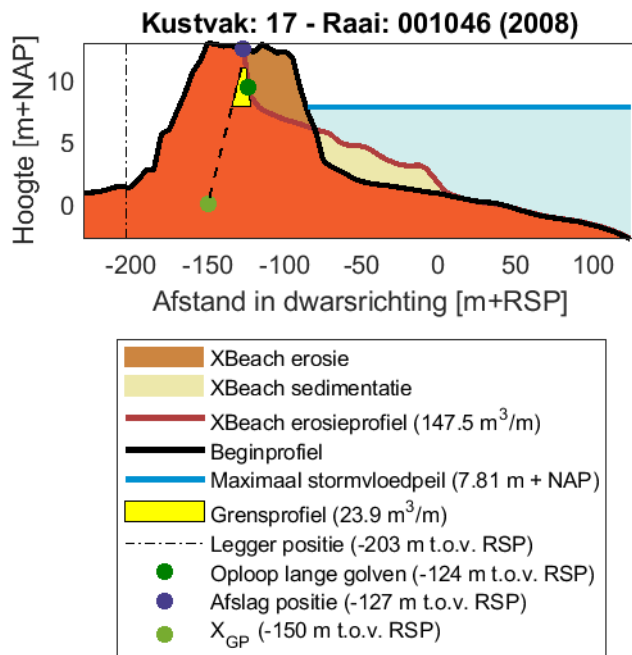






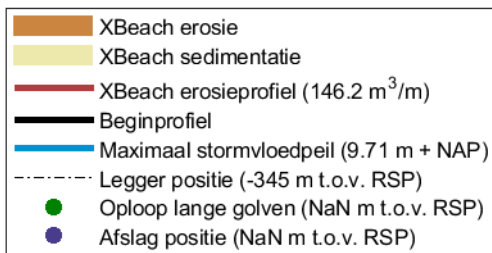
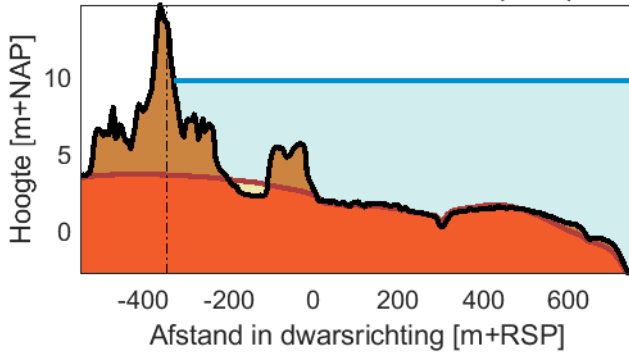




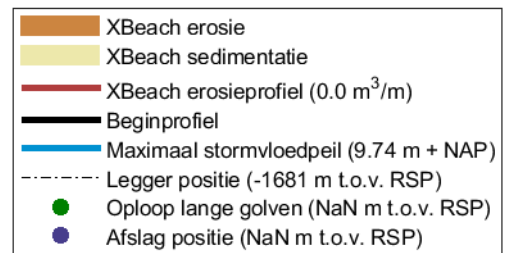
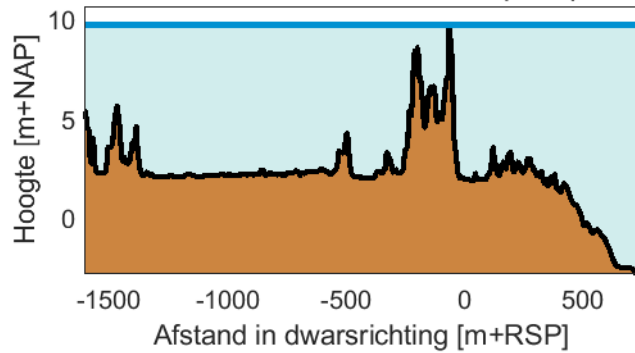


D.5 Niet Meegroeien – 5m Zeespiegelstijging

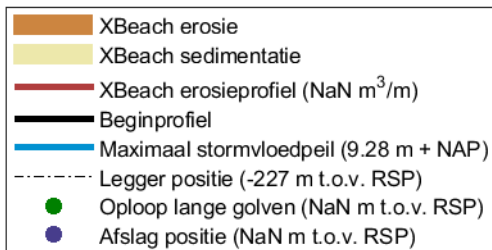
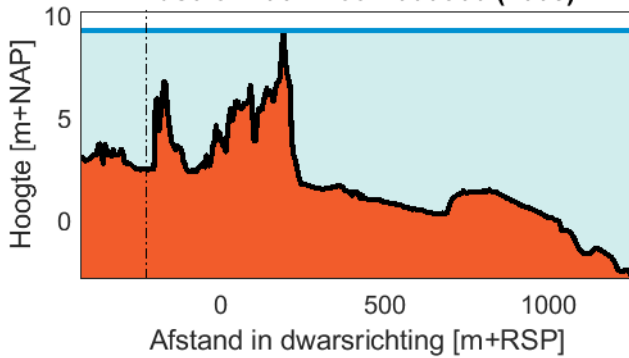
Kustvak: 02 - Raai: 000340 (2015)



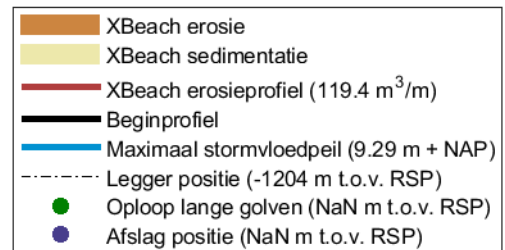
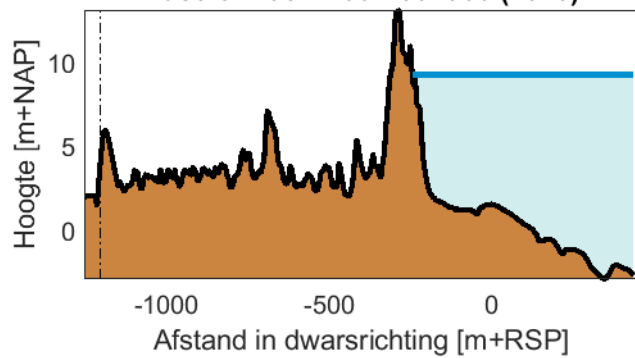
Kustvak: 02 - Raai: 000700 (2013)

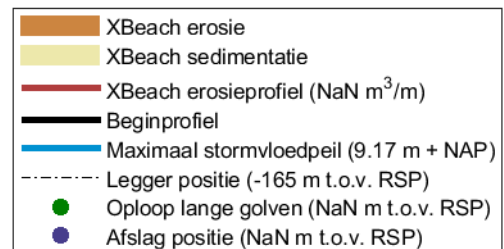
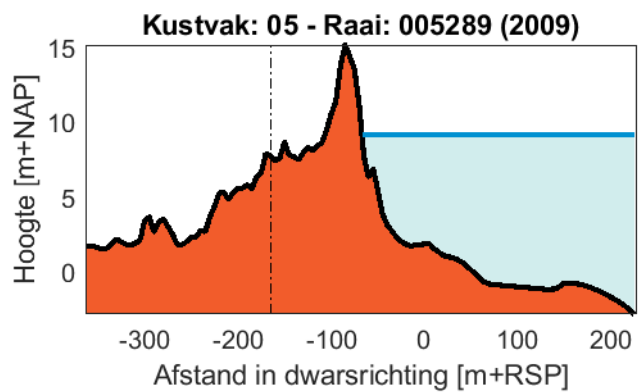
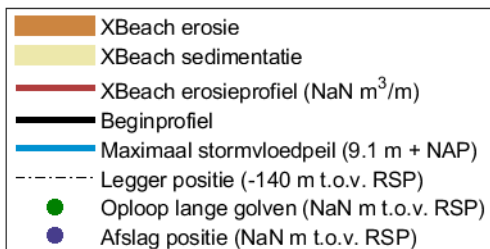
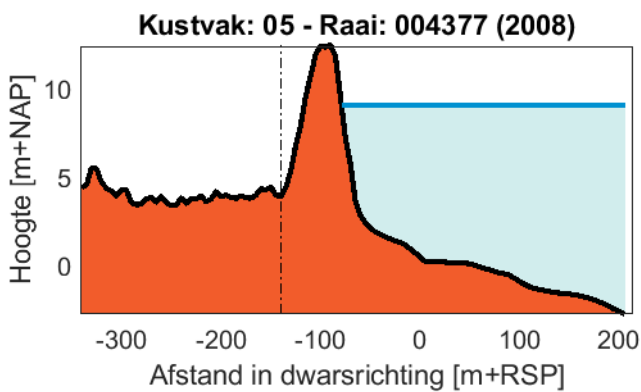
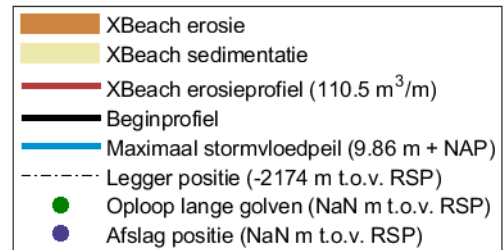
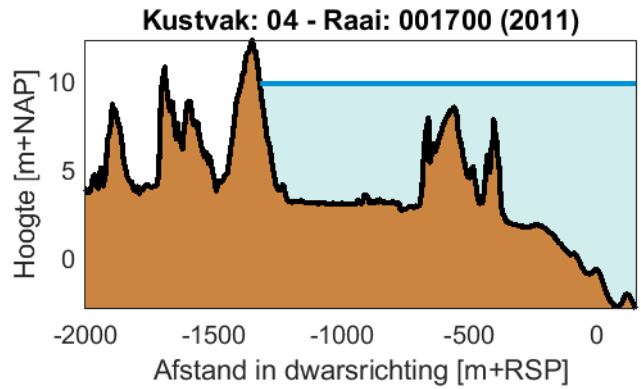
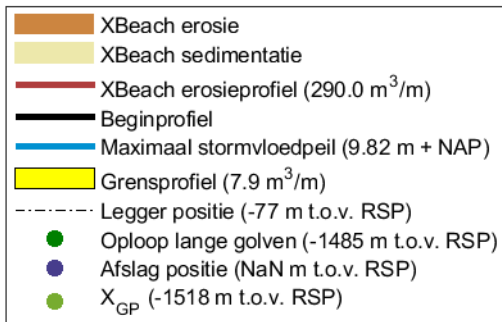
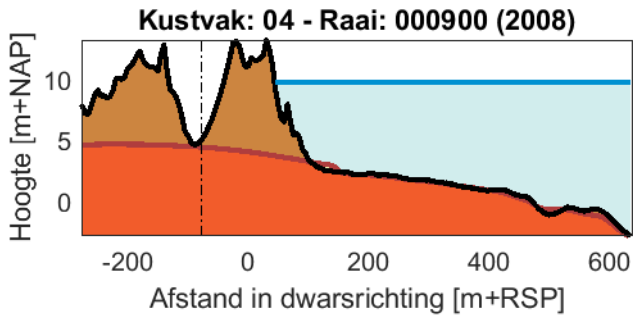


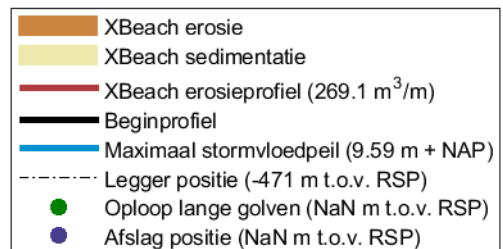
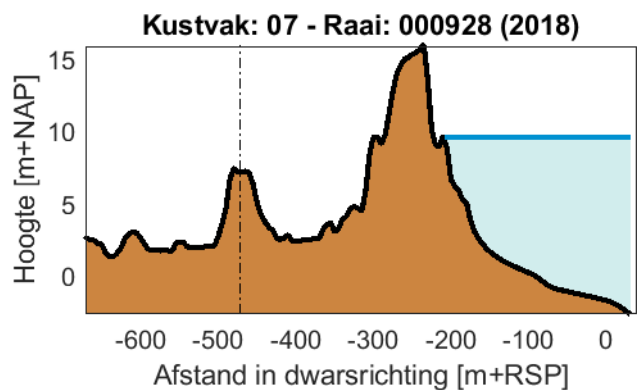
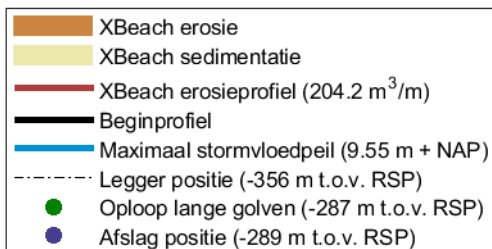
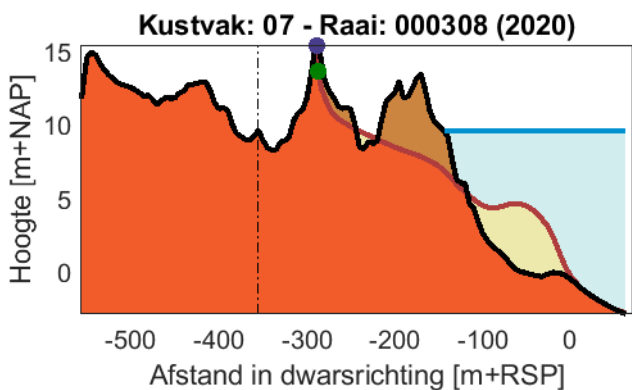
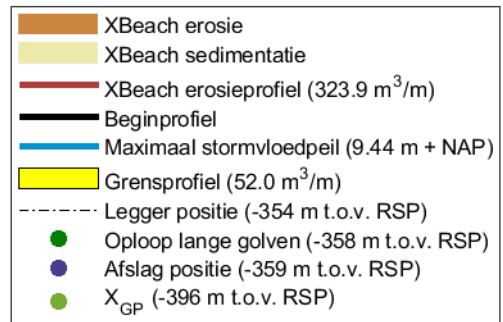
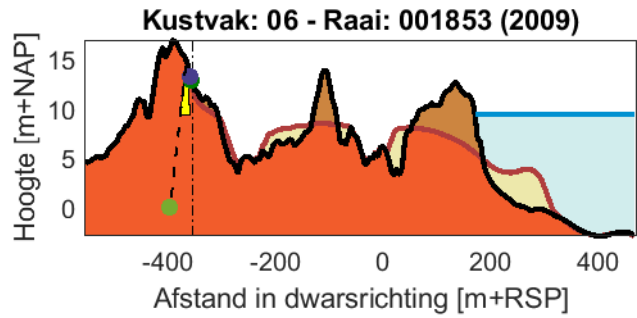
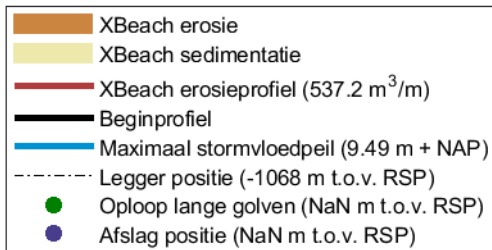
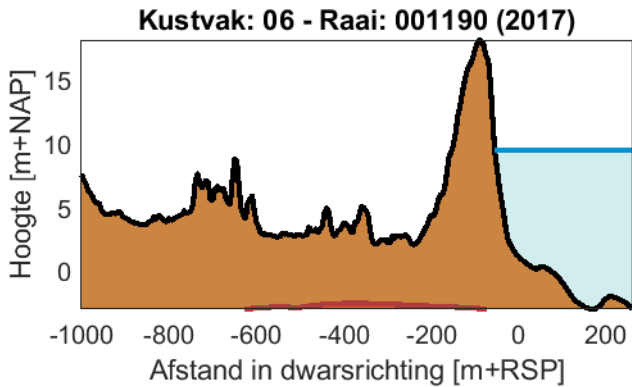
Kustvak: 03 - Raai: 000600 (2008)

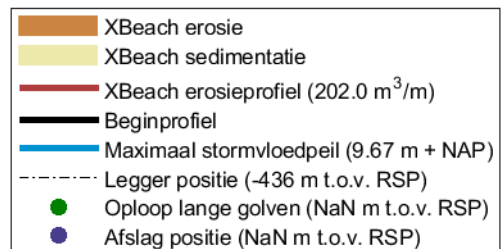
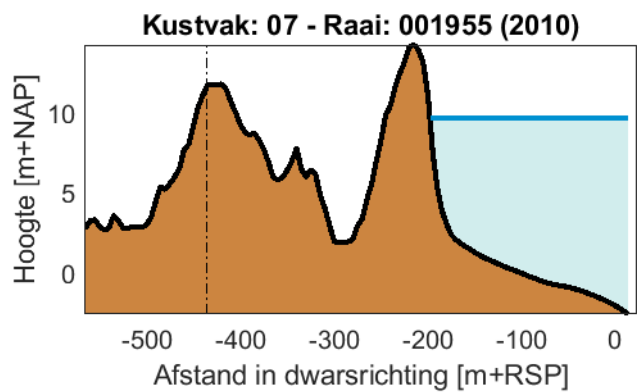
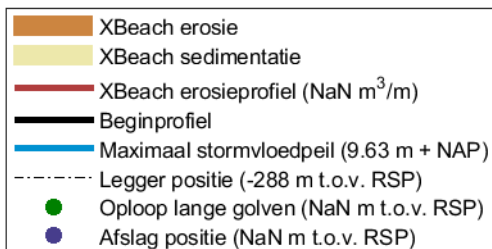
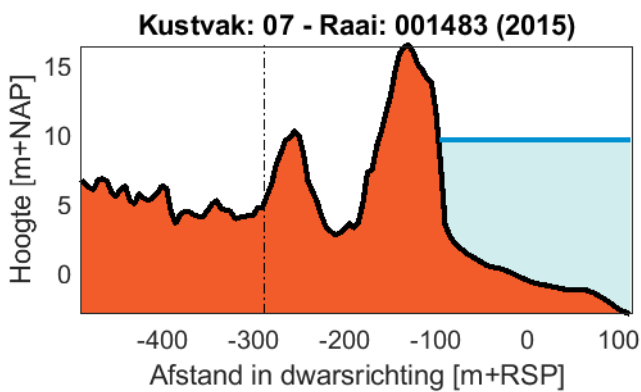
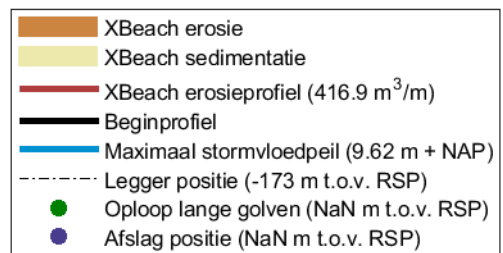
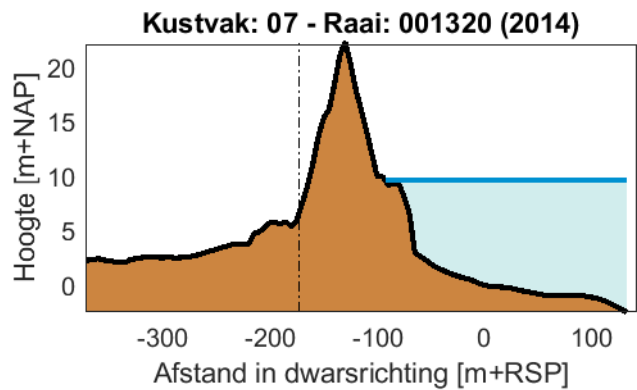
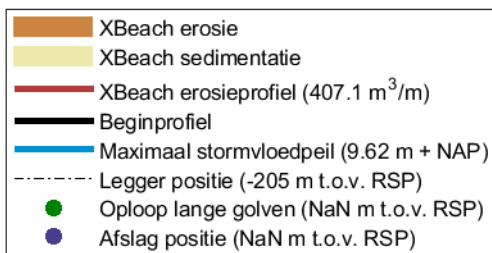
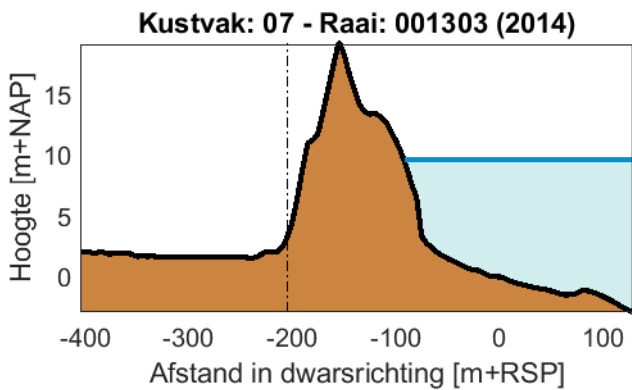


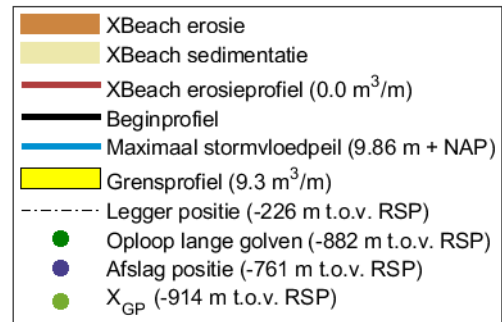
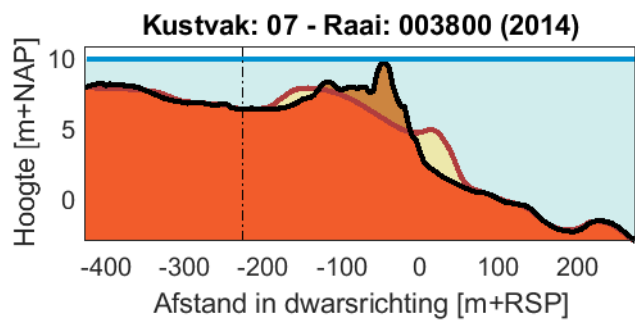
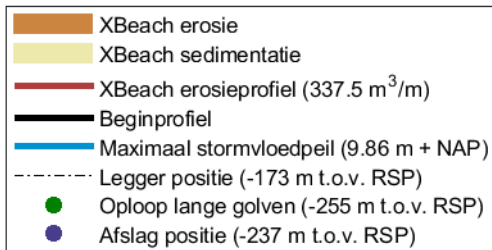
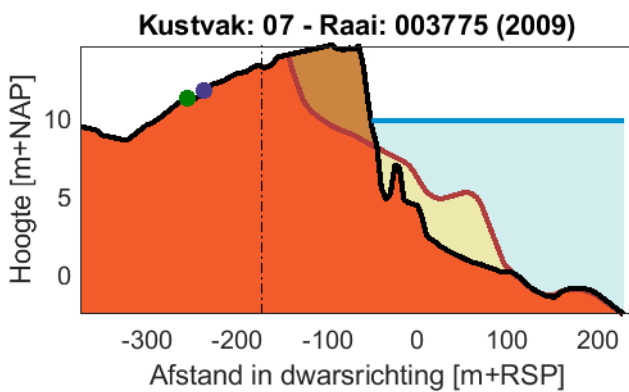
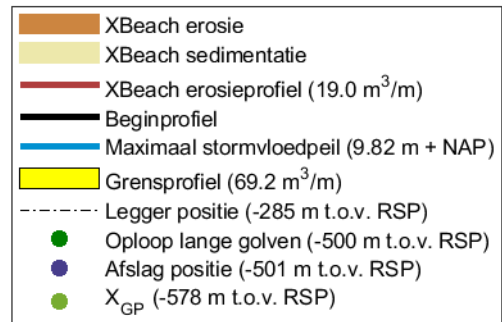
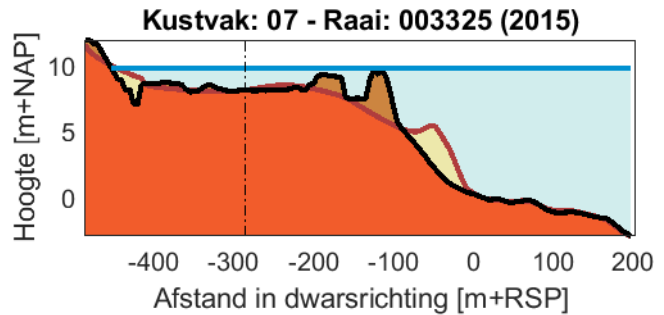
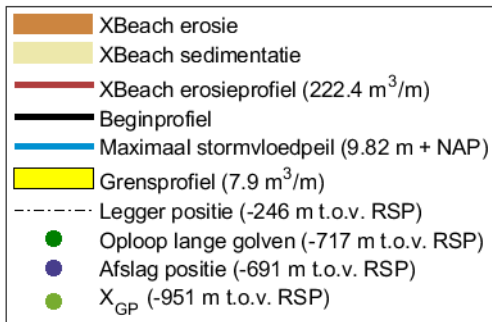
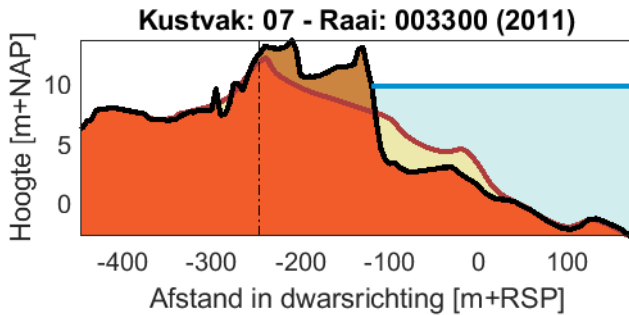
Kustvak: 03 - Raai: 001000 (2010)

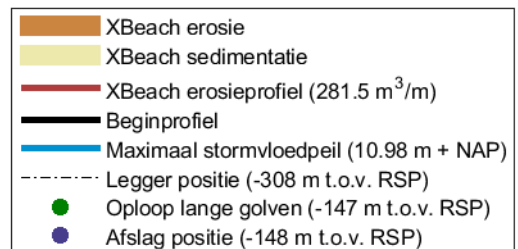
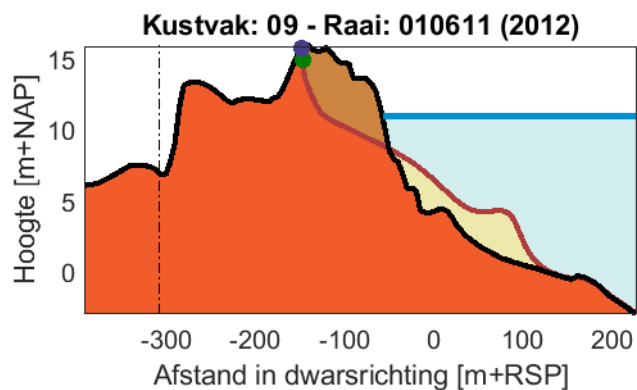
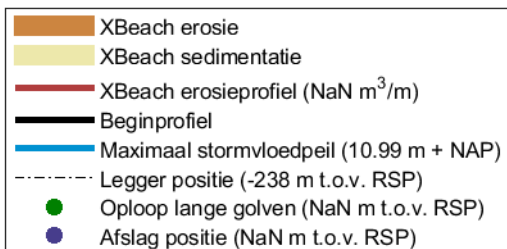
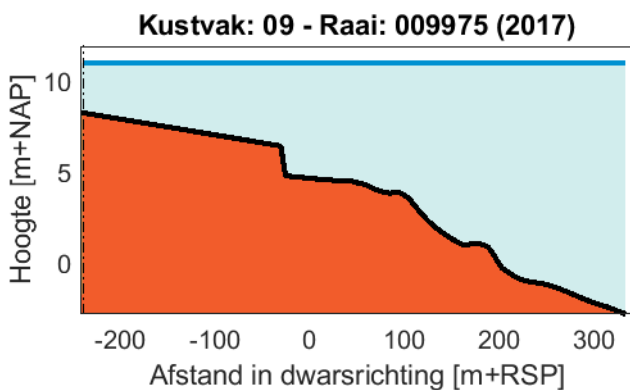
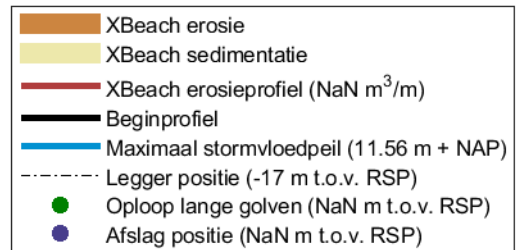
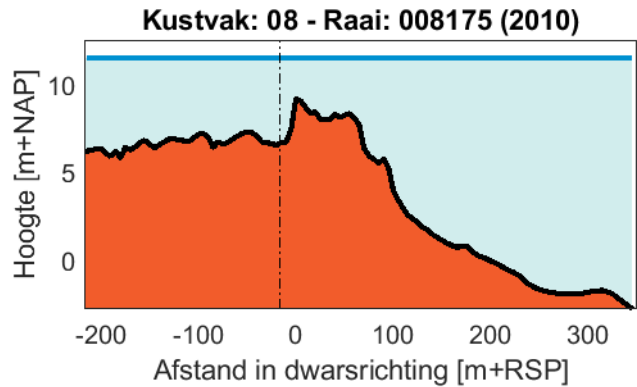
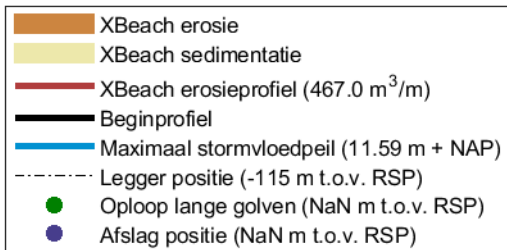
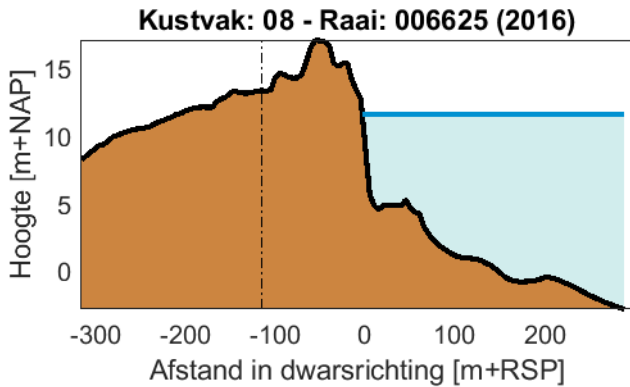


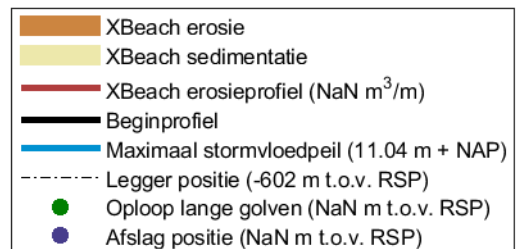
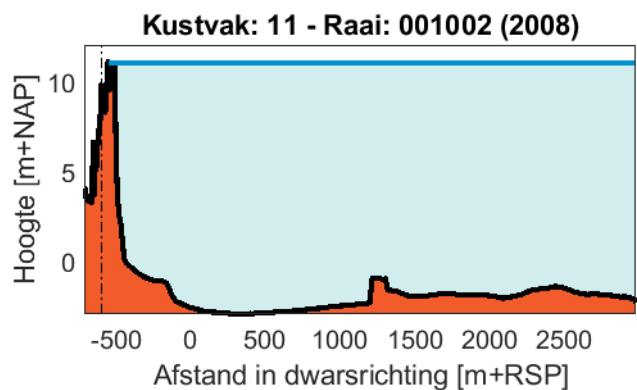
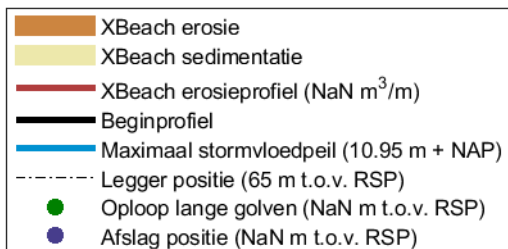
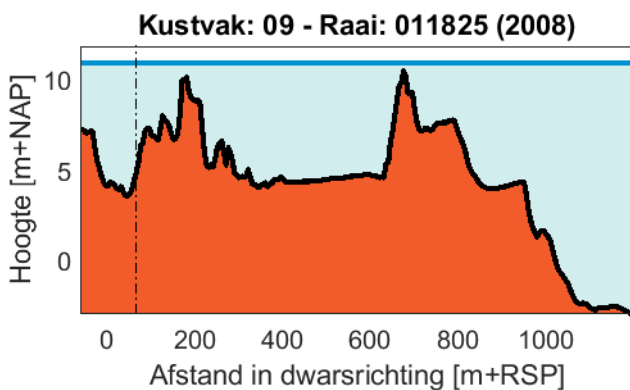
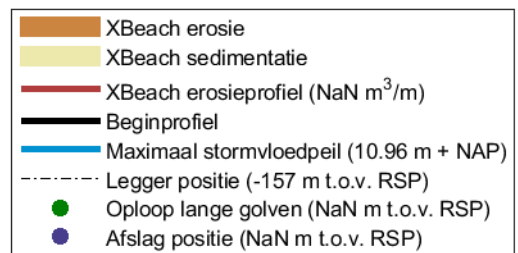
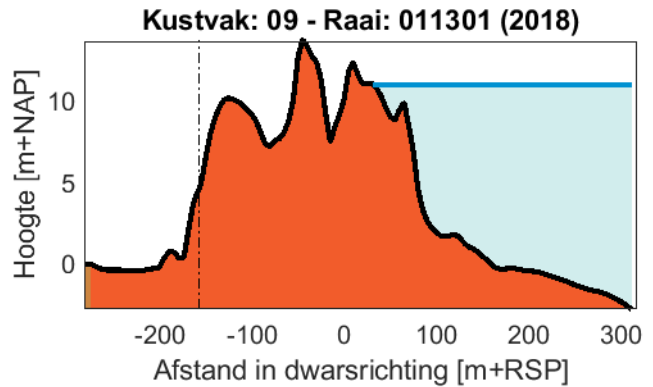
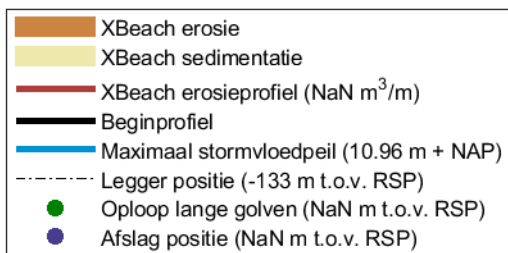
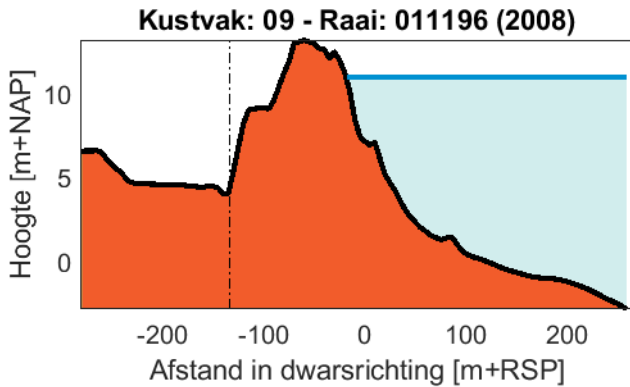


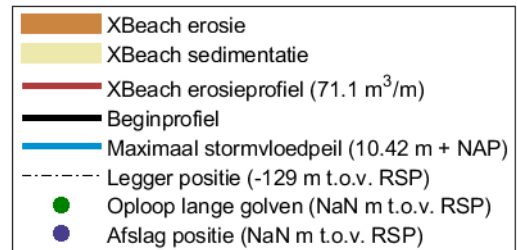
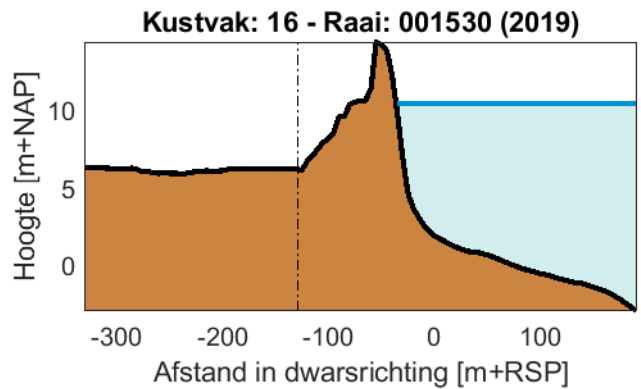
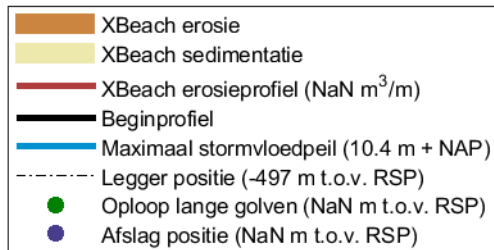
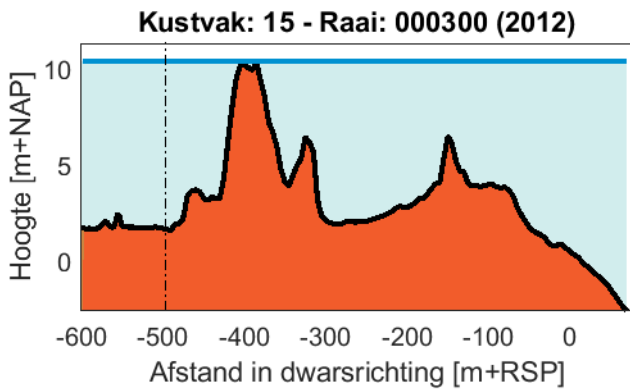
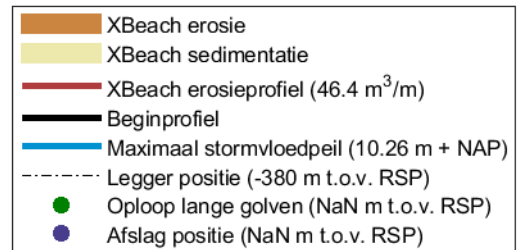
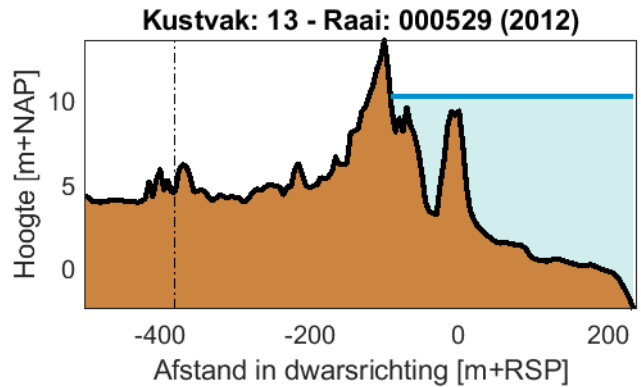
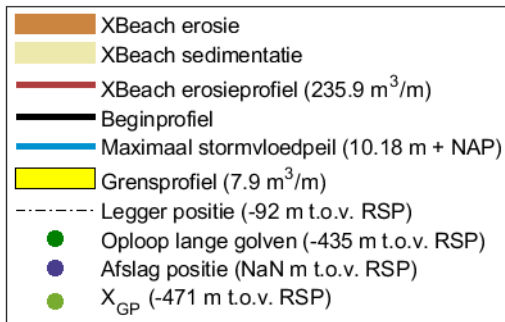
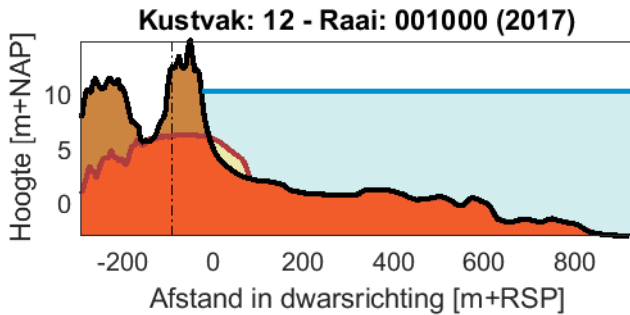


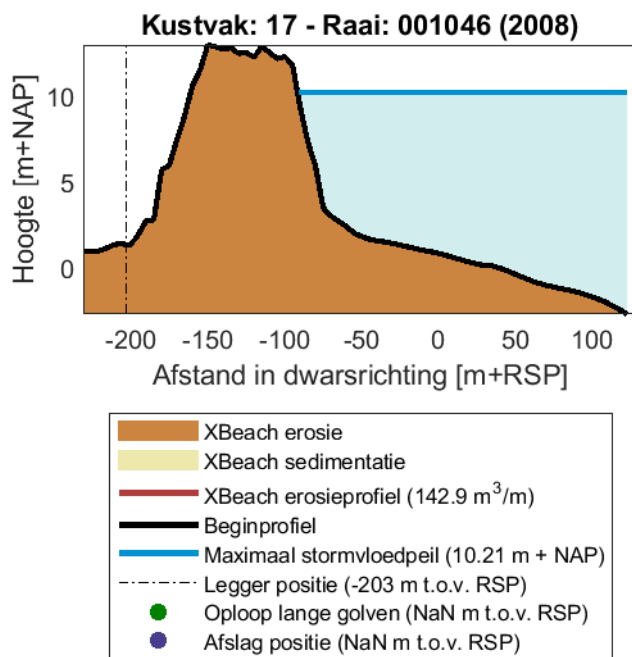








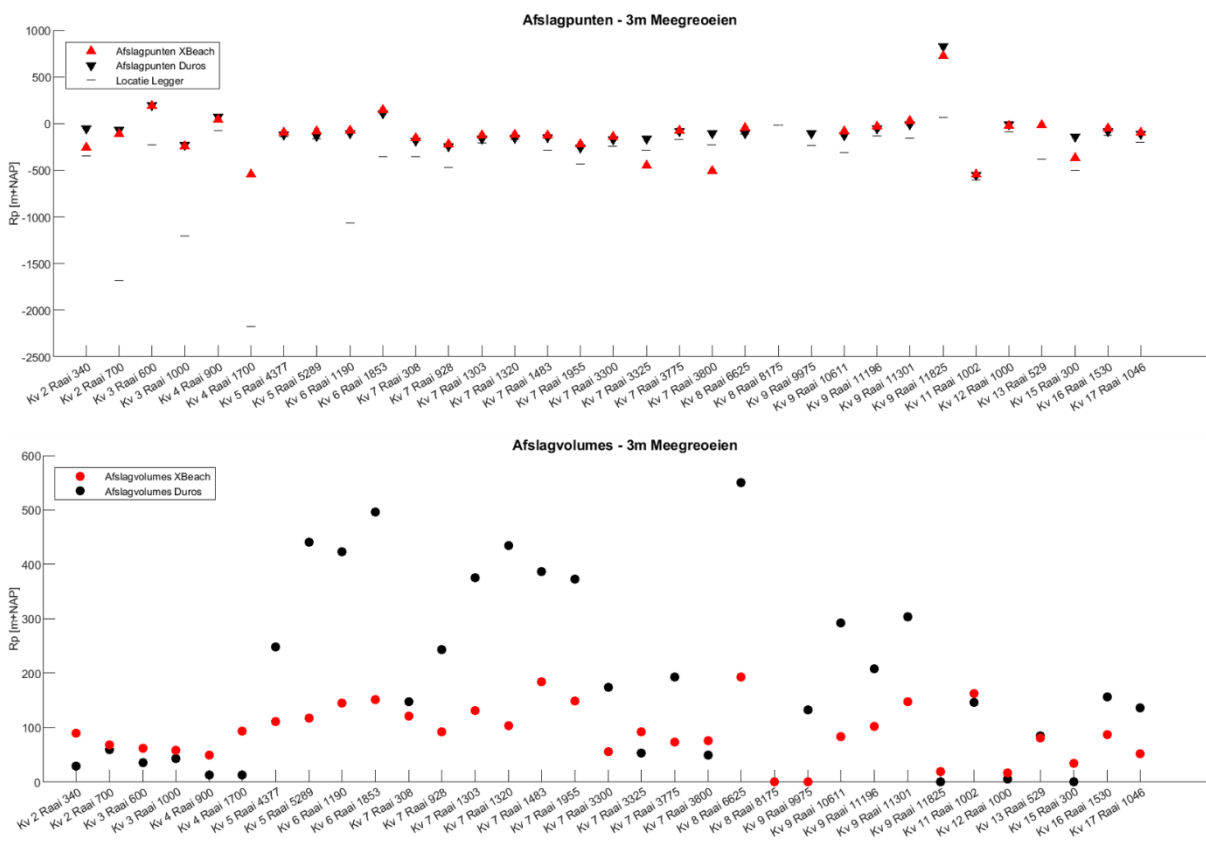




Bijlage E Verschillen XBeach en Duros+

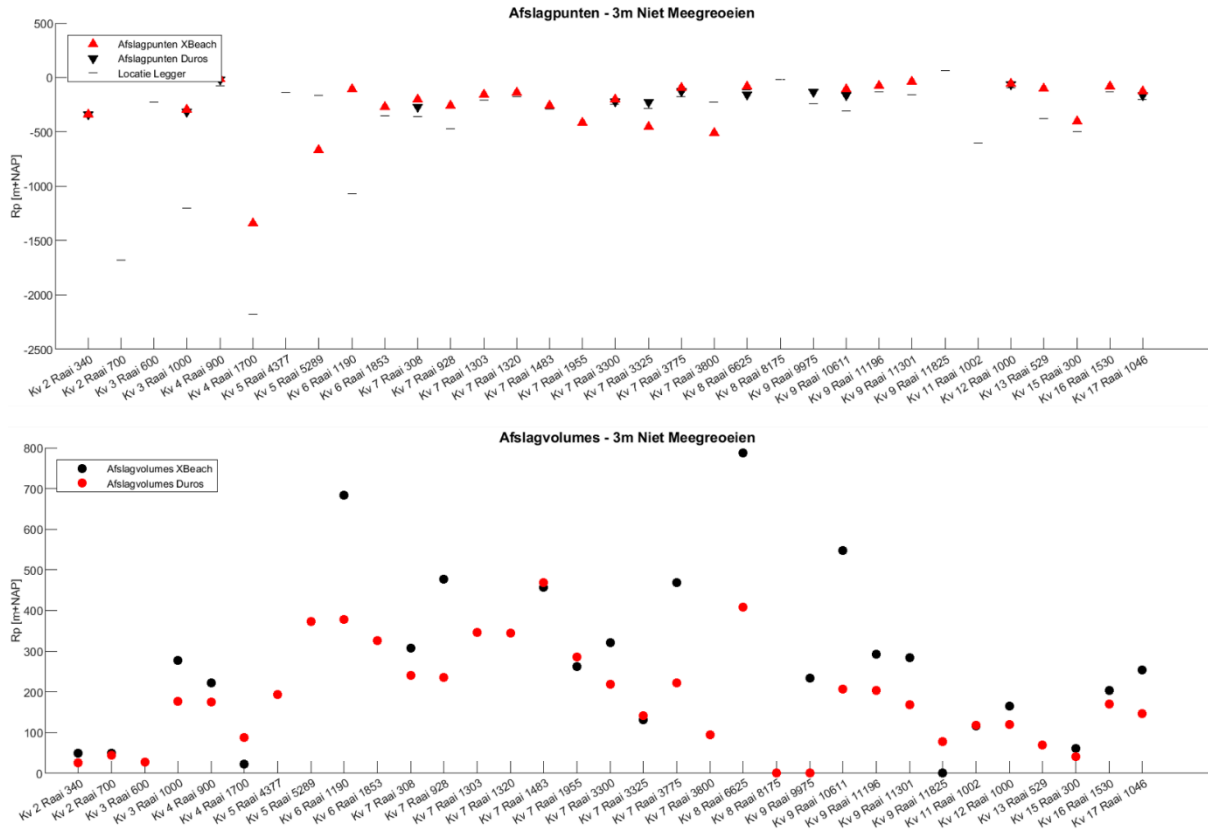
Deze bijlage bevat aanvullende figuren voor de verschillen tussen de berekende afslagpunten en erosievolumes met behulp van XBeach en Duros+.

E.1 3m - Meegroeien



Figuur 33: Verschillen in locatie van de afslagpunten en erosievolumes tussen XBeach en Duros+ voor 3m zeespiegelstijging en het scenario dat de kustprofielen kunnen meegroeien met de mate van zeespiegelstijging

E.2 3m – Niet meegroeiën



Figuur 34: Verschillen in locatie van de afslagpunten en erosievolumes tussen XBeach en Duros+ voor 3m zeespiegelstijging en het scenario dat de kustprofielen Niet kunnen meegroeiën met de mate van zeespiegelstijging.

