



Optimalisatie veiligheidsontwerp Hondsbossche Duinen

Memorandum: *Werkpakket B3; product B3P1*

Datum: *20 November 2018*

Auteurs: *Jakolien Leenders, Carolien Wegman (HKV)
Willem Bodde, Anne Verheijen (Witteveen+Bos)*

Status: *Review uitgevoerd door Marije Smit (Witteveen+Bos) en Henk Steetzel (Arcadis)*



Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
1.1	Doelstelling en onderzoeksvragen	5
1.2	Leeswijzer	5
2	Waterveiligheid, kustlijn­zorg en klimaatscenario's.....	6
2.1	Waterveiligheid in Nederland	6
2.2	Beheer en onderhoud van de Nederlandse kust - Kustlijn­zorg.....	7
2.2.1	Relatie kustlijn­zorg en waterveiligheid	9
2.3	Klimaatscenario's.	10
3	Hondsbos­sche Duinen	11
3.1	Aanlegvolumes.....	11
3.2	Verwachtingen eolisch zandtransport.....	12
3.3	Compensatie zeespiegel­stijging, bodemdaling en eolisch transport.	13
4	Optimalisatie ontwerp.....	14
4.1	Volumebalans HBD	14
4.1.1	Duinaangroei periode 2015-2018.....	14
4.1.2	Verwachting duinaangroei vanaf 2018.....	18
4.1.3	Samenvatting resultaten volumebalans	19
4.2	Detailanalyse voor twee profiel­typen.....	19
4.2.1	Introductie	19
4.2.2	Resultaten	21
4.2.3	Samenvatting resultaten detail analyse.....	22
4.3	Samenvatting/Conclusie compensatie duinaangroei – waterveiligheid	22
5	Effect korreldiameter op veiligheid duin­profiel.....	23
6	Discussie.....	24
6.1	Onzekerheid klimaatscenario's.....	24
6.2	Profielontwikkeling onder water	24
7	Conclusies.....	26
7.1	Compensatie aanlegvolumes	26
7.2	Relatieve veiligheids­waarde eolische deposities	27

8	Referenties	28
	Bijlage A: Achtergrond klimaat scenario's	30
	A.1. KNMI'06 scenario's	30
	A.2. Veerman scenario's	30
	A.3. Deltascenario's	31
	A.4. KNMI'14 scenario's	32
	A.5. Projectie 2018 - Deltares	32
	A.6. Impact zeespiegelstijging op golfkarakteristieken	33
	A.7 Referenties	33
	Bijlage B: technische beschrijving aanpak detailanalyse	34
	B.1. Inleiding	34
	B.2. Methode	34
	B.3. Uitgangspunten en randvoorwaarden	34
	B.4. Resultaten	38
	B.5. Conclusies	41
	B.6 Referenties	41

1 Inleiding

De Hondsbossche en Pettemer Zeewering (HPZ, Figuur 1-1) ligt tussen Camperduin en Petten aan de Noord-Hollandse kust. In de tweede toetsronde bleek dat de HPZ een zwakke schakel in de Noord-Hollandse kust was. De HPZ voldeed niet meer aan de geldende veiligheidseisen en moest worden versterkt. Van september 2014 tot mei 2015 is de HPZ als laatste van de zwakke schakels versterkt. Hierbij is gekozen voor het aanleggen van een zandige oplossing voor de HPZ. Er is bij aanleg ca. 35 miljoen m³ zand aangebracht om de kustlijn te versterken. Het gebied is daarbij omgedoopt tot de Hondsbossche en Pettemer Duinen (HD). Bij het ontwerp is de kustversterking als primair doel gesteld, en is gestreefd om maximale condities te scheppen voor natuur en ruimtelijke beleving en het voorkomen van hinder door stuivend zand. In het Ecoshape monitoringsproject HD zijn in de eerste 3 jaar na aanleg metingen gedaan naar de ontwikkelingen van de HD voor wat betreft natuur, morfologie en beleving. De resultaten van deze monitoring zijn in deelrapporten gerapporteerd (Ecoshape, Product B2P2, 2018, **Product A1, 2018, Product C1, 2018**).



Figuur 1-1: Satellietbeeld van de HPZ (December 2013) en de HD enkele maanden na aanleg (juni 2015) en circa 2 jaar na aanleg (juni 2017) Bron: Google Earth Pro

In dit memo wordt onderzocht of er op basis van de metingen en kennis die is opgedaan in de eerste 3 jaar na aanleg van de HD optimalisatiemogelijkheden zijn aan te wijzen ten behoeve van het ontwerp van een dergelijke versterking. Hierbij wordt specifiek gekeken naar het aspect van de zeespiegelstijging. Was het gezien de actuele processen nodig om bij aanleg van het duin een veiligheidsprofiel op te nemen dat al rekening houdt met klimaatverandering voor over 50 jaar? Of is het aannemelijk dat het natuurlijk proces van duinaangroei de negatieve effecten van waterstandstijging en de bodemdaling op de sterkte van de waterkering over de komende 50 jaar voldoende compenseert? Met andere

woorden: Is het bij versterken met een zandige oplossing aannemelijk te verwachten dat de duinen (en dus de sterkte van de waterkering) meegroeien met de optredende zeespiegelstijging of is het nodig om bij aanleg te compenseren voor de totaal verwachte zeespiegelstijging?

1.1 Doelstelling en onderzoeksvragen

Doelstelling van het uitgevoerde onderzoek is te onderzoeken of er op het gebied van waterveiligheid optimalisatiemogelijkheden zijn aan te wijzen als met de huidige kennis van zaken gekeken wordt naar het ontwerp en de ontwerpeisen van de inmiddels gerealiseerde kustversterking van de HD. Doel is om deze kennis in te kunnen zetten in andere toekomstige projecten waar een kustversterking en/of dynamische duinontwikkeling speelt.

De onderzoeksvragen die dit memo zijn behandeld zijn:

1. In welke mate wordt zandvraag als gevolg van zeespiegelstijging, bodemdaling en eolisch verlies gecompenseerd door eolische depositie?
2. Wat is de relatieve veiligheidswaarde van eolische deposities van zand in relatie tot het aangelegde zand met betrekking tot de korreldiameter?

De scope van deze onderzoeksvragen is het duingebied (vanaf 3,0m+NAP).

Op basis van de bevindingen in dit memo en de bevindingen in de rapportage naar de morfologische ontwikkeling van de HD in de eerste 3 jaar na aanleg (Ecoshape, Product B2P2, 2018) wordt een guideline opgesteld met lessons learned over de morfologische ontwikkeling van een zandige kustversterking. Deze guidelines worden in een apart document opgenomen (Ecoshape, Product B3P2, 2018) en gepubliceerd op de online Ecoshape Wiki.¹

1.2 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft achtergrondinformatie over waterveiligheid en kustlijnzorg in Nederland en geeft daarmee een begrippenkader en context van de vraagstelling. In Hoofdstuk 3 wordt kort ingegaan op de volumes die bij aanleg van de HD zijn aangebracht ter compensatie van zeespiegelstijging en bodemdaling. Hoofdstuk 4 geeft de analyse naar de vraag of de natuurlijke duinaangroei de zeespiegelstijging kan compenseren. Hoofdstuk 5 geeft op basis van literatuur en expert judgement een reflectie op het effect van korreldiameter op veiligheid. In Hoofdstuk 6 worden de resultaten in context van kustlijnzorg en waterveiligheid (Hoofdstuk 2) geplaatst en wordt ingegaan op verschillende klimaatscenario's. Hoofdstuk 7 geeft een samenvatting en conclusies. In hoofdstuk 8 zijn de referenties opgenomen. Tot slot is in de bijlagen een korte beschrijving opgenomen van klimaatscenario's (Bijlage A). In Bijlage B wordt achtergrond gegeven op de analyses die voor dit memo zijn uitgevoerd (Bijlage B).

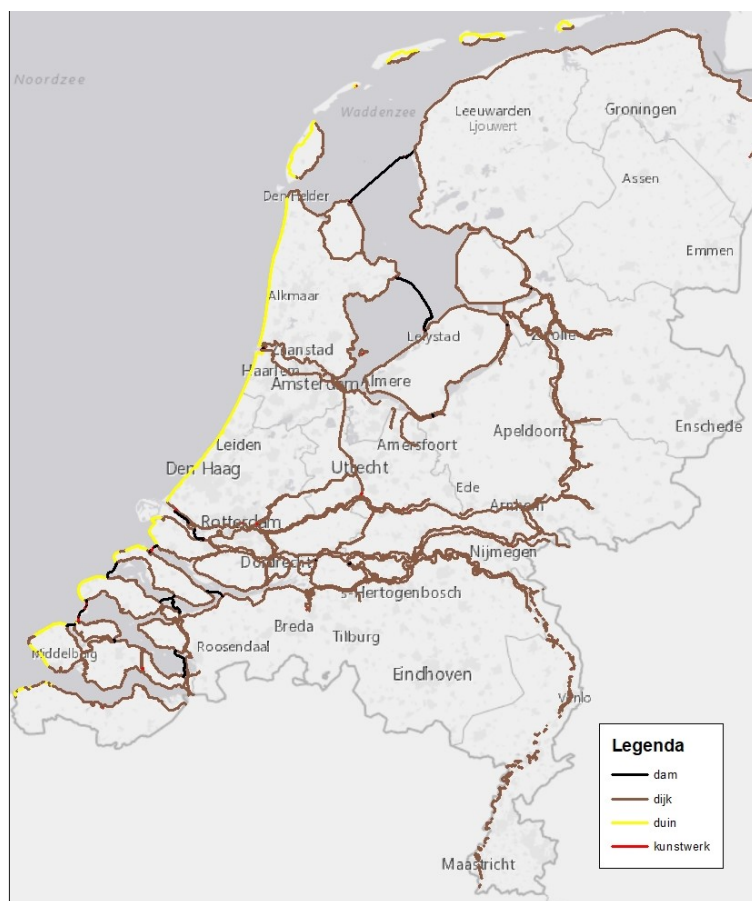
¹ <https://publicwiki.deltares.nl/display/BTG/Hondsbossche+Dunes++NL>

2 Waterveiligheid, kustlijnzorg en klimaatscenario's

In dit hoofdstuk worden belangrijke begrippen en ontwikkelingen op gebied van waterveiligheid (paragraaf 2.1), kustlijnzorg (paragraaf 0) en klimaatscenario's (paragraaf 2.2.1) kort toegelicht. Het hoofdstuk geeft daarmee een begrippenkader en context van de onderzoeksvragen die in dit memo worden onderzocht (Zie paragraaf 1.1). In de discussie in Hoofdstuk 6 worden de resultaten van de analyses in de context van waterveiligheid, kustlijnzorg en klimaatscenario's geplaatst. Paragraaf 2.1 geeft een korte beschrijving van de waterveiligheid in Nederland en de recente ontwikkelingen daarin. In paragraaf 0 wordt ingegaan op de kustlijnzorg, het beheer en onderhoud van de kust in Nederland en de relatie met de waterveiligheid. In paragraaf 2.2.1 wordt ingegaan op verschillende klimaatscenario's en de verwachte zeespiegelstijgingen in deze scenario's.

2.1 Waterveiligheid in Nederland

Nederland kent ongeveer 3500 km primaire waterkeringen, waarvan circa 350 km uit duinen bestaat (Figuur 2-1). De primaire waterkeringen houden het buitenwater (zee, meren en grote rivieren) tegen en beschermen daarmee het achterliggende gebied tegen overstromingen. De primaire waterkeringen zijn ingedeeld in normtrajecten. De waterveiligheid van de duinen is onderhevig aan verschillende processen. Zeespiegelstijging beïnvloedt de toekomstige hydraulische belastingen en vergroot daarmee de kans op overstromen. Anderzijds vindt er door eolische processen aangroei van duinen plaats waardoor er meer volume zand in de duinen komt.



Figuur 2-1: Ligging, primaire keringen, duinen, dijken en kunstwerken in Nederland

In de Waterwet zijn aan de primaire keringen normen toegekend. Periodiek wordt getoetst of de keringen aan deze norm voldoen. Zo is in de tweede toetsronde gebleken dat de HPZ niet aan de wettelijke norm voldeed en is deze versterkt. De kustversterking van de HPZ is ontworpen en aangelegd voor de op dat moment vigerende veiligheidsnormen. Sinds 1 januari 2017 gelden er nieuwe veiligheidsnormen. In Box 1 is wat meer achtergrond gegeven op de overgang naar de nieuwe normen en de consequenties hiervan voor de Noord-Hollandse kust.

Specifiek voor de HD betekent de normverandering dat de HD ontworpen en aangelegd is op hydraulische belastingen die groter zijn dan de nu vigerende hydraulische belastingen voor dit traject. Dit betekent in zekere zin dat de HD 'overgedimensioneerd' zijn voor de huidige inzichten van hydraulische belastingen. Een aanpassing van de randvoorwaarden vanwege verandering van norm, en/of veranderende inzichten in rekenmethoden en onzekerheden beschouwen we niet als mogelijkheid voor optimalisatie. Dit laatste geldt wel voor de mate waarin, bij een dergelijke zandige versterking, al in het ontwerp rekening wordt gehouden met bijvoorbeeld de effecten van zeespiegelstijging.

Aanpassing veiligheidsnormen vanaf 1 januari 2017

Aanleiding voor het aanpassen van de veiligheidsnormen is dat er meer kennis is ontwikkeld op gebied van overstromingsrisico's (kansen en gevolgen) én dat de bevolking is gegroeid en de economische waarde in de overstroombare gebieden sterk is toegenomen. Daarmee zijn ook de potentiële gevolgen van een overstroming toegenomen. De nieuwe veiligheidsnormen zijn gebaseerd op de risicobenadering. Dat wil zeggen kans én gevolgen. Belangrijkste wijzigingen bij de herijking van de normen per 1 januari 2017 is dat niet langer wordt gesproken over een overschrijdingskans maar over een overstromingskans.

- Overschrijdingskans: De kans dat de maatgevende hoogwaterstand wordt overschreden.
- Overstromingskans: Kans op verlies van waterkerend vermogen van een dijktraject.

Ook zijn er geen zogenaamde dijkkringen meer, maar zijn de normen gekoppeld aan dijktrajecten. Met het overstappen op nieuwe normen is er ook een nieuw toetsinstrumentarium, waarin de nieuwste inzichten op gebied van statistieken, rekenmethodes en meenemen van onzekerheden zijn opgenomen.

De nieuwe norm voor het traject van de Hondsbossche en Pettemer Duinen is een overstromingskans van 1/3.000 per jaar². In de oude normen was dit een overschrijdingskans van 1/10.000 per jaar. In de vershilanalyse naar hydraulische belastingen tussen de toetsinstrumentaria van de oude en de nieuwe norm is aangegeven dat de waterstanden langs de Noord-Hollandse kust in het nieuwe toetsinstrumentarium lager zijn dan in het vigerende toetsinstrumentarium ten tijde van het ontwerp en aanleg van de HD. Dit effect wordt met name veroorzaakt door het overstappen op een nieuwe norm en minder door een verandering van database, statistiek en rekenmethode of het meenemen van onzekerheden. De algehele trend voor de golfhoogten is dat deze gelijk blijven of lager worden. Dit geldt ook voor de piekperiode (RWS, 2016).

2.2 Beheer en onderhoud van de Nederlandse kust - Kustlijnzorg³

Nederland heeft van nature een eroderende kust; er verdwijnt meer zand dan dat er wordt aangevoerd. In 1990 is gekozen voor het dynamisch handhaven van de kustlijn. De structurele kustachteruitgang langs de gehele Nederlandse kust wordt daarmee gecompenseerd met zandsuppleties. Hiervoor is de ligging van de basiskustlijn (BKL) maatgevend. Dit is over het algemeen de positie van de 'gemiddelde' kustlijn op 1 januari 1990. Figuur 2-2 geeft een overzicht van de totale volumes aan zandsuppleties die in de periode 2008-2017 zijn uitgevoerd voor handhaving van de BKL. De figuur laat zien dat het volume aan zandsuppleties voor de Noord-Hollandse kust het grootst is (RWS, 2018).

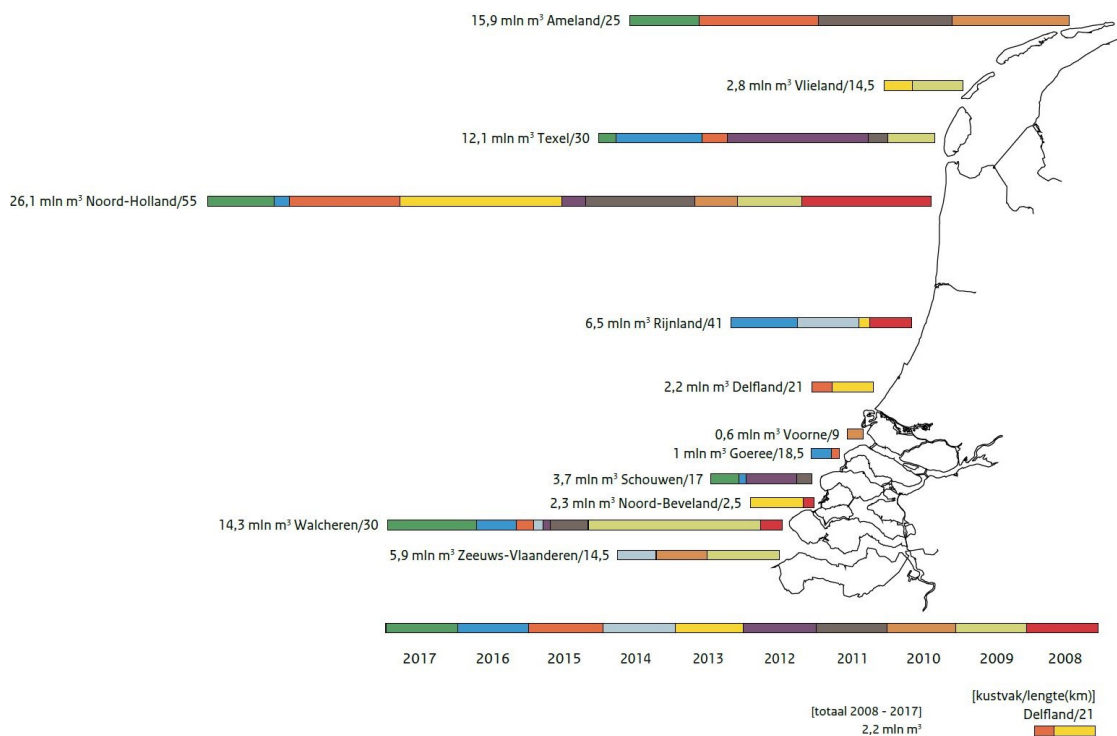
De kustlijn wordt jaarlijks gemeten en met de BKL vergeleken⁴. De BKL geeft de minimale positie aan van de ligging van de kust. Naast het zand voor de BKL wordt ook zand

² Traject 13-2. De maximaal toelaatbare overstromingskans en de signaleringswaarde zijn gelijk.

³ Uit: Stronkhorst J. en Loffler, M, 2014.

aangebracht om het kustfundament (eerste duinenrij tot -20 meter NAP) mee te laten groeien met de stijging van de zeespiegel. De afgelopen jaren was het volume zand voor onderhoud van de kust ca. 12 miljoen m³ zand per jaar. Over een kustlijn van 350 km duinen is dit ca. 34 m³/m/jaar. Het suppletiebeleid is in 2007 geëvalueerd. Daaruit blijkt dat betrokken partijen het suppletiebeleid succesvol vinden, voor wat betreft het bereiken van de doelen voor kustveiligheid. De komende jaren wordt voor de BKL en het kustfundament samen gemiddeld 7 miljoen m³ zand per jaar gesuppleerd. (www.helpdeskwater.nl). Over een kustlijn van 350 km duinen is dit ca. 20 m³/m/jaar.

Op het traject van de Hondsbossche Duinen is geen basiskustlijn (BKL) bepaald. Het onderhoud van de versterking is voor 20 jaar, dus tot eind 2035, bij de aannemerscombinatie (Van Oord & Boskalis) belegd. Dit betekent dat de aannemerscombinatie zand zal suppleren indien nodig, zoals ook bij handhaven van de BKL gebeurt. Zo is in maart 2018 een suppletie in het zuiden van de HD uitgevoerd. Aan het einde van deze onderhoudsperiode zal ook op dit traject een basiskustlijn worden gedefinieerd. Na oplevering wordt deze kustlijn onderhouden in het onderhoudsprogramma Kustlijnzorg van Rijkswaterstaat.

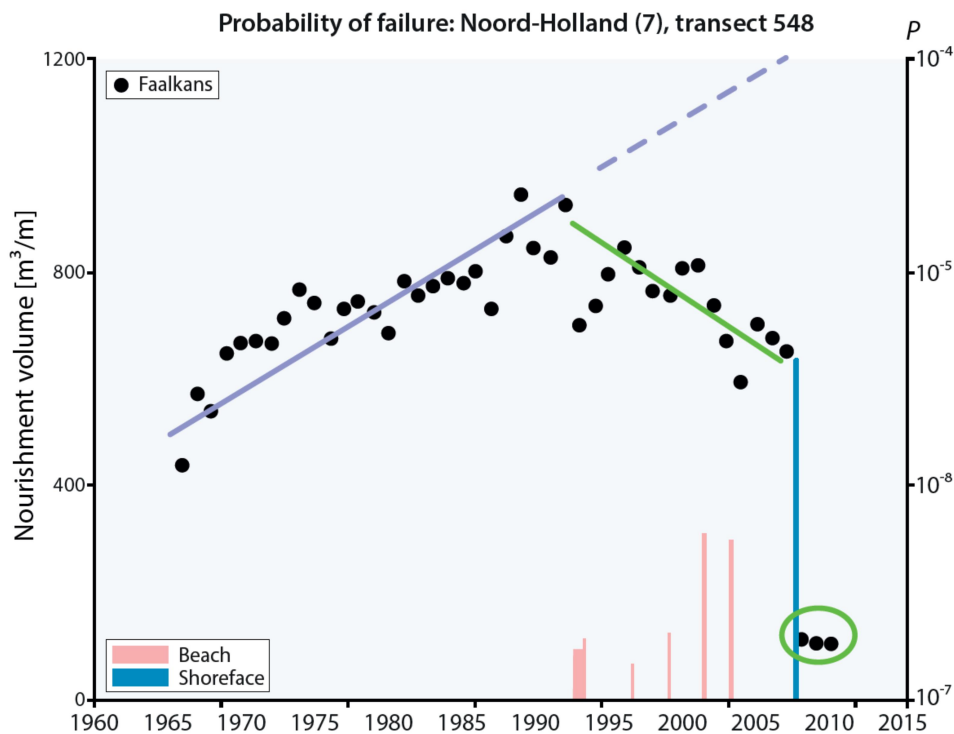


Figuur 2-2: Totale hoeveelheid uitgevoerde zandsuppleties (in m³) voor onderhoud van de kustlijn in de periode 2008 – 2017, per kustvak (Bron: RWS MinlenM, 2017).

⁴ Zie bijvoorbeeld documenten van kustlijnkarten van RWS.
<http://publicaties.minienm.nl/documenten/kustlijnkarten-seriebeschrijving>

2.2.1 Relatie kustlijnzorg en waterveiligheid

Figuur 2-3 illustreert de verandering van de faalkans (P) van de eerste duinenrij in een JarKusraai langs de Noord-Hollandse kust. De figuur laat het effect van strandsuppleties (roze staaf) en vooroeversuppleties (blauwe staaf zien). Het suppletievolume is op de linker as af te lezen. De zwarte bolletjes in de figuur geven de faalkans weer. De faalkans is op de rechter as weergegeven. In de periode 1965 – 1992 is te zien dat de faalkans van de waterkering toeneemt (weergegeven met een paarse trendlijn). Een toename van de faalkans betekent dat de kustveiligheid afneemt. Na strandsuppleties in de jaren daarna (1993 - 2007) neemt de faalkans geleidelijk aan af, weergegeven met de groene lijn. De strandsuppletie in 2008 zorgde voor een sterke afname van de faalkans. De faalkansen in de jaren na 2008 zijn significant kleiner (omcirkeld met groen). (Uit Stronkhorst J. en Loffler, M, 2014, op basis van Giardino et al., 2012).



Figuur 2-3: Verandering van faalkans (P) van de eerste duinenrij in een JarKus raai langs de Noord-Hollandse Kust (Bron: Stronkhorst J. en Loffler, M, 2014)

Door het programma Kustlijn zorg zijn de duinen op vele plaatsen sterker geworden; ca. 30% van het suppletiezand wordt teruggevonden in de duinen (Arens, 2009). De veiligheid van de kust kan worden gekarakteriseerd aan de hand van diverse indicatoren: de positie van de duinvoet, de ligging van de kustlijn, de overschrijdingskans van het maatgevend afslagpunt en de faalkans van de eerste duinenrij (van Balen et al., 2011). Uit onderzoek blijkt dat zandsuppleties een positief effect hebben op deze indicatoren. De veiligheid wordt dus groter: de kustlijn en de duinvoet verplaatsen zich zeewaarts en de faalkans van de eerste duinenrij neemt af. Een groter zandvolume in de BKL-zone resulteert namelijk in een lagere overschrijdingskans van het maatgevende afslagpunt (Steetzel en van Santen, 2010) Dat geldt ook voor de duinen; van Dongeren et al, (2008) constateerde al eerder dat een toe of afname van ongeveer 25 meter duin samengaat met een verandering in de overschrijdingskans van de duinwaterkering met een factor 10.

2.3 Klimaatscenario's.

Er zijn verschillende klimaatscenario's in omloop. In Bijlage A is een samenvatting opgenomen van een aantal gangbare klimaatscenario's in Nederland. De tekst is overgenomen uit een rapportage van Deltares en HKV over zeespiegelindicatoren (Nicolai *et al.*, 2016). In de getallen van bijlage A is de zeespiegelstijging opgenomen als absolute zeespiegelstijging. Als er gesproken wordt over relatieve zeespiegelstijging wordt daarmee de zeespiegelstijging bedoeld ten opzichte van de bodem.

Uit de klimaatscenario's als opgenomen in Bijlage A is te concluderen dat de scenario's niet veel van elkaar verschillen voor het zichtjaar 2050. Voor het zichtjaar 2100 verschillen de scenario's behoorlijk van elkaar: er is veel onzekerheid over de toekomstige emissies en de opwarming en zeespiegelstijging die daarmee gepaard gaat.

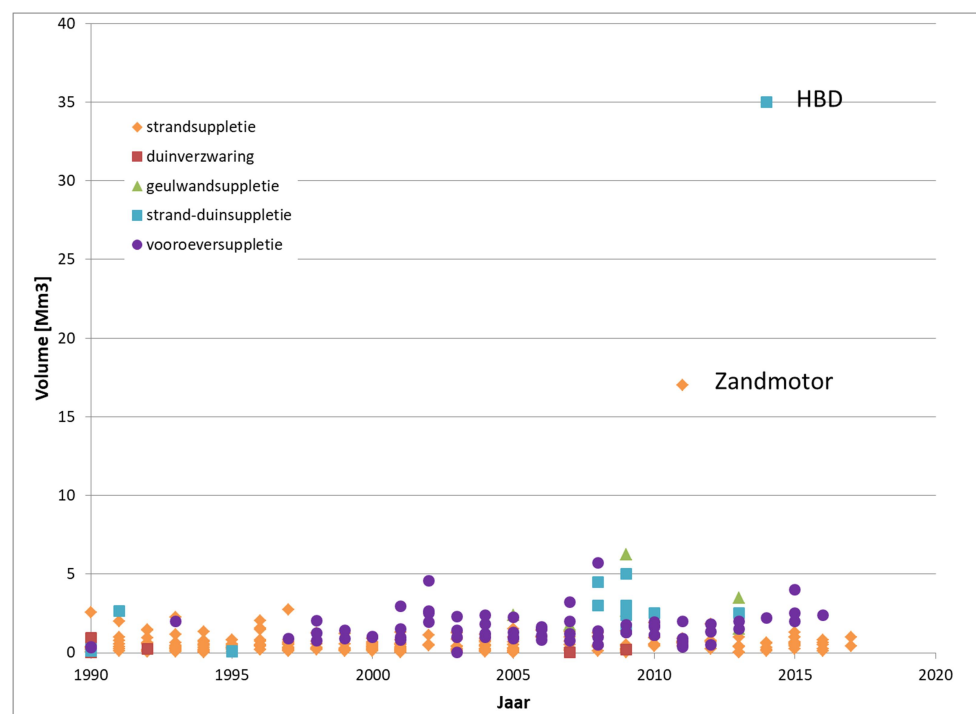
In een recent verschenen rapportage van Deltares (2018) over de mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma wordt dit ook nog eens benadrukt. Er zijn recente inzichten en signalen over mogelijke extra versnelde zeespiegelstijging als gevolg van het versneld afbreken en afsmelten van het ijs van Antarctica. De verwachting is dat in 2021 er officieel nieuwe verwachtingen over klimaatscenario's zullen worden afgegeven door KNMI, op basis van nieuwe scenario's van IPCC. Vooruitlopend daarop heeft KNMI projecties gemaakt tot het jaar 2100 waarin deze inzichten (die uiteraard nog onzeker zijn) zijn verwerkt. Tot 2050 verschillen deze projecties nauwelijks van de bovenwaarde van de Deltascenario's (Warm / Stoom). Dat wil zeggen een zeespiegelstijging van 40 cm in 2050 en 100 cm in 2100 (ten opzichte van zichtjaar 1995). Na 2050 is er wel een sterke afwijking en neemt de onzekerheidsmarge toe. In de nieuwe projecties wordt een zeespiegelstijging van 0,3 tot 2,0 m mogelijk geacht (bij het halen van de Parijs doelen van maximaal 2°C opwarming in 2100. Bij een sterkere opwarming van de aarde (4°C) kan dit oplopen tot 2,0 m (middenwaarde) tot 3,0 m (bovenwaarde) in 2100 (Deltares, 2018).

De zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust bedraagt momenteel circa 2 mm/jaar. In de Deltascenario's loopt deze op tot 10 mm/jaar rond 2050 tot maximaal 14 mm/jaar in 2100. Bij de extra versnelde zeespiegelstijging kan de snelheid van 14 mm/jaar al bereikt worden rond 2050 en loopt deze daarna op tot ± 20 – 35 mm/jaar rond 2070 en tot mogelijk zelfs 60 mm/jaar of meer aan het einde van deze eeuw (Uit: Deltares, 2018).

3 Hondsbossche Duinen

De eisen die voor het ontwerp van de kustversterking van de HPZ golden zijn opgenomen in een vraagspecificatie producteisen (VSE, 2013). In het document inventarisatie 'Inventarisatie maatregelen ontwerp HPZ' (Ecochape, Product B1P1, 2016) is een samenvatting van deze eisen opgenomen.

De Hondsbossche Duinen is veruit de grootste suppletie die in Nederland is gedaan sinds 1990 (Figuur 3-1). Het suppletievolume van de zandmotor, aangelegd in 2011 voor de kust van Delfland bedraagt circa de helft van het suppletievolume van de HD.



Figuur 3-1: Suppleties die zijn aangebracht in kader van kustlijn­zorg sinds 1990 (Bron: database suppleties uit Morphan versie 1.6.1.39872).

3.1 Aanlegvolumes.

Tabel 3-1 geeft een overzicht van de volumes die zijn aangebracht bij de aanleg van de Hondsbossche Duinen.

Aanlegvolume Ontwerp	Volume inschatting ontwerp [Mm³]
Volume voor Kustveiligheid [Mm³]	26,1
Volume ter compensatie van eolische verliezen [Mm³]	0,2
Volume ter compensatie van zetting [Mm³]	2,0
Volume ter compensatie van hydraulische verliezen [Mm³]	7,0
Volume t.b.v. ruimtelijke kwaliteit [Mm³]	0,3
Totaal Initieel aanlegvolume	35,6

Tabel 3-1: Aanlegvolumes kustversterking HPZ (Bron: E-mail Paul Olijslager dd 26 juni 2015).

In het volume voor kustveiligheid is het volume opgenomen om te voldoen aan de randvoorwaarden HR2006 (tot 20 jaar na acceptatie van aanleg) rekening houdend met het klimaat en bodemdaling over 50 jaar. Dit betreft het aanlegvolume. Het suppletievolume dat gedurende de onderhoudsperiode zal worden aangebracht is niet in de tabel opgenomen. De aannemerscombinatie zal indien nodig, suppleren om de kustlijn te handhaven zoals ook bij handhaven van de BKL gebeurt.

Voor het klimaat is conform de Vraagspecificatie Eisen (VSE,2013) uitgegaan van het middenscenario met een zeespiegelstijging van 0,3 m. Er is daarbij geen rekening gehouden met veranderingen in golfhoogte en piekperiode van golven. In het VSE (2013) is opgenomen een gevoeligheidsberekening te doen voor het maximum scenario van zeespiegelstijging van 0,45 m.

HKV heeft recent onderzoek gedaan naar het effect van 1 m zeespiegelstijging op de golfkarakteristieken (Wegman en Nicolai, 2018). Resultaat van de studie is dat de golfkarakteristieken (golfhoogte en piekperiode) niet noemenswaardig veranderen bij een zeespiegelstijging van 1 meter. Dit betekent dat het aanhouden van golfstatistiek die onafhankelijk is van zeespiegelstijging terecht is voor het bepalen van de hydraulische belasting op de kust. Voor het berekenen van het afslagvolume bij een klimaatscenario houden we daarom in deze studie ook alleen rekening met een verandering in zeespiegelstijging.

Voor bodemdaling is uitgegaan van 0,1 m over de periode 2016 – 2066, zoals beschreven in de vraagspecificatie eisen(VSE, 2013). Er is in het ontwerp echter niet vanuit gegaan dat de bodemdaling met de gemiddelde zeespiegelstijging meegroeit, zoals beschreven in het VSE. Er is bij aanleg voor gekozen om deze 0,1 m bij aanleg reeds aan te brengen⁵.

3.2 Verwachtingen eolisch zandtransport

In het ontwerp document 'Initieel Aanlegprofiel, Prognose van eolisch zandverlies' (ZSNH, 2012) is aangegeven dat de **potentiele** groei van duinen door alleen wind 30 m³/m/jaar is. Hierbij is geen rekening gehouden met eroderende processen als kustafslag.

De gemiddelde netto groei van duin (inclusief effect van duinafslag) voor de Nederlandse kust bedraagt 8,7 m³/m/jaar bedraagt. Hierbij is de duinvoet gekozen op 3,0 m+NAP. Dit is gebaseerd op analyses van De Vries et al. (2012) en Van der Wal (2004).

In het document over de prognoses van eolisch zandtransport (ZSNH, 2012) is aangegeven dat bij het ontwerp van de kustversterking van de HPZ wordt uitgegaan van een aanzanding van de Hondsbossche Duinen van 35 m³/m/jaar in de eerste 3 jaar na aanleg en 10 m³/m/jaar voor de daaropvolgende jaren tot 2040. Deze waarden zijn gebaseerd op basis van literatuur (De Vries et al. 2012 en Van der Wal, 2004) en ervaringen met stuifzand na aanleg van nieuw strand bij Maasvlakte 2 en Vlughtenburg en op basis van een analyse van 17 Jarkusraaien nabij Castricum over de periode 1981-2000. Zie onderstaande tabel.

Periode	Groei Duin [m ³ /m/jaar]	
	Gemiddeld	Standaarddeviatie
1981 - 1985	9,1	14,7
1986 - 1990	10,3	7,4
1991 - 1995	2,0	9,9
1996 - 2000	14,9	6,8

Tabel 3-2: Jaarlijkse groei van duinen bij Castricum, gemiddeld en standaarddeviatie voor 17 Jarkusraaien (bron: ZSNH, 2012)

⁵ Bron: commentaar Paul Olijslager 07/01/16 op eerdere versie van dit memo

3.3 Compensatie zeespiegelstijging, bodemdaling en eolisch transport.

Deze paragraaf geeft een overzicht van de volumes die bij aanleg zijn aangebracht ter compensatie van zeespiegelstijging, bodemdaling en eolisch transport. De volumes zijn berekend in gemiddelde volumes per jaar. In de analyse van de volgende paragraaf worden deze volumes worden vergeleken met de gemeten duinaangroei over de eerste 3 jaar na aanleg van de HD en de verwachting van duinaangroei in de komende jaren.

Volumecompensatie voor zeespiegelstijging

Zoals in paragraaf 3.1 genoemd, is bij de HD bij aanleg een compensatievolume aangebracht van 0,3 m voor zeespiegelstijging en 0.1 m voor bodemdaling. Dit is een relatieve zeespiegelstijging van 0,4 m. Uitgaande van een uniforme zeespiegelstijging en bodemdaling over de komende 50 jaar en een droog profiel van 600 m breed, betekent dit een volume van 4,8 m³/m/jaar (0,4 m * 600 m/ 50 jaar). Hierbij hoort een totaalvolume van 1,6 Mm³ (6750 m * 50 jaar * 4,8 m³/m/jaar).

De aangenomen breedte van 600 m is conservatief. Dit is de breedte van het dwarsprofiel in de metingen. Dit betekent dat de inschatting van het volume van 4,8 m³/m/jaar conservatief is. De inschatting van het totaalvolume van 1,6 Mm³ geeft een conservatieve (hoge) schatting van het aangebrachte compensatievolume, bedoeld om een veilig oordeel te geven over de vraag of dit aangebrachte volume niet had hoeven worden aangebracht, als rekening wordt gehouden met natuurlijke duinaangroei.

Volumecompensatie voor eolisch verlies

Bij aanleg van de kustversterking is ook het totaal eolisch verlies dat over de periode van aanleg tot 20 jaar na Acceptatie wordt verwacht, gecompenseerd door dit volume direct aan te brengen. Het totaal eolisch verlies over 20 jaar na acceptatie van aanleg is geschat op: 0,18 Mm³. Gemiddeld over 20 jaar betekent dit een gemiddeld volume van 1,35 m³/m/jaar. (0,2Mm³/6750 m(lengte)/20 jaar=1,35 m³/m/jaar).

Beschouwde scenario's in analyse

In de analyse van dit memo onderzoeken we of het bij aanleg aangebrachte volume ter compensatie van zeespiegelstijging, bodemdaling en eolisch verlies mogelijk ook door natuurlijk aangroei van duinen plaatsvindt. Dit zou betekenen dat dit volume bij aanleg niet aangebracht had hoeven worden.

Daarnaast beschouwen we de vraag breder en onderzoeken we of de natuurlijke duinaangroei eventueel ook groot genoeg is om extremere verwachtingen ten aanzien van zeespiegelstijging te compenseren. We beschouwen in dit memo 2 scenario's (Zie ook Tabel 3-3):

- Scenario 1: een relatieve zeespiegelstijging van 0,4 m, met daarbij compensatie voor eolisch verlies voor de komende 20 jaar. Dit betekent een benodigd compensatievolume van 6,15 m³/m/jaar.
- Scenario 2: een relatieve zeespiegelstijging van 0,55 m, met daarbij compensatie voor eolisch verlies voor de komende 20 jaar. 7,95 m³/m/jaar.

In onderstaande tabel zijn deze scenario's verder uitgewerkt:

	Relatieve Zeespiegel- stijging	Breedte profiel	Compensatie volume rel. zeespiegelstijging	Compensatie volume eolisch verlies	Totaal
	[m]	[m]	[m³/m/jaar]	[m³/m/jaar]	[m³/m/jaar]
Scenario 1	0,4	600	4,8	1,35	6,15
Scenario 2	0,55	600	6,6	1,35	7,95

Tabel 3-3: Benodigde compensatievolumes in de te beschouwen scenario's in dit memo.

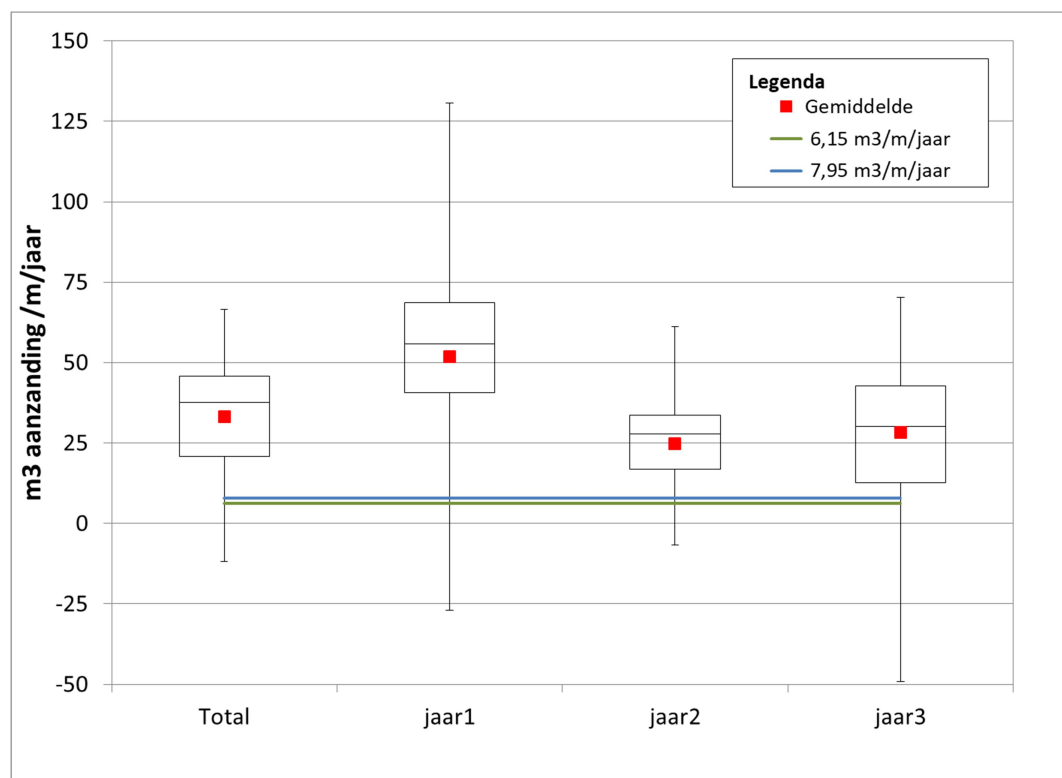
4 Bouwstenen voor optimalisatie ontwerp

Dit hoofdstuk geeft de analyse voor optimalisaties in het ontwerp ten aanzien van compensatie van zeespiegelstijging en bodemdaling en eolisch verlies. Paragraaf 4.1 geeft daarbij een beschouwing van de meetresultaten op basis van de metingen de eerste 3 jaar na aanleg en verwachtingen over aanzandingsvolumes in de komende jaren. Paragraaf 4.1.2 geeft een beschouwing op de te verwachten aangroevolumes voor de komende jaren. Paragraaf 4.2 geeft voor 2 profielen een analyse met afslagberekeningen voor verschillende scenario's. In paragraaf 4.3 worden de resultaten samengevat en conclusie getrokken ten aanzien van de vraag of duinaangroei de zeespiegelstijging en bodemdaling kan compenseren.

4.1 Volumebalans Hondsbossche Duinen

4.1.1 Volumetoename duinen periode 2015-2018

Voor de aangroei van de duinen wordt de aanzanding boven de duinvoet op 3 m+NAP beschouwd (Ecoshape, Product B2P2, 2018). De HD zijn de eerste 3 jaar na aanleg gemiddeld met 33 m³/m/jaar aangezand. De mediane waarde (50% waarde) van de aanzanding van de HD is 37 m³/m/jaar (Zie Figuur 4-1 en Tabel 4-1). Deze waarden komen overeen met de inschatting die bij het ontwerp is gemaakt voor de eerste 3 jaar na aanleg. In Figuur 4-1 en Tabel 4-1 is te zien dat de aanzanding in het eerste jaar na aanleg het sterkst was. De gemiddelde en mediane waarde van aanzanding in jaar 2 en jaar 3 zijn vergelijkbaar.



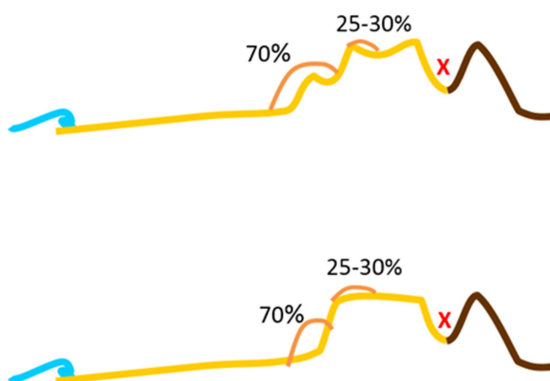
Figuur 4-1: Boxplot van aanzanding in m³/m/jaar over de HD over de eerste 3 jaar na aanleg. In de boxplot is weergegeven de minimale waarde, 25% waarde, mediaan (50% waarde), 75% waarde en maximum waarde. De rode stip is de gemiddelde waarde.

Aanzanding Hondsbossche Duinen [m ³ /m/jaar]				
	Totale periode	Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3
Meetperiode	24/05/2015 – 19/03/2018	24/05/2015 – 21/03/2016	21/03/2016 – 19/04/2017	19/04/2017 – 19/03/2018
Minimum	-11.7	-26.9	-6.7	-49.2
25% waarde	20.8	40.6	16.8	12.6
50% waarde	37.6	55.9	27.7	30.1
75% waarde	45.8	68.6	33.6	42.7
Maximum waarde	66.6	130.6	61.2	70.3
Gemiddelde waarde	33.1	51.9	24.9	28.3

Tabel 4-1: Aanzanding Hondsbossche Duinen over de eerste 3 jaar na aanleg.

De gemeten volumes van aanzanding zijn beduidend grotere waarden dan de compensatievolumes die bij aanleg zijn aangebracht voor zeespiegelstijging, bodemdaling en eolisch verlies. (zie paragraaf 3.3). Deze volumes zijn 6,15 m³/m/jaar of 7,95 m³/m/jaar (uitgaande van een compensatie van 0,3 of 0,45 m zeespiegelstijging over 50 jaar, 0,1 m bodemdaling over 50 jaar en eolisch verlies over 20 jaar). De gemiddelde aanzanding in de eerste 3 jaar na aanleg is een factor 5 hoger ten opzichte van de benodigde compensatie voor 0,3 m zeespiegelstijging (en bodemdaling en eolisch verlies) (compensatie volume van 6,15 m³/m/jaar). Voor een zeespiegelstijging van 0,45 m is de gemiddelde aanzanding (compensatie volume van 7,95 m³/m/jaar) in de eerste 3 jaar na aanleg een factor 4 hoger.

Uit de analyse van de aanzanding in de duinen (Ecoshape, Product B2P2, 2018) blijkt dat in de kustdwarse richting het zand vooral (ongeveer 70%) op de zeewaartse zijde, op het onderste deel van het duin terecht is gekomen (tot NAP + 6m). Een klein deel kwam boven op het duin en dan met name aan de zeewaartse zijde (Zie Figuur 4-2). Er stoof nauwelijks zand door richting de oorspronkelijke HPZ. Dit betekent dat het verstuivende zand beschikbaar blijft binnen het veiligheidsprofiel en dus de veiligheid niet minder wordt door eolische verliezen. Zo bezien is compensatie van dit volume voor eolisch verlies dus niet nodig, aangezien dit niet is opgetreden.

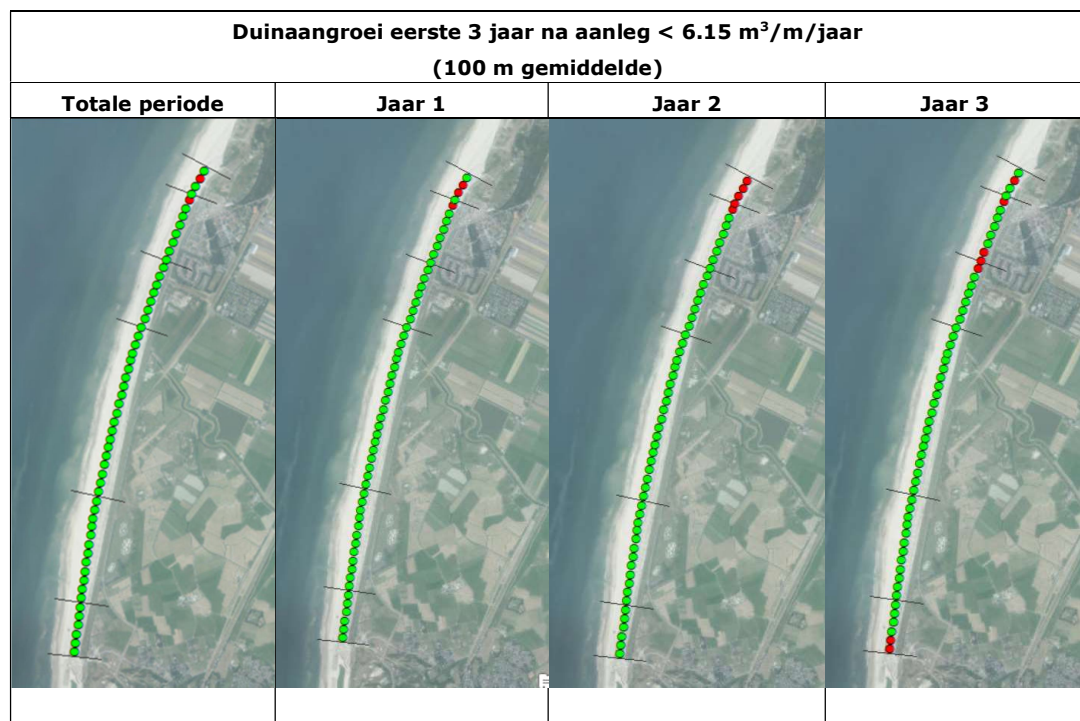


Figuur 4-2: Schematische accumulatieverdeling - deze is gelijk voor profielen met een laag en hoog duin (boven) en voor profielen met alleen een hoog duin (onder) (Ecoshape, Product B2P2, 2018).

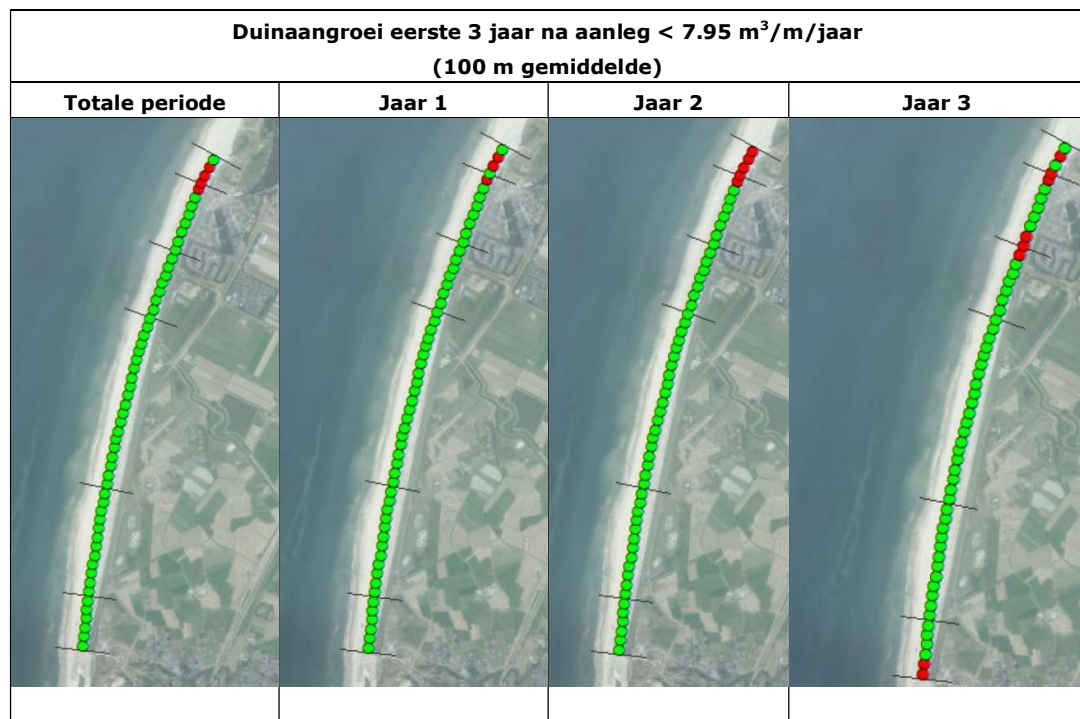
De minimumwaarde van aanzanding is lager dan 6,15 of 7,95 m³/m/jaar (Figuur 4-1 en Tabel 4-1). Dit betekent dat er locaties zijn waarop de aanzanding minder is dan de benodigde aanzanding ter compensatie van zeespiegelstijging, bodemverlies en eolisch verlies.

In Figuur 4-3 zijn de locaties waarop de aanzanding in de eerste 3 jaar minder is dan 6,15 m³/m/jaar ruimtelijk weergegeven. Dit zijn de rode bolletjes in de figuur. De locaties verschillen tussen de jaren. In het 3^e jaar na aanleg is in het zuiden de aanzanding minder dan 6,15 m³/m jaar. Dit wordt mogelijk verklaard doordat hier de strandbreedte sterk afgenomen is. In maart 2018 is hier een suppletie uitgevoerd, het effect hiervan op de duinen zit nog niet in deze meetreeks.

In Figuur 4-4 zijn de locaties waarop de aanzanding in de eerste 3 jaar lager is dan 7,95 m³/m/jaar ruimtelijk weergegeven. Dit zijn de rode bolletjes in de figuur. De locaties waar de aanzanding minder is dan de benodigde aanzanding ter compensatie van zeespiegelstijging, bodemverlies en eolisch verlies zijn iets toegenomen, maar het patroon is vergelijkbaar met Figuur 4-3.



Figuur 4-3: Overzicht van locaties langs de HD waarbij de aanzanding meer (groen) en minder (rood) is dan 6,15 m³/m/jaar.



Figuur 4-4: Overzicht van locaties langs de HD waarbij de aanzanding meer (groen) en minder (rood) is dan 7,95 m³/m/jaar.

4.1.2 Verwachting volumetoename duinen vanaf 2018

In het ontwerp van de HD is aangenomen dat 3 jaar na aanleg de aanzanding vermindert ten opzichte van de eerste 3 jaar na aanleg. De aanzanding na 3 jaar is ingeschat op $10 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ op basis van een analyse van een aantal jaren bij Castricum.

In Figuur 4-5 is een impressie gegeven van de strandbreedte bij Castricum en de Hondsbossche Duinen. Het strand bij de Hondsbossche Duinen is breder dan bij Castricum (zelfde schaal is toegepast). De gemiddelde strandbreedte over een periode van 10 jaar bij Castricum is 48 m (Decisio, 2011). Bij de Hondsbossche Duinen was de mediane waarde van de strandbreedte bij aanleg in 2015 130 m en aan het eind van de meetperiode in 2018 was deze 70 m (op basis van meetresultaten uit het Ecoshape monitorings project). Met name in het zuiden van het gebied is de strandbreedte sterk afgenomen. Hier is in maart 2018 een suppletie uitgevoerd. Het strand bij de Hondsbossche Duinen is breder dan bij Castricum.



Figuur 4-5: Screenshot google maps van strandbreedte bij Hondsbossche Duinen en Castricum aan Zee (zelfde resolutie toegepast). Bron: Google Earth Pro

De Vries et al. (2012) en Van der Wal (2004) vinden een lineair verband tussen de strandbreedte en de aanzanding van een duin (uit: Ontwerp document 'Initieel Aanlegprofiel, Prognose van eolisch zandverlies' (ZSNH, 2012)). Hierbij is ook aangegeven dat volgens De Vries et al. niet alleen de breedte van het strand, maar ook de breedte van de vooroever effect heeft op de hoeveelheid verstuiving en groei van het duin. In relatief steile kustprofielen is relatief weinig groei van duinen waargenomen (Bron ZSNH, 2012, mondelinge conversatie De Vries). Op basis van analyse van de breedte van het intergetijdengebied, ondiepe vooroever en strand bij de HD (Van Maanen 2018 en product B2P2, 2018) is er geen eenduidige relatie tussen de aanzanding van het duin en de breedte van strand, intergetijdengebied en vooroever gevonden bij de HD. Mogelijke verklaring hiervoor is dat er zo kort na de aanleg zoveel zand beschikbaar is voor aanzanding van het duin, dat deze niet limiterend is voor de aangroei van het duin waardoor een relatie tussen deze parameters niet zichtbaar wordt. We merken ook op dat het studiegebied mogelijk te klein is en de meetreeks te kort om dergelijke trends te ontdekken. Indicatie dat deze relatie mogelijk wel bestaat is dat bij afnemende strandbreedte in het zuiden van de HD de aanzanding ook sterk afneemt.

Als we ervan uitgaan dat het brede strand bij de HD de komende jaren gehandhaafd blijft, is het strand bij de HD breder dan op veel plekken langs de Noord-Hollandse kust. Uitgaande van een relatie tussen strandbreedte en duinen (De Vries et al. (2012) en Van der Wal (2004)) en een gemiddelde duinaangroeisnelheid van $10 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ voor de Hollandse kust, is een duinaangroeisnelheid van $10 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ voor de komende jaren bij de HD een realistische verwachting en waarschijnlijk aan de lage kant. Daar komt bij dat er ook nog relatief veel sediment in de vooroever aanwezig is, wat in potentie voor extra duinaangroei kan zorgen.

4.1.3 Samenvatting resultaten volumebalans

Op basis van de metingen over de aanzanding de eerste 3 jaar na aanleg van de HD (paragraaf 4.1.1) en verwachting voor de komende jaren van aanzanding (paragraaf 4.1.2) wordt het volgende geconcludeerd:

- eolisch verlies uit het veiligheidsprofiel treedt eigenlijk niet op, dus had bij de huidige eisen niet hoeven worden aangebracht bij aanleg, dit had in het aanlegvolume $0,2 \text{ Mm}^3$ zand gescheeld op het totaal van $35,6 \text{ m}^3$ zand wat initieel is aangebracht.
- de aanzanding van het duin kan een zeespiegelstijging van $0,3 \text{ m}$ of $0,45 \text{ m}$, met een bodemdaling van 10 cm voor de komende 50 jaar compenseren. Op slechts enkele locaties zal de aanzanding de zeespiegelstijging (en bodemdaling en eolische verliezen) niet compenseren. Dit had in het aanlegvolume $1,6 \text{ Mm}^3$ zand gescheeld op het totaal van $35,6 \text{ m}^3$ zand wat initieel is aangebracht.
- In totaal had $1,8 \text{ Mm}^3$ kunnen worden bespaard. Dit is ongeveer 5% van het totale aanlegvolume van $35,6 \text{ Mm}^3$. We merken op dat de aangebrachte compensatie voor bodemdaling en zeespiegelstijging van $1,6 \text{ Mm}^3$ is gebaseerd op een droog profiel van 600 m breed. Dit geeft een conservatieve (hoge) schatting van het aangebrachte compensatievolume, bedoeld om een veilig oordeel te geven over de vraag of dit aangebrachte volume niet had hoeven worden aangebracht, als rekening wordt gehouden met natuurlijke duinaangroei. Het werkelijk aangebrachte compensatievolume voor bodemdaling en zeespiegelstijging is mogelijk lager, omdat dit over een kleinere breedte is aangebracht, en gaat meer richting de helft ($0,8 \text{ Mm}^3$). Hiermee rekening houdend was er een besparing mogelijk van ongeveer 1 Mm^3 ($0,2 \text{ Mm}^3 + 0,8 \text{ Mm}^3$). Dit is ongeveer 3% van het totale volume van $35,6 \text{ Mm}^3$.

4.2 Detailanalyse voor twee profieltypen

4.2.1 Introductie

Om nader te onderzoeken of de duinaangroei door eolische deposities bij de Hondsbossche Duinen inderdaad opweegt tegen de zeespiegelstijging en bodemdaling op het gebied van kustveiligheid, wordt de ontwikkeling van de kustveiligheid als gevolg van verschillende toekomstscenario's in meer detail voor 2 profielen geanalyseerd en gekwantificeerd.

De belangrijkste onderdelen van deze scenario's zijn zeespiegelstijging en bodemdaling. Als gevolg hiervan neemt de veiligheid af bij een gelijkblijvend duinprofiel. Om dit te kwantificeren is de afname bepaald door middel van afslagberekeningen met DUROS+ en XBeach. De afname van veiligheid die daaruit volgt, is afgewogen tegen de toename van de veiligheid door de eolische duinaangroei.

De berekeningen worden uitgevoerd voor twee profielen:

- JarKusraai 7002123: profieltype 2 Noord (P2N) - hoog, smal duin
- JarKusraai 7002454: profieltype 3 Zuid (P3Z) - breed duin inclusief laag voorduin

Door twee profielen te beschouwen, wordt de eventuele gevoeligheid van de resultaten voor de vorm van het profiel in beeld gebracht. Daarnaast heeft in profieltype 2 Noord minder duinaangroei ($45 \text{ m}^3/\text{m}$) en meer erosie van de lagergelegen delen (strand, intergetijdengebied, vooroever) plaatsgevonden dan in profieltype 3 Zuid (duinaangroei $190 \text{ m}^3/\text{m}$) in de 3 jaar na aanleg. P2N betreft daardoor een slanker profiel, met minder volumeoverschot dan P3Z.

De volgende scenario's worden beschouwd:

Scenario	Basisjaar profiel	Zichtperiode	Zeespiegelstijging	Bodemdaling/ zetting	BKL handhaven?
1	2015	-	-	-	nee
2	2018	-	-	-	nee
3	2018	+50jr	middenscenario: 0.3 m	0.1 m	nee
4	2018	+50jr	maximumscenario: 0.45 m	0.1 m	nee
5	2018	+50jr	maximumscenario: 0.45 m	0.1 m	ja

Tabel 4-2: Randvoorwaarden afslagberekeningen volgens VSE (2013)

Voor beide profielen is een berekening uitgevoerd met en zonder handhaving van de BKL. Het effect van het handhaven van de BKL is meegenomen door het gemeten profiel beneden de 3 m+NAP te verhogen met de zeespiegelstijging. Voor de berekeningen zonder handhaving van de BKL is aangenomen dat het profiel onder 3 m+NAP gelijk blijft.

In deze paragraaf worden de conclusies van deze detailanalyse op hoofdlijnen beschreven. In bijlage B wordt de detailanalyse uitgebreid toegelicht, waarbij achtereenvolgens de methode, uitgangspunten en randvoorwaarden, resultaten en conclusies worden besproken.

4.2.2 Resultaten

De afslagberekeningen laten zien dat tussen 2015 en 2018 de veiligheid voor een deel van de Hondsbossche Duinen is toegenomen, en voor een ander deel juist afgenomen (Tabel 4-3 en Tabel 4-4). Dit is een gevolg van de totale volumebalans per profiel, waarbij in het profiel 3 Zuid veel duinaangroei is door eolische depositie en relatief weinig erosie op de lagere delen, terwijl in het profiel 2 Noord weinig duinaangroei plaatsvindt en relatief veel erosie op de lagere delen.

Voor een zichtperiode van 50 jaar met een zeespiegelstijging van 0,45 m blijkt dat het duin fors meer wordt afgeslagen tijdens een maatgevende storm bij beide profielen. Er is een extra volume van 200-300 m³/m benodigd, bij een gelijkblijvend profiel onder 3 m+NAP, om hetzelfde veiligheidsniveau te behouden. Dat komt neer op een gemiddelde duinaangroeisnelheid van 4-6 m³/m/jaar.

		Verschil t.o.v. 2015		Verschil t.o.v. 2018		
		2015	2018	+50jr (midden: +0.3m)	+50jr (maximum: +0.45m)	+50jr (maximum: +0.45m; BKL)
Afslagvolume [m ³ /m]	DUROS+	-	115	67	93	15
	XBeach	-	86	35	52	9
Afslaglengte [m]	DUROS+	-	12	9	13	2
	XBeach	-	6	7	13	5

Tabel 4-3: Vergelijking afslagvolume en afslaglengte ten opzichte van 2015 en ten opzichte van 2018 voor JarKusraai 7002123 (profiel 2N)

		Verschil t.o.v. 2015		Verschil t.o.v. 2018		
		2015	2018	+50jr (midden: +0.3m)	+50jr (maximum: +0.45m)	+50jr (maximum: +0.45m; BKL)
Afslagvolume [m ³ /m]	DUROS+	-	44	26	34	3
	XBeach	-	20	52	46	26
Afslaglengte [m]	DUROS+	-	-7	14	19	2
	XBeach	-	-22	21	27	16

Tabel 4-4: Vergelijking afslagvolume en afslaglengte ten opzichte van 2015 en ten opzichte van 2018 voor JarKusraai 7002454 (profiel 3Z)

In de eerste drie jaar na aanleg wordt een dergelijke duinaangroeisnelheid vrijwel overal gehaald op de Hondsbossche Duinen. Gemiddeld wordt meer dan een vijfvoud van deze snelheid behaald ($33 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ paragraaf 4.1.1). Na verloop van tijd zal deze afnemen richting de waarde van ongeveer $10 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ die in de literatuur staat beschreven voor de Noord-Hollandse kust. De verwachting is dat dit ruimschoots voldoende is om de extra afslag als gevolg van de zeespiegelstijging van 0,45 m te compenseren.

Als de BKL wordt gehandhaafd en het profiel door suppleties meegroeit met de zeespiegelstijging, gaat de veiligheid veel minder achteruit. Door duinaangroei door eolische depositie zal de veiligheid dan fors toenemen.

4.2.3 Samenvatting resultaten detail analyse

Tussen 2015 en 2018 is de veiligheid voor een deel van de Hondsbossche Duinen toegenomen, en voor een ander deel juist afgenomen. Dit is een gevolg van de totale volumebalans per profiel, waarbij in het ene profiel veel duinaangroei is door eolische depositie en relatief weinig erosie op de lagere delen, terwijl in het andere profiel weinig duinaangroei plaatsvindt en relatief veel erosie op de lagere delen.

Bij een gelijkblijvend profiel onder 3 m+NAP compenseert de eolische depositie de zeespiegelstijging en neemt de veiligheid mogelijk zelfs toe. Als de BKL wordt gehandhaafd en het profiel door suppleties meegroeit met de zeespiegelstijging, gaat de veiligheid veel minder achteruit. Door eolische depositieduinaangroei door eolische depositie zal de veiligheid dan fors toenemen.

4.3 Samenvatting/Conclusie compensatie duinaangroei – waterveiligheid

Er wordt geconcludeerd dat in de Hondsbosche Duinen nagenoeg geen eolisch verlies optreedt. Dit blijkt uit metingen van eolisch zandtransport (Ecoshape, Product B2P2,2018). Dit volume had bij aanleg daarom niet gecompenseerd hoeven worden.

Er wordt ook geconcludeerd dat voor een zichtperiode van 50 jaar de eolische depositie in vrijwel het gehele gebied van de Hondsbossche Duinen groot genoeg is om de zeespiegelstijging te compenseren. Voorwaarde daarbij is een gelijkblijvend of meegroeiend profiel onder de 3 m+NAP (vooroever, intergetijdengebied, strand). Dit past binnen het huidige suppletiebeleid in Nederland waarbij de BKL wordt gehandhaafd. Onder bovenstaande voorwaarde kan eolische depositie de zeespiegelstijging compenseren tot een snelheid van 1 m/eeuw. Hierbij geldt wel dat er enkele locaties zullen zijn waar dit niet het geval is.

5 Effect korreldiameter op veiligheid duinprofiel

Over het algemeen wordt fijner zand, met een kleinere korreldiameter makkelijker getransporteerd door de wind. Het mogelijke resultaat daarvan is dat de eolische deposities in het duin bestaan uit fijner zand dan wat initieel is aangelegd. Dit geldt niet alleen bij de HD, maar geldt voor alle duinen. Fijner zand leidt tot meer duinafslag tijdens storm, met name volgens DUROS+ (WL, 1992). XBeach is minder gevoelig voor de korreldiameter van het duinzand. De veiligheidswaarde van een kubieke meter eolische depositie is daardoor mogelijk lager dan van een kubieke meter van het zand dat al aanwezig was in het duin.

Om dit effect te beoordelen wordt het volgende kwalitatief beschouwd:

1. zijn de eolische deposities in het duin (significant) fijner dan het reeds aanwezige duinzand?
2. leidt duinaangroei met fijner zand tot meer duinafslag in het aangegroeide deel?

In het empirische duinafslagmodel DUROS+ bepaalt de korreldiameter van het afgeslagen duinzand de eigenschappen van het afslagprofiel (helling e.d.). Echter, als gevolg van het afslagproces komt het gedeelte van het duin waar eolische depositie heeft plaatsgevonden onder het uit de kern van het duin afgeslagen materiaal te liggen. Dit materiaal uit de kern dat bovenop ligt, bepaalt dan uiteindelijk de eigenschappen van het afslagprofiel. De invloed van de korreldiameter van de eolische deposities op de mate van afslag is daardoor ondergeschikt.

Daarbij dient de kanttekening te worden geplaatst dat wanneer er eenmaal voldoende depositie heeft plaatsgevonden, de afslag uiteindelijk nog plaatsvindt in het gedeelte van het duin dat is aangegroeid door eolische deposities. Indien dit fijner materiaal betreft, is het afslagvolume mogelijk groter dan indien dit materiaal zou zijn met dezelfde korreldiameter als het kernmateriaal van het duin. In deze situatie ligt het oude duin nog wel achter het nieuwe duin. Dit betekent dus niet direct een veiligheidsafname.

Uit een vergelijking van metingen van de korreldiameter direct na aanleg en na drie jaar komt echter niet duidelijk naar voren dat de korreldiameter van de eolische deposities in het duin fijner is dan de korreldiameter van het aangelegde duin.

Op basis van bovenstaande wordt geconcludeerd dat de korreldiameter van eolische deposities niet significant anders zijn dan de korreldiameter van de duinen. Het effect van de korreldiameter van de eolische deposities op de veiligheidswaarde van een volume zand van ondergeschikt belang is. Het mogelijke verschil in veiligheidswaarde is te verwaarlozen.

6 Discussie

6.1 Onzekerheid klimaatscenario's

Tot 2050 verschillen de klimaatscenario's niet enorm in voorspellingen over zeespiegelstijging. De zeespiegelstijging is ingeschat op 0,3 – 0,5 m voor de komende 50 jaar. De verschillen tussen de klimaatscenario's treden met name op in de periode daarna. In de huidige stand van zaken over klimaatscenario's voorspelt 50% van de klimaatscenario's een zeespiegelstijging van 2 meter of meer voor het zichtjaar 2100 (Deltares, 2018). Het is de vraag of de aanzanding van duinen dan voldoende is om zeespiegelstijging te compenseren.

De analyses in dit memo tonen aan dat 'bij een relatieve zeespiegelstijging van 0,4 en 0,55 m met een zichtperiode van 50 jaar de duinaangroei opweegt tegen de achteruitgang van veiligheid als gevolg van zeespiegelstijging en dat de veiligheid mogelijk zelfs toeneemt. Dit betekent dat het droge profiel van vergelijkbare versterkingen als de HD die in de nabije toekomst worden aangelegd, slanker kunnen worden ontworpen, terwijl de veiligheid voor een zichtperiode van 50 jaar wel is gegarandeerd.

Daarbuiten is de onzekerheid in de scenario's groot en kan er wellicht niet meer op worden gerekend dat natuurlijke duinaangroei voldoende is om de veiligheid te handhaven. Dit zal afhangen van de uiteindelijk optredende zeespiegelstijging en de mate waarin de huidige basiskustlijn gehandhaafd wordt.

Hiermee kan rekening gehouden worden in nieuwe projecten door de meest actuele voorspellingen te gebruiken en ook de tot dan toe opgetreden zeespiegelstijging te beschouwen en vervolgens af te wegen of een extra compensatie voor zeespiegelstijging noodzakelijk is. Voor reeds aangelegde versterkingen kan worden gekozen voor een adaptief beleid en kan te zijner tijd worden besloten om meer te suppleren. Ook zou op een toenemende zeespiegelstijging kunnen worden geanticipeerd door de BKL zeewaarts te verleggen.

6.2 Profielontwikkeling onder water

Aan de conclusie dat de eolische duinaangroei aan de kust het effect van zeespiegelstijging kan compenseren, ligt een belangrijk uitgangspunt ten grondslag, namelijk dat het profiel onder water wordt gehandhaafd of zelfs meegroeit met de zeespiegelstijging. Dat gaat om de vooroever en het intergetijdengebied.

Gezien het Nederlandse kustbeleid van handhaving van de BKL is dit een redelijk uitgangspunt, hoewel er ook enkele kanttekeningen bij te plaatsen zijn. Recentelijk is de keuze gemaakt om het suppletievolume voor het onderhouden van de BKL per jaar te verminderen van 12 Mm³ naar 7 Mm³. Bij langdurig handhaven van een minder volume voor handhaving van de BKL is de verwachting dat dit tot een afname zal leiden van de netto duinaangroei die eerder is geobserveerd en in literatuur is beschreven.

De analyses zijn uitgevoerd voor de Hondsbossche Duinen waar is afgesproken dat de BKL wordt vastgelegd na 20 jaar onderhoud door de aannemer. Het profiel onder water zal de komende jaren nog eroderen als gevolg van hydraulische verliezen. Het handhaven van het profiel onder water is daarom wellicht een te optimistisch uitgangspunt voor dit specifieke geval.

De precieze afspraken die hierover worden gemaakt, zouden onderdeel moeten zijn van de discussie of en in hoeverre zeespiegelstijging reeds bij aanleg moet worden gecompenseerd.

6.3 Toepassing op andere locaties

De conclusies in dit memo zijn bepaald voor de situatie van de Hondsbossche Duinen. Voor vergelijkbare projecten en kustgebieden zijn deze resultaten in kwantitatieve zin niet direct toepasbaar. Zo zijn de gemeten volumes van aanzanding niet direct te kopiëren naar andere gebieden. . In kwalitatieve zin zijn deze conclusies wel geldig voor vele andere kustgebieden en suppleties. Per locatie dient daarbij afgewogen te worden welke specifieke factoren daar bepalend zijn voor de mate van duinaangroei. Ook het eisenpakket en de afspraken over het kustbeleid spelen dan een belangrijke rol.

7 Conclusies

Het doel van dit memo was de beantwoording van de volgende onderzoeksvragen:

1. In welke mate wordt zandvraag als gevolg van zeespiegelstijging, bodemdaling en eolisch verlies inderdaad gecompenseerd door eolische depositie?
2. Wat is de relatieve veiligheidswaarde van eolische deposities van zand in relatie tot het aangelegde zand met betrekking tot de korreldiameter?

7.1 Compensatie aanlegvolumes

Op basis van een volumebalans met behulp van de metingen van de aanzanding de eerste 3 jaar na aanleg van de HD en verwachting voor de komende jaren van aanzanding wordt geconcludeerd dat de gemiddelde aanzanding van het duin een zeespiegelstijging van 0,3 m of 0,45 m, met een bodemdaling van 0,1 m voor de komende 50 jaar kan compenseren. Op enkele kustlangse locaties zal de aanzanding de zeespiegelstijging (en bodemdaling en netto eolische verliezen) niet compenseren. In totaal had 1,8 Mm³ kunnen worden bespaard. Dit is ongeveer 5% van het totale aanlegvolume van 35,6 Mm³.

Een nadere analyse van de kustveiligheid door middel van afslagberekeningen laat zien dat voor een zichtperiode van 50 jaar de netto eolische depositie in vrijwel het gehele gebied van de Hondsbossche Duinen groot genoeg is om de zeespiegelstijging te compenseren. Voorwaarde daarbij is een gelijkblijvend of meegroeiend profiel onder de 3 m+NAP (intergetijdengebied, strand). Dit past binnen het huidige suppletiebeleid in Nederland waarbij de BKL wordt gehandhaafd. Onder bovenstaande voorwaarde kan eolische depositie de zeespiegelstijging compenseren tot een snelheid van 1 m/eeuw.

Tot 2050 verschillen de klimaatscenario's niet enorm in voorspellingen over zeespiegelstijging. De zeespiegelstijging is ingeschat op 0,3 – 0,5 m voor de komende 50 jaar. De verschillen treden met name op in de periode daarna. In de huidige stand van zaken over klimaatscenario's voorspelt 50% van de klimaatscenario's een zeespiegelstijging van 2 meter per eeuw of meer voor 2100. (Deltares, 2018).

Hiermee kan rekening gehouden worden in nieuwe projecten door de meest actuele voorspellingen te gebruiken en ook de tot dan toe opgetreden zeespiegelstijging te beschouwen en vervolgens af te wegen of een (gedeeltelijke) extra compensatie voor zeespiegelstijging noodzakelijk is. Voor reeds aangelegde versterkingen kan worden gekozen voor een adaptief beleid en kan te zijner tijd worden besloten om meer te suppleren. Ook kan op een toenemende zeespiegelstijging worden geanticipeerd door de BKL zeewaarts te verleggen.

Aan de conclusie dat de eolische duinaangroei aan de kust het effect van meer extreme zeespiegelstijging kan compenseren, ligt een belangrijk uitgangspunt ten grondslag, namelijk dat het profiel onder water wordt gehandhaafd of zelfs meegroeit met de zeespiegelstijging. Dat gaat om de vooroever, intergetijdengebied en het strand. De precieze afspraken die hierover worden gemaakt, vormen de basis van de discussie of en in hoeverre zeespiegelstijging reeds bij aanleg moet worden gecompenseerd. De resultaten in dit memo wijzen erop dat in het geval van de HD een relatieve zeespiegelstijging van 0,4 m kan worden gecompenseerd door eolische duinaangroei.

7.2 Relatieve veiligheidswaarde korreldiameter eolische deposities

Op basis van een kwalitatieve analyse van het effect van een kleinere korreldiameter op het afslagvolume en metingen van de korreldiameter op de HD wordt geconcludeerd dat het effect van de korreldiameter van de eolische deposities op de veiligheidswaarde van een volume zand van ondergeschikt belang is. Het mogelijke verschil in veiligheidswaarde is te verwaarlozen.

8 Referenties

Arens, B., 2009. Effecten van suppleties op duinontwikkeling. ARENS – Bureau voor Strand- en Duinonderzoek.

Balen, van W., Vuik, V., Vuren van, S., 2011. Indicatoren voor kustlijnzorg. HKV.

Deltares, 2015, XBeach 1D - Probabilistic model - ADIS, Settings, Model uncertainty and Graphical User Interface. Referentie: 1209436-002.

Decisio, 2011, Ruimte voor recreatie op het strand; onderzoek naar een recreatiebasiskustlijn - Bijlagenrapport, 104 pp.

Deltares, 2018, Mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma, Een verkenning, september 2018, 83 pp.

de Vries, S. , H.N. Southgate, W. Kanning en R. Ranasinghe. (2012) Dune behavior and Aeolian transport on decadal timescales. Coastal Engineering, Vol 67, p41-53.

Dongeren A van et al, 2008. Bepaling beschermingscontouren kustplaatsen. Rapport Deltares, TU Delft & Alkyon.

Ecoshape, product B1P1, 2016, Leenders, J.K. en M. Smit: Inventarisatie maatregelen ontwerp HPZ, memorandum product B1P1, Ecoshape HPZ. 40 pp.

Ecoshape, product B1P2, 2016, Leenders, J.K. W. Bodde en M. Smit: Inventarisatie optimalisatiemogelijkheden kustversterking HPZ, memorandum product B1P2, Ecoshape HPZ., 34 pp.

Ecoshape, product B2P2, 2018, Verheijen, A.H, W.P. Bodde en M.W.J. Smit (Witteveen+Bos), C. Wegman en J.K. Leenders (HKV Lijn in water), Ecoshape Hondsbossche en Pettemer Zeewering, B2-P2 - Analyse effecten maatregelen, 156 pp.

Ecoshape, product B3P1, 2018, Guidelines, memorandum product B3P1, Ecoshape HPZ.

Giardino, A, Santinelli G, Bruens A, 2012. The state of the coast; case study: North Holland. Rapport Deltares, Delft.

Nicolai, R. Rongen, G en Baart F, 2016, Zeespiegelmonitor – Eenduidige zeespiegelindicatoren. PR2695.30. december 2016. 56 pp. Deltares en HKV in opdracht van Rijkswaterstaat.

Vuik, V en W. van Balen, 2012, Overstromingskansen voor de Nederlandse. HKV rapport PR2334.10. Opdrachtgever: Deltaprogramma Kust, 1 oktober 2012.

RWS, 2016, Landelijk beeld vershilanalyse hydraulische belastingen WBI2017 RWS ongeclassificeerd, 20 april 2016, 128 pp

RWS, Min IenM 2017, Kustlijnkaarten 2018, december 2017 125 pp.

Steetzel, H., 1992, Waterloop kundig Laboratorium, Vergelijking DUROS/DUROSTA, H1201, Rapport voor Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen; Werkgroep C, 52 pp.

Steetzel, H, R van Santen, 2010. Relatie Kustlijn zorg – Kustveiligheid I, resultaten uit het verleden. Alkyon rapport A2681.; van Santen & Steetzel , 2011. Relatie Kustlijn zorg – Kustveiligheid II, nader uitwerking. Arcadis, Zwolle.

Stronkhorst J. en Loffler, M, 2014, Kustlijn zorg en waterveiligheid – Een verkenning van de mogelijkheden om kustlijn zorg doelmatiger af te stemmen op waterveiligheid. Deltares project 1208904, 30 pp.

van Maanen, R. 2018. De samenhang van het intergetijdengebied op de duinaangroei van de Hondsbossche Duinen. Stagerapport, CIE4040-09, 47 pp.

van der Wal, D.(2004), Beach-Dune interactions in nourishment areas along the Dutch coast. Journal of Coastal Research, vol 20, p 317-325.

VSE, 2013, Vraagspecificatie eisen, Beschrijving van producteisen. Registratienummer 13.0001492, Versie C, 25 april 2013, 34 pp

Wegman, C en R. Nicolai, 2018, Verandering golfkarakteristieken en hydraulisch belastingniveau's bij zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Memorandum, 2 oktober 2018. PR3706.20. 13 pp.

ZSNH, Versterking en onderhoud, Kustdeel RSP17.00 – RSP28.32, (2013), Initieel Aanlegprofiel, Prognose van eolisch zandverlies, VB-ZSNH-76-MS-ONO-01, versie3.0. 18 pp.

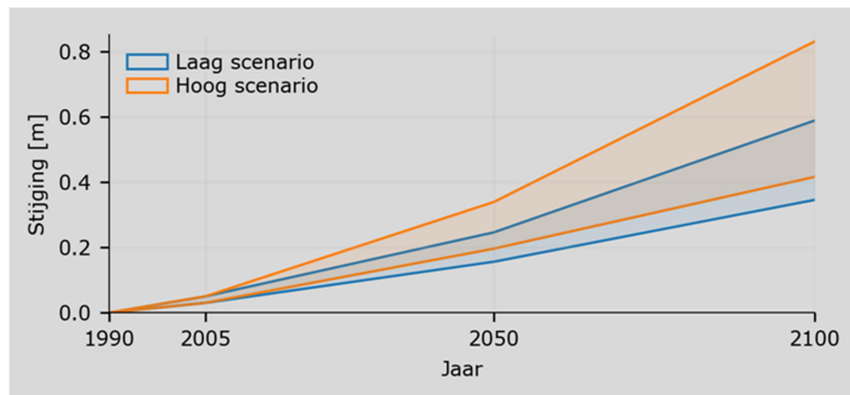
Bijlage A: Achtergrond klimaat scenario's

Er zijn verschillende klimaatscenario's in omloop. In deze bijlage volgt een samenvatting van een aantal gangbare klimaatscenario's. De tekst is overgenomen uit een rapportage van Deltares en HKV over zeespiegelindicatoren (Deltares, HKV, 2016)

A.1. KNMI'06 scenario's

In 2006 heeft het KNMI een set klimaatscenario's gepresenteerd, die een update vormen van eerdere klimaatscenario's uit 2001. De reden voor de vernieuwing was een wens vanuit stakeholders en voortschrijdend wetenschappelijk inzicht op het gebied van klimaatveranderingen (KNMI, 2006).

Op het gebied van zeespiegelstijging wordt een voorspelling gedaan op basis van verschillende modellen, die fysische factoren meenemen die bijdragen aan de zeespiegelstijging (smeltend land- of zee-ijjs, thermische expansie). Het resultaat is een bandbreedte van de absolute zeespiegelstijging voor 2050 en 2100, in een hoog en een laag scenario. Figuur A-1 geeft de zeespiegelstijging volgens beide scenario's weer. De klimaatvoorspellingen zijn gedaan vanuit het jaar 2005, waarbij de gemeten zeespiegelstijging tussen 1990 en 2005 is opgeteld.



Figuur A-1: KNMI'06-scenario's. De aangegeven banden geven het bereik tussen het 10de en 90ste percentiel aan.

De KNMI'06-scenario's worden ook wel vernoemd naar W, W+, G en G+, waarin de W staat voor warm, de G voor gematigd en de '+' voor verandering van de atmosferische circulatie. De in Figuur A-1 weergegeven percentielen zijn uiteindelijk op 5 cm afgerond, wat de onderstaande zeespiegelstijgingen per zichtjaar geeft:

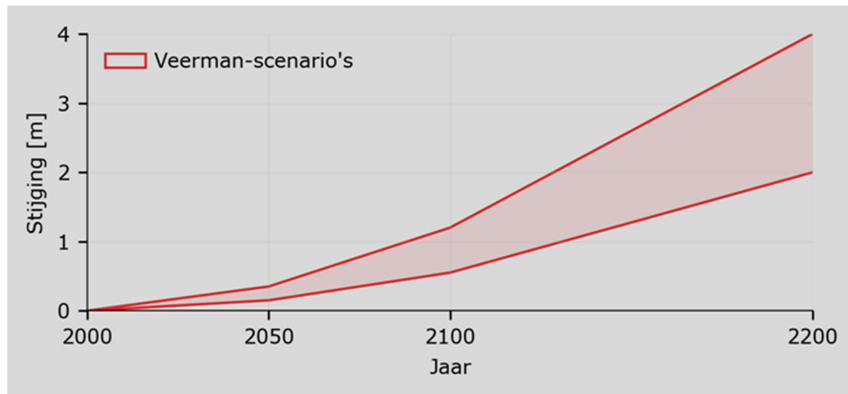
Scenario	2050 (t.o.v. 1990)	2100 (t.o.v. 1990)
G, G+	15 – 25 cm	35 – 60 cm
W, W+	20 – 35 cm	40 – 85 cm

Tabel A-1: Absolute zeespiegelstijging in de KNMI'06 scenario's.

A.2. Veerman scenario's

In 2008 heeft de Deltacommissie een klimaatscenario gepresenteerd op basis van het meest conservatieve temperatuurscenario voor de komende eeuwen. De gedachte hierachter is dat een klimaatbestendige strategie voor waterveiligheid en waterbeheer gebaseerd moet zijn op de mogelijkheid dat stabilisatie van het klimaat bij hoge

temperaturen niet optreedt. Dit scenario gebruikt dus de meest ongunstige voorspelling van het KNMI en IPCC, waarin fossiele brandstoffen de motor van de globale economie blijven. Figuur A-2 geeft de absolute zeespiegelstijging binnen de Veerman-scenario's weer. Opvallend is dat de voorspelling voor 2050 gelijk is aan die van het KNMI'06. Dit is te verklaren door het feit dat de ontwikkeling van de wereldeconomie tot 2050 een stuk voorspelbaarder is dan daarna. Tot 2050 zal het feit of men al dan niet overstapt op duurzame energiebronnen een stuk minder effect hebben dan voor de periode na 2050.



Figuur A-2: Veerman-scenario's.

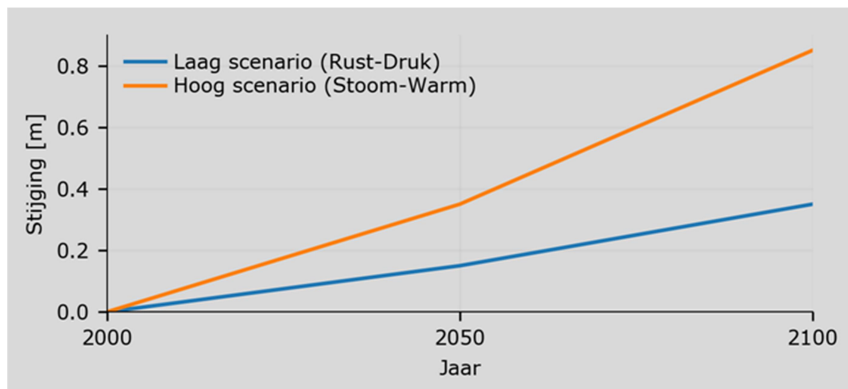
De waarden van de absolute zeespiegelstijging zijn weergegeven in onderstaande tabel:

Scenario	2050 (t.o.v. 2000)	2100 (t.o.v. 2000)	2200 (t.o.v. 2000)
Veerman	15 – 35 cm	55 – 120 cm	2 – 4 m

Tabel A-2: Absolute zeespiegelstijging in de Veerman scenario's.

A.3. Deltascenario's

In kader van het Deltaprogramma zijn scenario's uitgewerkt voor de ontwikkeling van de maatschappij tot 2100. Deze zogenaamde Deltascenario's komen voort uit de KNMI'06 klimaatscenario's die in 2012 en 2013 nader zijn uitgewerkt (Deltaprogramma: Bruggeman et al., 2013). Er zijn 4 scenario's uitgewerkt, waarin onder andere de absolute stijging van de zeespiegel is bepaald. De 4 scenario's komen voort uit 2 bevolkingsgroei-voorspellingen en 2 temperatuurvoorspellingen. Voor de zeespiegel is alleen de tweede van belang, waardoor er twee scenario's van zeespiegelstijging overblijven met 'getallen' voor de jaren 2050 en 2100:



Figuur A-3: Zeespiegelstijging binnen de Delta-scenario's.

De Deltascenario's komen dus grofweg overeen met de ondergrens (2050: 15 cm, 2100: 35 cm) en bovengrens (2050: 35 cm, 2100: 85 cm) van de KNMI'06 scenario's. Het referentiejaar is echter wel veranderd van 1990 naar 2000, zonder dat de reeds opgetreden zeespiegelstijging daarin verwerkt lijkt te zijn. Gezien de grofheid van de scenario's (afgerond op 5 cm) geeft dit geen grote fout.

De twee Deltascenario's worden ook wel aangegeven met W+ (het hoge scenario) en G (het lage scenario). Deze coderingen zijn afkomstig uit de KNMI'06 scenario's.

A.4. KNMI'14 scenario's

Het KNMI heeft in 2014 opnieuw klimaatscenario's bepaald voor zichtjaren 2050 en 2085. De klimaatscenario's zelf zijn afgeleid uit het IPCC rapport (2013), waarin de wetenschappelijke inzichten met betrekking tot klimaatonderzoek zijn samengevat. Het KNMI communiceert over de klimaatscenario's in termen van temperatuurscenario's. Het rekent net als het IPCC met CO₂-emissiescenario's.

Uit het IPCC-rapport zijn door het KNMI 4 scenario's afgeleid: W-L, WH, GL en GH. Hierin staat de eerste letter voor de temperatuur, warm of gematigd, en de tweede letter voor de luchtstroming, hoog en laag. Allen hebben een voorspelde temperatuurstijging waarbij een zeewaterstand is afgeleid. Het IPCC rekent met iets andere scenario's dan het KNMI waardoor er een vertaling is gemaakt van de IPCC naar de KNMI scenario's. De gematigde (G) scenario's komen voort uit de RCP 4.5 en RCP 6.0 scenario's van het IPCC, en de warme (W) scenario's zijn afgeleid van het RCP 8.5 scenario (RCP: Representative Concentration Pathways). Tabel A-3 geeft de absolute zeespiegelstijging binnen de verschillende scenario's weer.

Scenario	2050 (t.o.v. klimaat 1981-2010)	2085 (t.o.v. klimaat 1981-2010)
G _L , G _H	15 – 30 cm	25 – 60 cm
W _L , W _H	20 – 40 cm	45 – 80 cm

Tabel A-4: Absolute zeespiegelstijging in de KNMI'14 scenario's.

De auteurs zijn niet bekend met toepassingen van de KNMI'14-scenario's in ontwerp. Het KNMI doet wel suggesties voor het gebruik van deze scenario's in onderzoek naar adaptatie aan klimaatverandering

A.5. Projectie 2018 - Deltares

Er zijn recente inzichten en signalen over mogelijke extra versnelde zeespiegelstijging als gevolg van het versneld afbreken en afsmelten van Antarctica. De verwachting is dat in 2021 er officieel nieuwe verwachtingen over klimaatscenario's zullen worden afgegeven door IPCC en KNMI (Deltares, 2018). Vooruitlopend daarop heeft KNMI projecties gemaakt tot het jaar 2100 waarin deze inzichten (die uiteraard nog onzeker zijn) zijn verwerkt. Tot 2050 verschillen deze projecties nauwelijks van de bovenwaarde van de Deltascenario's (Warm / Stoom). Na 2050 is er wel een sterke afwijking en neemt de onzekerheidsmarge toe. In de nieuwe projecties wordt een zeespiegelstijging van 0,3 tot 2,0 m mogelijk geacht (bij het halen van de Parijs doelen van maximaal 2°C opwarming). Bij een sterkere opwarming van de aarde (4°C) kan dit oplopen tot 2,0 m (middenwaarde) tot 3,0 m (bovenwaarde) in 2100 (Deltares, 2018).

Scenario	2050	2100
RCP4,5	7 – 14 cm	29 – 192 cm
RCP8,5	9 – 47 cm	75 – 317 cm

Tabel A-5: Absolute zeespiegelstijging projectiescenario's 2018.

A.6. Impact zeespiegelstijging op golfkarakteristieken

HKV heeft recent onderzoek gedaan naar het effect van 1 m zeespiegelstijging op de golfkarakteristieken (Wegman en Nicolai, 2018). Resultaat van de studie is dat de golfkarakteristieken (golfhoogte en piekperiode) niet noemenswaardig veranderen bij een zeespiegelstijging van 1 meter. Dit betekent dat het aanhouden van golfstatistiek die onafhankelijk is van zeespiegelstijging terecht is voor het bepalen van de hydraulische belasting op de kust. Voor het berekenen van het afslagvolume bij een klimaatscenario houden we daarom in deze studie alleen rekening met een verandering in zeespiegelstijging.

A.7 Referenties

Deltares, 2018, Mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma, Een verkenning, september 2018, 83 pp.

Nicolai, R. Rongen, G en Baart F, 2016, Zeespiegelmonitor – Eenduidige zeespiegelindicatoren. PR2695.30. december 2016. 56 pp. Deltares en HKV in opdracht van Rijkswaterstaat.

Wegman, C en R. Nicolai, 2018, Verandering golfkarakteristieken en hydraulisch belastingniveau's bij zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Memorandum, 2 oktober 2018. PR3706.20. 13 pp.

Bijlage B: Technische beschrijving aanpak detailanalyse

B.1. Inleiding

Om te beoordelen hoe de veiligheidsbijdrage van duinaangroei door eolische deposities bij de Hondsbossche Duinen opweegt tegen het effect van de zeespiegelstijging en bodemdaling op de kustveiligheid, wordt de ontwikkeling van de kustveiligheid als gevolg van verschillende toekomstscenario's geanalyseerd.

De belangrijkste onderdelen van deze scenario's zijn zeespiegelstijging en bodemdaling. Als gevolg hiervan neemt de veiligheid af bij een gelijkblijvend duinprofiel. De afname kan worden bepaald door middel van afslagberekeningen. De afname van veiligheid die daaruit volgt, wordt afgewogen tegen de toename van de veiligheid door de eolische duinaangroei.

In deze bijlage wordt de detailanalyse toegelicht, waarbij achtereenvolgens de methode, uitgangspunten en randvoorwaarden, resultaten en conclusies worden besproken.

B.2. Methode

Om de effecten op de veiligheid te bepalen wordt gebruikt gemaakt van de afslagmodellen DUROS+ en XBeach. Met deze modellen worden berekeningen uitgevoerd voor een aantal scenario's dat in de volgende paragraaf wordt beschreven.

DUROS+ is een empirisch balansmodel dat onderdeel is van het wettelijk toetsinstrumentarium voor de Nederlandse kust. XBeach is een proces-gebaseerd model dat in ontwikkeling is en mogelijk ook een rol krijgt in het toetsinstrumentarium. Daarvoor wordt XBeach toegepast met de in dat kader vastgestelde WTI-instellingen (Deltares, 2015).

Beide modellen worden gebruikt om zowel in lijn te blijven met de voorschriften rondom het toetsen van kustveiligheid als inzicht te verkrijgen in de eventuele verschillen in de bevindingen wanneer een meer proces-gebaseerde aanpak (XBeach-model) wordt gehanteerd.

Omdat het gaat om onderlinge vergelijking van de resultaten van de scenario's en de modellen worden de resultaten geïnterpreteerd zonder toepassing van de gebruikelijke toeslagen voor duinafslag in de DUROS+-aanpak.

B.3. Uitgangspunten en randvoorwaarden

Profielen

Voor de afslagberekeningen wordt gebruik gemaakt van JarKusprofielen, omdat deze het volledige profiel inclusief het onderwatergedeelte bevatten. De eerste JarKusmeting ter hoogte van de Hondsbossche Duinen is uitgevoerd in 2015, de laatste in 2018.

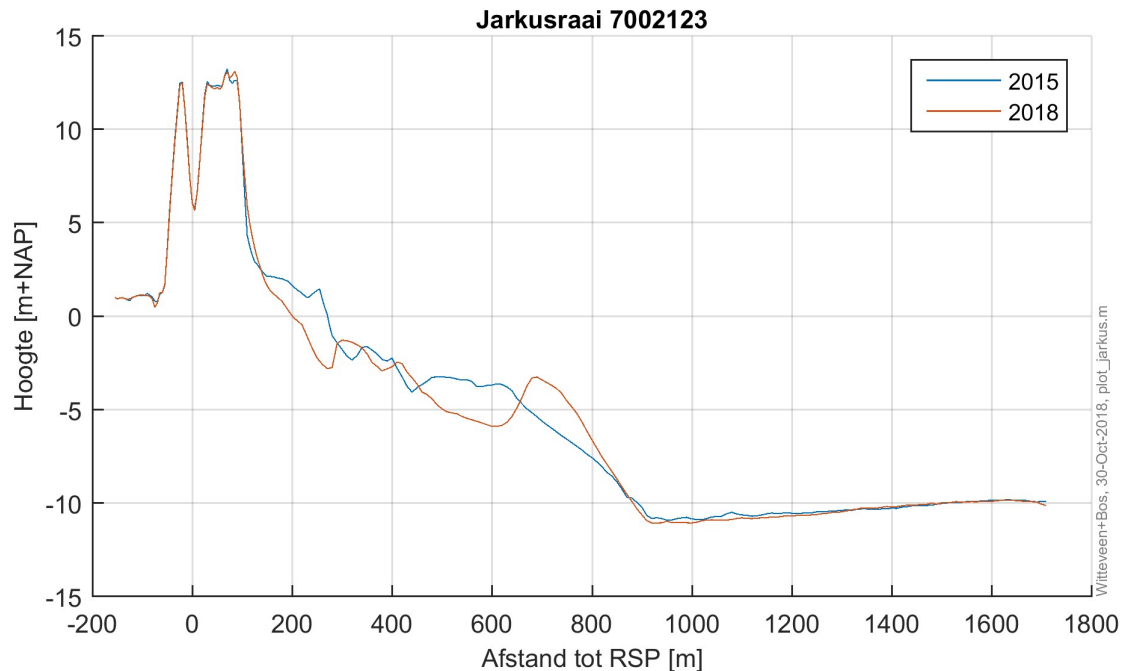
De berekeningen worden uitgevoerd voor twee profielen:

- JarKusraai 7002123: profieltype 2 Noord (P2N) - hoog, smal duin (Figuur B-4)
- JarKusraai 7002454: profieltype 3 Zuid (P3Z) - breed duin inclusief laag voorduin (Figuur B-5)

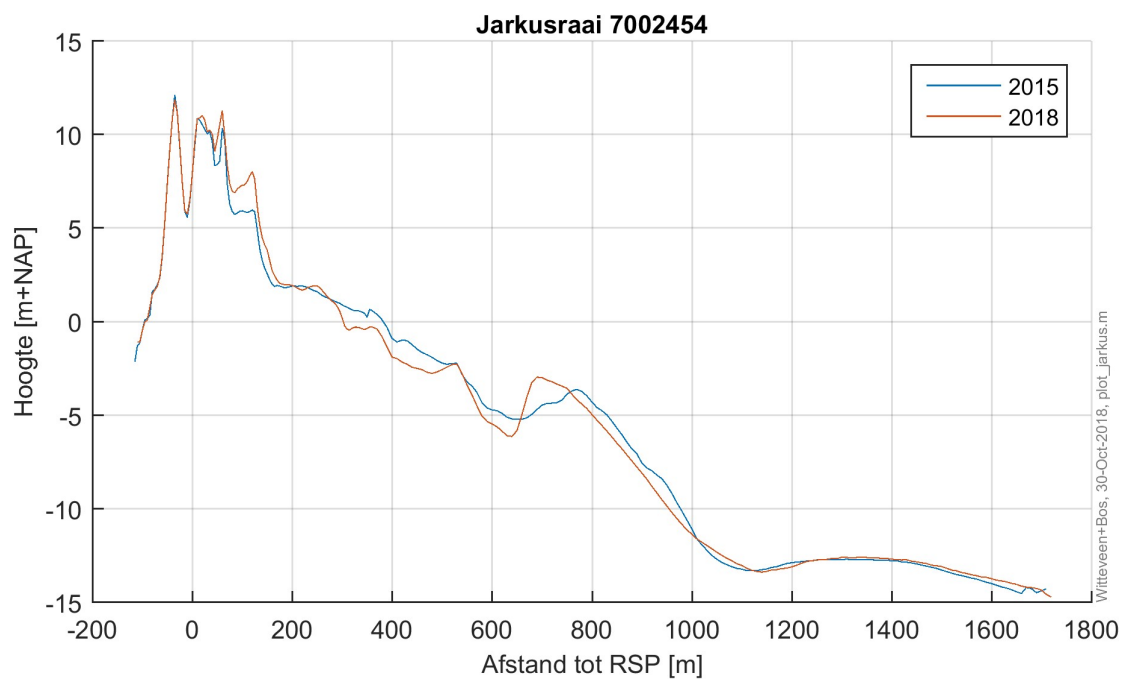
Door twee profielen te beschouwen, wordt de eventuele gevoeligheid van de resultaten voor de vorm van het profiel in beeld gebracht. Daarnaast heeft in profieltype 2 Noord minder

duinaangroei ($45 \text{ m}^3/\text{m}$) en meer erosie van de lagergelegen delen (strand, intergetijdengebied, vooroever) plaatsgevonden dan in profieltype 3 Zuid (duinaangroei $190 \text{ m}^3/\text{m}$), op basis van het volumeverschil boven de duinvoet ($3 \text{ m}+\text{NAP}$). P2N betreft daardoor een slanker profiel, met minder volumeoverschot dan P3Z.

Als referentiejaar voor de toekomstscenario's met zeespiegelstijging en bodemdaling wordt het meest recente profiel uit 2018 gehanteerd. Wel wordt de veiligheid in 2015 en 2018 voor beide profielen vergeleken om het effect van de totale profielontwikkeling in de eerste drie jaar te bepalen.



Figuur B-4: JarKusraai 7002123 ter hoogte van Profieltype 2 Noord



Randvoorwaarden

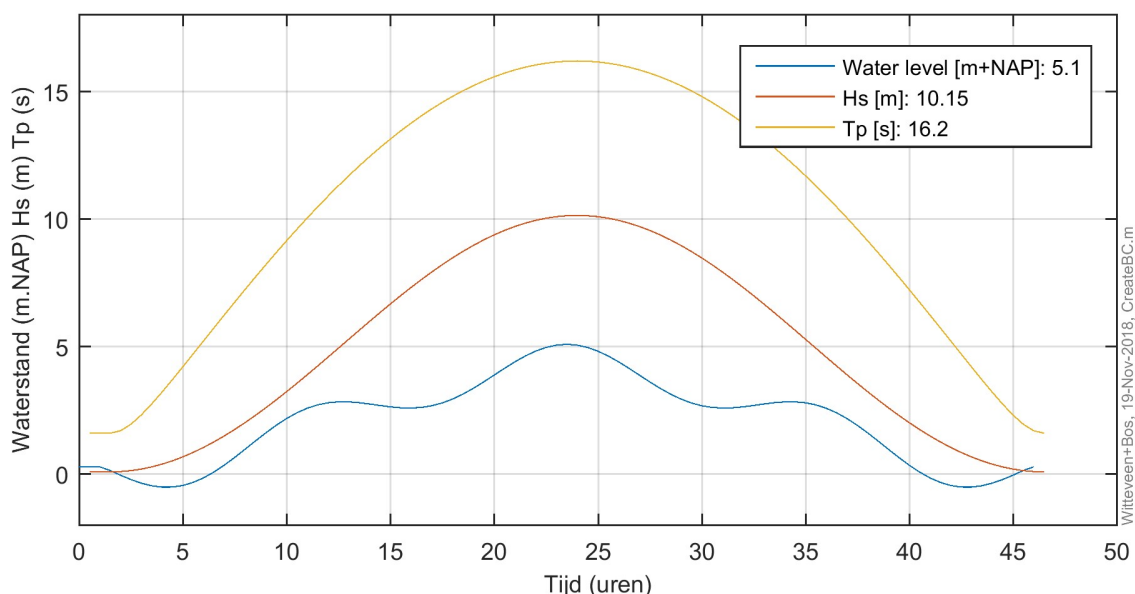
De hydraulische randvoorwaarden zoals aangegeven in de VSE (2013) worden gehanteerd (Tabel B-6).

Tabel B-6: Randvoorwaarden afslagberekeningen volgens VSE (2013)

JarKusraai	Profiel	Rekenpeil [m+NAP]	H _{m0} [m]	T _p [s]
2041 - 2200	profieltype 2 Noord	5,1	10,15	16,2
2400 - 2600	profieltype 3 Zuid	5,3	9,9	16,2

Stormverloop

Voor de afslagberekening met het XBeach model is een stormduur van 45 uur aangehouden. Het stormverloop inclusief getij is opgezet conform Leidraad Zee- en Meerdijken (1999) (zie Figuur B-6).



Figuur B-6 Voorbeeld stormverloop voor XBeach berekeningen

Bodemdaling

Voor de komende 50 jaar wordt voor de resterende zetting en bodemdaling uitgegaan van 0.10m⁶. Dit wordt meegenomen in de berekening als extra zeespiegelstijging van de in rekening gebrachte waterstanden.

Korrel diameter

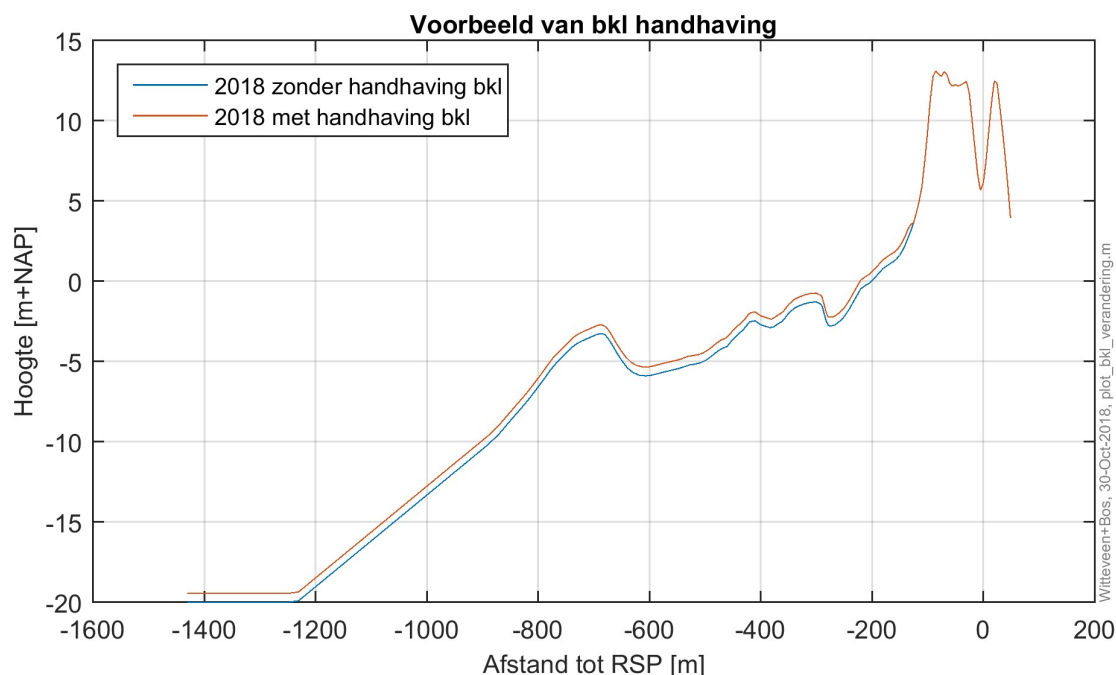
De korrel diameter is voor alle berekeningen gelijk gehouden op 250 mu.

Handhaving Basiskustlijn (BKL) bij zeespiegelstijging

Door middel van suppleties wordt in Nederland de positie van de BKL gehandhaafd. Bij zeespiegelstijging zorgt dit ervoor dat vooroever, intergetijdengebied en stand meegroeien met de hogere waterstand.

Voor beide profielen is een berekening uitgevoerd met en zonder handhaving van de BKL. Het effect van het handhaven van de BKL is meegenomen door het gemeten profiel beneden de 3 m+NAP te verhogen met de zeespiegelstijging (Figuur B-7).

⁶ Persoonlijke mededeling Peter Brandenburg (Van Oord) d.d. 23-08-2018



Figuur B-7 Handhaving BKL onder 3 m+NAP bij zeespiegelstijging

Scenario's

Per profieltype zijn de volgende scenario's beschouwd:

Tabel B-7: Randvoorwaarden afslagberekeningen volgens VSE (2013)

Scenario	Basisjaar profiel	Zichtperiode	Zeespiegelstijging	Bodemdaling/ zetting	BKL handhaven?
1	2015	-	-	-	nee
2	2018	-	-	-	nee
3	2018	+50jr	middenscenario: 0.3 m	0.1 m	nee
4	2018	+50jr	maximumscenario: 0.45 m	0.1 m	nee
5	2018	+50jr	maximumscenario: 0.45 m	0.1 m	ja

B.4. Resultaten

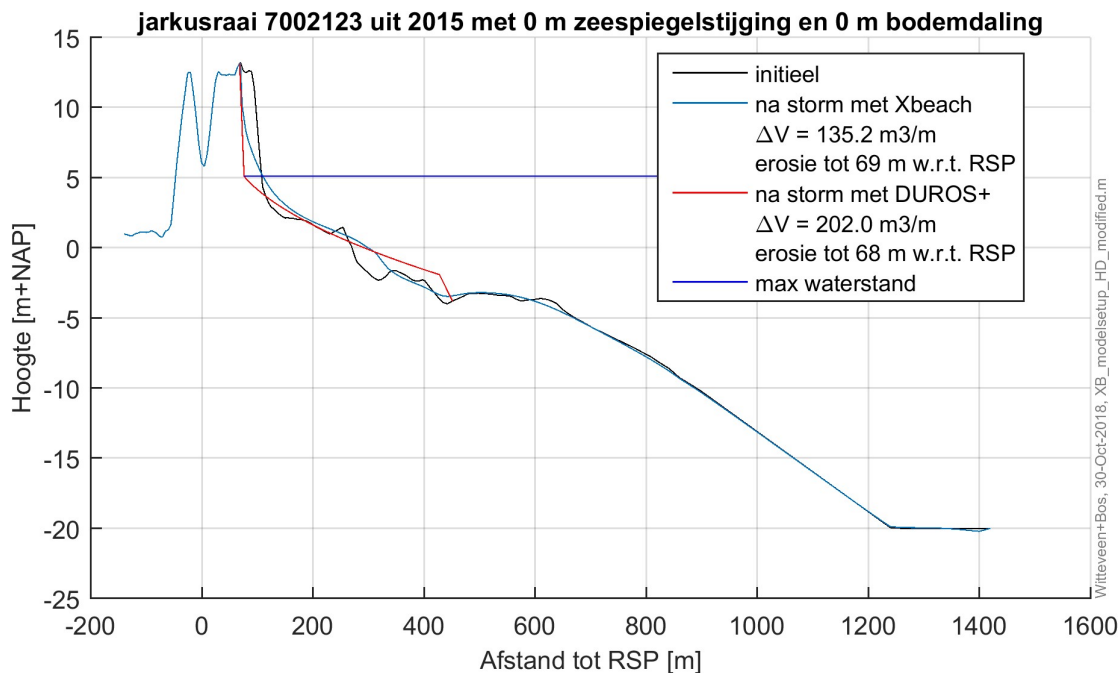
Profieltype 2 Noord

Profielontwikkeling 2015/2018

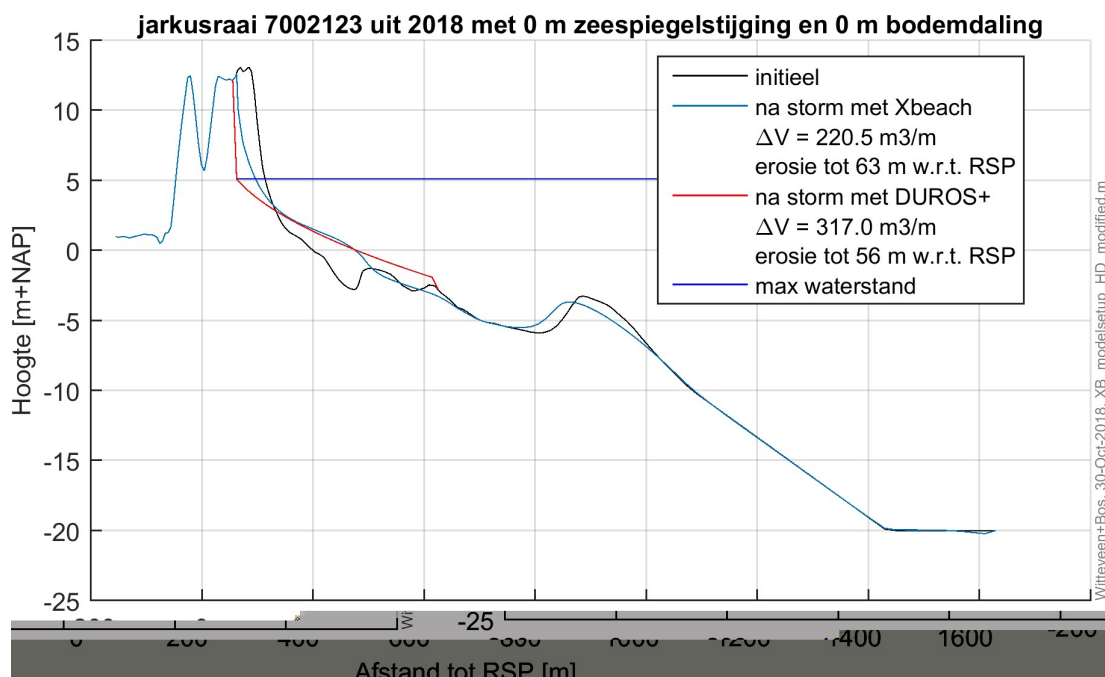
Uit de afslagberekeningen met DUROS+ en XBeach voor deze raai blijkt dat zowel het afslagvolume als de afslaglengte toeneemt in 2018 ten opzichte van 2015 (Figuur B-8 en Figuur B-9). De resultaten van DUROS+ en XBeach voor dit profiel zijn sterk vergelijkbaar. Het profiel gaat meer achteruit tijdens de maatgevende storm wat betekent dat de veiligheid in dit profiel is afgenomen in de periode na aanleg. Wel valt op dat het XBeach-model slechts een beperkte achteruitgang geeft van het op RP gelegen duinfront (zelfs helemaal niets voor het 2015-profiel).

Dit is naar verwachting en wordt verklaard vanuit het feit dat de duinaangroei in dit profiel relatief klein is ten opzichte van het volume dat onder water is geërodeerd. Daarbij moet worden opgemerkt dat het een momentopname betreft op één locatie en dat de resultaat in een

ander jaar of voor een ander profiel net anders kan uitpakken. De berekening laat echter wel de te verwachten trend zien in kustveiligheid bij weinig duinaangroei en erosie op de vooroever.



Figuur B-8 Afslagberekening DUROS+ en XBeach voor JarKusraai 7002123 voor 2015



Figuur B-9 Afslagberekening DUROS+ en XBeach voor JarKusraai 7002123 voor 2015

Resultaten scenario's

Voor het scenario met de een maximum zeespiegelstijging van 0.45 m in de komende 50 jaar neemt de achteruitgang van het duin bij een storm toe met 13 m bij een gelijkblijvend profiel onder 3 m+NAP (geen handhaving BKL). Dit resultaat is voor XBeach en DUROS+ gelijk (Tabel B-8).

Wanneer het profiel onder 3 m+NAP meegroeit met de zeespiegelstijging (handhaving BKL) is de extra achteruitgang vrijwel verwaarloosbaar met 2 tot 5 m.

De achteruitgang van het duin tijdens storm is maatgevend voor de veiligheid in het dwarsprofiel. De achteruitgang kan worden uitgedrukt in een volume door de actieve hoogte (erosie en sedimentatie zone afslagberekening) te beschouwen en deze te vermenigvuldigen met de achteruitgang. Daarmee wordt een inschatting verkregen van het benodigde volume om de achteruitgang te compenseren.

Voor het beschouwde profiel is de actieve hoogte ongeveer 14 m. Dat betekent dat een volume van

$$14 \text{ m (actieve hoogte)} \times 13 \text{ m (achteruitgang)} = 182 \text{ m}^3/\text{m}$$

benodigd is om de extra achteruitgang als het gevolg van bodemdaling en zeespiegelstijging te compenseren.

Tabel B-8: Vergelijking afslagvolume en afslaglengte ten opzichte van 2015 en ten opzichte van 2018 voor JarKusraai 7002123

		Verskil t.o.v. 2015		Verskil t.o.v. 2018		
		2015	2018	+50jr (midden: +0.3m)	+50jr (maximum: +0.45m)	+50jr (maximum: +0.45m; BKL)
Afslagvolume [m ³ /m]	DUROS+	-	115	67	93	15
	XBeach	-	86	35	52	9
Afslaglengte [m]	DUROS+	-	12	9	13	2
	XBeach	-	6	7	13	5

Profieltype 3 Zuid

Profielontwikkeling 2015/2018

Op deze raai neemt de afslaglengte tijdens storm met 7-22 m af in 2018 ten opzichte van 2015. De veiligheid in dit profiel is toegenomen als gevolg van het grote duinaangroevolume van 190 m³/m die de erosie van de lagergelegen delen compenseert.

De snelheid van duinaangroei in dit profiel is het hoogst van de Hondsbossche Duinen, terwijl de erosie van de lagergelegen delen juist relatief klein is, doordat dit profiel in het midden van het gebied ligt. Naar verwachting zal de duinaangroei de komende jaren fors lager zijn dan tot nu toe is waargenomen. De trend van toenemende veiligheid zal daardoor langzaam afnemen in de tijd.

Resultaten scenario's

Voor het scenario met de een maximum zeespiegelstijging van 0.45 m in de komende 50 jaar neemt de achteruitgang van het duin bij een storm toe met 19-27 m bij een gelijkblijvend profiel onder 3 m+NAP (geen handhaving BKL). De resultaten van DUROS+ en XBeach lopen wat uit elkaar, maar laten dezelfde trend van extra achteruitgang zien (Tabel B-8).

Wanneer het profiel onder 3 m+NAP meegroeit met de zeespiegelstijging (handhaving BKL) is de extra achteruitgang vrijwel verwaarloosbaar volgens DUROS+, terwijl volgens XBeach ook dan tot 16 m extra achteruitgang optreedt. Dit heeft te maken met de verschillende manier waarop beide modellen reageren op de aanwezigheid van het lage duin. De waarheid ligt waarschijnlijk ergens in het midden.

Voor het beschouwde profiel is de actieve hoogte ongeveer 13 m. Dat betekent dat een volume van

$$13 \text{ m (actieve hoogte)} \times (19+27)/2 \text{ m (achteruitgang)} = 299 \text{ m}^3/\text{m}$$

benodigd is om de extra achteruitgang als het gevolg van bodemdaling en zeespiegelstijging te compenseren.

Tabel B-9: *Vergelijking afslagvolume en afslaglengte ten opzichte van 2015 en ten opzichte van 2018 voor JarKusraai 7002454*

		Verskil t.o.v. 2015		Verskil t.o.v. 2018		
		2015	2018	+50jr (midden: +0.3m)	+50jr (maximum: +0.45m)	+50jr (maximum: +0.45m; BKL)
Afslagvolume [m ³ /m]	DUROS+	-	44	26	34	3
	XBeach	-	20	52	46	26
Afslaglengte [m]	DUROS+	-	-7	14	19	2
	XBeach	-	-22	21	27	16

Compensatie door eolische depositie

De afslagberekeningen laten zien dat voor een zichtperiode van 50 jaar met een zeespiegelstijging van 0.45 m een extra volume van 200-300 m³/m benodigd is, bij een gelijkblijvend profiel onder 3 m+NAP, om hetzelfde veiligheidsniveau te behouden. Dat komt neer op een duinaangroeisnelheid van 4-6 m³/m/jaar.

In de eerste drie jaar na aanleg wordt een dergelijke duinaangroeisnelheid vrijwel overal gehaald op de Hondsbossche Duinen. Gemiddeld wordt meer dan een vijfvoud van deze snelheid behaald (33 m³/m/jaar). Na verloop van tijd zal deze afnemen richting de waarde van ongeveer 10 m³/m/jaar die in de literatuur staat beschreven voor de Noord-Hollandse kust. Dit is ruimschoots voldoende om de extra afslag als gevolg van de zeespiegelstijging van 0.45 m te compenseren.

Bij een gelijkblijvend profiel onder 3 m+NAP compenseert de eolische depositie de zeespiegelstijging en neemt de veiligheid mogelijk zelfs toe. Als de BKL wordt gehandhaafd en het profiel door suppleties meegroeit met de zeespiegelstijging, gaat de veiligheid veel minder achteruit. Door eolische depositie zal de veiligheid dan fors toenemen.

B.5. Conclusies

Tussen 2015 en 2018 is de veiligheid voor een deel van de Hondsbossche Duinen toegenomen, en voor een ander deel juist afgenomen. Dit is een gevolg van de totale volumebalans per profiel, waarbij in het ene profiel veel duinaangroei is door eolische depositie en relatief weinig erosie op de lagere delen, terwijl in het andere profiel weinig duinaangroei plaatsvindt en relatief veel erosie op de lagere delen.

De scenario's voor een zichtperiode van 50 jaar laten zien dat de eolische depositie in vrijwel het gehele gebied van de Hondsbossche Duinen groot genoeg is om de zeespiegelstijging te compenseren. Voorwaarde daarbij is een gelijkblijvend of meegroeïend profiel onder de 3 m+NAP (vooroever, intergetijdengebied, strand). Dit past binnen het huidige suppletiebeleid in Nederland waarbij de BKL wordt gehandhaafd.

Onder bovenstaande voorwaarde kan eolische depositie de zeespiegelstijging van 0.45 m in de komende 50 jaar compenseren. Daarin zit bovendien nog wat rek, zoals hierboven berekend, dus op basis hiervan kan worden geconcludeerd dat de zeespiegelstijging tot een snelheid van 1 m/eeuw kan worden gecompenseerd.

B.6 Referenties

Deltares, 2015, XBeach 1D - Probabilistic model - ADIS, Settings, Model uncertainty and Graphical User Interface. Referentie: 1209436-002.