

RWS INFORMATIE

Achtergrond Sterktemodel Duinafslaginstrumentarium

BOI Zandige Waterkeringen

Datum	26 januari 2023
Versie	2.1
Status	Finaal-definitieve versie



Samenvatting

Het Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI) is het ondersteunend instrumentarium voor de werkzaamheden in de tweede Landelijke Beoordeling primaire waterkeringen Overstromingskansen (LBO-2) en verder. Het BOI bestaat uit een procesinstrumentarium (regeling, bijlagen, ontwerphandleiding) en een basisinstrumentarium. Het BOI is opgezet in het ontwikkelingsprogramma BOI '20-'23.

Binnen het project 'BOI Zandige Waterkeringen' is in de periode 2020-2023 het nieuwe basisinstrumentarium ontwikkeld voor de beoordeling, het ontwerp en het beheer van zandige waterkeringen. Het Plan van Aanpak Vernieuwd Instrumentarium Zandige Waterkeringen (Deltares en Arcadis, 2019) beschrijft hiertoe de ontwikkeling van een nieuw instrumentarium, op basis van het proces-gebaseerde, numerieke model XBeach, om de veiligheidsbeoordeling van de zandige kust van de Nederlandse Noordzeekust mee uit te voeren. Als onderdeel van het Plan van Aanpak, is een aantal taken beschreven welke uitgevoerd zijn om toepassing van het nieuwe instrumentarium in de tweede Landelijke Beoordeling op basis van Overstromingskansen (LBO-2) mogelijk te maken. Deze start in 2023 en duurt tot 2035.

De voorliggende rapportage beschrijft de achtergrond van het sterktemodel van het instrumentarium voor het faalpad duinafslag en vormt samen met de zogenaamde Handleiding Overstromingskansanalyse Faalpad Duinafslag (Arcadis en Deltares, 2023c) en de Technische Leidraad Zandige Waterkeringen (Arcadis en Deltares, 2023a) een beschrijving van het nieuwe instrumentarium voor zandige waterkeringen.

Het eerste gedeelte van het rapport bevat een historisch overzicht van de ontwikkeling van het duininstrumentarium met de TAW-leidraad uit 1984 als startpunt. Hierbij wordt expliciet onderscheid gemaakt tussen de ontwikkeling van het zogenaamde sterktemodel (met de modellen Duros, DurosTa, Duros+ en XBeach) en het (parallele) ontwikkeltraject van de sterktemodellen welke voor ontwerp- en beoordelingsdoeleinden worden gebruikt (leidraad) en het daarbij gebruikte semi-probabilistische rekenmodel. Vervolgens is een uitgebreide toelichting gegeven op het nu gebruikte XBeach-model, inclusief de hierbij te gebruiken instellingen die voor het BOI-basisinstrumentarium zijn afgeleid en opgesteld.

Onderdeel van het voor ontwerp- en beoordelingsdoeleinden gebruikte model is het zogenaamde grensprofiel waarvoor de definitie (rol en geometrie) is herzien. Ten opzichte van het binnen WBI2017 nog vigerende TRDA2006-grensprofielmodel (Technische Rapportage DuinAfslag) is een ingrijpende herziening doorgevoerd waarbij de dimensies van het grensprofiel afhankelijk zijn gemaakt van de direct voor het duin aanwezige hydraulische condities. Daarbij kon gebruik worden gemaakt van de overstap op het procesmodel XBeach welke deze golfcondities kan toeleveren. In aanvulling op de basisdefinitie van het grensprofiel is ook het resultaat opgenomen van een nadere optimalisatie waarbij de hoogtemaat is aangepast en een iets lager kruinniveau kan worden gecompenseerd door een bredere kruin.

Inhoudsopgave

Colofon	2
Samenvatting	3
Inhoudsopgave	4
1 Inleiding en achtergronden	5
1.1 Ontwikkeling nieuw instrumentarium voor zandige waterkeringen	5
1.2 Faalpadbenadering	5
1.3 Leeswijzer	6
1.4 Positie voorliggende rapportage	6
1.5 Totstandkoming van dit rapport	6
2 Ontwikkeling duinafslaginstrumentarium	8
2.1 Inleiding	8
2.2 Overzicht van de verschillende typen modellen	8
2.3 Ontwikkeling sterktemodel sinds 1984	8
2.4 Ontwikkeling semi-probabilistische modellen	10
3 XBeach als nieuw sterktemodel voor initieel mechanisme duinafslag	13
3.1 Inleiding	13
3.2 XBeach-versie voor BOI	14
3.3 Parameterinstellingen voor het sterktemodel XBeach	16
3.4 Instellingen voor profielschematisatie	16
3.5 Genereren van hydraulische modelrandvoorwaarden	17
3.6 Analyse van modelresultaten: duinafslagindicatoren	19
4 Definitie grensprofiel t.b.v. van niet-gemodelleerde vervolprocessen	21
4.1 Inleiding	21
4.2 Definitie van het grensprofiel in het WBI2017-duinafslaginstrumentarium	21
4.3 Bepalingen grensprofiel in het WBI2017-duinafslaginstrumentarium	23
4.4 Herdefinitie grensprofiel in het BOI-basisinstrumentarium	26
4.5 Basisgeometrie van het grensprofiel	33
4.6 Alternatieve geometrie van het grensprofiel	44
4.7 Effect van de overstap op de BOI grensprofieldefinitie	49
Referenties	52
Bijlage A: Overzicht BOI-instellingen voor XBeach	55
Bijlage B: Overzicht MatLab-scripts voor opzet en naverwerking XBeach duinafslagberekingen	57
Bijlage C: Detailresultaten alternatief grensprofiel: breedte-hoogte-uitwisseling	61
Bijlage D: Detailresultaten alternatief grensprofiel: minimale kruinhoogte	65

1 Inleiding en achtergronden

1.1 Ontwikkeling nieuw instrumentarium voor zandige waterkeringen

1.1.1 *Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI)*

Het Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI) is het ondersteunend instrumentarium voor de werkzaamheden in de tweede Landelijke Beoordeling op basis van Overstromingskansen (LBO-2) en verder. Het BOI bestaat uit een procesinstrumentarium (Omgevingsregeling, twee bijlagen en handleiding Veiligheidsontwerp) en een basisinstrumentarium (handleidingen, technische leidraden, softwareapplicaties en databases). Het BOI is opgezet in het ontwikkelingsprogramma BOI '20-'23.

1.1.2 *Project 'BOI Zandige Waterkeringen'*

Door de beperkte toepasbaarheid van het tot en met 2022 gebruikte beoordelingsinstrumentarium voor duinen, maar met name de beschikbaarheid van nieuwe kennisinzichten en nieuwe sterktemodellen bestond er voldoende draagvlak om een ontwikkelingstraject te starten voor een nieuw beoordelingsinstrumentarium voor duinen. Daarom is binnen het brede BOI-programma het instrumentarium voor de beoordeling, het ontwerp en het beheer van zandige waterkeringen herzien binnen het project 'BOI Zandige Waterkeringen' in de periode 2020 – 2023. Hierin stond de ontwikkeling van het op de fysische processen gebaseerde sterktemodel XBeach als opvolger van het empirische sterktemodel Duros+ centraal.

Rijkswaterstaat WVL heeft, in opdracht van DGWB, STOWA en de kust- en duinwaterkeringsbeheerders, de taak gekregen om de ontwikkeling van dit nieuwe instrumentarium te leiden. Door verschillende organisaties zijn in dit verband voorbereidende studies en verkenningen uitgevoerd welke de basis vormen voor dit ontwikkelings-traject voor zandige waterkeringen.

Ten behoeve van deze overstap is binnen het project 'BOI Zandige Waterkeringen' het XBeach-model gekalibreerd en gevalideerd (Deltares en Arcadis, 2022; Arcadis en Deltares, 2022) en vervolgens gebruikt om een semi-probabilistisch rekenmodel met bijbehorende rekenwaarden te definiëren (Arcadis en Deltares, 2023b). Hiermee kan de maatgevende positie van het afslagpunt als functie van de kans waarmee deze locatie wordt overschreden op een eenvoudige manier worden afgeleid. In het kader van deze overgang is ook de faalfunctie herzien en de conceptuele onderbouwing van het grensprofiel en de wijze waarop de dimensies hiervan worden bepaald aangepast.

1.2 Faalpadbenadering

In de LBO-2 wordt de overstromingskans op trajectniveau bepaald en beoordeeld aan de hand van zogenaamde relevante faalmechanismen en dominante faalpaden, zoals nader is beschreven in de 'Handleiding Overstromingskansanalyse' (Rijkswaterstaat, 2022). Een faalmechanisme is gedefinieerd als 'de combinatie van alle faalpaden met hetzelfde initieel mechanisme' en een faalpad als 'de gehele keten van opeenvolgende gebeurtenissen of mechanismen die samen leiden tot een overstroming of falen van de waterkering' in de Omgevingsregeling (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022).

Voor een zandige waterkering is het faalmechanisme duinafslag relevant, welke uit slechts één faalpad bestaat. Het faalpad duinafslag bestaat uit het initieel mechanisme duinafslag en vervolgmecanismen (geotechnische instabiliteit en erosie van

kruin/binnentalud door golfploop/-overslag) die uiteindelijk kunnen leiden tot het falen en doorbreken van de zandige waterkering en overstroming van het achterland. Om de faalkans van een zandige waterkering te bepalen, heeft daarom niet alleen duinafslag een plaats gekregen binnen het duinafslaginstrumentarium, maar ook de vervolgprocessen.

1.3 Leeswijzer

De voorliggende rapportage beschrijft de achtergrond van het BOI basis-instrumentarium voor het faalpad duinafslag, waarbij de geschiedenis van het duinafslaginstrumentarium, het duinafslagmodel XBeach en het grensprofiel aan bod komen.

Het eerste gedeelte van het voorliggende rapport bevat een historisch overzicht van de ontwikkeling van het duininstrumentarium sinds het beschikbaar komen van het eerste wettelijk voorgeschreven rekenvoorschrift in 1984 ([Hoofdstuk 2](#)).

In het nieuwe instrumentarium neemt het gebruik van het XBeach-model voor het modelleren van het duinafslagproces – het initieel mechanisme – een centrale rol in. Dit op de onderliggende fysische processen gebaseerde morfologische model is, inclusief de hierbij te gebruiken instellingen, in meer detail beschreven in [Hoofdstuk 3](#).

Daar waar in Hoofdstuk 3 expliciet wordt ingegaan op de wel gemodelleerde processen (duinafslag), gaat het hierop volgende deel van de rapportage juist in op de wijze waarop met de niet-gemodelleerde vervolgprocessen is omgegaan. In dit verband wordt in [Hoofdstuk 4](#) de definitie van het zogenaamde grensprofiel toegelicht dat gebruikt kan worden als pragmatische methode om de vervolgprocessen mee te nemen in een faalkansanalyse. Hierbij wordt een vergelijking gemaakt tussen het grensprofiel conform het oude instrumentarium (WBI2017) en conform het BOI-basisinstrumentarium, en de geometrie van het grensprofiel – zowel de basisgeometrie als de alternatieve geometrie met breedte-hoogte uitwisseling – toegelicht. De gedetailleerde uitwerkingen ten behoeve van deze verdiepingsslag voor de alternatieve geometrie zijn opgenomen in de Bijlage C en D bij deze rapportage.

1.4 Positie voorliggende rapportage

De voorliggende rapportage beschrijft de achtergrond van het BOI-basisinstrumentarium voor het faalpad duinafslag en vormt samen met de zogenaamde Handleiding Overstromingskansanalyse Faalpad Duinafslag (Arcadis en Deltares, 2023c) en de Technische Leidraad (Arcadis en Deltares, 2023a) een beschrijving van het nieuwe instrumentarium voor zandige waterkeringen.

In deze rapportage is nadrukkelijk geen aandacht besteed aan de te gebruiken hydraulische randvoorwaarden welke zijn beschreven in de op de Technische Leidraad gebaseerde artikelen (Arcadis en Deltares, 2023a). De onderliggende definitie van het semi-probabilistische model is beschreven in een separate Engelstalige achtergrond-rapportage (Arcadis en Deltares, 2023b).

1.5 Totstandkoming van dit rapport

In eerste instantie was dit rapport gericht op de herziening van de beoordelingsmethodiek en de definitie van de faalfunctie. Eerdere werkversies bevatten ook informatie over de aanpak voor het afleiden van een semi-probabilistisch model. Het document heeft daarbij gedurende het project nadrukkelijk de status van 'werkdocument' gehad.

De eerste versie van het hiertoe opgestelde werkdocument is door Arcadis in opdracht van Deltares opgesteld binnen Fase 0 van het project 'BOI Zandige Waterkeringen'. Deze werkzaamheden waren voorbereidend op de vervolgfases binnen het project, waarin Arcadis en Deltares vanaf medio 2020 tot eind 2022 gezamenlijk, in opdracht van Rijkswaterstaat, het vernieuwde instrumentarium voor zandige waterkeringen ontwikkelen.

Een eerste concept (versie 0.1) van voorliggende document werd in nauw overleg met de direct betrokken teamleden opgesteld door Arcadis en vervolgens van een interne review voorzien (versie 0.2) en op basis daarvan is versie 0.3 beschikbaar gemaakt. Deze versie is vervolgens gedeeld met RWS en voorzien van een uitgebreidere review. Het verzamelde commentaar is gebruikt als input voor een op 9 maart 2021 met enkele specialisten gehouden workshop.

De verwerking van zowel het ontvangen commentaar als de resultaten van de workshop zijn opgenomen in een nieuwe versie van het document (versie 1.0). In deze versie is ook een eerste uitwerkingsslag van de (her)definitie van het grensprofiel opgenomen waarbij beoogd werd om deze te baseren op de kustnabije hydraulische condities bij het duin. In deze versie van het werkdocument, aangeboden ter externe review, werd de beoogde methodiek voor de rekenkundige implementatie van de grensprofieldefinitie op hoofdlijnen beschreven.

In versie 1.1 (oktober 2021) is het van de begeleidingsgroep ontvangen commentaar verwerkt waarna de aandacht binnen het project primair uitging naar de (definitieve) validatie van het sterktemodel en het afleiden van een semi-probabilistisch model. Parallel hieraan werden ook de 'Handleiding Overstromingskansanalyse Faalpad Duinafslag' en de 'Technische Leidraad Zandige Waterkeringen' ingevuld.

Versie 1.3 (juni 2022) heeft na oplevering een externe review doorlopen waarna delen van de rapportage met daarin de resultaten van de optimalisatie van het grensprofiel separaat zijn gedeeld.

De definitieve invulling van de voorliggende rapportage werd daarbij afgestemd op de inhoud van met name deze laatste twee documenten. Feitelijk omvat deze nu dus de relevant geachte achtergrondinformatie die geen deel uitmaakt van de Handleiding of de Technische Leidraad en zo samen met deze documenten een beschrijving geeft van het nieuwe instrumentarium voor zandige waterkeringen.

De nu voorliggende rapportage betreft de definitieve versie (versie 2.0) van het eindproduct met de (inmiddels aangepaste) titel 'Achtergrond Sterktemodel Duinafslaginstrumentarium'. Hierin zijn de opmerking op concept definitieve versie 1.6 verwerkt.

2 Ontwikkeling duinafslaginstrumentarium

2.1 Inleiding

In het project 'BOI Zandige Waterkeringen' is een nieuw instrumentarium ontwikkeld waarmee de veiligheid van een primaire zandige waterkering (duin) kan worden beoordeeld op basis van overstromingskansen maar dat ook geschikt is voor ontwerpen en beheerdoeleinden. Een wezenlijk onderdeel van dit project is het ontwikkelen van een zogenaamde semi-probabilistische rekenregel voor het beoordelen (en ontwerpen en beheren) van de in eerste instantie langs de open Noordzeekust gelegen zandige waterkeringen. Met een dergelijk voorschrift kan op basis van specifieke rekenwaarden, die representatief zijn voor de situatie ter plaatse, de kans op doorbraak van een zandige waterkering worden bepaald. Een set rekenwaarden (waterstand, golfcondities, korrelkarakteristieken, etc.) is daarbij een adequate representatie uit het bereik van mogelijke combinaties van stochasten (met eigen verdelingen). Dit semi-probabilistische voorschrift vormt het hart van het nieuw ontwikkelde instrumentarium.

2.2 Overzicht van de verschillende typen modellen

In het ontwikkelingstraject kunnen drie verschillende typen modellen worden onderscheiden, namelijk:

- Een *deterministisch* model waarbij de hoeveelheid duinafslag een functie is van een vastomlijnde set invoerparameters (bijvoorbeeld stormvloedpeil, golfcondities, sediment karakteristieken en initieel aanwezig dwarsprofiel);
- Een *probabilistisch* model welke het voorgenoemde deterministische model toepast, maar daarbij ook de statistische verdelingsfuncties van de eerdergenoemde stochastische invoerparameters in beschouwing neemt om zo de verwachte hoeveelheid duinafslag te kunnen berekenen;
- Een *semi-probabilistisch model* waarbij de resultaten van het probabilistische model kunnen worden benaderd door het gebruik van een representatief gekozen set invoerparameters (rekenwaarden) om zo de verwachte hoeveelheid duinafslag te kunnen berekenen.

Het eerste, deterministische sterktemodel kan gezien worden als het startpunt van de verdere uitwerkingen. In §2.3 is ter informatie een historisch overzicht vanaf 1984 gegeven van de ontwikkeling van deze sterktemodellen tot en met het nu te hanteren XBeach model.

De deels parallelle ontwikkeling van de semi-probabilistische modellen is beschreven in §2.4. Deze modellen slaan in feite een brug tussen de andere twee typen modellen waardoor het probabilistische model door gebruik van rekenregels feitelijk weer als een deterministisch sterktemodel kan worden gezien. Dit laatste model kan voor ontwerp- en beoordelingsdoeleinden worden gebruikt.

2.3 Ontwikkeling sterktemodel sinds 1984

2.3.1 *Duros als sterktemodel vanaf 1984*

De kern van het in 1984 beschikbaar gemaakte beoordelingsmodel werd gevormd door het zogenaamde Duros-model (DUineROSie-model). Dit model beschreef de karakteristieke vorm van het afslagprofiel als aanwezig na het optreden van een zware stormconditie op basis van de resultaten van langjarig modelonderzoek (Vellinga, 1986). Door deze eenduidig beschreven vorm van het afslagprofiel te combineren met de voor de storm aanwezige profielligging kon via een balansmodel

de hoeveelheid duinafslag worden gekwantificeerd. Deze versie van, het op primair in modelfaciliteiten waargenomen afslagprofielen gebaseerde, sterktemodel was tot 2007 in gebruik.

2.3.2 *Ontwikkeling nieuw sterktemodel DurosTa (1985-1993)*

Omdat het eenvoudige empirische balansmodel Duros - per definitie - ongeschikt was voor toepassingen bij onder andere gekromde kusten zoals de koppen van eilanden en harde constructies zoals duinvoetverdedigingen, is er vanaf 1985 gewerkt aan het formuleren van een meer geavanceerde versie van het sterktemodel. Hierin is de ontwikkeling van de hoeveelheid afslag gebaseerd is op een modellering van de onderliggende transportprocessen. Dit onderzoek heeft in 1993 geleid tot het beschikbaar komen van een tijdsafhankelijke versie van het Duros-model, het zogenaamde DurosTA-model (Steetzel, 1993).

Met deze versie van het rekenmodel kon stapsgewijs de ontwikkeling van het afslagprofiel onder invloed van een in de tijd variërende hydraulische belasting worden bepaald. Per tijdstap werden in dit rekenmodel de golfvoortplanting, de door golfbreken geïnduceerde sedimentconcentraties en secundaire stromingen berekend. Uit de aldus berekende dwarstransporten volgde weer de bodemverandering en daarmee ook de tijdsontwikkeling van de hoeveelheid afslag boven het maximale stormvloedpeil.

Met het DurosTA-model was het ook mogelijk om rekening te houden met effecten van gradiënten in het langtransport, hetgeen het model, conform de oorspronkelijke doelstelling, ook geschikt maakte voor toepassingen voor gekromde kusten. De voornaamste aandacht ging echter uit naar toepassingen met harde constructies in het dwarsprofiel en dan met name naar de kwantificering van de omvang van ontgrondingskuilen en het ontwerp van hybride waterkerende constructies.

In de beginfase is er veel aandacht gegeven aan de vergelijking tussen het vigerende Duros-model en het nieuwe DurosTA-model resulterende in een lange reeks van rapportages die allemaal waren gerelateerd aan de validatie van het nieuwe model. Feitelijk kan deze onderzoeksfase achteraf worden gezien als eerste vervolgstap in de ontwikkeling van een fundamenteel nieuw beoordelingsinstrumentarium zoals dat bijna 30 jaar later daadwerkelijk werd ingezet.

Het DurosTA-model is veelvuldig gebruikt voor toepassingen langs de Nederlandse kust voor met name die situaties waarbij het relatief simpele Duros model niet geschikt was. Hierbij kan met name worden gedacht aan het ontwerp van hybride keringen waarbij de afslag van het voorliggende zandmassief werd doorgerekend tot en met het moment dat er sprake was van golfaanval op de achterliggende dijkconstructie. Op basis van de door het model net zeewaarts van de constructie berekende golfcondities kon ook de overslag over de dijkconstructie worden gekwantificeerd en zo de gecombineerde versterkingsoplossing worden ontworpen.

2.3.3 *Duros+ als update Duros (2006)*

De ontwikkeling van een nieuwe versie van het Duros model was het gevolg van het feit dat er vanaf 2002 rekening moest worden gehouden met de laatste inzichten in de hydraulische belasting. Deze hadden met name betrekking op de bij de maatgevende omstandigheden te verwachten grootte van de golfperiode. Deze was veel groter was dan waar eerder rekening mee werd gehouden. Bij de ontwikkeling van het Duros-model werd, gegeven de destijds beschikbare informatie en het verwachte bereik van de golfperioden, de vorm van het afslagprofiel feitelijk onaf-

hankelijk verondersteld van de grootte van de golfperiode. Voor de maatgevende periode werd voor de Hollandse kust uitgegaan van een piekwaarde van 12 s.

Analyse van de marginale statistiek op offshore meetstations leidde echter tot de conclusie dat er (ten opzichte van deze 12 s) rekening moest worden gehouden met een toename tot 60 % van deze periode voor met name de meer noordelijk langs de Noordzeekust gelegen stations.

Het verwachte effect van deze zwaardere golfcondities is in kaart gebracht door gebruik te maken van resultaten van reeds voor kortere perioden uitgevoerde modelproeven in combinatie met de resultaten van DurosTA-berekeningen (Alkyon, 2002). Conclusie hiervan was dat er bij een toename van de golfperiode van 12 naar 15 tot 18 s rekening moest worden gehouden met orde 10 tot (wellicht) 50% extra duinafslag.

Op basis van deze resultaten zijn mogelijke versies voor een nieuwe op Duros gebaseerde sterktemodel in kaart gebracht (WL Delft Hydraulics, Alkyon en TU Delft, 2006a). Ook is grootschalig modelonderzoek uitgevoerd in de Deltagoot van het Waterloopkundig Laboratorium om zo betrouwbare informatie te verkrijgen over de relatie tussen de golfperiode en de mate van duinafslag voor het hogere periodebereik (Van Gent, De Vries, Coeveld, De Vroeg, & Van de Graaff, 2008), (De Vries, Van Gent, Walstra, & Reniers, 2008).

De resultaten van deze Deltagoot proeven zijn gebruikt om een nieuwe gevalideerde versie van het sterktemodel te definiëren (WL Delft Hydraulics, Alkyon en TU Delft, 2006b). Deze aangepaste versie van het Duros-model, het zogenaamde Duros+ model, was in basis gelijk aan de 1984-versie maar hield nu in de beschrijving van de afslagparabool ook rekening met de grootte van de maximale golfperiode.

2.3.4 *XBeach (2023)*

Als resultaat van het in 2020 tot 2022 uitgevoerde BOI-onderzoekstraject is er een verbeterde versie van het sterktemodel Duros+ beschikbaar gekomen in de vorm van het XBeach-model. Daartoe heeft een uitgebreide validatie van dit model plaatsgevonden welke is vastgelegd in een Engelstalige achtergrondrapportage (Arcadis en Deltares, 2022).

In Hoofdstuk 3 is een uitgebreide beschrijving van dit model gepresenteerd, inclusief de hierbij te gebruiken BOI-instellingen.

2.4 **Ontwikkeling semi-probabilistische modellen**

2.4.1 *Duros als sterktemodel vanaf 1984*

In 1984 is de 'Leidraad voor de beoordeling van duinen als waterkering' verschenen (TAW, 1984). Met de in dit document beschreven methode werd het toen al mogelijk om de veiligheid van een zandige waterkering op een probabilistisch gestoelde wijze te bepalen. Het sterktemodel van dit model werd gevormd door het zogenaamde Duros model (zie §2.3.1). In deze leidraad is daartoe een semi-probabilistische versie van dit rekenmodel opgenomen. Daarbij werd rekening gehouden met de onzekerheden in de duinafslagbepalende factoren (Graaff, J. van de, 1984). Zowel het sterktemodel als het hieraan gekoppelde semi-probabilistische model zijn ruim 20 jaar in gebruik gebleven.

2.4.2 *Initiële aanzet gebruik DurosTA als sterktemodel*

Ofschoon het DurosTA-model (Steetzel, 1993), mede vanwege het grotere toepassingsbereik, uitgebreid is toegepast voor de meer complexe toepassingen langs

de Nederlandse Noordzeekust, was een echte Leidraad-toepassing nog niet mogelijk. Daartoe is vanaf 2002 gewerkt aan de ontwikkeling en toetsing van een probabilistisch schil rond het duinafslagprogramma DurosTA (Alkyon, 2003). Deze vervolgstap in de ontwikkeling was gericht op het technisch beschikbaar maken van een methode waarmee later het vigerende beoordelingsinstrumentarium (de Leidraad uit 1984) zou kunnen worden vervangen door het zogenaamde DuinToets-instrumentarium. Voor dit deel van het onderzoekstraject is in 2004 ook een meer gedetailleerd plan van aanpak opgesteld (Alkyon, 2004). Omdat er toen nog niet voldoende draagvlak aanwezig was voor de verdere implementatie van dit model, heeft dit niet geleid tot een afgerond semi-probabilistisch model. Daar kwam bovendien bij dat de aandacht van het sterktemodel verschoof naar de belastingkant. De reden hiervoor was het beschikbaar komen van nieuwe inzichten in de hydraulische belastingen waaruit bleek dat, met name de tijdens de maatgevende omstandigheden aanwezige, golfperiode aanmerkelijk groter was dan tot dan toe voorzien (zie ook §2.3.3).

2.4.3 *Duros+ als sterktemodel vanaf 2006*

In 2006 is een nieuwe versie van het sterktemodel beschikbaar gekomen in de vorm van het zogenaamde Duros+ model (zie §2.3.3) waarbij ook het effect van de golfperiode op de hoeveelheid duinafslag kon worden gekwantificeerd. In het oorspronkelijk Duros model was de afhankelijkheid van de golfperiode niet expliciet aanwezig.

Als laatste stap is vervolgens dit model weer omgezet in een semi-probabilistische methode (WL Delft Hydraulics, Alkyon en TU Delft, 2007). Deze laatste stap heeft geleid tot het zogenaamde TRDA2006-model dat het oorspronkelijke semi-probabilistische model uit 1984 vervangt (ENW, 2007). In het kader van de overstap naar het WBI2017 heeft een herkalibratie plaatsgevonden van dit model, zonder dat dit heeft geleid tot een aanpassing van de methode (Deltares, 2015b). Feitelijk is het TRDA2006-model dus nog onderdeel van WBI2017 en daarmee ook de tot en met 2022 vigerende methode voor de beoordeling van zandige waterkeringen langs de Nederlandse Noordzeekust.

2.4.4 *XBeach als sterktemodel vanaf 2023*

In zowel de 1984- als de 2006-uitvoering had het sterktemodel (respectievelijk (Duros en Duros+) betrekking op een relatief eenvoudig balansmodel waarbij de vorm van het afslagprofiel was gedefinieerd als functie van de offshore golfcondities en de karakteristieken van het korrelmateriaal. In de periode 2019-2023 is de overstap voorbereid naar een tijdsafhankelijk, op fysische processen gebaseerd sterktemodel als kern van deze modellering.¹ Hierbij vormt het meer op de fysica gebaseerde procesmodel XBeach de kern en is opnieuw een semi-probabilistische formulering afgeleid welke de resultaten van meer complexe probabilistische uitwerkingen op een acceptabele manier vervangt. De afleiding en validatie van deze semi-probabilistische rekenregel is als onderdeel van de BOI-uitwerkingen uitgebreid beschreven in een Engelstalige achtergrondrapportage (Arcadis en Deltares, 2023b).

Een beschrijving van de ontstaansgeschiedenis en een korte beschrijving van dit sterktemodel zijn opgenomen in het volgende hoofdstuk. Ten opzichte het ook op onderliggende fysische processen gebaseerde DurosTa-model is met name de beschrijving van de golfvoortplanting en de waterbeweging sterk verbeterd. Het expliciet beschrijven van de effecten van de lange golven is daar een belangrijk onderdeel van. Dit heeft geleid tot een kwaliteitsverbetering van het rond de waterlijn gesimuleerde duinafslagproces zoals dat met name voor lage duinen van belang is.

¹ Het is aan de gebruiker of deze bij het beschikbaar komen van het nieuwe op het sterktemodel XBeach gebaseerde instrumentarium nog gebruik wil maken van het Duros+ instrumentarium.

Het voor het beoordelen van zandige waterkeringen ontwikkelde instrumentarium staat beschreven in de 'Handleiding Overstromingskansanalyse Faalpad Duinafslag' en de artikelen die behoren tot de 'Technische Leidraad Zandige Waterkeringen' (Arcadis en Deltares, 2023c), (Arcadis en Deltares, 2023a).

De details aangaande de afleiding en definitie van het semi-probabilistische sterktemodel staan in detail beschreven in een separate rapportage (Arcadis en Deltares, 2023b).

3 XBeach als nieuw sterktemodel voor initieel mechanisme duinafslag

3.1 Inleiding

3.1.1 *Ontstaansgeschiedenis*

De aanleiding voor de ontwikkeling van het model XBeach ligt in de zware orkanen die in 2004 en 2005 de oostkust van de Verenigde Staten hebben geteisterd. Deze hebben met name veel schade aangericht langs de zandige kust van de staat Florida. Hierdoor ontstond bij het US Army Corps of Engineers de behoefte aan een modelinstrument om de kwetsbaarheid van de kust in kaart te brengen en mogelijke beschermingsmaatregelen te kunnen ontwerpen. Er is daarom opdracht gegeven aan Unesco-IHE (nu IHE Delft), Deltares, de Universiteit van Miami en de Technische Universiteit Delft om het model XBeach te ontwikkelen.

Een volledige beschrijving van de ontwikkeling, formuleringen en validatie van het model is gegeven in (Roelvink, et al., 2009), (Roelvink, McCall, Mehvar, Nederhoff, & Dastgheib, 2018) en de gebruikershandleiding van XBeach (Deltares, 2022).

3.1.2 *Modelbeschrijving*

XBeach lost simultaan vergelijkingen voor de waterbeweging, het sedimenttransport en de verandering van de bodemligging op. Op dit moment is XBeach geformuleerd in drie modi met toenemende mate van detail in de beschrijving van de processen:

- stationaire modus;
- surf-beat modus;
- niet-hydrostatische modus.

In de *stationaire modus* wordt de golfhoogte als constante (in de tijd) aangenomen. De golven planten zich voort naar de kust waarbij de golfhoogte afneemt door bodemwrijving en breken. Dit is enigszins vergelijkbaar met SWAN, maar dan in een vereenvoudigde versie voor de kustnabije toepassing. Deze modus bevat echter niet de essentiële fysica om het duinafslagproces goed te beschrijven.

In de laatste, meest gedetailleerde modus van XBeach (*niet-hydrostatische modus*) wordt de waterbeweging van alle afzonderlijke golven opgelost en is daarmee analoog aan het SWASH-model. Deze modus is rekenintensief, en is daarnaast ook nog niet gevalideerd voor sedimenttransport van zandige fracties (wel aan bodemtransport van grind). Deze modus is daarom nog niet geschikt voor het modelleren van duinerosie.

De als tweede genoemde *surf-beat modus* is de best ontwikkelde en best gevalideerde modus van het XBeach model. In deze modus worden korte (wind, deining) golven en lange (infragraviteit; op de tijdschaal van golfgroepen) golven gesimuleerd, die samen de belangrijkste processen voor duinerosie aandrijven. Daartoe worden de korte golven berekend met gebruik van een tijdsvariërende energiebalans, die de variatie van de golfhoogte op de tijd- en ruimteschaal van golfgroepen bijhoudt, en processen als refractie, breken, bodemwrijving en shoaling beschrijft. De waterbeweging wordt opgelost op het niveau van golfgroepen (fasegemiddeld) waarbij de 'lange golven' expliciet worden doorgerekend als onderdeel van de waterbeweging. De 'korte golven' worden daarentegen parametrisch meegenomen via een aparte gekoppelde rekenmodule voor de golfenergiepropagatie.

Dit golfmodel lijkt daarmee op het tweede generatie golfmodel HISWA, met als verschil dat in XBeach geen windgroei wordt berekend maar dat XBeach wel de voortplanting van individuele golfgroepen kan simuleren. De berekende variatie van de golfhoogte in de ruimte en tijd (door shoaling, breken en als gevolg van het passeren van golfgroepen) veroorzaakt krachten op het gemiddelde wateroppervlak (zogenaamde radiation stress/golfspanning gradiënten).

Omdat in deze modus géén individuele korte golven worden doorgerekend is het standaard dus ook niet mogelijk om bijvoorbeeld de oploop van korte golven op het duinprofiel te kwantificeren. Het is wel mogelijk om de oploop van lange golven te monitoren op basis van de modelresultaten.

Waterbeweging, inclusief dwars- en langstromingen en golfopzet aan de kust, worden berekend met 2DH (tweedimensionaal horizontale) niet-lineaire ondiep water vergelijkingen, inclusief termen voor de golfkrachten en bodemwrijving. Omdat de golfkrachten in de tijd en ruimte variëren, veroorzaken zij ook variaties in de waterbeweging (stroming en oppervlakte uitwijking) op de tijdschaal van golfgroepen. Deze zogenaamde lange (infragravity) golven hebben een belangrijke rol in het duinafslagproces. De waterbeweging en de korte golven drijven samen het bodem- en zwevend sedimenttransport aan, dat simultaan opgelost wordt.

XBeach in surf-beat modus is wereldwijd toegepast en gevalideerd, en is uitermate geschikt om duinerosie te simuleren. De toegevoegde waarde van het XBeach model boven andere modellen is dat de essentiële fysica van de stormprocessen worden opgelost, inclusief tijdsafhankelijkheid en de lange golven. Het model is in staat om de waterbeweging en de sedimenttransporten in willekeurige topografieën en willekeurige profielvormen op te lossen. Het model wordt wereldwijd toegepast en is op dit moment meer dan 1.300 keer geciteerd in de literatuur.

3.2 XBeach-versie voor BOI

3.2.1 Sterktemodel

Voor toepassingen binnen BOI wordt een BOI-specifieke versie² van het sterktemodel XBeach gebruikt. In het BOI-basisinstrumentarium wordt dit sterktemodel toegepast in 1D (dwarsprofiel) surf-beat modus. Voor deze modus is een set modelparameterinstellingen bepaald voor toepassing in het BOI (zie (Deltares en Arcadis, 2022)). Dit sterktemodel is gevalideerd aan de hand van veld- en laboratoriummetingen (Arcadis en Deltares, 2022; Deltares, 2021e) en is gebruikt voor de afleiding van de vernieuwde beoordelingsmethodiek (Arcadis en Deltares, 2023b).

Het BOI-basisinstrumentarium op basis van de 1D surf-beat modus van XBeach is geschikt voor toepassing op volledige zandige delen van de Nederlandse getijd kust (duinprofielen), die kustlangs min of meer uniform en recht zijn.

In de surf-beat modus van XBeach worden golven, diepte-gemiddelde waterbeweging, sediment transport en morfologische veranderingen op de tijdschaal van golfgroepen berekend om duinafslag gedurende een storm te simuleren. Het model wordt in daartoe toegepast in 1D (dwarsprofiel) modus. Hierbij berekent XBeach waterstanden en kustdwarse stromingen in het dwarsprofiel als gevolg van getij en stormopzet, golven (golfopzet en onderstroom in de brekerzone) en golfgroepen

² Op het moment van schrijven is dit de release 'BOI-phase3-5956' van 5 december 2022 (Deltares, 2022). Zie ook de actuele MorphAn-versie voor de actuele BOI-versie van XBeach, en xbeach.readthedocs.io voor de actuele gebruikshandleiding.

(infragravity golven). Het model kan hiermee stroming in complexe gebieden (overwash over lage duinen) simuleren. De transformatie van wind- en deininggolven van diep water naar de kust door shoaling en golfbreking wordt gesimuleerd aan de hand van een energiebalans. De zogenaamde intragolf bewegingen (waterbeweging binnen één golf) worden door XBeach parametrisch beschreven. Dit betekent dat het model met golf-gemiddelde parameters (golfhoogte) rekent, en de waterbeweging van individuele wind- en deininggolven niet expliciet zichtbaar zijn in de uitvoer van het XBeach model. Bodemveranderingen worden in XBeach berekend op basis van berekende sedimenttransporten. Daarnaast simuleert XBeach het instorten van steile duinfronten (*dune slumping* of *avalanching*) door middel van een relatie met de kritieke helling.

Hoewel het sterktemodel XBeach de belangrijkste processen voor duinafslag expliciet simuleert, worden er in het sterktemodel aannames gemaakt die relevant zijn voor de toepassing van XBeach binnen het BOI. Het is hierbij van belang te weten dat de processen die in XBeach beschreven zijn, vooral relevant zijn voor energetische (storm) condities. Processen die belangrijk zijn tijdens minder energetische perioden (niet-lineaire golftransporten, migreren van brekerbanken, etc.) worden in XBeach minder nauwkeurig dan duinafslag beschreven, en zijn vaak afhankelijk van de kalibratie van modelparameters (zie §3.3). Het sterktemodel en standaard modelparameterinstellingen zijn daarom niet zondermeer geschikt voor het simuleren van laag-energetische, dagelijkse condities.

In XBeach wordt aangenomen dat binnen het rekegebied, de golftransformatie vooral bepaald wordt door golfrefractie, -shoaling, en -breking (dat wil zeggen processen die relevant zijn op relatief ondiep water). Golfgroei door wind wordt in XBeach niet meegenomen. Dit betekent dat het model alleen toegepast moet worden in de kust-nabije zone waarin windgroei relatief beperkt is ten opzichte van bijvoorbeeld golfbreking. Dit is het geval voor de Nederlandse kustzone tot grofweg een waterdiepte diepte van 10 meter of (in de praktijk) het bereik van de JarKus metingen. Voor grotere modeldomeinen is het relevant te onderzoeken of het ontbreken van golfgroei door wind invloed kan hebben op de uiteindelijke modelresultaten.

3.2.2 Toepassingsbereik

In het BOI-basisinstrumentarium wordt gebruik gemaakt van de 1D surf-beat modus van XBeach. Het sterktemodel wordt hierin aangedreven door *loodrecht-invallende* golven, en is daarom niet geschikt voor het analyseren van duinafslag in gebieden met zeer schuine golfval of grote gradiënten in het langtransport zoals bij eilandkoppen. Voor deze gebieden zijn aanvullende analyses, eventueel op basis van de 2DH-modus van XBeach, nodig om tot een betrouwbare schatting te komen van de afslagprofielen en de hiermee samenhangende afslaghoeveelheden.

Het BOI-basisinstrumentarium is thans evenmin geschikt om hybride waterkeringen (e.g., dijk-in-duin) en dwarsprofielen met zogenaamde Niet-Waterkerende Objecten (NWO's) te beoordelen. Omdat het model bovendien speciaal is afgeleid voor de open kust met energetische condities, is de huidige versie van het model ook niet geschikt voor zandige waterkeringen langs meren en estuaria.

In de volgende paragrafen worden de standaard instellingen en gemaakte keuzes met betrekking tot enkele pre- en postprocessing stappen toegelicht.

3.2.3 *Beschikbaarheid via MorphAn*

De BOI-versie van XBeach (release BOI-phase3-5956) is ook beschikbaar binnen de MorphAn Duinveiligheidsmodule vanaf MorphAn versie 22.1.1. (Deltares, 2022a). Hierin zijn de §3.3 tot met §3.6 beschreven instellingen en de scripts horend bij de stappen (achter de schermen) geïmplementeerd.

3.3 **Parameterinstellingen voor het sterktemodel XBeach**

3.3.1 *Basisinstellingen*

Standaard BOI-parameterinstellingen voor toepassing van het sterktemodel XBeach voor beoordeling en ontwerp op de Nederlandse kust zijn in (Arcadis en Deltares, 2022) gekalibreerd op basis van laboratorium- en veldmetingen.

Een gedetailleerd overzicht van de gekalibreerde instellingen zoals bepaald in deze rapportage is weergegeven in Tabel A – 1 op pagina 55 in Bijlage A; zie ook (Deltares en Arcadis, 2022).

3.3.2 *Overige instellingen*

Overige relevante BOI-standaardinstellingen voor modelparameters zoals afgeleid in andere rapporten zijn opgenomen in eveneens in Bijlage A opgenomen Tabel A - 2. De achterliggende afleiding is beschreven in onder andere (Deltares, 2021a) en (Deltares, 2021c).

3.4 **Instellingen voor profielschematisatie**

3.4.1 *Inleiding*

Voor het bereiken van een nauwkeurige en consistente veiligheidsbeoordeling met de BOI-versie van XBeach is het essentieel dat het kustprofiel in het model aan bepaalde eisen voldoet. Zo zijn bijvoorbeeld eisen opgesteld voor een minimale waterdiepte aan de zeezijde van het kustprofiel voor toepassing in het XBeach model, en hoe een kustprofiel te schematiseren zodat het hieraan voldoet (Deltares, 2021b). Daarnaast zijn er voor een consistente beoordeling eisen met betrekking tot de resolutie en resolutieverloop van het rekengrid (Deltares, 2021c).

Hieronder zijn de belangrijkste instellingen kort samengevat. De bijbehorende scripts zijn, voorzien van een aanvullende toelichting, samengebracht in Bijlage B van dit document en specifiek beschikbaar voor de via MorphAn aangeboden XBeach-versie.

3.4.2 *Waterdiepte aan de zeezijde*

De theorie die momenteel wordt gebruikt om de gebonden lange-golf randvoorwaarde voor XBeach te bepalen is alleen geldig voor grote waterdiepten. Indien een modelrand in te ondiep water wordt opgelegd, zal de lange-golf energie worden overschat. Dit zal vervolgens resulteren in een overschatting van de lange-golfhoogte dicht bij de kustlijn, en daardoor in een overschatting van duinerosie volumes, en een overschatting van de kans op doorbraak.

Om deze overschatting van lange-golfhoogte te voorkomen is door Deltares een minimaal benodigde startdiepte afgeleid (Deltares, 2021b). Deze minimaal benodigde startdiepte kan worden berekend met het MatLab-script `'check_profile.m'` welke is opgenomen in Bijlage B.1 van deze rapportage.

3.4.3 *Kunstmatige profielverlenging*

In gevallen waarin de beschikbare kustdwarse profielgegevens niet tot de vereiste diepte reiken, wordt een tijdsefficiënte aanpak voorgesteld om aan de eisen van de randvoorwaarden te voldoen (Deltares, 2021b). Bij deze benadering wordt het profiel

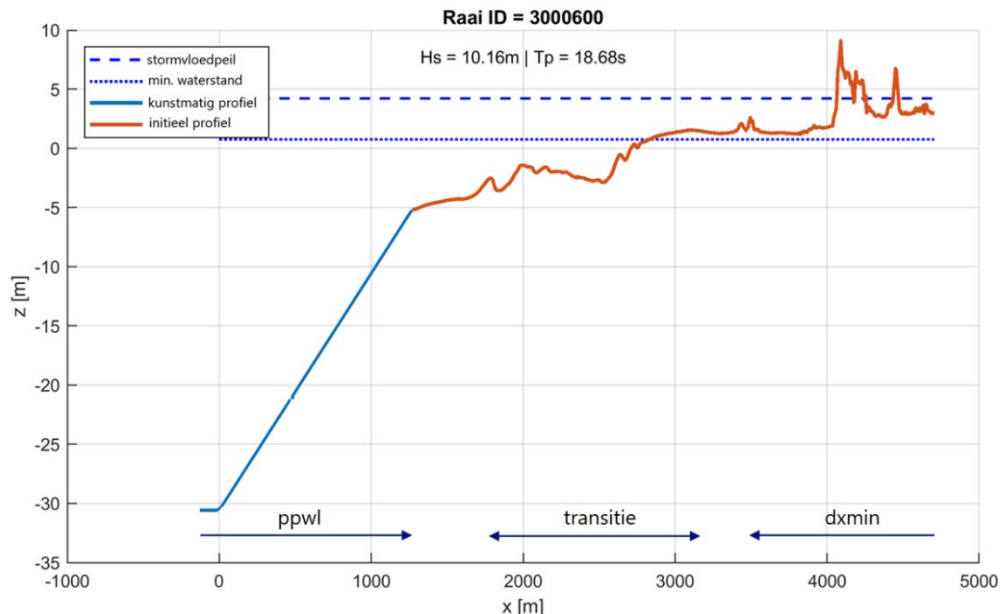
verlengd tot de (tijdens de piek van de storm) vereiste startwaterdiepte met een steil, kunstmatig profiel. De helling waarmee het profiel verlengd kan worden (1/10- of 1/50-helling) wordt eveneens bepaald door het MatLab-script `'check_profile.m'` en hangt onder andere af van de groepssnelheid van de golven (zie ook Bijlage B.2). Voor nadere onderbouwing wanneer welke helling wordt gehanteerd wordt verwezen naar (Deltares, 2021b).

3.4.4 Resolutie van het rekengrid

Om ervoor te zorgen dat kustprofielen op verschillende locaties op een consistente maar zo efficiënt mogelijke manier beoordeeld kunnen worden met XBeach, zijn er door Deltares richtlijnen opgesteld voor de gewenste resolutie van het rekengrid en het resolutieverloop (Deltares, 2021c).

Voor kustprofielen die voldoen aan de vereiste startdiepte, of reeds kunstmatig verlengd zijn tot de gewenste diepte, kan het rekengrid worden opgezet met het in Bijlage B.3 toegelichte MatLab-script `'xb_grid_xgrid2.m'`.

Nadat een rekengrid is gegenereerd worden er aan de zeewaartse rand nog een drietal cellen toegevoegd met dezelfde bodemhoogte als het meest zeewaartse punt. Een voorbeeld van een rekengrid dat kunstmatig is verlengd tot de minimaal vereiste diepte is weergegeven in Figuur 3-1. Hierin is eveneens weergegeven waar de minimaal benodigde gridgrootte `'dxmin'` en het minimaal aantal punten per golflengte `'ppwl'` met name hun uitwerkingen hebben op de gridresolutie.



Figuur 3-1 Voorbeeld van een rekengrid dat is verlengd tot de minimaal benodigde diepte voor Jarkus-profiel 3000600. De gridresolutie in kustdwars richting wordt bij de zeewaartse rand met name beïnvloed door het minimaal aantal punten per golflengte (`ppwl`), en nabij de kust door de minimaal benodigde gridgrootte (`dxmin`).

3.5 Genereren van hydraulische modelrandvoorwaarden

Naast het rekenprofiel zijn voor elke XBeach-duinafslagberekening ook tijdsvariërende hydraulische modelrandvoorwaarden nodig. Voor toepassing binnen het BOI-basisinstrumentarium worden die aan de hand van (semi-probabilistische) rekenwaarden op diepwater bepaald.

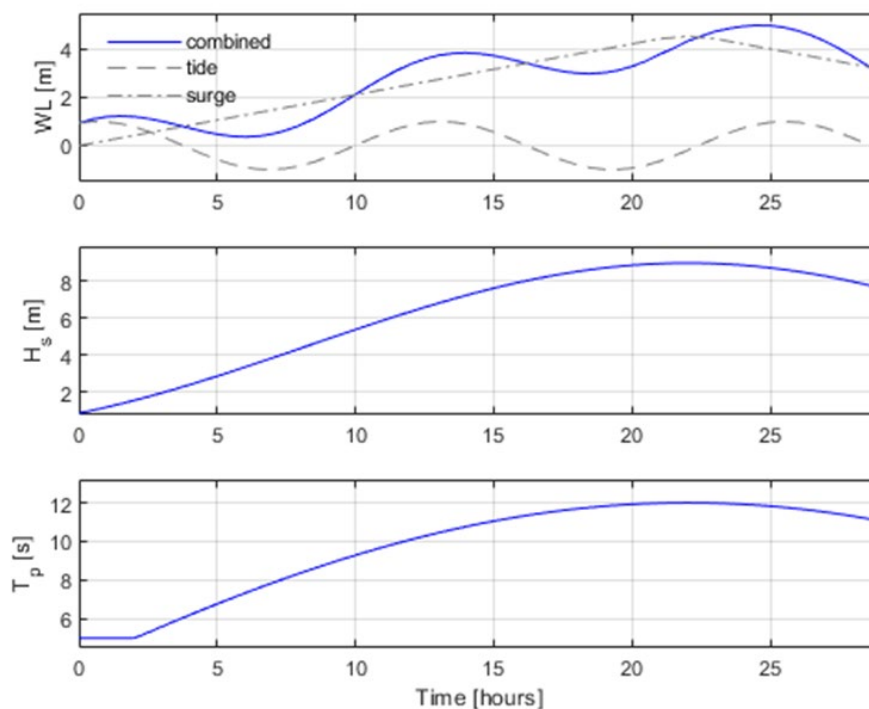
Deze rekenwaarden zijn locatieafhankelijk en kunnen kortweg worden geschematiseerd met:

- Waterstanden tijdens de stormpiek (stormvloedpeil) (m +NAP);
- Significante golfhoogte (H_s) tijdens de stormpiek (m);
- Piekperiode (T_p) tijdens de stormpiek (s);
- Gemiddelde getijdeamplitude (m).

Naast de bovenstaande locatieafhankelijke parameters zijn er nog een aantal parameters die het stormverloop karakteriseren (welke voor nu constant zijn gehouden, zie (Arcadis en Deltares, 2023b)):

- Tijdsverschil tussen de getijde-piek en aankomst van de stormvloed-piek (standaard 3,5 uur);
- Tijdsduur van de stormvloed (standaard 44 uur) en de daaraan gerelateerde duur van het verloop van de golfhoogtes (44 uur + 25% = 55 uur);
- Het tijdsverloop van de golfperiode is gekoppeld aan de golfhoogte uitgaande van een golfsteilheid zoals deze aanwezig is ten tijde van de maximale golfcondities;
- Vorm van het tijdsverloop van de stormvloed (standaardvorm is trapezium);
- Additionele constanten/factoren om rekening te houden met toekomstige scenario's voor waterstanden, golfhoogtes en golfperioden (standaard allemaal gelijk aan 0);
- Minimaal toegestane significante golfhoogte (0,5 m) en golfperiode (5 s).

Met behulp van het in Bijlage B.4 beschreven MatLab-script '*generate_timeseries_HR_morphan.m*' kunnen de rekenwaarden worden omgezet in een tijdsafhankelijk stormverloop voor waterstand en golven, welke gebruikt kunnen worden als hydraulische randvoorwaarden voor de XBeach berekening.



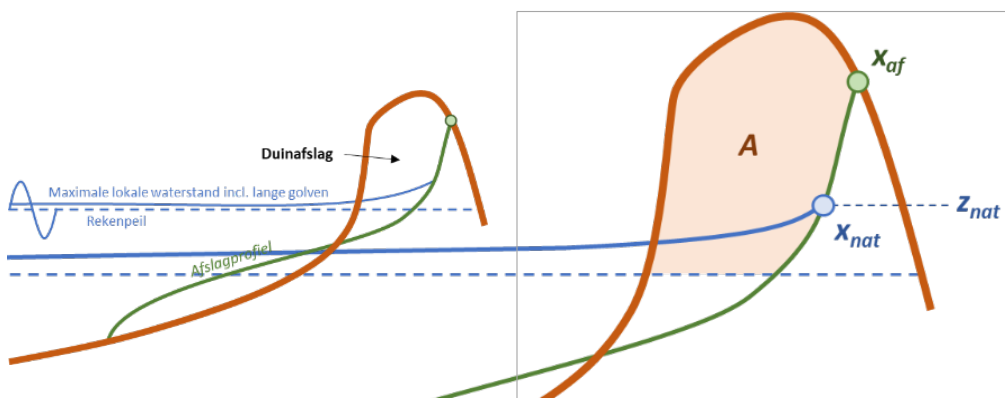
Figuur 3-2 Voorbeeld van een tijdsafhankelijk stormverloop voor de waterstanden (bovenste paneel), significante golfhoogtes (middelste paneel) en piek golfperiode (onderste paneel).

In Figuur 3-2 is een typisch stormverloop berekend op basis van het hiervoor genoemde script weergegeven.

In dit voorbeeld is gerekend met een maximale waterstand van NAP+5 m, een maximale significante golfhoogte van 9 m, een maximale piekperiode van 12 s en een getijdeamplitudo van 1 m. Voor de overige parameters zijn de standaardwaarden gebruikt. Het waterstandssignaal aan de zeewaartse kant bestaat uit een combinatie van een getij-sigitaal en een stormvloed signaal. Om de rekestijden zo kort mogelijk te houden worden de tijdseries voor waterstanden en golven afgekapt op het moment dat de waterstanden 2 meter onder de piek-waterstanden komen. Het nog verder doorrekenen van de storm leidt niet meer tot een toename van de hoeveelheid afslag boven het stormvloedpeil en is in deze zin ook niet nuttig.

3.6 Analyse van modelresultaten: duinafslagindicatoren

Duinafslag leidt tot landwaartse verplaatsing van het duinfront door hoofdzakelijk zeewaarts gericht transport van het duinsediment tijdens een storm (in het zogenaamde 'collision-regime'). De mate van duinafslag kan onder meer worden gekwantificeerd met een afslagvolume. Het afslagvolume is kortweg gedefinieerd als de integraal over het duinprofiel met een negatieve bodemverandering (dus geen compensatie voor depositie) boven stormvloedpeil (maximum van de opgelegde offshore waterstand uit het stormverloop). Het afslagvolume boven stormvloedpeil ('A') is schematisch weergegeven met het oranje gearceerde vlak in Figuur 3-3 en kan worden berekend met het in Bijlage B.5 opgenomen MatLab-script 'get_erosionvolume.m'.



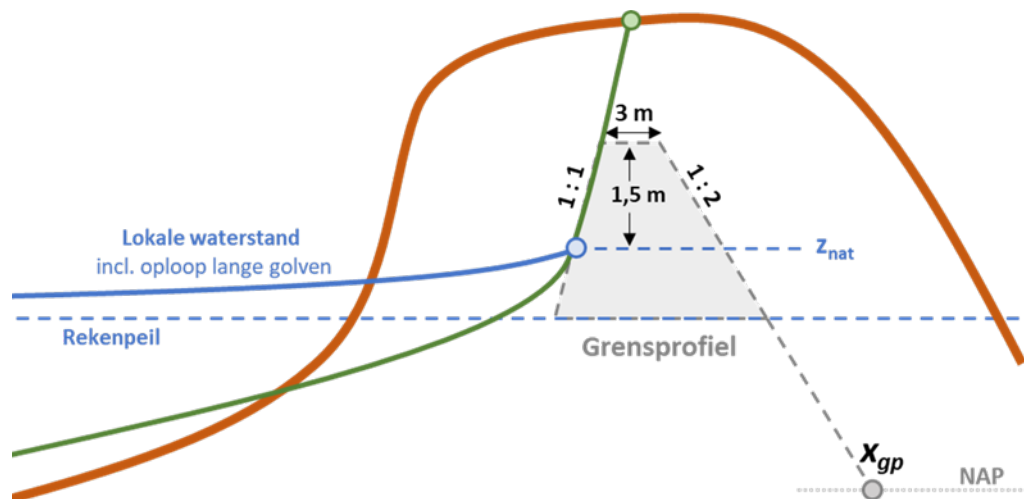
Figuur 3-3 Schematische weergave van de relevante kwantitatieve indicatoren in relatie tot het duinafslagproces. Bron: Rijkswaterstaat (2022).

Naast het afslagvolume zijn er nog een aantal andere kwantitatieve indicatoren van het afslagproces die kunnen worden gebruikt bij het uitvoeren van een faalkansanalyse:

- De positie van het afslagpunt (X_{af}), zie Figuur 3-3, en bijbehorend afslagniveau (Z_{af}).
- Het maatgevende oplooppniveau van de lange golven (Z_{nat}) en de bijbehorende positie daarvan (X_{nat}), zie Figuur 3-3. Feitelijk geeft deze informatie aan wat het meest landwaartse punt is in het duinprofiel waar de oploop van de lange golven heeft plaatsgevonden in de XBeach simulatie.
- Een indicatieve positie van de landzijde van het grensprofiel op het niveau NAP (X_{gp}) indien deze direct landwaarts van X_{nat} geplaatst wordt, zie Figuur 3-4.

Deze indicatoren kunnen worden uitgerekend met het MatLab-script '*xbBOI_safety-indicators.m*' zoals opgenomen in Bijlage B.6.

Naast de afslag is voor de beoordeling van de veiligheid van een zandige waterkering ook het zogenaamde grensprofiel van belang. In Figuur 3-4 zijn de basisdimensies van dit grensprofiel weergegeven.



Figuur 3-4 Schematische weergave van de vorm en de dimensies van het zogenaamde grensprofiel.

De dimensionering (inclusief onderbouwing van de gebruikte hoogte) verdere toelichting op het grensprofiel komt in het volgende hoofdstuk van deze rapportage aan de orde.

4 Definitie grensprofiel t.b.v. van niet-gemodelleerde vervolgprocessen

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk is de afleiding en het resultaat van de definitie van het grensprofiel uitgewerkt als pragmatische invulling van de niet met het duinafslagmodel XBeach gemodelleerde vervolgprocessen binnen het faalpad duinafslag. In §4.2 is daartoe in eerste instantie de 'oude' versie van het grensprofiel conform het WBI2017 beschreven. Vervolgens zijn in §4.3 aan de hand van een aantal voorbeelden de beperkingen van deze formulering toegelicht.

Als opstap naar de nieuwe BOI-definitie van het grensprofiel is in §4.4 de herdefinitie van het grensprofiel in het BOI-basisinstrumentarium besproken. In lijn met de uitwerking voor de oude grensprofieldefinitie is vervolgens in §4.5 en §4.6 respectievelijk de nieuwe basisgeometrie en een alternatieve geometrie (met andere breedte/hoogte-verhoudingen) van het grensprofiel gepresenteerd.

Het hoofdstuk sluit af met een samenvatting van het effect van de overstap van de WBI2017- naar de nieuwe BOI-grensprofieldefinitie in §4.7.

4.2 Definitie van het grensprofiel in het WBI2017-duinafslaginstrumentarium

4.2.1 Inleiding

De grensprofieldefinitie die werd gebruikt in combinatie met het sterktemodel Duros+ is in meer detail vastgelegd in het Technisch Rapport DuinAfslag (TRDA) uit 2006 (ENW, 2007) en maakt nog onderdeel uit van het WBI2017-instrumentarium. De TRDA2006-versie van het grensprofiel is overigens onveranderd gebleven ten opzichte van de oorspronkelijk in de Leidraad uit 1984 opgenomen definitie (TAW, 1984).

Het onderliggende idee van dit grensprofielconcept was dat met zowel het Duros+ als het oorspronkelijke Duros model weliswaar de positie van het maatgevende afslagfront kon worden berekend maar dat er geen zekerheid kon worden gegeven over de kans op doorbraak van het landwaarts van het afslagprofiel nog aanwezige duinprofiel.

Daarbij is de pragmatische afspraak gemaakt dat als daarachter nog een restduin met specifieke dimensies kon worden ingepast ervan mocht worden uitgegaan dat deze niet zou doorbreken.

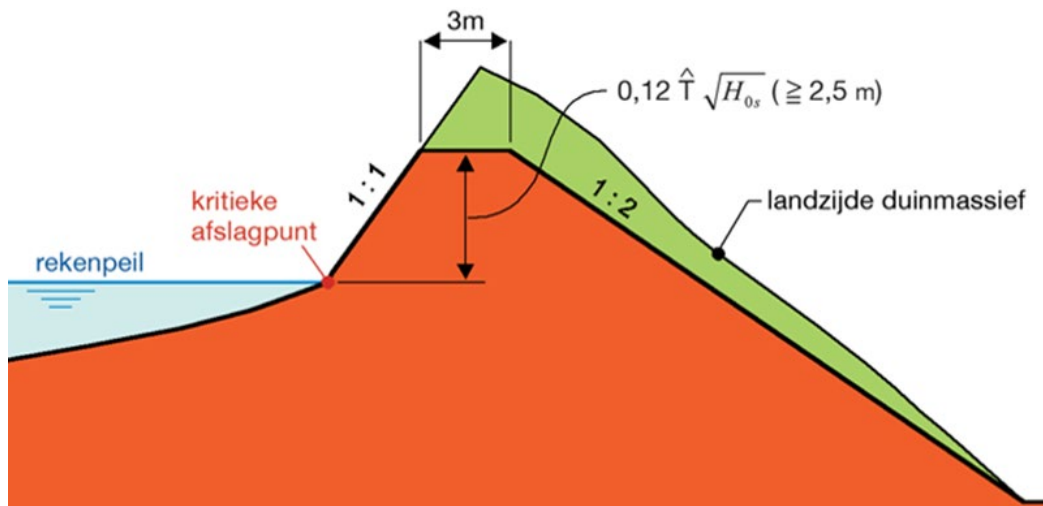
De dimensies van het dit zogenaamde grensprofiel zijn gebaseerd op de offshore (diepwater) hydraulische condities die zijn beschouwd voor de betreffende duinafslagberekening.

Naast een *basisgeometrie* is in dit kader ook de mogelijkheid geboden om een afwijkende vorm met *alternatieve dimensies* en een lagere, maar bredere kruin toe te passen. Deze aanpassing is doorgevoerd op basis van de resultaten van een in 1987 uitgevoerde bureaustudie (Waterloopkundig Laboratorium, 1987). Het resultaat is ook opgenomen in het eerder genoemde TRDA2006.

Beide dimensies zijn toegelicht in het volgende.

4.2.2 Basisgeometrie

De basisgeometrie van het oude grensprofiel is weergegeven in Figuur 4-1.



Figuur 4-1 Oude grensprofieldefinitie conform TRDA2006 (ENW, 2007), met in oranje het minimaal benodigde restprofiel (grensprofiel) en in groen het werkelijk aanwezige restprofiel na duinafslag.

Het grensprofiel in de TRDA uit 2006 heeft een trapeziumvorm met aan de zeezijde een taludhelling van 1 : 1, zijnde dezelfde helling als die van het met Duros+ berekende afslagfront. Het kruinniveau van het grensprofiel (Z_{gp} , in m ten opzichte van NAP) is een directe functie van de offshore golfcondities (rekenwaarden voor golfhoogte en golfperiode) en de rekenwaarde voor de waterstand, verder aangeduid als het rekenpeil (RP ; in m ten opzichte van NAP). De golfcondities bepalen de hoogte van het grensprofiel boven het niveau van het rekenpeil (h_{gp} in m), waarbij een (minimale) kruinhoogte van 2,5 meter boven het rekenpeil moet worden aangehouden. Het kruinniveau van het oude grensprofiel komt daarmee uit op:

$$Z_{gp} = RP + h_{gp}$$

De breedte van de kruin van het grensprofiel betreft 3 meter en aan de landzijde is een talud van 1 : 2 aanwezig.

Zoals ook aangegeven in het figuur, volgt de hoogte van het grensprofiel boven het rekenpeil uit de volgende formule:

$$h_{gp} = 0,12 T_p \sqrt{H_s}$$

Hierbij geldt als minimale waarde een hoogte van 2,5 m.

In Tabel 4-1 zijn de belangrijkste geometrische parameters van het WBI2017-grensprofiel nog eens samengevat.

Tabel 4-1 Overzicht van de belangrijkste geometrische parameters die het vigerende grensprofiel (WBI2017) beschrijven.

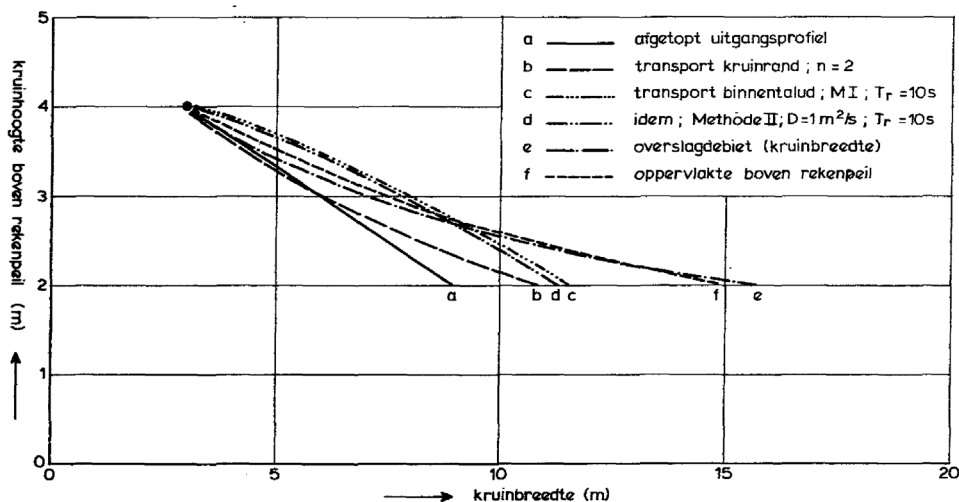
Geometrische parameter	Waarde in WBI2017
Profielvorm	Trapezium
Taludhelling zeezijde [m/m]	1 : 1
Kruinhoogte [m]	$h_{gp} = \max(0,12 \cdot T_p \cdot \sqrt{H_s}; 2,5 \text{ m})$
Kruinbreedte [m]	3 m
Taludhelling landzijde [m/m]	1 : 2

4.2.3 Alternatieve dimensies (lager maar breder grensprofiel)

De TRDA uit 2006 geeft ook de ruimte om een alternatieve vorm van het grensprofiel te beschouwen als het grensprofiel met de hierboven beschreven geometrie niet inpasbaar is. Dit kan bijvoorbeeld bij een laag maar breed duin het geval zijn. Hierbij geldt dat de profielvorm volgens de basisdefinitie mag worden losgelaten, mits hetzelfde grensprofielvolume boven rekenpeil kan worden ingepast. Eis hierbij is wel dat het grensprofiel overal minimaal 1 m boven rekenpeil is gelegen.

Voor meer details over het oude grensprofiel wordt verwezen naar de TRDA uit 2006 (ENW, 2007) of de onderliggende uitwerking (Waterloopkundig Laboratorium, 1987). In deze laatste studie is de breedte-hoogteverhouding voor lage grensprofielen onderzocht en op basis daarvan is deze volumetrische inpassing van het grensprofiel onderbouwd.

Deze studie resulteerde voor een reeks van uitgangspunten in een verband tussen de kruinhoogte boven rekenpeil en de benodigde kruinbreedte zoals weergegeven in Figuur 4-2. In dit geval valt het referentiepunt samen met een kruinhoogte van 4 m boven het rekenpeil en een (basis) breedte van 3 m.



Figuur 4-2 Overzicht kruinhoogte-kruinbreedte relaties uit 1987-studie op basis waarvan uiteindelijk is gekozen voor het volumetrisch inpassen van het alternatieve grensprofiel conform verband 'f' in het TRDA uit 2006 (Waterloopkundig Laboratorium, 1987).

Op basis van deze uitwerking is gekozen voor het zogenaamd volumetrisch inpassen van het boven het rekenpeil aanwezige volume. Voor een 1 m lager kruinniveau leidde deze uitwerking tot toename van de kruinbreedte van afgerond 5 m waardoor voor deze hoogte een breedte van 8 m (zie Figuur 4-2) als voldoende werd beschouwd.

4.3 Beperkingen grensprofiel in het WBI2017-duinafslaginstrumentarium

4.3.1 Inleiding

De grensprofieldefinitie uit de TRDA uit 2006 is gericht op het beoordelen of een bepaald dwarsprofiel al dan niet voldoet aan de bij de norm behorende maatgevende condities.

Deze definitie heeft in de praktijk een aantal beperkingen die kunnen resulteren in (onnodig) conservatieve inschattingen van de minimaal benodigde omvang van het na duinafslag resterende duinprofiel. Dit komt met name omdat de dimensies van het grensprofiel in deze definitie, in aansluiting op de kenmerken van het Duros+ model, een functie zijn van de *offshore* stormcondities (waterstand en golfkarakteristieken). Daarbij is een impliciete aanname gedaan over de vorm van het aanwezige kustprofiel. De rekenkundige formulering is immers specifiek afgeleid voor geleidelijk oplopende profielen die typisch voorkomen langs de Hollandse Kust.

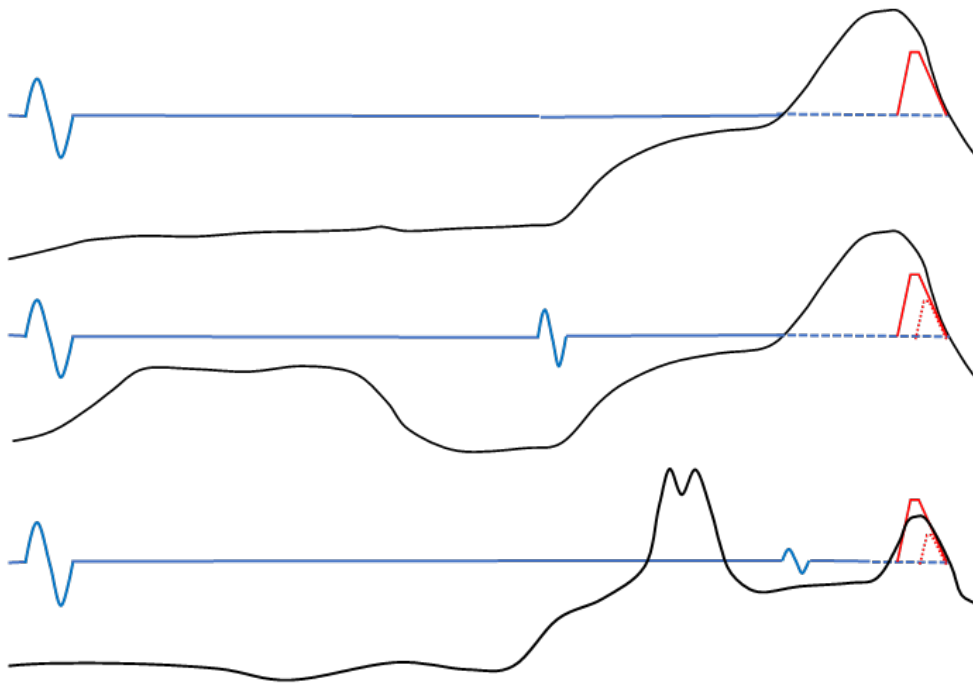
Deze formulering is daardoor minder goed toepasbaar voor profielen met een daarvan sterk afwijkende vorm zoals aanwezig zijn langs de Delta- en Waddenkust. De profielvorm beïnvloedt namelijk de lokale waterstanden of golfcondities ter plaatse van het duin, en daarmee de minimaal benodigde sterkte van het duinprofiel en dus ook de omvang van het benodigde grensprofiel.

4.3.2 *Nadere beschouwing aan de hand van enkele voorbeeldsituaties*

In Figuur 4-3 zijn enkele voorbeeldsituaties getoond met verschillende relaties tussen de (offshore) hydraulische belasting en de benodigde omvang van het grensprofiel. De bovenste doorsnede betreft de basissituatie met een geleidelijk oplopend kustprofiel, waarbij de met de doorgetrokken lijn weergegeven grensprofielomvang is gekoppeld aan de offshore (golf)condities, dit als karakteristieke weergave van de dwarsprofielen langs de Hollandse kust.

De middelste doorsnede betreft een afwijkende situatie met een voorliggende ondiepte (bijvoorbeeld een buitendelta) en diepe geul zoals onder meer aanwezig langs de Deltakust.

De onderste doorsnede toont een situatie met meerdere duinenrijen, waarbij de eerste duinenrij doorbreekt tijdens extreme stormcondities en de waterkering de sterkte mede ontleend aan de tweede duinregel.



Figuur 4-3 Enkele voorbeeldsituaties met verschillende relaties tussen offshore (golf)condities en de benodigde grensprofielomvang (doorgetrokken lijn voor de offshore condities en gestippelde lijnen voor de lokale condities). Boven: basissituatie met geleidelijk oplopend kustprofiel. Midden: situatie met voorliggende ondiepten. Onder: situatie met doorbrekende 1^e duinenrij en één of meerdere achterliggende duinenrijen.

De bovenste doorsnede in Figuur 4-3 illustreert een situatie die gelijk is aan degene waarvoor de (oude) grensprofieldefinitie is afgeleid: een geleidelijk oplopend kustprofiel met een enkele duinenrij. Onder deze aanname kan de omvang van het grensprofiel één-op-één gekoppeld worden aan de offshore (golf)condities. Diezelfde relatie geldt echter niet voor de onderste twee doorsneden in Figuur 4-3. Dit zijn voorbeelden van situaties waarbij de offshore condities niet met dezelfde relatie te koppelen zijn aan de benodigde grensprofielomvang; omdat de impliciete onderliggende aanname voor de Hollandse profielvorm hier niet van toepassing is.

De middelste doorsnede wordt gekarakteriseerd door een voorliggende ondiepte, waardoor de lokale (golf)belasting bij het duin zeer waarschijnlijk kleiner is dan in een situatie zonder ondiepte. De met de stippellijn aangegeven benodigde omvang van het grensprofiel is in dat geval dus ook kleiner. Bij het gebruik van de oude grensprofieldefinitie (op basis van offshore condities) zou in dit geval geen rekening worden gehouden met de aanwezigheid van de ondiepte, waardoor wellicht een onnodig conservatief uitgangspunt voor de dimensies van het grensprofiel wordt beschouwd.

De onderste doorsnede betreft een situatie waarbij meerdere duinregels aanwezig zijn en waarbij tijdens extreme stormcondities een doorbraak optreedt van de eerste duinenrij. In dat geval is er sprake van belasting in het binnengebied, maar de resterende golfbelasting is lager dan ter plaatse van de oorspronkelijke voorliggende duinenrij. Ook in dit geval is het realistischer om de, met de stippellijn aangegeven, grensprofiel-omvang te relateren aan de lokale (golf)belasting behorende bij het meest landwaarts aangevallen duin in plaats van aan de offshore condities.

In relatie tot het laatste voorbeeld wordt wel opgemerkt dat bij een situatie met een duindoornbraak altijd goed moet worden afgewogen of een (1D) raai benadering voldoende toepasbaar is, onder andere vanwege de kans op achterloopsheid of andere complicerende ruimtelijke (2DH) processen.

4.4 Herdefinitie grensprofiel in het BOI-basisinstrumentarium

4.4.1 Inleiding

In de nieuwe formulering van het grensprofiel zijn twee verschillende onderdelen van belang, namelijk (1) de aansluiting op de nieuwe BOI-methodiek inclusief de faalpadbenadering waarbij de berekeningen zijn bedoeld om tot een betrouwbare schatting te komen van de kans op doorbraak van de waterkering en (2) het gebruik van de lokaal voor het duin aanwezige hydraulische condities.

Deze laatste condities zijn zowel van belang voor een verbeterde kwantificering van de hoogte van het grensprofiel als het in rekening brengen van de niet gemodelleerde processen welke kunnen leiden tot de doorbraak van de waterkering in het geval dat er na duinafslag slechts een restprofiel van beperkte omvang resteert.

Op basis van de beschouwing van de toepasbaarheid en de beperkingen van de oude grensprofieldefinitie – met bijbehorende voorbeelden – en ervaringen uit de beoordelingspraktijk, is geconcludeerd dat er behoefte is aan een grensprofieldefinitie waarbij meer expliciet rekening wordt gehouden met de profielvorm en de bij de teen van het duin optredende hydraulische condities, dit in plaats van hiervoor de offshore golfcondities te gebruiken.

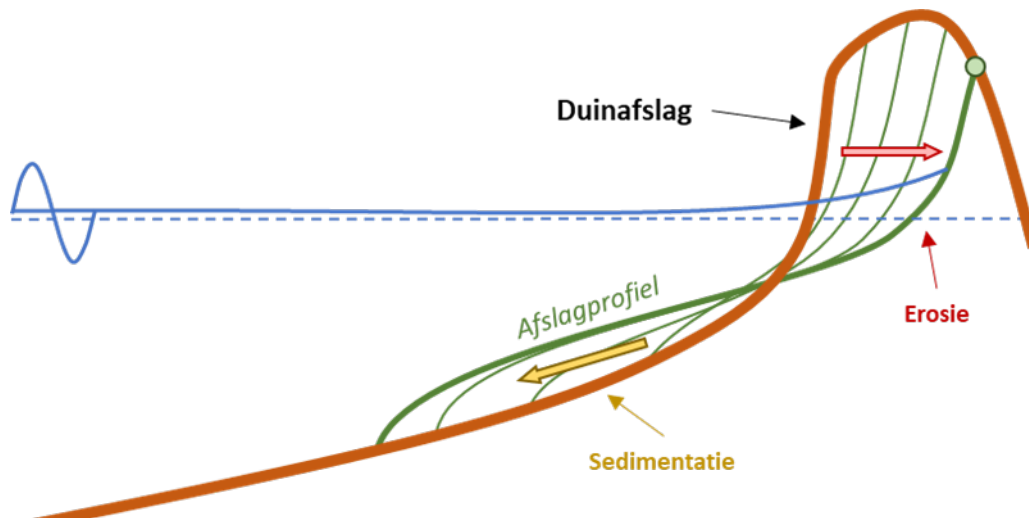
Doordat in het nieuwe instrumentarium voor duinen de overstap gemaakt wordt van het empirische sterktemodel Duros+ naar het proces-gebaseerde sterktemodel XBeach (zie Hoofdstuk 3 voor meer details) wordt het, naast het verkrijgen van verbeterde inschattingen van de hoeveelheid duinafslag voor een breder toepassingsbereik, ook mogelijk om de lokale optredende condities ter plaatse van het duin expliciet uit te rekenen. Hiermee wordt ook automatisch rekening gehouden met de lokale profielvorm en de verandering daarvan tijdens stormcondities.

Deze wens heeft ook geleid tot een specifieke formulering van het semi-probabilistische model waarin de resultaten van de XBeach-berekening direct bruikbaar zijn voor deze analyse (Arcadis en Deltares, 2023b). In deze formulering maakt de modelonzekerheid van het XBeach model geen zichtbaar onderdeel meer uit van de semi-probabilistische rekenregel maar is deze 'verwerkt' in het voor de berekening te hanteren rekenpeil voor de waterstand. De positie van het maatgevende afslagfront volgt daarbij dus direct uit de XBeach berekening. De wijze waarop dit gebeurt is in meer detail uitgewerkt in §4.5 en meer specifiek in §4.5.3.

4.4.2 Toelichting op initieel mechanisme en vervolgmecanisme

Het initieel mechanisme duinafslag leidt tot landwaartse verplaatsing van het duinfront door hoofdzakelijk zeewaarts gericht transport van het duinsediment tijdens een storm (in het zogenaamde 'collision-regime'). Tijdens een storm wordt het duin belast door een combinatie van hoge waterstanden – door (spring)tij of opzet door wind en golven – en korte en lange golven die op een relatief hoog niveau tegen het onbeschermd en veelal steile duinfront slaan. Het duinfront wordt hierdoor aan de onderkant ondergraven. Zodra een instabiele situatie optreedt, stort een deel van het duinfront in. Dit zand wordt zeewaarts afgevoerd door golfaanval en door de golf-

genereerde retourstroom (onderstroom en mui-stromen), totdat er opnieuw aantasting van het duinprofiel optreedt en het proces zich herhaalt, zie Figuur 4-4.



Figuur 4-4 Schematische weergave van het duinafslagproces. De dunne groene lijnen met rode en gele pijl tonen de ontwikkeling van het profiel over tijd.

Als dit duinafslagproces zich te ver doorzet, dan ontstaat er een situatie waarin uiteindelijk de zandige waterkering doorbreekt en het achterland kan overstromen, dit laatste natuurlijk ook weer afhankelijk van de karakteristieken van dit achterland. Het doorbreken van de zandige waterkering is in dit geval dus het directe gevolg van het duinafslagproces zelf (duinafslag totdat er geen duinprofiel meer aanwezig is), maar ook van eventuele vervolprocessen rondom het (tijdens of na afslag) nog aanwezige duinprofiel als slechts nog een beperkt deel van het duin resteert.

De sterkte van een zandige waterkering tijdens en na het optreden van duinafslag wordt volledig ontleend aan de stabiliteit van het resterende (zandige) duinprofiel. Na duinafslag zijn er nog andere processen die in dit geval de sterkte van de waterkering nadelig kunnen beïnvloeden.

Een voorbeeld van een mogelijk vervolproces dat kan leiden tot een doorbraak van het restprofiel is (geotechnische) instabiliteit in relatie tot grondwaterstandsvariaties en uittredend grondwater. Ook kan deze laatste duinregel worden 'overstroomd' door lange golven of door de oploop en overslag van de tegen het duinfront oplopende korte golven. Deze leiden tot erosie van de kruin of het binnentalud van dit restduin dat vervolgens volledig erodeert en de doorbraak van de zandige waterkering inleidt.

4.4.3 Gebruik grensprofiel niet verplicht

Het verderop nieuw gedefinieerde, en in MorphAn ondersteunde, grensprofielmodel kan feitelijk worden gezien als een pragmatische methode om aan te tonen dat de (niet door XBeach gemodelleerde) vervolprocessen leiden tot verwaarloosbare kans op doorbraak van de waterkering. Wanneer het nieuwe grensprofiel landwaarts van het met XBeach berekende afslagfront in het nog resterende duin kan worden ingepast, dan weet de gebruiker dat de kans op een doorbraak van de waterkering verwaarloosbaar klein is.

Het niet inpasbaar zijn van het grensprofiel kan daarbij worden gezien als een aanbeveling om de relevante vervolprocessen nader te onderzoeken. Dit laatste is natuurlijk niet nodig als er al duidelijk sprake is van een doorgebroken waterkering.

De gebruiker is dus niet verplicht om voor het meenemen van de vervolgprocessen de definitie van het grensprofiel te gebruiken. Als de gebruiker op een andere manier kan of wil aantonen dat de kans op doorbraak van het na duinafslag resterende duinprofiel verwaarloosbaar klein is, is dat ook toegestaan.

Hiertoe kan gebruik worden gemaakt van andere modellen waarin de overslag en de daarmee verband houdende morfologische effecten in beeld worden gebracht.

Op termijn valt hierbij te denken aan de niet-hydrostatische versie van het XBeach-model op het moment dat daarbij ook de morfologische module voldoende is gekalibreerd. Ook een goed beargumenteerd beheerdersoordeel behoort natuurlijk tot de mogelijkheden (Arcadis en Deltares, 2023c).

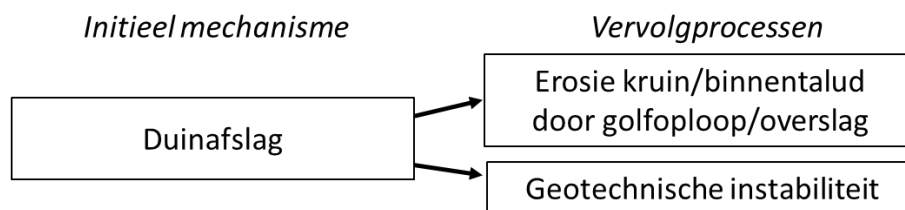
4.4.4 *Aansluiting op de faalpadbenadering voor het faalpad duinafslag*

In het BOI wordt de overstromingskans op trajectniveau bepaald en beoordeeld aan de hand van zogenaamde faalpaden, zoals nader zijn beschreven in de 'Handleiding Overstromingskansanalyse' (Rijkswaterstaat, 2022). Een faalpad betreft hierin de volledige keten van gebeurtenissen van het initieel faalmechanisme tot en met de daaropvolgende gebeurtenissen die uiteindelijk leiden tot overstroming van het achterland. De naamgeving van de faalpaden is in de meeste gevallen gekoppeld aan de naam van het initieel faalmechanisme, in dit geval duinafslag.

Voor zandige waterkeringen is het faalmechanisme duinafslag relevant. Het faalpad duinafslag omvat daarbij zowel het initieel mechanisme duinafslag (zie §1.1) als de vervolgmechanismen (zie §1.1) die uiteindelijk leiden tot het falen en doorbreken van de zandige waterkering en overstroming van het achterland.

De positie van deze vervolgprocessen binnen het faalpad is schematisch weergegeven in Figuur 4-5.

Faalpad duinafslag

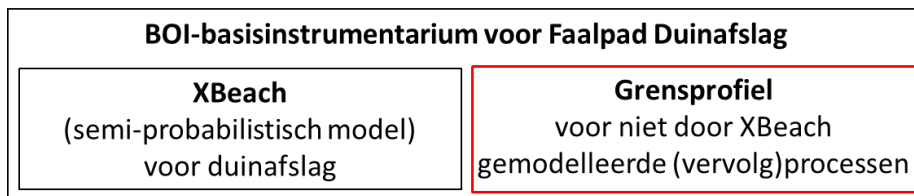


Figuur 4-5 *Schematische weergave faalpad duinafslag met initieel mechanisme duinafslag en vervolgprocessen gerelateerd aan golfoverslag en geotechnische instabiliteit.*

Door een grensprofiel te definiëren op basis van vlak voor het duinfront aanwezige lokale condities wordt ook de mogelijkheid verkregen om een grensprofiel te definiëren dat qua geometrie recht doet aan de invulling van de vervolgprocessen binnen het faalpad duinafslag.

Voor een verbeterde uitwerking van dit faalpad is inzicht nodig in de processen die (kunnen) leiden tot deze vervolgmechanismen en daarmee ook op een schatting van de kans dat een zandige waterkering als gevolg van het optreden van deze vervolgprocessen faalt en tot overstroming van het achterland leidt. Voor het bepalen van een realistische faalkansschatting dient immers het volledige faalpad bestaande uit het initieel mechanisme (duinafslag) én vervolgmechanismen beschouwd te worden. Ook daarvoor is inzicht in de lokaal voor het duin aanwezige condities van belang.

De BOI-versie van XBeach is niet in staat om *alle* (mogelijk) relevante vervolgprocessen te simuleren die kunnen resulteren in het falen van een zandige waterkering. Het grensprofiel *kan* in het nieuwe instrumentarium daarom worden beschouwd als een pragmatische methode om de benodigde sterkte na duinafslag voor niet-gemodelleerde vervolgprocessen te kwantificeren (zie Figuur 4-6).



Figuur 4-6 Grensprofielmodel als niet gemodelleerd deel van het BOI-model.

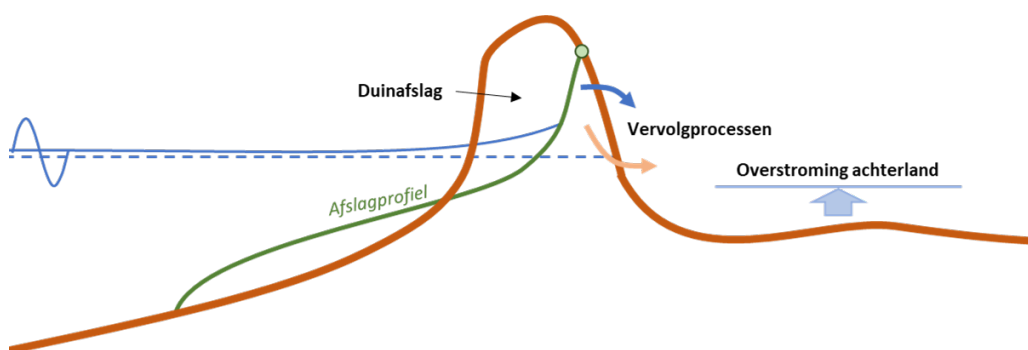
Deze methode kan dus worden gebruikt, maar is zoals eerder aangegeven geen verplichting. De gebruiker kan ook op een andere manier proberen aan te tonen dat de kans op falen van het na duinafslag resterende duin verwaarloosbaar klein is; zie §4.4.3 en de handleiding (Arcadis en Deltares, 2023c).

Nadere toelichting: geen conservatisme

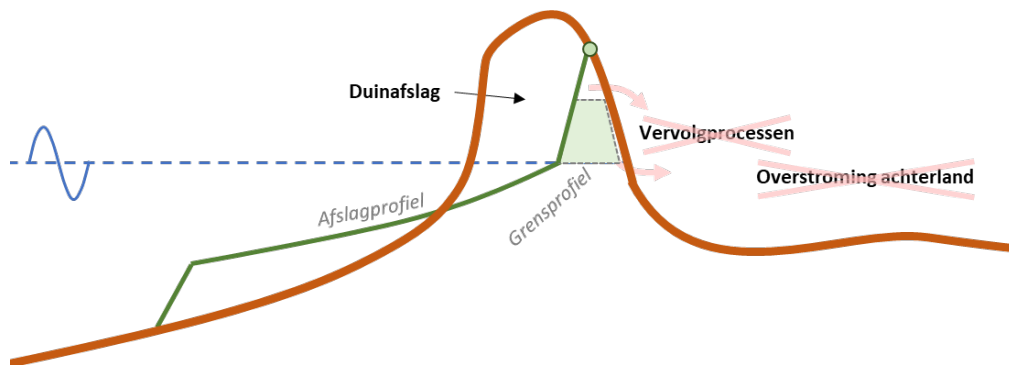
Het nieuwe grensprofielconcept is nadrukkelijk geen ingebouwd conservatisme in de beoordelingssystematiek en is ook niet bedoeld om onzekerheden te ondervangen in relatie tot het duinafslagproces.

Het grensprofiel is een manier om niet-gemodelleerde processen vereenvoudigd mee te nemen, om aan te kunnen tonen dat de kans op het optreden van ongewenste vervolgprocessen en dus de kans op de doorbraak van de zandige waterkering verwaarloosbaar klein is. Anders gezegd: Wanneer het nieuwe grensprofiel na landwaarts van het met XBeach berekende afslagfront kan worden ingepast, dan weet de gebruiker dat de kans op een doorbraak van de waterkering verwaarloosbaar klein is.

Het grensprofiel is dus *niet* het gedeelte van het duin dat afslaat tijdens de storm (afslagprofiel). Het achterliggende idee is dat elke vorm van aantasting van het grensprofiel onomkeerbaar leidt tot vervolgprocessen die resulteren in een volledige duindoorkraak en overstrooming van het achterland. Daarbij genoemde voorbeelden van vervolgprocessen die leiden tot een doorbraak zijn erosie van de kruin en binnentalud door golfoverslag en (geotechnische) instabiliteit door uittredend grondwater. De functie van het grensprofiel is dus om te voorkomen dat deze vervolgprocessen na het initieel mechanisme duinafslag optreden en dus de kans op doorbraak groot is, zie Figuur 4-7 en Figuur 4-8.



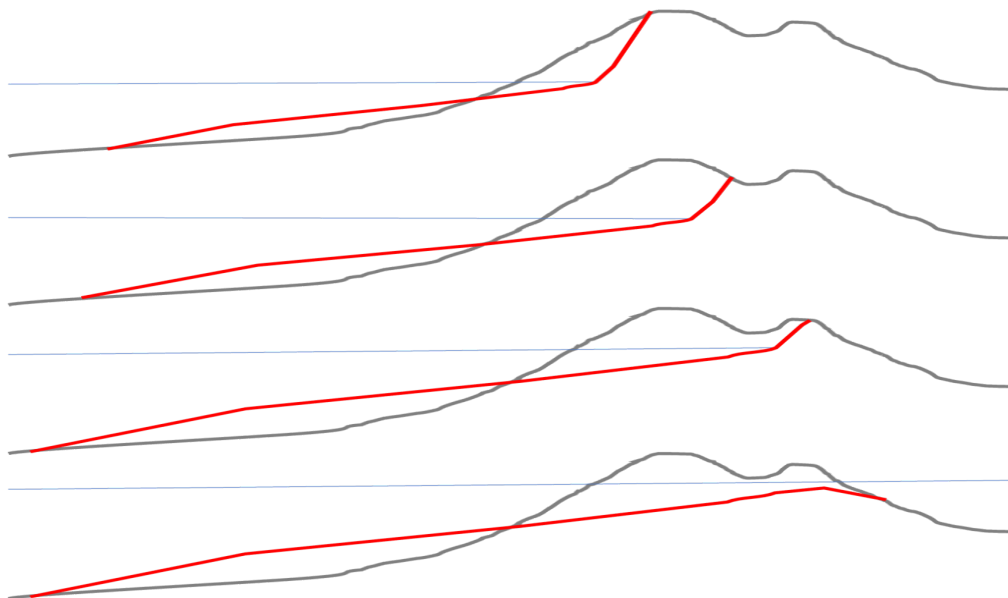
Figuur 4-7 Voorbeeld van de mechanismen binnen het faalpad duinafslag: het initiële mechanisme duinafslag en de mogelijke vervolgprocessen ná optreden van het gemodelleerde duinafslagproces, zoals instabiliteit, erosie, overslag, etc.



Figuur 4-8 Voorbeeld van de rol van het grensprofiel in een zandige waterkering: het grensprofiel is het minimaal benodigde restprofiel ná duinafslag om te voorkomen dat vervolgprocessen kunnen resulteren in een doorbraak van de waterkering en overstroming van het achterland.

Nadere toelichting: Van belang in specifieke situatie

Het gebruik van het grensprofielconcept is feitelijk pas 'nuttig' op het moment dat er na duinafslag, of feitelijk landwaarts van de door XBeach berekende positie van het afslagfront, nog slechts sprake is van een duinprofiel met een beperkte omvang. Deze hoeveelheid restduin hangt in werkelijkheid natuurlijk direct samen met zowel het initieel aanwezige duinprofiel. Een reeks van mogelijke uitkomsten van een duinafslagberekening is weergegeven in Figuur 4-9.



Figuur 4-9 Schematische weergave van mogelijke uitkomsten van de afslagberekening bij oplopende zwaarte van de hydraulische belasting met respectievelijk een situatie met slechts beperkte afslag, significante maar nog niet kritische afslag, een situatie met een bijna doorgebroken duin en een daadwerkelijk doorgebroken duinprofiel.

In Figuur 4-9 is schematisch het effect gegeven van een oplopende zwaarte van de hydraulische belasting (met oplopend stormvloedpeil) op de mate van duinafslag en positie van het duinfront. In de bovenste twee figuren is de uiteindelijke afslag nog beperkt van omvang en resteert er landwaarts van het berekende afslagprofiel nog

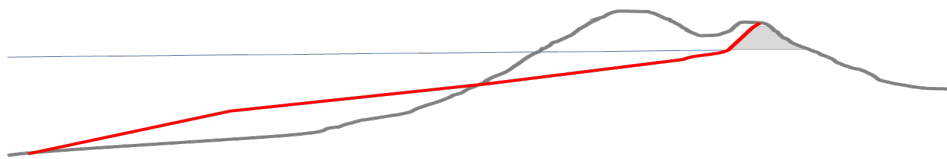
een voldoende breed duin. De kans op doorbraak is in beide situaties verwaarloosbaar klein en de bijdrage van de vervolgprocessen ondergeschikt.

Ook in de onderste situatie, waarbij het resultaat van XBeach al een doorgebroken duin laat zien, is het resultaat duidelijk. Ook hier spelen de vervolgprocessen een ondergeschikte rol.

Het grensprofielconcept is met name relevant voor de derde situatie waarbij er landwaarts van het berekende afslagfront nog slechts een beperkte hoeveelheid duin aanwezig is. In dit geval zijn de eventuele effecten van de vervolgprocessen wel belangrijk.

In dit specifieke geval is het al dan niet inpasbaar zijn van het grensprofiel relevant. Past het grensprofiel er net in, dan is er per definitie sprake van een situatie waarbij de kans op doorbraak van de waterkering als gevolg van de niet gemodelleerde vervolgprocessen per definitie nog verwaarloosbaar klein is.

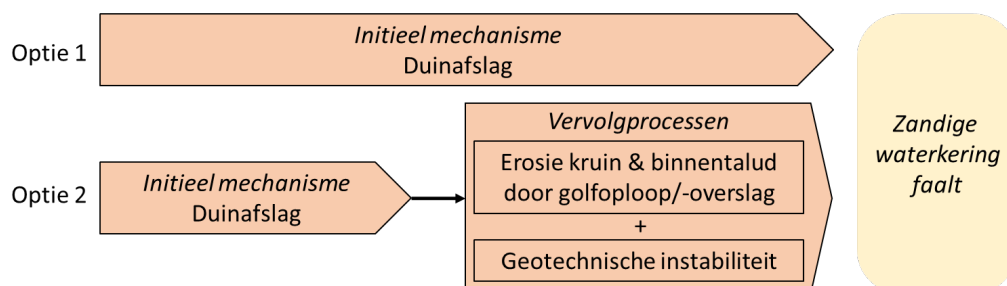
Deze situatie is voor de betreffende belasting weergegeven in Figuur 4-10.



Figuur 4-10 Schematische weergave van een situatie waarbij het grensprofiel nog net landwaarts van het met XBeach berekende afslagfront kan worden ingepast en waarvoor de kans op doorbraak dan per definitie verwaarloosbaar klein is.

Feitelijk leidt deze uitwerking tot de conclusie dat afhankelijk van de combinatie van hydraulische belasting en omvang van het duin er sprake is van twee mogelijke opties zijn, namelijk (1) een waarbij alleen het beschouwen van het duinafslagproces als initieel mechanisme afdoende is en de vervolgprocessen een ondergeschikte rol spelen en (2) een waarbij zowel het initieel mechanisme als de vervolgprocessen van belang zijn.

Deze opties zijn schematisch weergegeven in Figuur 4-11.

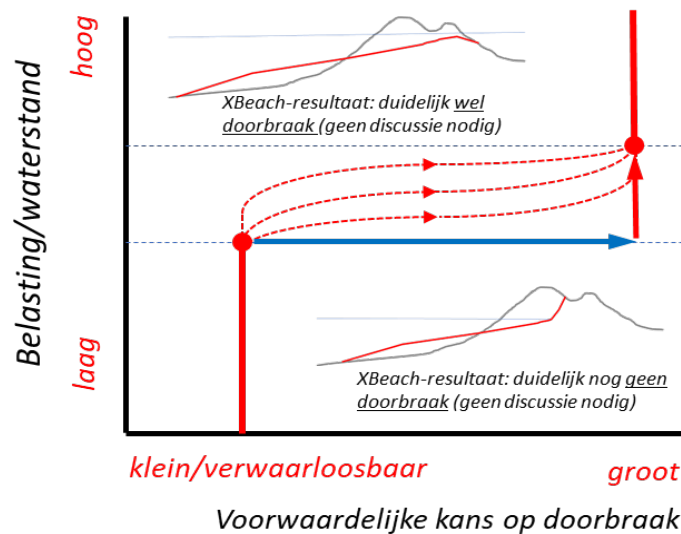


Figuur 4-11 Schematisch overzicht faalpad duinafslag met, afhankelijk van het belang van de vervolgprocessen, twee mogelijke opties die kunnen leiden tot het falen van een duinwaterkering.

Het grensprofielconcept speelt dan alleen een rol in de situatie waarbij de vervolgprocessen tot een mogelijke doorbraak van het resterende duin kunnen leiden. Dit principe is schematisch gepresenteerd in Figuur 4-12.

Voor de situatie met een lage belasting is de voorwaardelijke kans op doorbraak verwaarloos klein (onderste deel van de grafiek). Voor een hele zware belasting is deze per definitie groot tot zeker (bovenste gedeelte van de grafiek). Boven een bepaald niveau van de belasting kunnen vervolgprocessen leiden tot een doorbraak van de waterkering. Het daadwerkelijke verloop van de voorwaardelijke kans als functie van de belasting (in Figuur 4-12 aangegeven met de rode stippellijnen) is echter onbekend. Het feitelijk binair werkende grensprofielconcept geeft hier de met de blauwe pijl aangegeven invulling aan waarbij met name de positie van het startpunt van deze pijl van belang is.

Het inpasbaar zijn van het grensprofiel heeft in de gehanteerde definitie immers betrekking op de situatie waarbij de kans op doorbraak van het landwaarts van het berekende afslagfront gelegen duinprofiel verwaarloosbaar klein is. Het niet inpasbaar zijn maakt dat dit niet het geval is.



Figuur 4-12 Schematische weergave relatie tussen belasting (op de verticale as) en de voorwaardelijke kans op doorbraak (op de horizontale as) waarbij het grensprofielconcept is gepresenteerd als de blauwe pijl en de niet goed te kwantificeren vervolgprocessen de gestippelde rode lijn volgen.

4.5 Basisgeometrie van het grensprofiel

4.5.1 Inleiding

De hernieuwde grensprofieldefinitie betreft een onderbouwde definitie van het minimaal benodigde restprofiel dat landwaarts van de door XBeach berekende positie van het afslagfront moet worden ingepast om er zeker van te zijn dat de kans op doorbraak van het nog landwaarts van het afslagfront gelegen duinprofiel verwaarloosbaar klein is. De hoogte van het (nieuwe) grensprofiel is gebaseerd op de lokaal nabij het duinfront optredende hydraulisch condities. Met deze nieuwe definitie kan meer expliciet rekening worden gehouden met invloed van de voorliggende profielvorm op de (resterende) belasting net zeewaarts van het in te passen grensprofiel (zie ook §4.3.2).

In het volgende is de basisgeometrie gekwantificeerd, namelijk de standaard vorm, afmetingen en hellingen van het grensprofiel in relatie tot de relevante vervolgmechanismen. Hiertoe zijn in §4.5.2 eerst de specifiek voor deze uitwerking gehanteerde uitgangspunten op een rij gezet en is vervolgens de gevolgde methodiek een stap verder uitgewerkt in §4.5.3.

In deze definitie spelen het maatgevende oplooppniveau van de lange golven in de vorm van de positie van het zogenaamde 'natte punt' en de minimaal benodigde kruinhoogte boven dit niveau een belangrijke rol. Deze onderdelen zijn in meer detail toegelicht in respectievelijk §4.5.4 en §4.5.5.

De uiteindelijke conclusies zijn samengebracht in §4.5.6 waarna in §4.5.7 de resultaten van een aanvullende controle op de geotechnische stabiliteit zijn opgenomen.

In de daaropvolgende sectie wordt toegelicht hoe het nieuwe grensprofiel ook op een andere wijze kan worden ingepast waarbij nog steeds wordt voldaan aan de eis dat de kans dat vervolgprocessen kunnen leiden tot doorbraak van de waterkering verwaarloosbaar klein is (zie §4.6).

4.5.2 Uitgangspunten definitie basisgeometrie

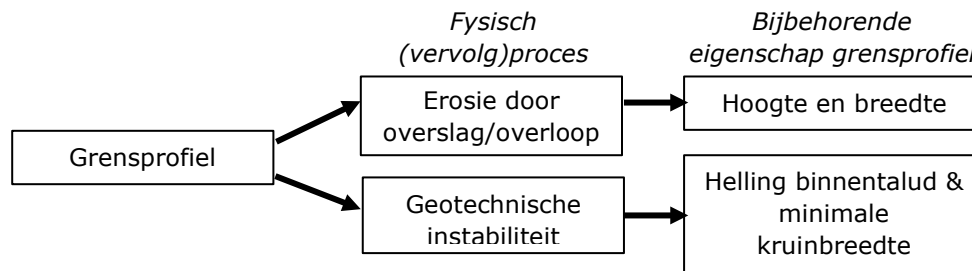
Voor de dimensionering van het (nieuwe) grensprofiel is dezelfde basisvorm aangehouden als bij de grensprofieldefinitie uit het ook binnen de WBI2017 vigerende TRDA2006, namelijk een trapeziumvorm. Er was geen reden om af te wijken van deze basisvorm. De vorm heeft immers voldoende vrijheidsgraden om een robuuste, profielvorm te definiëren om zo invulling te geven aan de niet-gemodelleerde processen binnen het faalpad duinafslag.

De dimensies van het trapeziumvormige grensprofiel worden beschreven met de volgende parameters:

- De taludhelling aan de zeezijde (buitentalud);
- De hoogte van het grensprofiel (kruinhoogte);
- De breedte van de top of kruin;
- De taludhelling aan de landzijde (binnentalud).

De benodigde dimensies van het grensprofiel zijn in het BOI zodanig afgeleid dat de kans dat eventuele vervolgprocessen (golfoverslag/overloop of geotechnische instabiliteit door uittredend grondwater) leiden tot een doorbraak van de zandige waterkering verwaarloosbaar klein is.

Deze relatie tussen de fysische processen en de bijbehorende eigenschap van het grensprofiel is schematisch weergegeven in Figuur 4-13.



Figuur 4-13 Schematisch overzicht van samenhang tussen de vervolgprocessen die het grensprofiel representeert en de bijbehorende geometrische eigenschappen van het grensprofiel.

Golfoverslag of overloop over de kruin van het grensprofiel kan leiden tot erosie van de kruin of het binnentalud waardoor de afmetingen van dit profiel afnemen. Omdat dit weer leidt tot een toename van de mate van erosie kan dit uiteindelijk leiden tot een doorbraak van de waterkering. Van belang is dus dat het grensprofiel voldoende hoog en breed is om er zeker van te zijn dat de kans op doorbraak als gevolg van deze processen in lijn met de faalpadbenadering verwaarloosbaar klein is.

Om de kans op falen van de kering als gevolg van geotechnische instabiliteit voldoende klein te houden moeten er met name eisen worden gesteld aan de helling van het binnentalud en de kruinbreedte.

In het volgende is eerst de kruinhoogte definitie in relatie tot de golfoverloop en golfoverslag behandeld. Aansluitend is een controle op de geotechnische stabiliteit beschreven in §4.5.7.

4.5.3 Aanpak kruinhoogte definitie i.r.t. erosie door golfoverloop en -overslag

Eén van de mogelijke vervolgmechanismen, tijdens of na het optreden van duinafslag, waarmee rekening gehouden dient te worden bij de dimensionering van het grensprofiel is *erosie door golfoverslag* (rechtsboven in Figuur 4-13). Het grensprofiel moet derhalve zodanig gedimensioneerd zijn dat er door golfoverslag geen significante erosie van de kruin en het binnentalud van het grensprofiel ontstaat. Hierbij is met name de hoogte van de kruin van belang. Een te laag niveau van het grensprofiel leidt onomkeerbaar tot meer overslag/overloop en een zichzelf versterkend erosieproces, waardoor uiteindelijk een doorbraak van de waterkering zeer waarschijnlijk is.

Bij de oude grensprofieldefinitie op basis van de TRDA uit 2006 was de hoogte van het grensprofiel een functie van de offshore (golf)condities.

Bij de nieuwe definitie van het grensprofiel wordt de hoogte bepaald op basis van de hydraulische condities bij de teen van het duin en dan met name door de karakteristieken van de hier aanwezige lange golven. Door de recente ontwikkelingen van het nieuwe (BOI) instrumentarium voor zandige waterkeringen kan de hiertoe benodigde informatie worden berekend met het proces-gebaseerde sterktemodel XBeach.

De gehanteerde BOI-versie van XBeach betreft een afgeregeld 1D model waarbij de zogenaamde surfbeat-modus wordt gebruikt. In deze modus wordt de waterbeweging opgelost op het niveau van golfgroepen (fasegemiddeld) waarbij de 'lange golven' expliciet doorgerekend als onderdeel van de waterbeweging maar de 'korte golven'

parametrisch worden meegenomen via een aparte gekoppelde rekenmodule voor de golfenergie(propagatie). In XBeach (surfbeat modus) worden daardoor géén individuele korte golven doorgerekend en is het standaard dus ook *niet* mogelijk om de oploop van *korte golven* op het duinprofiel te monitoren. Het is *wel* mogelijk om de oploop van *lange golven* te monitoren op basis van de modelresultaten en daar wordt dan ook gebruik van gemaakt.

Bij zogenaamde dissipatieve kustprofielen – zoals aanwezig langs de zandige delen van de Nederlandse kust – wordt de waterbeweging nabij het afslagfront gedomineerd door lange golven in plaats van korte golven. Dit komt omdat de (korte) golven breken op de relatief flauwe, geleidelijk oplopende profielen en de waterstandvariaties ter plaatse van het duinfront daarom primair nog het gevolg zijn van lange golven (surf beat). Aangenomen wordt daarom dat de met XBeach berekende lange golven en lange-golf-oploop (of -overslag) een goede indicator zijn voor de dominante hydraulische belasting ter plaatse van het afslagfront van het (resterende) duinprofiel.

Nadat de maatgevende belasting bij het duinfront is vastgesteld, is een vertaling gemaakt van het vastgestelde maximale oplooppniveau (van de lange golven) naar een minimaal benodigde hoogte van het grensprofiel. Er is daarbij gekozen om de kruinhoogte van het grensprofiel op een vaste hoogte boven het maatgevende oplooppniveau van de lange golven, zoals berekend met XBeach, te definiëren.

De hoogtemaat boven het maatgevend oplooppniveau van de lange golven representeert alle 'onbekenden', zoals missende fysische processen, onzekerheden (t.a.v. vervolprocessen; *niet* t.a.v. duinafslag) en eventuele robuustheden.

In de volgende secties volgt een methodische beschrijving van de wijze waarop de relevante lokale condities worden gekwantificeerd op basis van XBeach resultaten. Hierbij speelt de positie en het niveau van het zogenaamde 'natte punt' een belangrijke rol. Deze is toegelicht in de volgende paragraaf.

De vertaling naar het te gebruiken kruinniveau van het grensprofiel is besproken in de daaropvolgende sectie (§4.5.5).

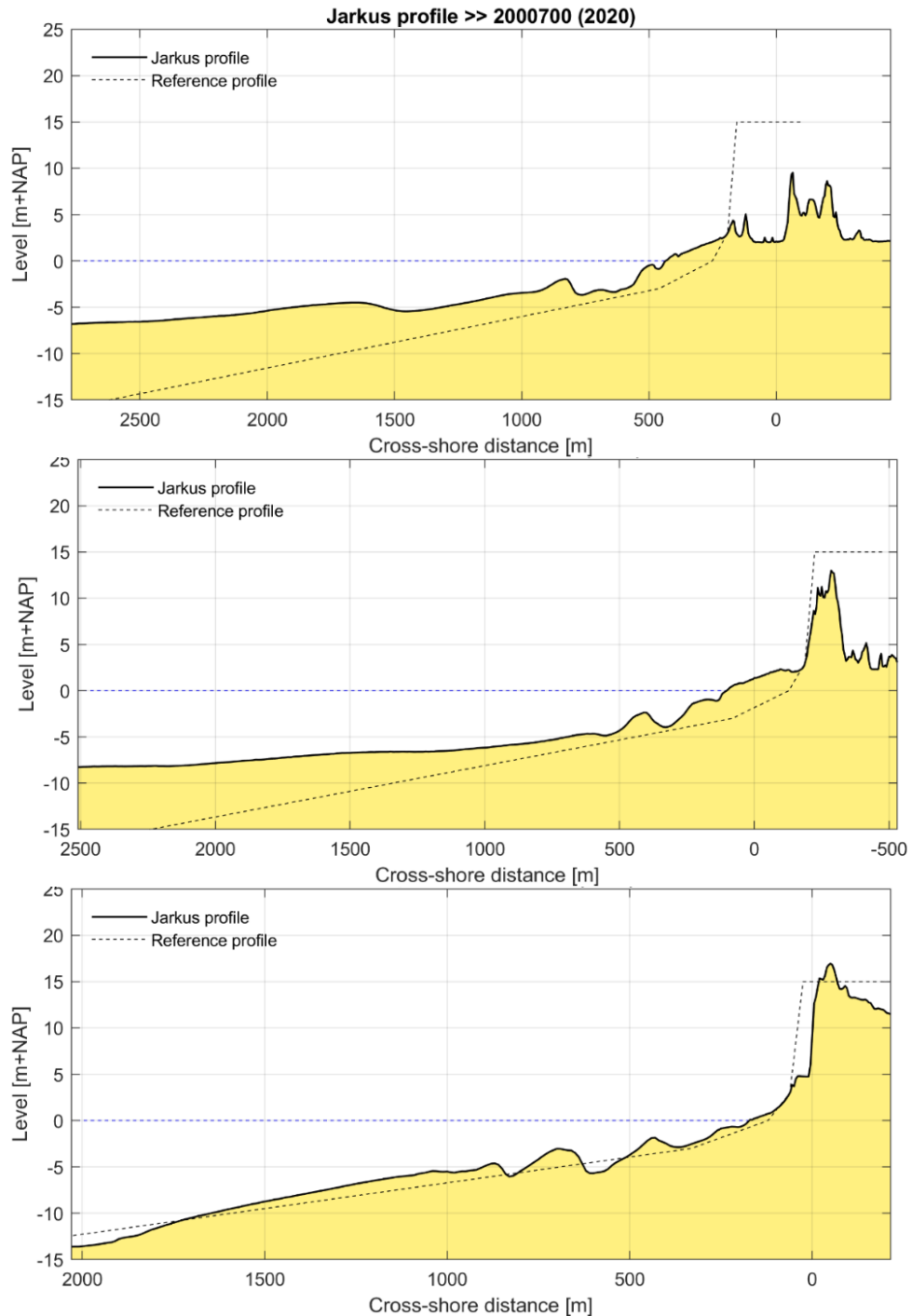
4.5.4 *Definitie maatgevende oplooppniveau: het 'natte punt'*

De eerste stap om te komen tot een hoogtebepaling voor het grensprofiel is het berekenen van de lokale hydraulische condities in de buurt van het afslagfront. Hierbij wordt – zoals hierboven toegelicht – primair gekeken naar de met XBeach berekende lange golven en de resulterende lange-golf-oploop (run-up). Het doel van deze exercitie is om het maatgevende oplooppniveau van de lange golven te bepalen. Dit is niet noodzakelijkerwijs het *hoogste* niveau van de lange golfoploop. Het maatgevende oplooppniveau van de lange golven is het oplooppniveau ter plaatse van de meest landwaartse positie van lange-golf-oploop³.

De bepaling van deze oplooppositie en het bijbehorende oplooppniveau van de lange golven volgt uit een post-processingstap op basis van de resultaten van een XBeach berekening. De benodigde analyseroutine is ontwikkeld als onderdeel van dit project. Voor het testen van de routine zijn XBeach berekeningen uitgevoerd voor een set met 26 representatieve profielen langs de Nederlandse Noordzeekust. Figuur 4-14 toont drie van deze profielen uit deze brede range van verschillende profieltypen en profielvormen.

³ De werkelijke rekenkundige implementatie is iets complexer dan dit. Het maatgevend punt wordt bepaald door vanaf de berekende golfoplooppunten een fictieve 1 : 2 helling (= helling binnentalud grensprofiel) naar een gekozen niveau (bijv. NAP) door te trekken. Het oplooppunt behorende bij de meest landwaartse positie van dit fictieve talud wordt aangemerkt als het maatgevende punt. In praktijk is dat *bijna* altijd het meest landwaartse punt, maar het *kan* ook een punt zijn dat iets verder zeewaarts ligt, maar (veel) hoger.

Deze variëren van karakteristieke Hollandse Kust profielen die sterke gelijkenissen tonen met het referentieprofiel (zie bovenste doorsnede in Figuur 4-14) tot meer complexe dwarsprofielen die representatief zijn voor (delen van) de langs de Noordzee gelegen Waddenkust en de Zuidwestelijke Deltakust.



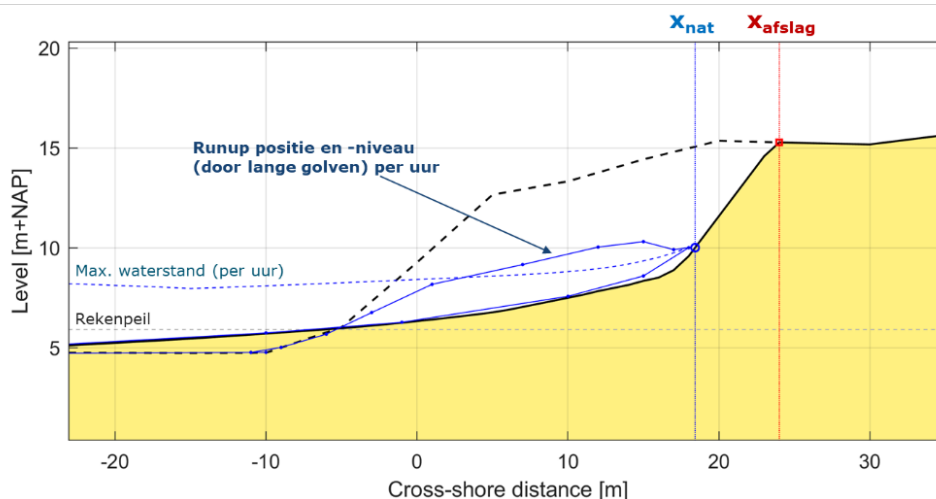
Figuur 4-14 Drie (van de 26) Jarkus-profielmetingen die zijn doorgerekend met XBeach t.b.v. berekening duinafslag en lokale condities. Met ter vergelijking ook het referentieprofiel van de Hollandse Kust (gestippelde lijn). Boven: raai 8006625 (Hollandse Kust; ~referentieprofiel). Midden: raai 2000700 (Waddenkust; flauwe vooroever, meerdere lage duinen). Onder: raai 3001000 (Waddenkust; breed strand, flauwe vooroever).

Bijvoorbeeld, profielen met zeer flauwe vooroevers, brede strandvlakten of meerdere lage duinenrijen (zie onderste twee doorsneden in Figuur 4-14).

Voor de 26 verschillende profielen zijn duinafslagberekeningen uitgevoerd met XBeach, uitgaande van karakteristiek veronderstelde maatgevende stormcondities⁴, en is de ontwikkelde post-processing routine toegepast.

In Figuur 4-15 is een tussenresultaat getoond van de methode voor de bepaling van de maatgevende olooppositie en het bijbehorende oloopniveau. Het figuur toont het oorspronkelijke dwarsprofiel (zwart gestreepte lijn) en het berekende afslagprofiel (zwarte lijn, gele arcering) met het berekende afslagpunt (rode marker) en het offshore rekenpeil (grijze gestreepte lijn).

Voor de bepaling van het maatgevende lange-golf-oloopniveau is de berekende maximale waterstand (inclusief de lange golven) gemonitord. De blauwe lijn met markers representeert de meest landwaartse positie van de berekende waterstand (de lange-golf-oloop) per uur tijdens de storm. Daarbij geldt dat de olooppositie aan het begin van de storm ver zeewaarts ligt en het bijbehorende niveau laag is voor de lage waterstand en relatief milde golfcondities. Richting de stormpiek worden steeds hogere en verder landwaarts gelegen oloopposities berekend. Het *hoogste* oloopniveau wordt bereikt tijdens de stormpiek. Maar, dit is niet het *maatgevende* oloopniveau, behorende bij het meest landwaartse olooppositie, omdat *na* de stormpiek ook nog afslag plaatsvindt en het afslagfront verder in landwaartse richting verschuift. Het maatgevende oloopniveau volgt – in dit specifieke geval – twee uur na de stormpiek. Daarna zakt zowel de waterstand en ook het golfoloopniveau van de lange golven weer.

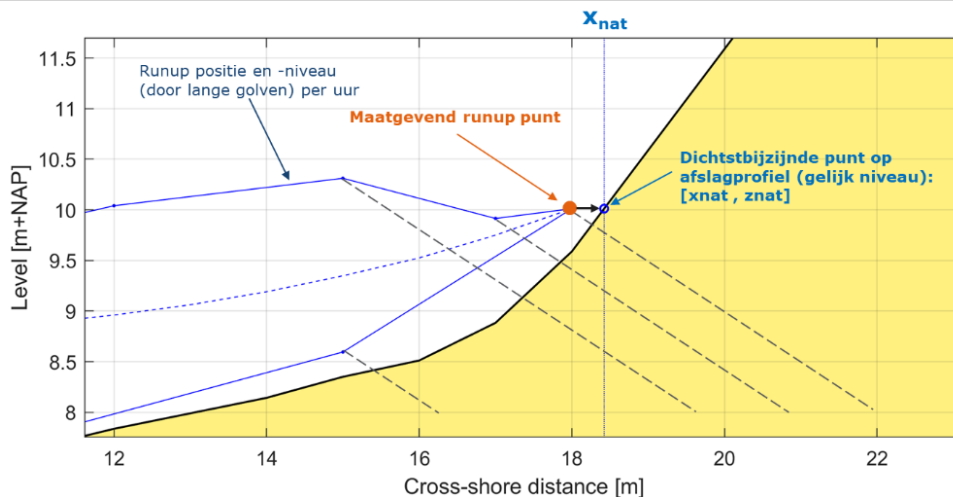


Figuur 4-15 Tussenresultaat van de methode voor de bepaling van de maatgevende olooppositie en -niveau van de met XBeach berekende lange golven. Doorgetrokken blauwe lijn: het tijdverloop van de oloopposities en -niveaus tijdens de storm. Gestreepte blauwe lijn: de berekende maximale waterstand incl. lange golven in 1 uur (in dit geval: het 2e volle uur na de stormpiek). Raailocatie: 8006625, Hollandse Kust.

⁴ Voor deze berekeningen zijn de HR-rekenwaarden uit het WBI2017 gebruikt, behorende bij de *signaleringswaarde*, aangezien de rekenwaarden voor XBeach nog niet beschikbaar waren. De exacte getalsmatige uitgangspunten voor deze sommen zijn niet relevant, omdat het hier gaat om het testen van de analysemethode.

In Figuur 4-16 is hetzelfde resultaat getoond als in Figuur 4-15, maar in dit geval is wat verder ingezoomd op het profieldeel in de buurt van de maatgevende olooppositie (of run-up punt). Het figuur laat zien dat het maatgevende punt (oranje marker) niet op het afslagprofiel ligt. Dat komt omdat XBeach gebruik maakt van een rekenrooster en het resultaat van de analyse betrekking heeft op het *laatste natte roosterpunt*. De afstand tussen het maatgevende run-up punt en het dichtstbijzijnde punt op het afslagprofiel (op gelijk niveau) is *maximaal* de gehanteerde roosterresolutie (hier: 1 m).

Het punt *op het afslagprofiel* – aangeduid met $[X_{nat}, Z_{nat}]$ ofwel ‘het natte punt’ – wordt representatief verondersteld voor de maatgevende olooppositie (door lange golven) en het bijbehorende maatgevende oloopniveau.



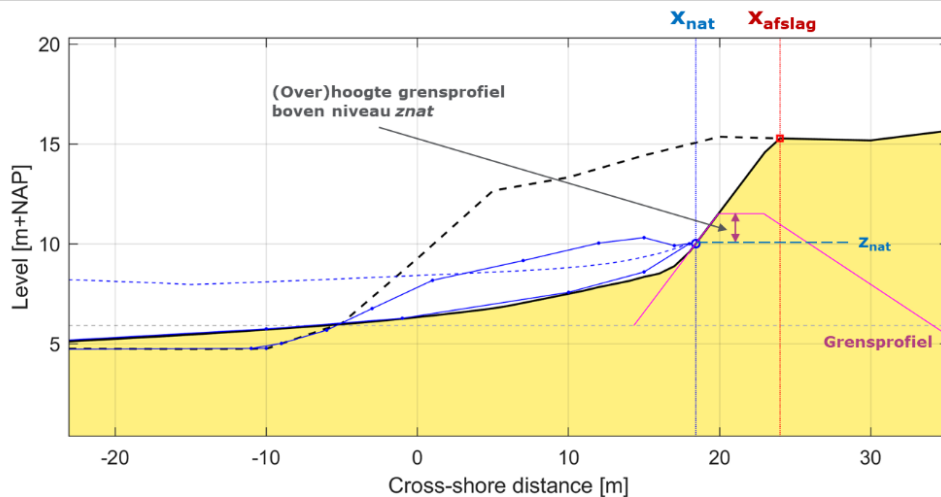
Figuur 4-16 Tussenresultaat – ingezoomd – van de methode voor de bepaling van de maatgevende olooppositie en -niveau van de met XBeach berekende lange golven (oranje marker) Doorgetrokken blauwe lijn: het tijdsverloop van de oloopposities en -niveaus tijdens de storm. Gestreepte blauwe lijn: de berekende maximale waterstand incl. lange golven in 1 uur (in dit geval: het 2^e volle uur na de stormpiek). Verticale lijn: berekende positie van X_{nat} . Gestreepte diagonale lijnen: fictieve 1 : 2 hellingen t.b.v. bepaling maatgevende (meest landwaartse) positie.

De routine is ook ingebouwd in de nieuwe BOI-versie van de gebruikersinterface MorphAn; waardoor de benodigde analysestappen ‘achter de schermen’ worden uitgevoerd voor de gebruiker van het instrumentarium.

4.5.5 Definitie minimaal benodigde kruinhoogte

In combinatie met de eerder vastgestelde uitgangspunten voor de breedte en de taludhelling kan nu een grensprofiel geconstrueerd worden. Het resultaat is gepresenteerd in Figuur 4-17. Hierbij is het grensprofieltalud aan de zeezijde zo dicht mogelijk tegen het punt X_{nat} gepositioneerd.

Het geconstrueerde grensprofiel in Figuur 4-17 heeft dus een hoogte die is gebaseerd op het berekende maatgevende oloopniveau van de lange golven (Z_{nat}) plus een – nog nader te kwantificeren – hoogte h_{gp} . Landwaarts van het 1 : 1 buitentalud heeft deze een kruinbreedte van 3 meter en een binnentaludhelling van 1 : 2.



Figuur 4-17 Voorbeeld van het berekende grensprofiel op basis van $[X_{nat}, Z_{nat}]$, een gekozen kruinhoogte, een kruinbreedte van 3 m en een binnentaludhelling van 1 : 2. Raailocatie: 8006625, Hollandse Kust.

De resterende parameter van het grensprofiel die gekwantificeerd dient te worden is de hoogte van de kruin van het grensprofiel boven het niveau van het natte punt. Deze hoogte is feitelijk een pragmatische implementatie om zo *alle resterende onbekenden en onzekerheden* te kunnen verdisconteren. Zo kan met deze hoogte onder andere *impliciet* rekening worden gehouden met de eventuele effecten van golfoverslag van de nog lokaal aanwezige korte golven.

Overwegende dat de hoogte boven het natte punt vooral bedoeld is om onbekenden mee te nemen, en het tegelijkertijd niet wenselijk is om onnodig onzekerheden te stapelen en enig conservatisme in te bouwen, is geconcludeerd dat er niet zondermeer een rekenkundige methode beschikbaar is om deze hoogte eenduidig te kunnen kwantificeren. Er zijn in theorie wel mogelijkheden om aanvullend op en deels gebruikmakend van de XBeach resultaten een inschatting te maken van eventuele (extra) korte golfoverslag, maar hier zitten methodisch diverse haken en ogen aan. Ook is in dat geval nog is een (complexe) analyseslag nodig om de doorvertaling te maken naar een robuuste, kwantitatieve maat voor de gezochte hoogtemaat. Er is daarom voor gekozen om vast te houden aan een pragmatische aanpak om in eerste instantie te komen tot een kwantitatieve maat voor de kruinhoogte boven Z_{nat} .

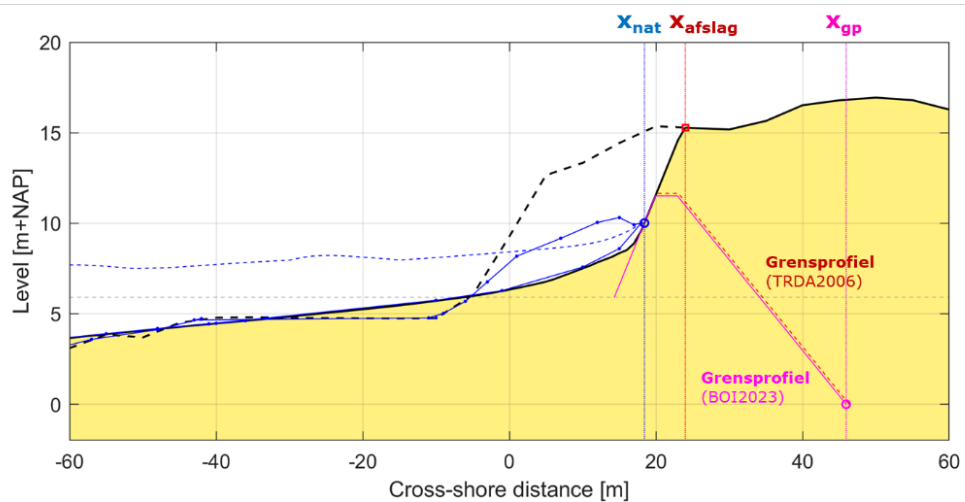
Het basisuitgangspunt voor de pragmatische aanpak is dat de hoogte van het grensprofiel wordt afgeregeld op basis van informatie en kennis over de referentiesituatie langs de Hollandse Kust. Specifiek wordt hierbij gebruik gemaakt van de 'oude' grensprofieldefinitie zoals deze is onderzocht in een tweetal specifiek hiervoor uitgevoerde modelonderzoeken (Waterloopkundig Laboratorium, 1983), (Waterloopkundig Laboratorium, 1984).

Destijds is een minimaal benodigde grensprofielomvang vastgesteld voor de referentiesituatie, met karakteristieke offshore stormcondities en het referentieprofiel. Ondanks dat de toepasbaarheid van de oude definitie – door gebruik van de offshore condities – feitelijk beperkt is tot profielen die lijken op deze referentieprofiel, is er op dit moment geen enkele aanleiding om te veronderstellen dat de oude grensprofielomvang 'verkeerd' is voor de referentiesituatie.

Daarom is ervoor gekozen om de basiswaarde voor de kruinhoogte van het grensprofiel boven Z_{nat} zo af te regelen dat de omvang van het nieuwe grensprofiel *in*

de referentiesituatie min or meer gelijk is aan de omvang van het oude grensprofiel. De referentiesituatie heeft hier betrekking op het referentieprofiel en normatieve referentiestormcondities.

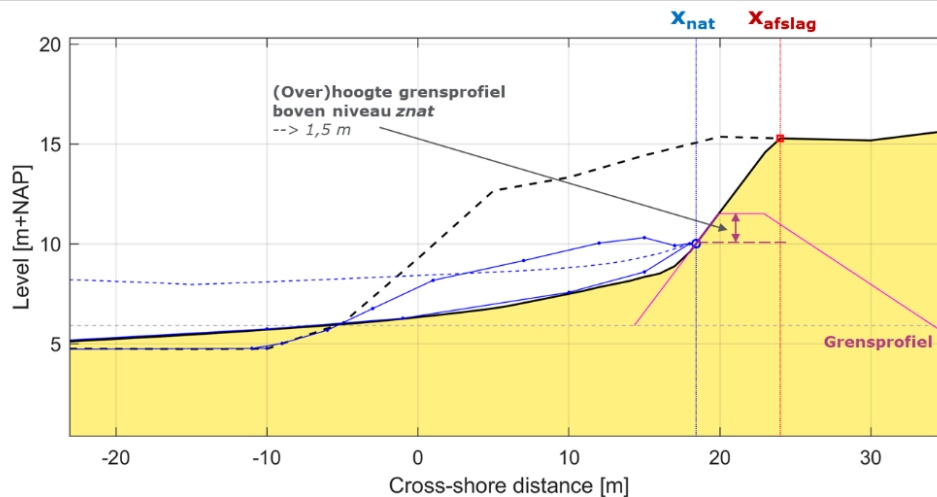
Figuur 4-18 toont (wederom) de situatie ter plaatse van raai 8006625, langs de Hollandse Kust, waarbij het initieel aanwezige kustprofiel zeer vergelijkbaar is met het referentieprofiel (zie Figuur 4-14). In dit geval is de *kruinhoogte* van het grensprofiel zo gekozen dat de totale grensprofielomvang (min of meer) gelijk is aan het grensprofiel dat is gebaseerd op basis de oude formulering uit het TRDA en de offshore condities.



Figuur 4-18 Voorbeeld van het berekende grensprofiel conform de nieuwe grensprofieldefinitie (op basis van lokale condities; magenta) en de oude grensprofieldefinitie (op basis van offshore condities; rood gestippeld). Raailocatie: 8006625, Hollandse Kust.

Op basis van een analyse voor meerdere profielen langs de Hollandse Kust is geconcludeerd dat een kruinhoogte van het grensprofiel van 1,5 m boven het niveau van het natte punt gemiddeld genomen resulteert in een grensprofielhoogte dat vergelijkbaar is met de hoogte van het grensprofiel op basis van de TRDA2006 en de offshore condities.

In Figuur 4-19 is het verkregen eindresultaat samengevat. Het berekende (nieuw) grensprofiel heeft een kruinniveau dat gelijk is aan $Z_{nat} + 1,5$ m, een kruinbreedte van 3 meter en een binnentalud van 1 : 2.



Figuur 4-19 Voorbeeld van het berekende nieuwe grensprofiel op basis van $[X_{nat}, Z_{nat}]$, de afgeregelde kruinhoogte (= 1,5 m boven Z_{nat}), een kruinbreedte van 3 m en een binnentaludhelling van 1 : 2. Raailocatie: 8006625, Hollandse Kust.

Samenvattend is de hoogte van het grensprofiel (Z_{gp} in m t.o.v. NAP) gebaseerd op het maatgevende oplooptniveau van de lange golven (Z_{nat} in m +NAP) plus een hoogte h_{gp} (in m) welke gelijk is aan 1,5 m.

Deze hoogte is een *locatie-onafhankelijke* waarde die voor een specifieke situatie (referentiesituatie) is afgeregeld. Het kan daarom in bepaalde gevallen wenselijk zijn om het basisuitgangspunt voor de hoogte boven het Z_{nat} -niveau (1,5 m) nader te beschouwen en eventueel (onderbouwd) bij te stellen, om zo te komen tot een nog betere kwantitatieve onderbouwing ervan.

Het feit dat de nieuwe kruinhoogte van het grensprofiel – voor de referentiesituatie – is afgeregeld op de oude grensprofielhoogte, betekent niet dat beide definities voor gehele Nederlandse kust tot vergelijkbare resultaten leiden en de nieuwe definitie dus feitelijk overbodig is. De onderliggende methodiek om de hoogte te bepalen is namelijk fundamenteel anders (oud: gebaseerd op offshore condities; nieuw: gebaseerd op lokale condities). Dit betekent de verschillen tussen beide definities groter (kunnen) worden naar mate de beschouwde profielen complexer worden en meer afwijken van het reguliere referentieprofiel.

De routine is bovendien ook ingebouwd in de nieuwe BOI-versie van de gebruikersinterface MorphAn; waardoor de benodigde analysestappen 'achter de schermen' worden uitgevoerd voor de gebruiker van het instrumentarium.

4.5.6 Conclusies dimensionering basisgeometrie grensprofiel

De op basis van de in de vorige paragrafen afgeleide vorm en de standaardafmetingen van het grensprofiel zijn samengevat in Tabel 4-2 en Figuur 4-20. Met name de hoogtedefinitie voor het nieuwe grensprofiel is substantieel gewijzigd.

Tabel 4-2 Overzicht van de belangrijkste geometrische parameters die het nieuwe grensprofiel (BOI) beschrijven.

Geometrische parameter	Waarde in BOI
Profielvorm	Trapezium
Taludhelling zeezijde [m/m]	1 : 1
Kruinniveau [m +NAP]	$Z_{gp} = z_{nat} + h_{gp}$ met: $h_{gp} = 1,5$ m
Kruinbreedte [m]	3 m
Taludhelling landzijde [m/m]	1 : 2

De hoogte en daarmee de omvang is nu een functie van de lokaal voor het duin optredende hydraulische belasting, waarbij expliciet rekening wordt gehouden met het oplooppniveau van lange golven. Dit laatste niveau is aangeduid als Z_{nat} . De inpassing van het grensprofiel gebeurt landwaarts dit het 'natte punt' tot waar de lange-golf-oploop reikt, te weten de positie X_{nat} .

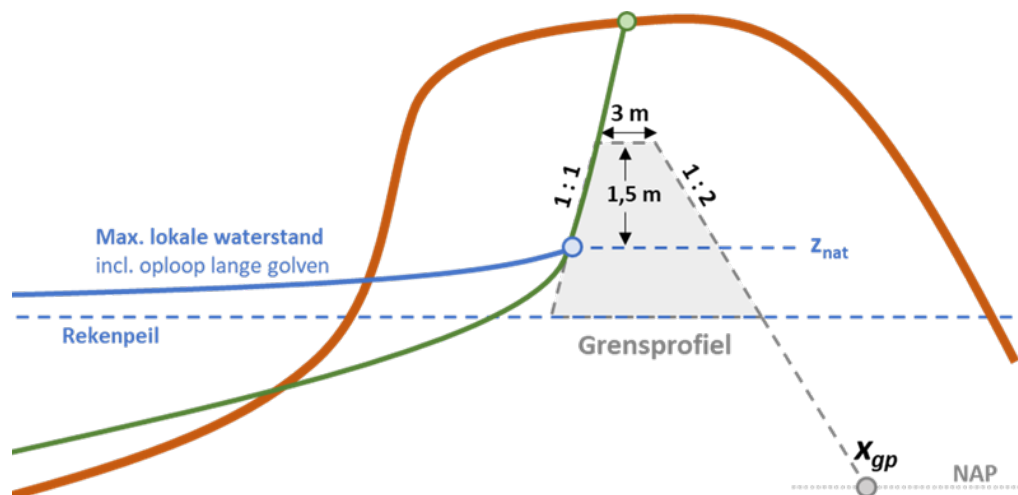
Uit deze afregeling volgt dat de kruinhoogte van het grensprofiel boven dit Z_{nat} -niveau standaard 1,5 m bedraagt.

In formulevorm:

$$Z_{gp} = z_{nat} + h_{gp}$$

met $h_{gp} = 1,5$ m.

Deze laatste waarde is zodanig afgeregeld dat de kruinhoogte van het grensprofiel boven rekenpeil vergelijkbaar is met de hoogte van de TRDA2006-definitie.



Figuur 4-20 Schematische weergave van de vorm en de dimensies van het grensprofiel inclusief de positie van de doorsnijding van het binnentalud met het NAP-niveau.

Het volume van het grensprofiel (grijze arcering in Figuur 4-20) wordt beschouwd *boven het (offshore) rekenpeil*, in lijn met de oude grensprofieldefinitie.⁵ Aan de landzijde wordt het talud ten behoeve van de positionering van de legger (fictief) doorgetrokken tot het niveau NAP. De positie van de landzijde van het grensprofiel op het NAP-niveau is een belangrijke indicator in de veiligheidsanalyse.

⁵ Hierbij dient wel te worden opgemerkt dat de definitie van het rekenpeil voor de oude en de nieuwe rekenkern (respectievelijk Duros+ en XBeach) onderling afwijkend is, waarbij deze semi-probabilistische rekenwaarde voor het nieuwe rekenmodel hoger is gelegen (Arcadis en Deltares, 2023b).

Bij het uitvoeren van een faalkansanalyse voor duinen is het van belang om vast te stellen of er na optreden van duinafslag nog een grensprofiel inpasbaar is in het resterende duinprofiel. Indien deze binnen het restprofiel tussen X_{nat} en de landwaartse begrenzing van de waterkering kan worden ingepast is de kans op het optreden van doorbraak als gevolg van niet-gemodelleerde vervolgprocessen verwaarloosbaar klein.

4.5.7 Controle basisgeometrie grensprofiel i.r.t. (geotechnische) instabiliteit

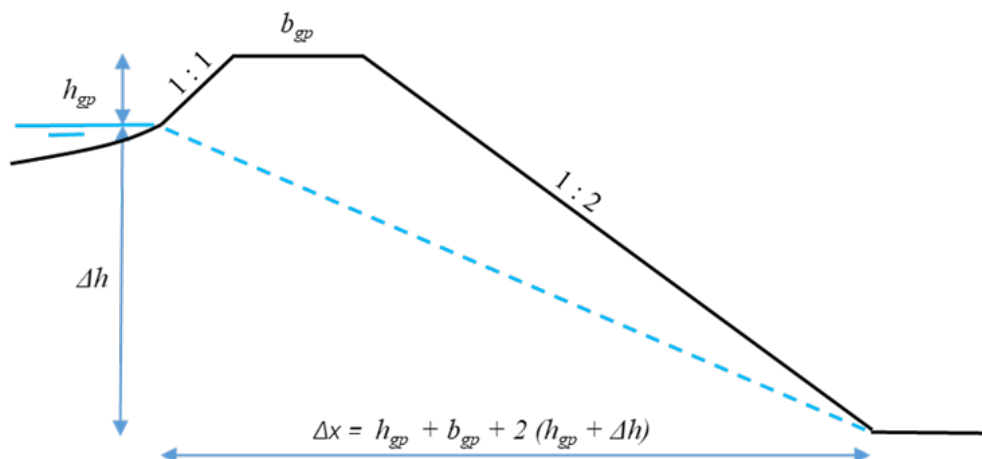
De (minimaal) benodigde breedte en de taludhellingen van het grensprofiel zijn primair te relateren aan een ander type vervolgmechanisme: (macro-)instabiliteit. Het gaat hierbij bijvoorbeeld om (geotechnische) instabiliteit door uittredend grondwater wat resulteert in erosie of afschuiven van het binnentalud. Met name in combinatie met eventuele golfoverslag kan dit versneld leiden tot een ongewenste doorbraak van het resterende duinprofiel.

Geotechnische stabiliteit van het grensprofiel wordt geborgd met een minimale breedte en een voldoende flauwe helling van het binnentalud van het grensprofiel. In de oorspronkelijke grensprofieldefinitie (TAW1984 en TRDA2006) werd uitgegaan van taludhellingen van 1 : 1 aan zeezijde (het afslagfront), en 1 : 2 aan de landzijde en een minimale kruinbreedte van 3 meter; zie Figuur 4-1 (ENW, 2007).

Bij de nieuwe grensprofieldefinitie is vooralsnog geen reden om af te wijken van deze waarden. Dit komt omdat er – in tegenstelling tot bij de hoogte-definitie in relatie tot golfoverslag – geen bruikbare nieuwe informatie beschikbaar is om de aan stabiliteit gerelateerde dimensies van het grensprofiel verder te optimaliseren.

Hieronder wordt voor de volledigheid kort ingegaan op de onderliggende aannames bij de oorspronkelijke totstandkoming van de gehanteerde waarden voor de breedte en de taludhellingen.

Het uitgangspunt voor de definitie van de combinatie van de (minimale) breedte van de bovenkant van het grensprofiel en de (maximale helling) van het binnentalud is de aanname dat er voor deze combinatie geen sprake van geotechnisch falen van het restduin aanwezig is. Aangenomen wordt dat dit het geval is als de helling van de maatgevende freatische lijn niet steiler is dan 1 : 4.



Figuur 4-21 Basisvorm grensprofiel met helling freatische lijn als functie van de hoogte en breedte van de bovenzijde van het grensprofiel en de kerende hoogte.

In dat geval is er op het binnentalud zeker (nog) geen sprake van uittredend (grond)water en dus ook geen aanleiding tot het begin van geotechnische instabiliteit (Graaff, 2022).

De kritieke freatische lijn is in dit geval gedefinieerd als de verbindinglijn tussen het snijpunt van het buitentalud met de waterstand (rekenpeil) en het snijpunt van het binnentalud met het maaiveld (zie Figuur 4-21).

De helling van de freatische lijn is voor een gegeven breedte en taludhelling een functie van de hoogte van het grensprofiel en de kerende hoogte Δh . Uitgaande van een kritieke freatische lijn onder 1 : 4 volgt de maximale kerende hoogte van een grensprofiel uit de volgende vergelijking:

$$\Delta h_{max} = (b_{gp} + 3 h_{gp})/2$$

Deze formule laat zien dat de maximaal toelaatbare kerende hoogte Δh_{max} nog verder toeneemt met de hoogte van het grensprofiel h_{gp} .

Voor een (minimale) hoogte van 2,5 m leidt dit pas tot uittredend water aan de voet van het binnentalud voor een kerende hoogte van tenminste 5,25 m. In de praktijk is de hoogte van het grensprofiel echter veel groter en wordt de kritieke freatische lijn pas bereikt voor veel grotere kerende hoogten. Bij een kruinhoogte van bijvoorbeeld 4 m behoort een kerende hoogte van 7,5 m.

Omdat dergelijke kerende hoogten, zeker in combinatie met een binnentaludhelling van 1 : 2, in de praktijk niet voor zullen komen lijkt de conclusie gerechtvaardigd dat de vigerende breedte-helling-combinatie geotechnisch robuust is.

4.6 Alternatieve geometrie van het grensprofiel

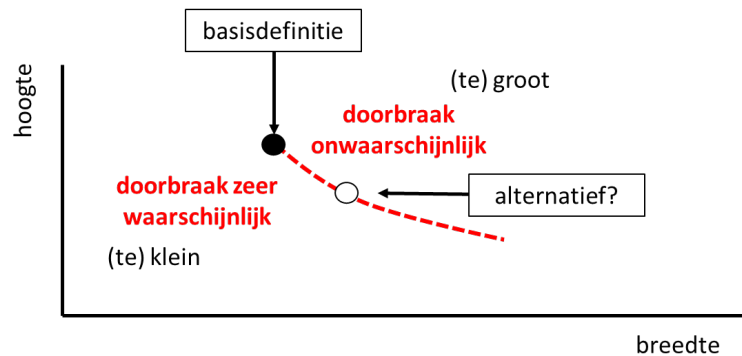
4.6.1 Inleiding

In de voorgaande paragraaf is bij de dimensionering van de breedte en de taludhellingen gekeken naar vervolgmecanismen die relateren aan geotechnische instabiliteit. De breedte en de helling van het binnentalud van het grensprofiel zijn echter ook niet geheel los te zien zijn van het (voor het kruinniveau van het grensprofiel beschouwde) vervolgmecanismes *erosie door golfoverslag* of *erosie door golfoverloop*.

Het kruinniveau van de basisgeometrie van het grensprofiel is immers zo gedefinieerd dat de hoeveelheid golfoverslag voldoende beperkt blijft om doorgaande en zichzelf versterkende erosie van de kruin en met name het binnentalud te voorkomen en daarmee de kans op doorbraak verwaarloosbaar klein te laten zijn.

In theorie is het echter mogelijk om (iets) meer golfoverslag over de kruin toe te staan, mits de kruin en het binnentalud voldoende robuust gedimensioneerd zijn opdat er geen onomkeerbaar en doorgaand erosieproces geïnitieerd wordt en dus de kans op doorbraak verwaarloosbaar klein blijft.

Een iets lagere kruin kan bijvoorbeeld 'gecompenseerd' worden met een (veel) grotere kruinbreedte. Hierbij blijft het uitgangspunt dat, als het grensprofiel nog inpasbaar is, de kans op doorbraak van het duin op de locatie van de doorsnede verwaarloosbaar klein is. Dit basisprincipe is schematisch weergegeven in Figuur 4-22.



Figuur 4-22 Basisdefinitie in relatie tot kans op doorbraak als functie van de dimensies (breedte en hoogte) van het grensprofiel.

Een alternatieve combinatie van breedte en hoogte moet dus ergens gelegen zijn op de in dit figuur aangegeven stippellijn waarbij de aandacht specifiek uitgaat naar hoogte-breedte-combinaties met een lager kruinniveau. Een smallere kruin is, ook in combinatie met een hoger kruinniveau, niet toegestaan.

4.6.2 Aanpak voor nadere uitwerking

Het grensprofiel met de standaardafmetingen staat dus een beperkte hoeveelheid overslag over de kruin toe. De met deze overslag samenhangende sedimenttransporten ter plaatse van de 3 meter verder landinwaarts gelegen binnenkruinrand van het grensprofiel zijn daarbij per definitie klein genoeg om de kans op doorbraak verwaarloosbaar klein te houden.

Echter, er kunnen situaties voorkomen waarbij met name de hoogte van het grensprofiel niet landwaarts van het berekende afslagprofiel kan worden ingepast, maar het aanwezige duin mogelijk toch voldoende robuust is om de kans op doorbraak verwaarloosbaar klein te maken. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn als het achterliggende duin heel breed is. In deze situaties is het wenselijk om te bepalen of het grensprofiel met andere afmetingen - maar met dezelfde uitgangspunten - wel inpasbaar is.

Daarom zijn enkele in §4.6.4 beschreven, aanvullende analyses uitgevoerd om te bepalen of er ook andere geometrische verhoudingen van het grensprofiel zijn waarvoor geldt dat als deze dan toch inpasbaar is, de kans op doorbreken vergelijkbaar is met die van de basisgeometrie van het grensprofiel. Op basis hiervan kunnen alternatieve dimensies van het grensprofiel worden voorgesteld.

4.6.3 Onderscheid effect korte en lange golven

In een dergelijk alternatieve situatie kan de kruinhoogte verlaagd worden mits de kruin breder wordt. Hierbij is het uitgangspunt dat:

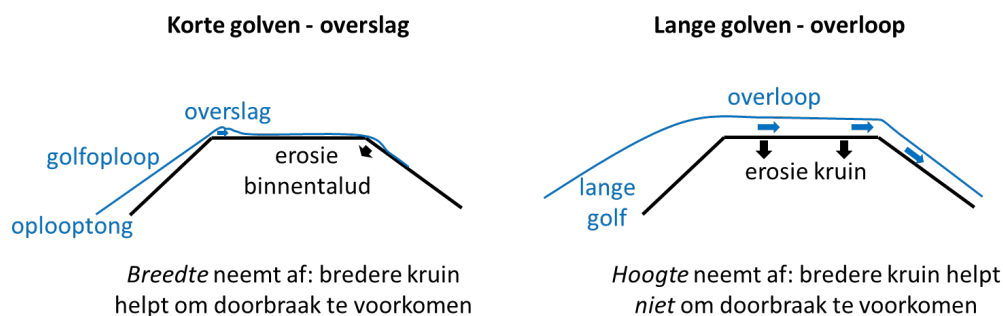
- 1) de belasting door *overslag van korte golven* (eroderend vermogen) op de binnenkruinrand gelijk blijft, en
- 2) de belasting door *overloop door lange golven* verwaarloosbaar klein is.

Zo blijft de bijbehorende kans op doorbraak van het duin immers vergelijkbaar bij gebruik van het grensprofiel met de basisgeometrie en het grensprofiel met alternatieve dimensies, temeer omdat hierbij wordt uitgegaan van dezelfde basisbreedte van 3 m en een ongewijzigde helling van het binnentalud van 1 : 2.

Hierbij is bewust onderscheid gemaakt tussen overslag van korte golven en overloop van lange golven. Het onderscheid tussen deze twee processen is weergegeven in Figuur 4-23.

Korte golven (links in het figuur) leiden tot golfoploop en kunnen vervolgens leiden tot overslag, waarbij per golf een beperkte hoeveelheid water over de kruin loopt. Dit zal hoofdzakelijk leiden tot erosie op (het knikpunt naar) het binnentalud waar het afstromende water versnelt. Als gevolg hiervan wordt de kruin smaller. Dit leidt tot minder afremming van golven op de kruin en geleidelijk hogere snelheden op het binnentalud. Hierdoor neemt de kruinbreedte steeds verder af.

In dit geval zal een relatief bredere duin we toe leiden dat de stroom- en daarmee erosiesnelheden op het binnentalud lager zijn en de kans op doorbraak reduceert.



Figuur 4-23 Schematisch overzicht van de verschillen in erosie van het grensprofiel door overslag door korte golven en overloop door lange golven.

Lange golven (rechts in het figuur) zullen daarentegen vooral resulteren in erosie van de (volledige) kruin van het grensprofiel omdat er grotere hoeveelheden water overheen lopen en daardoor de belasting groter is. Hierdoor wordt de kruin lager, waardoor de overlopende lange golven de kruin nog sterker belasten en erosie van de kruin wordt versterkt. Zo kan uiteindelijk het duinprofiel doorbreken. In dit geval zal een bredere kruin niet zorgen voor het reduceren van de kans op een doorbraak.

In lijn met de hierboven beschreven uitgangspunten in relatie tot overslag en overloop, zijn aanvullende analyses uitgevoerd om de geometrie van een alternatief grensprofiel met een lagere kruin te kunnen definiëren.

Met oog op het aan de korte golven gerelateerde uitgangspunt (1) is geanalyseerd hoeveel breder het grensprofiel zou moeten worden als de kruin met een bepaalde maat wordt verlaagd om hetzelfde eroderend vermogen op de binnenkruinrand te behouden als in de basisgeometrie van het grensprofiel. Dit is nader toegelicht in de volgende paragraaf (zie §4.6.4).

Met oog op het aan de lange golven gerelateerde uitgangspunt (2) is bepaald tot welk kruinniveau het grensprofiel maximaal kan worden verlaagd zonder dat de kans op overloop van lange golven (en dus de kans op doorbraak) te groot wordt. Dit is nader toegelicht in de daaropvolgende paragraaf (zie §4.6.5).

De uitkomst van beide analyses samen bepaalt de karakteristieken van de alternatieve geometrie van het grensprofiel zoals deze is gepresenteerd in §4.6.6.

4.6.4 Uitwerking compensatie van lagere kruin door grotere kruinbreedte

Om te bepalen hoeveel breder het alternatief grensprofiel zou moeten worden als de kruin met een bepaalde maat wordt verlaagd, zijn voor het referentieprofiel

berekeningen uitgevoerd met de non-hydrostatische versie van het XBeach-model voor verschillende breedte-hoogte-verhoudingen van het grensprofiel. In deze XBeach-versie worden ook de korte golven en dus ook de overslag gesimuleerd. Deze berekeningen zijn uitgevoerd voor combinaties van een reeks van kruinhoogtes en kruinbreedtes om te bepalen bij welke combinaties van kruinhoogte en -breedte het eroderend vermogen op de bovenkant van het binnentalud hetzelfde is als voor het grensprofiel met de basisdimensies.

In Bijlage C zijn de aanpak en de resultaten van deze uitwerking nader toegelicht.

Als proxy voor het eroderende vermogen op de bovenzijde van het binnentalud is gebruik gemaakt van zowel de maximale snelheid als het debiet in de overslaande golven. Vergelijkbare proxies worden ook voor dijken gebruikt om de belasting op de bekleding en de mate van erosie door overslag te bepalen op de kruin en het binnentalud (EurOtop, 2018; Deltares, 2015a). Beschouwing van de resultaten van de non-hydrostatische XBeach berekeningen in relatieve zin (dat wil zeggen ten opzichte van conditie op de binnenkruinrand voor het grensprofiel met de basisdimensies) geeft een beeld van de combinaties van hoogte en breedte die qua maximum debiet of snelheid vergelijkbaar zijn. Deze aanpak sluit aan op de ook in de 1987-studie gehanteerde uitgangspunten (Waterloopkundig Laboratorium, 1987).

Op basis van de uitkomsten van deze analyse is een maatgevende relatie tussen de reductie in kruinhoogte en extra kruinbreedte afgeleid. Voor een verlaging van het grensprofiel met 1 m is een verbreding van de kruin met 18 m nodig. Voor een kleinere verlaging van de kruinhoogte, dient de breedte naar rato aangepast te worden.

In formulevorm:

$$B_{kruin} = B_{kruin,basis} + \Delta h * 18$$

met $B_{kruin,basis}$ de kruinbreedte van het oorspronkelijke grensprofiel (3 m) en Δh de verlaging van de kruinhoogte ten opzichte van de basisgeometrie.

Een nadere toelichting op en onderbouwing van deze uitwerkingen is zoals eerder aangegeven beschreven in Bijlage C van deze rapportage.

Merk op dat voor het alternatief grensprofiel de toegestane verlaging (en bijbehorende verbreding) van de kruin direct gerelateerd is aan het vervolgproces overslag. Het grensprofiel ondervangt ook het vervolgproces geotechnische instabiliteit.

Zoals eerder beschreven zijn voor dit proces het binnentalud en de breedte van de kruin van belang. De helling van het binnentalud blijft gelijk en de breedte van de kruin neemt toe in het alternatief grensprofiel, waardoor de kans op doorbraak ten gevolge van dit vervolgproces zeker niet groter wordt. Dit is in lijn met het uitgangspunt dat als het basis of alternatief grensprofiel nog inpasbaar is de kans op doorbraak van het duin op de locatie van de doorsnede verwaarloosbaar klein is.

4.6.5 *Uitwerking minimaal kruinniveau grensprofiel*

Het alternatief grensprofiel kan conform de breedte-hoogte-relatie zoals beschreven in de vorige paragraaf verlaagd worden tot de hoogte waarop de kans groot is dat lange golven tot overloop over de kruin van het grensprofiel leiden. Oftewel: de kruin van het grensprofiel moet boven het lange-golf oploophoogte op het buitentalud liggen. Hiervoor geeft het Z_{nat} -niveau dat volgt uit een standaard BOI-XBeach berekening een goede indicatie.

Ten behoeve van het verkrijgen van reproduceerbare resultaten, wordt in de standaard BOI-XBeach-berekeningen het opgegeven JONSWAP-spectrum omgezet in

een golftijdserie op de offshore rand met behulp van een vaste 'random-factor' ($random = 0$). Hierdoor zijn de golftijdserie en het offshore lange-golfsignaal van een herhaalde simulatie altijd hetzelfde en daarmee ook de hydrodynamische en morfologische resultaten waaronder het maatgevende lange-golf-oploophoogte Z_{nat} . Dit impliceert dat het afgeleide Z_{nat} -niveau een toevallige trekking is uit een grotere populatie van Z_{nat} -niveaus, en het 'werkelijke' oploophoogte van de lange golven hoger zou kunnen zijn.

Om voldoende zeker te zijn dat het alternatief grensprofiel niet verlaagd wordt tot een niveau waar lange golven overheen kunnen lopen en de kans op doorbraak significant vergroot wordt, moet er daarom ook rekening worden gehouden met de spreidingsmaat in het Z_{nat} -niveau. Met behulp van een reeks aan berekeningen voor 26 profielen langs de Nederlandse kust en het referentieprofiel waarin de trekking per simulatie wordt gevarieerd ($random = 1$), is deze spreidingsmaat bepaald. De detailresultaten van deze uitwerkingen zijn opgenomen in Bijlage C van deze rapportage.

Uit deze berekeningen volgt dat de standaarddeviatie van het Z_{nat} -niveau gemiddeld 0,27 m is voor de beschouwde profielen, met een maximum van 0,46 m. De gemiddelde maximale afwijking van het gemiddelde per profiel is 0,5 m. Voor het Hollands referentieprofiel is de spreiding nog wat kleiner.

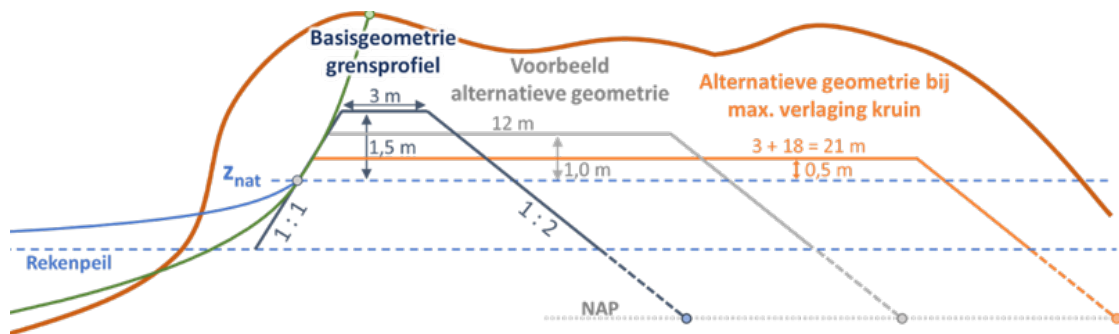
Op basis hiervan is bepaald dat het alternatieve grensprofiel tot maximaal een halve meter boven Z_{nat} kan worden verlaagd ($Z_{gp,min} = Z_{nat} + 0,5$ m), zijnde een afgeronde waarde van éénmaal de maximale standaarddeviatie, tweemaal de gemiddelde standaarddeviatie en eenmaal de gemiddelde maximale afwijking van het gemiddelde.

In dat geval kan met voldoende zekerheid gesteld worden dat de lange golven niet over het grensprofiel heen lopen en dat de kans op doorbraak van de waterkering verwaarloosbaar klein blijft, mits de kruinbreedte op dit niveau voldoet aan de in de vorige paragraaf beschreven relatie.

Een nadere toelichting op en onderbouwing van deze uitwerkingen is beschreven in Bijlage D van deze rapportage.

4.6.6 *Conclusies dimensionering alternatieve geometrie grensprofiel*

Op basis van aanvullende analyses is vastgesteld dat het kruinniveau van het nieuwe grensprofiel maximaal 1 meter kan worden verlaagd. Een verlaging van 1 meter dient gecompenseerd te worden met een verbreding van de kruin met 18 meter om de belasting op de kruin van het binnentalud vergelijkbaar te houden met die van de basisgeometrie.



Figuur 4-24 Voorbeelden van het nieuwe alternatieve grensprofiel in vergelijking met de basisgeometrie van het grensprofiel.

Dit grensprofiel kan ook minder dan 1 meter verlaagd worden, waarbij de breedte naar rato aangepast wordt. Een verlaging van een halve meter betekent dus bijvoorbeeld een verbreding van de kruin met 9 meter. Een en ander is schematisch toegelicht in Figuur 4-24.

4.7 Effect van de overstap op de BOI grensprofieldefinitie

4.7.1 Verschillen in de basisdimensies

In Tabel 4-3 is een vergelijking gegeven tussen de belangrijkste parameters voor het oude grensprofiel uit het WBI2017 en het nieuwe voor BOI.

De nieuwe grensprofieldefinitie is expliciet gekoppeld aan het faalpad duinafslag door de link te leggen tussen de geometrische parameters en de vervolprocessen na duinafslag. Hierbij is de nieuwe grensprofieldefinitie op een fundamenteel punt gewijzigd ten opzichte van de oude grensprofieldefinitie die is beschreven in het TRDA uit 2006. De hoogte van het grensprofiel boven de maatgevende waterstand h_{gp} wordt namelijk bepaald op basis van de lokaal optredende condities bij het duinfront, terwijl de hoogte van het oude grensprofiel een functie was van de offshore (golf)condities. Voor deze maatgevende condities werd eerder nog gebruik gemaakt van het rekenpeil. Nu is dit niveau gekoppeld aan het niveau van het maatgevende oplooppunt van de lange golven z_{nat} en daarmee direct gerelateerd aan de lokaal voor het duinfront aanwezige golfcondities.

Door deze wijziging is het toepassingsbereik van het grensprofiel flink vergroot en is deze beter toepasbaar in kustzones met meer complexe profielvormen of profielvormen die sterk afwijken van het referentieprofiel (zie §4.3.2).

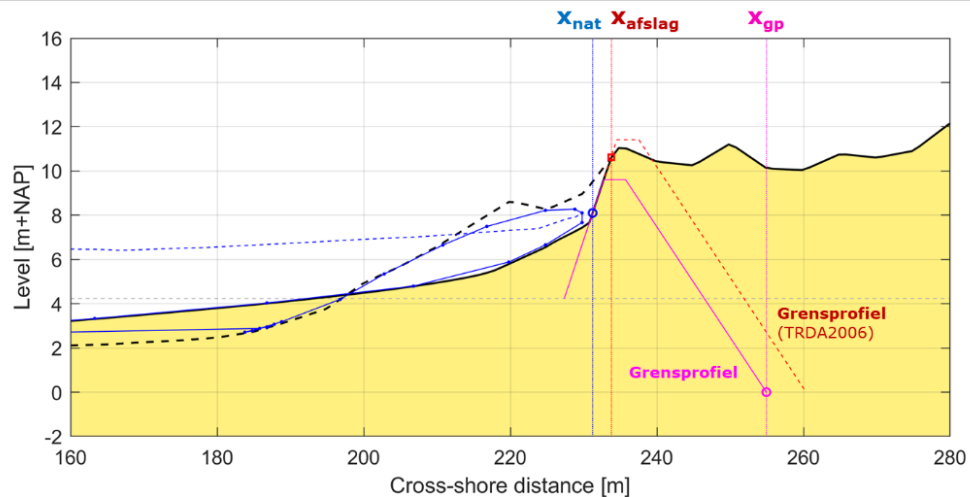
Tabel 4-3 Vergelijking tussen belangrijkste geometrische parameters die het oude (WBI) en nieuwe (BOI) grensprofiel beschrijven.

GEOMETRISCHE PARAMETER	Waarde in BOI	Waarde in WBI2017 (oud)
Profielvorm	Trapezium	Trapezium
Maatgevende waterstand	Z_{nat} -niveau	Rekenpeil (RP)
Taludhelling zeezijde [m/m]	1 : 1	1 : 1
Kruinhoogte (boven maatgevende waterstand) [m]	$h_{gp} = 1,5 \text{ m}$	$h_{gp} = \max(0,12 \cdot T_p \cdot \sqrt{H_s}; 2,5 \text{ m})$
Kruinniveau [m]	$Z_{gp} = Z_{nat} + h_{gp}$	$Z_{av} = RP + h_{gp}$
Kruinbreedte [m]	3 m	3 m
Taludhelling landzijde [m/m]	1 : 2	1 : 2

Een ander, minder in het oog springend verschil is de gebruikte offshore waterstand welke in beide gevallen gelijk is aan het zogenaamde rekenpeil. Omdat het rekenpeil echter gekoppeld is aan het gebruikte sterktemodel (Duros+ voor het oude en XBeach voor het nieuwe model) is ook hierin een verschil aanwezig. Gemiddeld genomen maakt XBeach gebruik van een relatief hoger gelegen rekenpeil en leidt dit voor een vergelijkbare grensprofielhoogte dus tot een hoger kruinniveau van het grensprofiel.

De overstap op de nieuwe grensprofieldefinitie resulteert dus in een breder toepassingsbereik, maar heeft ook enkele andere consequenties waar een gebruiker van het nieuwe instrumentarium rekening mee moet houden. Een belangrijke consequentie van het gebruik van de lokale hydraulische belasting voor de dimensionering van het grensprofiel is dat de grensprofielomvang – per definitie – afhankelijk wordt van de lokale profielligging. De kruinhoogte van het grensprofiel is weliswaar afgeregeld op basis van de oude grensprofielhoogte voor de standaard Holland-referentiesituatie, maar dit betekent niet dat de oude en nieuwe grensprofieldefinities altijd hetzelfde resultaat opleveren: het grensprofiel is voor de referentiesituatie *wel* hetzelfde, maar voor afwijkende profielvormen nadrukkelijk *niet*.

Figuur 4-25 toont als voorbeeld een vergelijking tussen beide grensprofieldefinities voor een raailocatie langs de Waddenkust (raai 3001000). Dit betreft een profiel met een relatief flauwe vooroever en een breed strand. De lokale belasting wordt daar dusdanig door het profiel beïnvloed dat het nieuwe grensprofiel resulteert in een (veel) kleinere benodigde omvang van het grensprofiel.



Figuur 4-25 Voorbeeld van het berekende nieuwe grensprofiel op basis van $[X_{nat}, Z_{nat}]$, de afgeregelde kruinhoogte (= 1,5 m boven Z_{nat}), een kruinbreedte van 3 m en een binnentaludhelling van 1 : 2. Raailocatie: 3001000, Waddenkust.

Concreet betekent dit dat bij een reeks duinafslagberekeningen voor één raailocatie (meerdere metingen/jaren), voor elke individuele berekening een andere grensprofielomvang berekend wordt. Dit was niet het geval bij de oude definitie, omdat de dimensie profielonafhankelijk was door het gebruik van offshore condities. De profielafhankelijkheid van de nieuwe grensprofieldefinitie is niet onwenselijk (in tegendeel zelfs), maar het vergt wel een iets andere benadering bij de interpretatie van de resultaten.

4.7.2 Verschillen in dimensionering alternatief grensprofiel

Ook zijn er belangrijke verschillen tussen de nieuwe alternatieve dimensies en de oude conform het TRDA uit 2006 (zie §4.2.3).

Ten eerste bestaat het nieuwe alternatieve grensprofiel uit een specifieke uitwisseling tussen breedte en hoogte van de kruin en niet uit het simpel inpassen van een vast volume waarbij de geometrie los wordt gelaten zoals voorheen. Dit komt mede doordat de afgeleide relatie voor de breedte-hoogte-uitwisseling niet aansluit bij het behoud van een vast volume boven het rekenpeil (of Z_{nat}).

Bovendien sluit een volumetrisch ingepast grensprofiel niet aan bij de overstromingskansfilosofie en de faalpadbenadering van het BOI, omdat de niet-gemodelleerde vervolprocessen niet expliciet terugkomen in de (minimum) dimensies of geometrie van een grensprofiel waarvoor de kans op een doorbraak verwaarloosbaar klein is.

In vergelijking tot het oorspronkelijk in 1987 afgeleide alternatieve grensprofiel is de breedte van een 1 m lager grensprofiel ook significant toegenomen. Nu bedraagt de hierbij benodigde breedte op basis van de laatste inzichten 3 plus 18 is 21 m terwijl deze conform Figuur 4-2 (op pagina 23) slechts 8 m bedroeg.

Ten tweede wordt alleen een verlaging toegestaan tot het niveau waarop lange golven tot overloop kunnen leiden, te weten een halve meter boven het Z_{nat} -niveau. Dit niveau ligt meestal hoger dan het rekenpeil + 1 m wat de minimale hoogte van het oude alternatieve grensprofiel was.

Referenties

- Alkyon. (2002). *Effect van zwaardere golfcondities op duinenkust - Verkenning effect grotere golfhoogte en langere golfperiode op mate duinafslag en veiligheid duinenkust*. Rapport A963, September 2002.
- Alkyon. (2003). *Ontwikkeling DuinToets versie 0.0; Ontwikkeling en toetsing probabilistische schil rond duinafslagprogramma DurosTA*. Eindrapportage A964, april 2003.
- Alkyon. (2004). *Ontwikkeling en verbetering toetsingsinstrumentarium duinveiligheid/DuinToets*. Rapport A1041, maart 2004.
- Arcadis en Deltares. (2022). *Validation of dune erosion model XBeach - Development of 'BOI Sandy Coasts'*. Auteurs: Coumou, L., Van Santen, R., Van der Baan, J., McCall, R., De Bakker, A., Quataert, E. en De Goede, R. Definitieve versie 3.0, 21 maart 2022. Achtergrondrapport bij het BOI. Gepubliceerd door Rijkswaterstaat.
- Arcadis en Deltares. (2023a). *Technische Leidraad Katern Zandige Waterkeringen*. Auteurs: Steetzel, H., Coumou, L., Van Santen, R., McCall, R., De Goede, R. en De Bakker, A. Definitieve versie 1.0, 3 februari 2023. Definitieve versie vanaf juli 2023 online te raadplegen via: tl.iplo.nl. Onderdeel van basisinstrumentarium BOI. Gepubliceerd door Rijkswaterstaat.
- Arcadis en Deltares. (2023b). *Semi-probabilistic model for XBeach - Definition of a semi-probabilistic method for 'BOI Sandy Flood Defences'*. Auteurs: Steetzel, H., Lenstra, K., Velhorst, R. en Van der Baan, J. Definitieve versie 3.1, 3 januari 2023. Achtergrondrapport basisinstrumentarium BOI. Gepubliceerd door Rijkswaterstaat.
- Arcadis en Deltares. (2023c). *Handleiding Overstromingskansanalyse Faalpad Duinafslag*. Auteurs: Coumou, L., Van Santen, R., Steetzel, H. en McCall, R. Definitieve versie 1.0, 3 februari 2023. Onderdeel van basisinstrumentarium BOI. Gepubliceerd door Rijkswaterstaat.
- Daly, C., Roelvink, D., Van Dongeren, A., De Vries, J., & McCall, R. (2012). Validation of an advective-deterministic approach to short wave breaking in a surf-beat model. *Coastal Engineering* (60), 69-83.
- De Vries, J., Van Gent, M., Walstra, D., & Reniers, A. (2008). Analysis of dune erosion processes in large-scale flume experiments. *Coastal Engineering*, 55(12), 1028-1040.
- Deltares. (2015a). *Handreiking Dijkbekledingen - Deel 5: Grasbekledingen*. In opdracht van Rijkswaterstaat WVL en Projectbureau Zeeweringen. Definitief.
- Deltares. (2015b). *Semi-probabilistisch toetsvoorschrift voor duinen ten behoeve van WTI2017*. Kenmerk 1220080-008, december 2015.
- Deltares. (2021a). *BOI - Scaling of dimensional parameters in XBeach*. Auteurs: De Bakker, A., Van der Lugt, M., De Vet, L., De Goede, R., McCall en R., Roelvink, D. Kenmerk 11205758-029-GEO-0002. Definitieve versie 0.2, 22 maart 2021. Achtergrondrapport bij het BOI.
- Deltares. (2021b). *Boundary condition guidelines for XBeach simulations - methodology for the representation of infragravity waves in varying water depth and wave conditions*. Auteurs: M. de Ridder, A. de Bakker, R. McCall en A. van Dongeren. Kenmerk 11205758-029-GEO-0003. Definitieve versie 0.2, 19 maart 2021. Achtergrondrapport bij het BOI.
- Deltares. (2021c). *XBeach BOI - Approaches to reduce calculation time*. Auteurs: De Goede, R., De Ridder, M., Quataert, E., McCall, R. Kenmerk 11205758-029-GEO-0012. Definitieve versie 1.0, 29 april 2021. Achtergrondrapport bij het BOI.

- Deltares. (2021d). *Memo: Voortgangsrapportage projectmanagement BOI Zandige Waterkeringen Fase 1*. Auteur: McCall, R. Kenmerk: 11206818-018-GEO-0002.
- Deltares. (2021e). *BOI Zandige Waterkeringen: XBeach testbed BOI Phase 1 release 2021 - Skillbed quality status report*.
- Deltares. (2022). *Gebruikershandleiding XBeach (Release BOI-phase3-5956, 5 december 2022)*. Actuele versie is online te raadplegen via xbeach.readthedocs.io.
- Deltares. (2022a). *Gebruikershandleiding MorphAn - Analysetool voor zandige kusten*. Versie 22.1.1., 19 december 2022.
- Deltares en Arcadis. (2019). *Plan van Aanpak Vernieuwd Instrumentarium Zandige Waterkeringen*. Auteurs: McCall, R., Van Santen, R., Van Dongeren, A. en Steetzel, H. Kenmerk 11203720-014-GEO-0001.
- Deltares en Arcadis. (2020). *Wave spreading and sediment size effects in the XBeach model*. Auteurs: McCall, R., Quataert, E., De Bakker, A., De Ridder, M., Van Santen, R., Steetzel, H. Kenmerk 11203720-030-GEO-0002. Definitieve versie 0.1, 5 maart 2020. Achtergrondrapport bij het BOI.
- Deltares en Arcadis. (2022). *BOI Standaard instellingen - Kalibratie van de XBeach model parameters*. Auteurs: McCall, R., De Bakker, A., Quataert, E., De Goede, R., De Vet, L., De Ridder, M., Van Der Lugt, M., Roelvink, D., Van Santen, R., Steetzel, H en Coumou, L. Kenmerk: 11206818-018-GEO-0006. Definitieve versie 1.0, 3 juni 2021. Achtergrondrapport bij het BOI. Gepubliceerd door Rijkswaterstaat.
- ENW. (2007). *Technisch Rapport Duinafslag - Beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering ten behoeve van Voorschrift Toetsing op Veiligheid 2006 (TRDA2006)*.
- EurOtop. (2018). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures - An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application*. Auteurs: Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. en Zanuttigh, B. Second Edition. www.overtopping-manual.com.
- Graaff, J. v. (2022). Toelichting op achtergronden geotechnische aspecten grensprofieldefinitie (persoonlijke communicatie).
- Graaff, J. van de. (1984). *Probabilistische methoden bij het duinontwerp; Achtergronden van de TAW-Leidraad duinafslag*. Technische Universiteit Delft.
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2022). *Omgevingsregeling inclusief bijlage XXXIIA (Procedure beoordeling primaire waterkeringen) en XXXIIB (Randvoorwaarden beoordeling primaire waterkeringen)*. Onderdeel van procesinstrumentarium BOI.
- Rijkswaterstaat. (2022). *Handleiding Overstromingskansanalyse*. Conceptversie 0.9, december 2022. Onderdeel van basisinstrumentarium BOI.
- Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A., Van Thiel de Vries, J., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering* (56), 1133-1152. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2009.08.006.
- Roelvink, J., McCall, R., Mehvar, S., Nederhoff, K., & Dastgheib, A. (2018). Improving predictions of swash dynamics in XBeach: The role of groupiness and incident-band runup. *Coastal Engineering* (134), 103-123. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2017.07.004.
- Steetzel, H. (1993). *Cross-shore transport during storm surges*. PhD. Thesis Delft University of Technology. September 1993.
- TAW. (1984). *Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering*.

- Van Gent, M., De Vries, J., Coeveld, E., De Vroeg, J., & Van de Graaff, J. (2008). Large-scale dune erosion tests to study the influence of wave periods. *Coastal Engineering*, 55(12), 1041-1051.
- Van Thiel de Vries, J. S. (2009). *Dune erosion during storm surges*. PhD thesis, Fac. of Civ. Eng. and Geosciences, Delft Univ. of Technology, Delft, Netherlands.
- Vellinga, P. (1986). *Beach and dune erosion during storm surges*. PhD. Thesis Delft University of Technology. December 1986.
- Waterloopkundig Laboratorium. (1983). *Golfoploop en -overslag bij duinen tijdens superstormvloed*. Verslag modelonderzoek M1819-II, februari 1983.
- Waterloopkundig Laboratorium. (1984). *Golfoploop en -overslag bij duinen tijdens superstormvloed, aanvullend onderzoek ten behoeve van de bepaling van de kruinhoogte van het restprofiel (leidraad duinafslag)*. Verslag modelonderzoek M1819-IV, augustus 1984.
- Waterloopkundig Laboratorium. (1987). *Breedte-hoogteverhouding lage grensprofielen - Oriënterend onderzoek naar de relatieve veiligheid van lage, brede grensprofielen*. Verslag onderzoek H298 deel IV.
- WL Delft Hydraulics, Alkyon en TU Delft. (2006a). *Dune erosion - Product 1: Deterministic dune erosion prediction method*. Rapport H4357, januari 2006.
- WL Delft Hydraulics, Alkyon en TU Delft. (2006b). *Dune erosion - Product 2: Large-scale model tests and dune erosion prediction method*. Rapport H4357, mei 2006.
- WL Delft Hydraulics, Alkyon en TU Delft. (2007). *Dune erosion - Product 3: Probabilistic dune erosion prediction method*. Rapport H4357/A1414, februari 2007.

Bijlage A: Overzicht BOI-instellingen voor XBeach

Standaard BOI-parameterinstellingen voor toepassing van het sterktemodel XBeach voor beoordeling en ontwerp op de Nederlandse kust zijn gekalibreerd op basis van laboratorium- en veldmetingen (Arcadis en Deltares, 2022). Een overzicht van de gekalibreerde instellingen zoals bepaald is weergegeven in Tabel A – 1 (zie ook (Deltares en Arcadis, 2022)).

Tabel A – 1 Overzicht van definitieve BOI-standaardinstellingen voor het sterktemodel XBeach die behandeld worden in (Arcadis en Deltares, 2022).

Modelparameter	Beschrijving	Waarde / instelling	Afleiding
bedfriction	Formulering van de bodemwrijving voor stroming	<i>Manning</i>	Deel 1 van Deltares/Arcadis (2022); op basis van laboratoriumdata.
bedfriccoef	Waarde van de bodemwrijvingscoëfficiënt	0,02 [-]	Deel 1 van Deltares/Arcadis (2022); op basis van laboratoriumdata.
break	Formulering van korte golfbreking	<i>Roelvink_Daly</i> ⁶	Deel 1 van Deltares/Arcadis (2022); op basis van laboratoriumdata.
gamma	Brekingscoëfficiënt in golfbrekingsformulering	0,46 [-]	Deel 1 van Deltares/Arcadis (2022); op basis van laboratoriumdata.
gamma2	Coëfficiënt einde golfbreking in <i>Roelvink_Daly</i>	0,34 [-]	Deel 1 van Deltares/Arcadis (2022); op basis van laboratoriumdata.
alpha	Intensiteit van golfbreking in golfbrekingsformulering	1,38 [-]	Deel 1 van Deltares/Arcadis (2022); op basis van laboratoriumdata.
beta	Coëfficiënt voor rollerdissipatie	0,08 [-]	Deel 1 van Deltares/Arcadis (2022); op basis van laboratoriumdata.
form	Formulering van sedimenttransport	<i>VanThiel_VanRijn</i> ⁷	Deel 1 van Deltares/Arcadis (2022); op basis van laboratoriumdata.
waveform	Formulering van golf-nietlineariteit	<i>VanThiel</i> ⁴	Deel 1 van Deltares/Arcadis (2022); op basis van laboratoriumdata.
facSk	Coëfficiënt bijdrage golf skewness aan sedimenttransport	0,15 [-]	Deel 1 van Deltares/Arcadis (2022); op basis van laboratoriumdata.
facAs	Coëfficiënt bijdrage golf asymmetrie aan sedimenttransport	0,20 [-]	Deel 2 van Deltares/Arcadis (2022); op basis van velddata.
alfaD50	Coëfficiënt (d_{D50}) korrelgroottegevoeligheid in sedimenttransport	0,4 [-]	Deel 2 van Deltares/Arcadis (2022); op basis van velddata.
wetslp	Coëfficiënt voor ondiep water avalanching	0,15 [-]	Deel 2 van Deltares/Arcadis (2022); op basis van veld

⁶ Zie (Daly, Roelvink, Van Dongeren, De Vries, & McCall, 2012)

⁷ Zie (Van Thiel de Vries, 2009)

Overige relevante BOI-standaardinstellingen voor modelparameters zoals afgeleid in andere rapportages zijn opgenomen in Tabel A - 2. De afleiding is beschreven in onder andere (Deltares, 2021a) en (Deltares, 2021c).

Tabel A - 2 Overzicht van overige BOI-standaardinstellingen voor het sterktemodel XBeach.

Modelparameter	Beschrijving	Waarde / instelling	Afleiding
wbcEvarreduce	Coëfficiënt (a_E) voor het verdisconteren van richtingspreidingseffecten in 1D modellen	0,3 [-] voor veldcases (met golfrichtings-spreiding) 1,0 [-] voor golfgoot experimenten (zonder golfrichtingsspreiding)	Deltares (2021c)
CFL	Waarde voor Courant–Friedrichs–Lewy numerieke stabiliteitscriterium	0,95 [-] (voor 1D modellen)	Deltares (2021c)
fixedAvaltime	Optie om duin avalanching met vaste (1) of golfperiode-afhankelijke (0) tijdschaal uit te rekenen	0 [-]	Deltares (2021a)
nTrepAvaltime	Aantal golfperiodes in golfperiode-afhankelijke tijdschaal voor avalanching	1,0 [-]	Deltares (2021a)
oldTmin	Optie om dimensiehoudende (1) of dimensieloze (0) minimum adaptatietijdschaal voor sedimentconcentratie toe te passen	0 [-]	Deltares (2021a)
dtLimTs	Aantal numerieke tijdstappen voor minimum adaptatietijdschaal voor sedimentconcentratie	5 [-]	Deltares (2021a)
deltaHmin	Fractie van de brekende golfhoogte die toegevoegd wordt aan de waterdiepte ter bepaling van de retourstroom	0,1 [-]	Deltares (2021a)
hswitch	Waterdiepte voor overgang tussen droge en natte avalanching	0,0 [m]	Deltares (2021a)
eps	Minimum numerieke waterdiepte voor natte cellen	0,005 [m] (op prototypeschaal)	Deltares (2021a)
eps_sd	Snelheidsverschil tussen aanliggende rekencellen waarbij van een impuls-behoudende numerieke rekenschema overgegaan wordt naar een energiebehoudend numeriek rekenschema	0,50 [m/s] (op prototypeschaal)	Deltares (2021a)
tidetype	Formulering voor getijde randvoorwaarden	hybrid [-]	Deltares (2021d)
wbcScaleEnergy	Optie om de op de modelrand gegenereerde golftijdserie wel (1) of niet (0) te schalen naar de opgelegde golfhoogte	1 [-]	Deltares (2021d)
wbcRemoveStokes	Optie om de op de modelrand gegenereerde fluxtijdserie wel (1) of niet (0) de IG Stokes drift te compenseren	1 [-]	Deltares (2021d)
nuhfac	Factor om door roller-geïnduceerde viscositeit mee te nemen in de bewegingsvergelijkingen	0,0 [-]	Deltares/ Arcadis (2020)
random	Optie om een simulatie-specifieke randomizer wel (1) of niet (0) toe te passen in het genereren van golfrandvoorwaarden	0 [-]	Deltares (2021c)
morfac	Morfologische versnellingsfactor	1–4 [-] (afhankelijk van benodigde versnelling rekentijd)	Deltares (2021c)

Bijlage B: Overzicht MatLab-scripts voor opzet en naverwerking XBeach duinafslagberekeningen

Deze bijlage geeft een overzicht van MatLab-scripts die gebruikt worden voor de opzet en naverwerking van duinafslagberekeningen met de BOI-versie van XBeach. Deze scripts vormen de basis voor de routines die in MorphAn (vanaf versie 22.1.1) ingebouwd zijn om duinveiligheidsberekeningen uit te voeren. Een actueel overzicht van deze scripts is terug te vinden op de OET repository:

<https://svn.oss.deltares.nl/repos/openearthtools/trunk/matlab/applications/MorphAn/boi>.

B.1 Controle waterdiepte aan zeezijde

Om een overschatting van lange-golfhoogte te voorkomen is door Deltares een minimaal benodigde startdiepte afgeleid (Deltares, 2021b). Deze minimaal benodigde startdiepte kan worden berekend met het MatLab-script `'check_profile.m'`. De in- en uitvoer van deze functie wordt hieronder beschreven:

```
function [d_start, slope] = check_profile(Hm0, Tp, d_profile,
                                         varargin)

Invoer:
Hm0 [m]      = significante golfhoogte tijdens piek van de storm
Tp [s]       = golfpiekperiode tijdens piek van de storm
d_profile [m] = startdiepte bestaand profiel tijdens stormpiek(dus;
                    waterstand stormpiek - bodemligging offshore rand)

Uitvoer:
d_start [m]  = minimaal benodigde startdiepte
slope [-]    = minimale helling van kunstmatig profiel
```

B.2 Kunstmatig profielverlenging

In gevallen waarin de beschikbare kustdwarse profielgegevens niet tot de vereiste waterdiepte reiken, is een tijdsefficiënte aanpak voorgesteld om aan de eisen van de randvoorwaarden te voldoen (Deltares, 2021b). Bij deze benadering wordt het profiel verlengd tot de (tijdens de piek van de storm) vereiste startwaterdiepte met een steil kunstmatig profiel. De helling waarmee het profiel verlengd kan worden (1/10- of 1/50-helling) wordt eveneens bepaald door het MatLab-script `'check_profile.m'`.

Voor nadere onderbouwing wanneer welke helling wordt gehanteerd wordt verwezen naar (Deltares, 2021b).

B.3 Resolutie van het rekengrid

Om ervoor te zorgen dat kustprofielen op verschillende locaties op een consistente maar zo efficiënt mogelijke manier beoordeeld kunnen worden met XBeach, zijn er door Deltares richtlijnen opgesteld voor de gewenste resolutie van het rekengrid en het resolutieverloop (Deltares, 2021c).

Voor kustprofielen die voldoen aan de vereiste startdiepte, of reeds kunstmatig verlengd zijn tot de gewenste diepte, kan het rekengrid worden opgezet met het MatLab-script `'xb_grid_xgrid2.m'`.

De in- en uitvoer van deze functie wordt hieronder beschreven:

```
function [xgr zgr] = xb_grid_xgrid2(xin, zin, Tm=Tp, dxmin=1,
    ppwl=40, wl=3, varargin)

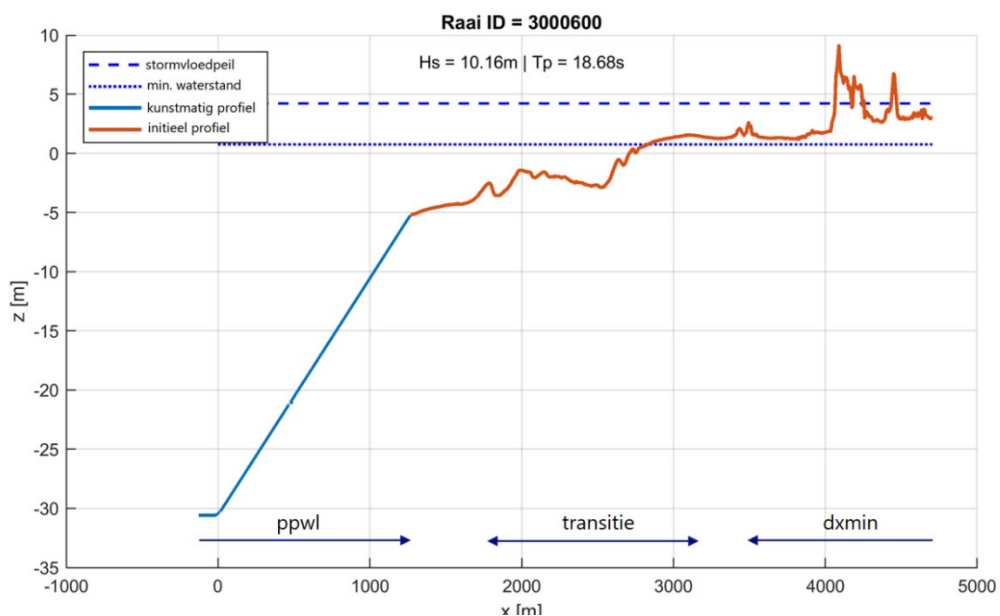
Invoer:
xin   = vector met kustdwarse afstanden; toenemend naar de kust
zin   = vector met bodemhoogtes; positief omhoog

Optionele invoer::
Tm [s] = golfperiode tijdens stormpiek voor golven op modelrand
dxmin [m] = minimaal benodigde kustdwarse gridgrootte (typisch op
    land) (default = 1)
wl [m] = waterstand ten opzichte van de bodem om waterdieptes te
    schatten (default = 3; duinvoet)
ppwl [-] = aantal gridpunten per golflengte (default = 40)

Uitvoer:
xgr   = vector met grid-locaties in kustdwarse richting; toenemend
    naar de kust
zgr   = vector met bodemhoogtes op grid-locaties; positief omhoog
```

Nadat een rekengrid is gegenereerd met 'xb_grid_xgrid2.m' worden er aan de zeewaartse rand nog een drietal cellen toegevoegd met hetzelfde bodemniveau als het meest zeewaartse punt. Een indicatief voorbeeld van een rekengrid dat kunstmatig is verlengd tot een minimaal vereiste diepte is weergegeven in onderstaande figuur.

Hierin is eveneens weergegeven waar de parameters 'dxmin' (nabij de kust door de minimaal benodigde grid grootte) en 'ppwl' (het minimaal aantal punten per golflengte) met name hun uitwerkingen hebben op de gridresolutie.



Figuur B - 1 Voorbeeld van een rekengrid dat is verlengd tot de minimaal benodigde diepte voor Jarkus-profiel 3000600. De gridresolutie in kustdwarse richting wordt bij de zeewaartse rand met name beïnvloed door het minimaal aantal punten per golflengte (ppwl), en nabij de kust door de minimaal benodigde gridgrootte (dxmin).

B.4 Genereren randvoorwaarden

Met behulp van het MatLab-script '*generate_timeseries_HR_morphan.m*' kunnen de rekenwaarden worden omgezet in een tijdsafhankelijk stormverloop voor waterstand en golven, welke gebruikt kunnen worden als hydraulische randvoorwaarden voor een XBeach berekening.

De in- en uitvoer van deze functie wordt hieronder beschreven:

```
script generate_timeseries_HR_morphan

Invoer:
WLmax      = Maximaal stormvloedpeil [m]@ stormpiek
Hsmax      = Significante golfhoogte [m] @ stormpiek
Tpmax      = Piek golfperiode [s] @ stormpiek
tidalAMPL  = Getij-amplitude [m] (uitgaande van M2)

Uitvoer:
xb_wl      = matrix met tijdsverloop (1e kolom), waterstanden aan de
            zeewaartse rand (2e kolom) en waterstanden aan de
            landkant (3e kolom)
xb_waves   = matrix met tijdsverloop (1e kolom), tijdsinterval (2e
            kolom), significante golfhoogte gedurende tijdsinterval
            (3e kolom) en piek golfperiode tijdens tijdsinterval (4e
            kolom)
```

B.5 Duinafslagindicator erosievolume

Het afslagvolume boven stormvloedpeil kan worden berekend met het MatLab-script '*get_erosionvolume.m*'.

De in- en uitvoer van deze functie wordt hieronder beschreven:

```
function [EROVOL,X,Z0,Z1] = get_erosionvolume(x,zi,ze,maxWL)

Invoer:
x          = x-grid
zi         = initieel profiel
ze         = erosie profiel
maxWL     = stormvloedpeil

Uitvoer:
EROVOL    = erosievolume boven stormvloedpeil
X,Z0,Z1   = profielen inclusief snijpunten van profielen met elkaar
            en profielen met maxWL
            voor visualisatie zoals in figuur)
```

B.6 Duinafslagindicator veiligheidsindicatoren

Aanvullende indicatoren kunnen worden uitgerekend met het MatLab-script `'xbBOI_safetyindicators.m'`.

Deze hebben betrekking op:

- De horizontale positie van het afslagpunt (X_{afslag});
- Het verticale niveau van het afslagpunt (Z_{afslag});
- De horizontale positie van het maatgevend oplooptniveau van de lange golven (X_{nat});
- Het verticale niveau van het maatgevend oplooptniveau van de lange golven (X_{nat});
- De horizontale positie van de landzijde van het grensprofiel op NAP-niveau (X_{gp});
- Het verticale niveau van deze laatste (Z_{gp}) (= NAP).

De in- en uitvoer van deze functie wordt hieronder beschreven:

```
function [xafslag,zafslag, xnat,znat, xgp,zgp, grensprf] =
    xbBOI_safetyindicators(xbdirout)

Invoer:
xbdirout = uitvoer locatie/folder van XBeach simulatie

Uitvoer:
xafslag = locatie van afslagpunt
zafslag = niveau behorend bij afslagpunt
xnat    = positie behorend bij maatgevend oplooptniveau
znat    = maatgevend oplooptniveau
xgp     = positie van de landzijde van het grensprofiel op het
         niveau NAP
zgp     = niveau behorend bij xgp; NAP
grensprf = grensprofiel
```

Bijlage C: Detailresultaten alternatief grensprofiel: breedte-hoogte-uitwisseling

Het achterliggende doel van deze uitwerking is om te komen tot een alternatieve dimensionering van het grensprofiel, waarbij gezocht is naar de benodigde (extra) breedte van de kruin voor een lager kruinniveau. Achterliggend uitgangspunt is dat er voor een lager niveau (met dus iets meer golfoverslag) een kruinbreedte kan gevonden welke op de binnenkruinrand een vergelijkbaar eroderend vermogen laat zien. Dit is in lijn met de studie uit 1987 (Waterloopkundig Laboratorium, 1987) die de basis heeft gevormd voor het oude alternatief grensprofiel conform het TRDA uit 2006 en welke onderdeel was van het WBI2017-instrumentarium.

Als proxy voor dit eroderende vermogen is gebruik gemaakt van zowel de maximale snelheid als het debiet in de overslaande golven. Vergelijkbare proxies worden ook voor dijken gebruikt om de belasting op de bekleding en de mate van erosie door overslag te bepalen op de kruin en het binnentalud (EurOtop, 2018; Deltares, 2015a).

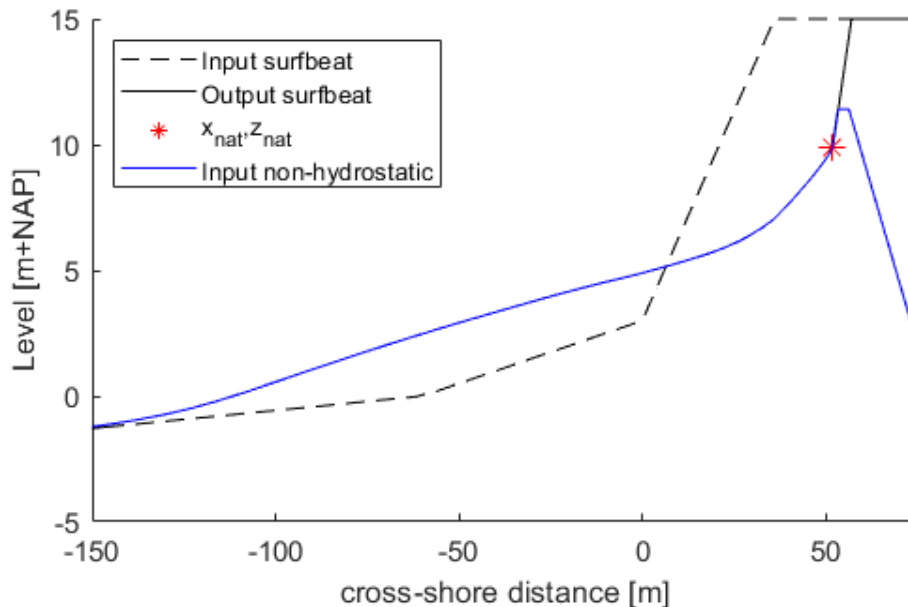
Een dergelijk verband tussen breedte en hoogte van de kruin is hiertoe onderbouwd met de resultaten van berekeningen met de non-hydrostatische versie van het XBeach-model. In deze specifieke versie van het model worden ook de korte golven en dus ook de overslag gesimuleerd. Deze berekeningen zijn uitgevoerd voor een specifiek afslagprofiel (op basis van het referentieprofiel) voor combinaties van een reeks van kruinhoogtes en kruinbreedtes.

Opzet XBeach-simulaties

De invoer van de non-hydrostatische berekeningen is gebaseerd op de uitvoer van een enkele surfbeat berekening. Bij deze berekening met de surfbeat versie van het XBeach-model (release BOI-phase2-5924, 15 juli 2022) is het referentieprofiel geforceerd met de 1/30.000 per jaar condities zoals geldig voor Hoek van Holland. In deze berekening is gebruik gemaakt van de standaard BOI-instellingen met uitzondering van *wbcEvarreduce*, welke op 1 is gezet omdat deze waarde op dit moment nog de enige keuze is in de non-hydrostatische versie van XBeach.

In de uitvoer van de surfbeat berekening is gezocht naar het tijdstip wanneer Z_{nat} het verst landwaarts op profiel (x_{nat}) een waarde heeft, zie Figuur C - 1.

Het profiel en de optredende randvoorwaarden (golven en waterstand) op dit tijdstip in de berekening vormen de basis van de invoer van non-hydrostatische berekeningen. De forcering in deze berekening is constant tijdens de gehele simulatieduur van 1 uur. Verder zijn veranderingen in bodemligging uitgeschakeld.



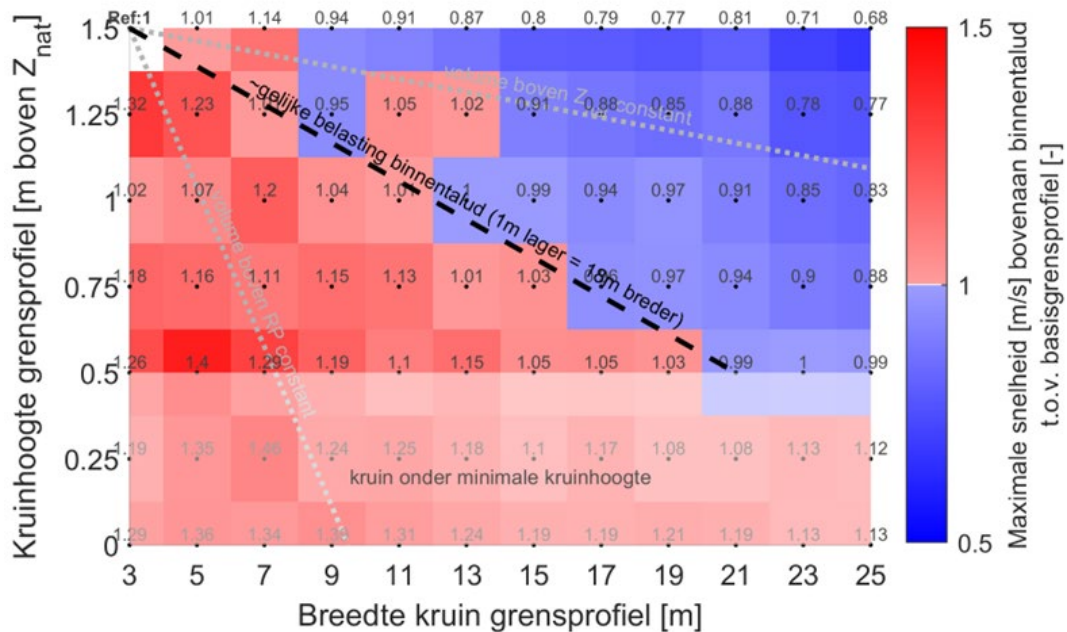
Figuur C - 1 De in- en uitvoer van de surfbeat berekeningen (zwart), waarbij de laatste de basis vormt van de invoer van de non-hydrostatische berekeningen (blauw). Landwaarts van $[X_{nat}, Z_{nat}]$ (rood) is het grensprofiel ingepast. In dit figuur is de basisgeometrie van het grensprofiel getoond met een kruinhoogte van 1,5 m (boven Z_{nat}) en kruinbreedte van 3 m.

In deze non-hydrostatische berekeningen is het grensprofiel landwaarts van X_{nat} ingepast (voorbeeld is het blauwe profiel in Figuur C - 1) in plaats van het resterend duin. Er zijn verschillende berekeningen uitgevoerd waarbij de referentie kruinhoogte van 1,5 m (boven Z_{nat}) in stappen van 0,25 m is verlaagd tot een waarde van 0 m. Voor de breedte vormt 3 m de referentie en is deze in stappen van 1 m verhoogd tot 25 m. Op deze wijze is een matrix gevuld met zowel de maximale overslag (debiet) als de maximaal optredende snelheid op de binnenkruinrand.

Resultaten XBeach non-hydrostatische simulaties

Een voorbeeld van een dergelijke matrix is getoond in Figuur C - 2. Deze toont de maximale stroomsnelheid aan de landwaartse rand van de kruin voor de verschillende kruinhoogtes en -breedtes. De maximale snelheid op dit punt is een goede indicator voor de belasting op het binnentalud aangezien de instantane erosie direct afhankelijk is van deze waarde.

In de referentiesituatie (kruinhoogte van 1,5 m boven het Z_{nat} -niveau en kruinbreedte van 3 m) bedraagt de maximale snelheid 6,2 m/s. In de matrix in Figuur C - 2 zijn de waardes vergeleken met deze referentiewaarde, waarbij hogere waardes een rode achtergrond kleur hebben en lagere blauw.

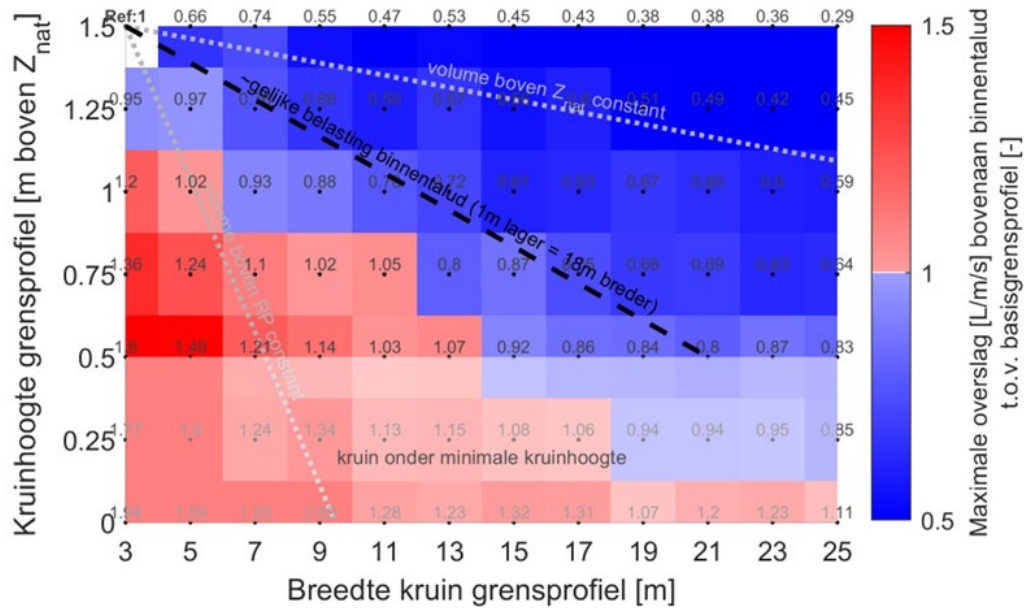


Figuur C - 2 De maximale stroomsnelheid op de binnenkruinrand voor de verschillende kruinhoogtes en -breedtes relatief ten opzichte van de waarde behorende bij de basisgeometrie van het grensprofiel. De getallen geven in de matrix geven de relatieve maximale snelheid weer, waarbij een rode (blauwe) achtergrond aangeeft dat deze waarde hoger (lager) is dan de referentiewaarde van 6,2 m/s (linksboven in de matrix).

De grens tussen blauwe en rode waardes is een belangrijke indicatie voor een belasting op het binnentalud waarbij deze gelijk aan de referentiesituatie. Op basis van deze parameter is een verhouding tussen breedte en hoogte van de kruin voor gelijke belasting van 1:18 afgeleid. Dit is in Figuur C - 2 met een zwarte gebroken lijn weergegeven.

Ook getoond zijn de grijze lijnen met gelijk volume boven rekenpeil (RP) – als vergelijking met het volumetrisch inpasbaar alternatief grensprofiel conform het WBI2017 - en gelijk volume boven Z_{nat} . De 1:18-lijn valt daartussen. Daarnaast zijn de kruinhoogtes onder de 0,5 m boven Z_{nat} lichter gekleurd: de kruinhoogte is in deze zone lager dan de benodigde minimale kruinhoogte zoals toegelicht in Bijlage D van deze rapportage.

Figuur C - 3 toont eenzelfde figuur als Figuur C - 2 maar dan met de maximale overslag voor de verschillende grensprofielen, waarbij dezelfde vergelijking met de referentiewaarde is gemaakt. Deze parameter toont een vergelijkbaar beeld met de maximale snelheid. De hierboven geïdentificeerde relatie van gelijke belasting (grensprofiel 18 m breder bij 1 m lager) verloopt parallel aan de scheiding tussen de waardes die hoger (rood) en lager (blauw) zijn dan de referentiewaarde.



Figuur C - 3 De maximale overslag op de binnenkruinrand voor de verschillende kruinhoogtes en -breedtes relatief ten opzichte van de waarde voor de basisgeometrie van het grensprofiel. De getallen geven in de matrix geven de relatieve maximale overslag weer, waarbij een rode (blauwe) achtergrond aangeeft dat deze waarde hoger (lager) is dan de referentiewaarde van 256 l/m/s (linksboven in de matrix).

Conclusie uitwisseling kruinhoogte voor -breedte

Op basis van de XBeach-resultaten volgt dat een verlaging van het kruinniveau van het grensprofiel met 1 m vraagt om een 18 m bredere kruin ten opzichte van de basiswaarde van 3 m. De breedte van een 1 m verlaagde kruin komt daarmee op 18 plus 3 is 21 m.

Bijlage D: Detailresultaten alternatief grensprofiel: minimale kruinhoogte

In het grensprofiel met alternatieve dimensies kan de kruinhoogte verlaagd worden mits de kruin breder wordt. Hierbij is het uitgangspunt dat (1) de belasting door overslag van korte golven (eroderend vermogen) op de binnenkruinrand gelijk blijft en (2) de belasting door overloop door lange golven verwaarloosbaar klein is. Zo blijft de bijbehorende kans op overstromen en falen van het duin vergelijkbaar bij gebruik van het grensprofiel met de basisgeometrie en de alternatieve dimensies.

Vanwege het tweede uitgangspunt kan het grensprofiel maximaal verlaagd worden tot het niveau $Z_{gp,min}$. Als de kruinhoogte onder dit niveau zou liggen, is de kans groot dat lange golven voor overloop over het grensprofiel zorgen en niet wordt voldaan aan het uitgangspunt waarbij de kans op falen verwaarloosbaar klein moet blijven. Deze minimale kruinhoogte is bepaald op basis van het maatgevende lange-golf-oplooppniveau in XBeach: het zogenaamde natte punt.

Ten behoeve van het verkrijgen van reproduceerbare resultaten, wordt in de standaard BOI-XBeach-berekeningen het opgegeven JONSWAP-spectrum omgezet in een golftijdserie op de offshore rand met behulp van een vaste 'random-factor' (instelling: $random = 0$). Hierdoor zijn de golftijdserie en daarmee de hydrodynamische en morfologische resultaten - waaronder het maatgevende lange-golf-oplooppniveau Z_{nat} - van een herhaalde simulatie altijd hetzelfde. Dit impliceert dat het afgeleide Z_{nat} -niveau feitelijk een toevallige trekking is uit een grotere populatie van Z_{nat} -niveaus.

Om voldoende zeker te zijn dat het alternatief grensprofiel niet verlaagd wordt tot een niveau waar lange golven overheen kunnen lopen, moet er ook rekening worden gehouden met de spreidingsmaat in dit Z_{nat} -niveau. Met behulp van een reeks aan berekeningen voor verschillende dwarsprofielen, waarin de trekking per simulatie wordt gevarieerd (instelling: $random = 1$), is deze spreidingsmaat bepaald.

Opzet XBeach-simulaties om spreiding in Z_{nat} te bepalen

De spreidingsmaat in maatgevende lange-golf-oplooppniveau Z_{nat} is bepaald voor (1) het referentieprofiel en (2) de 26 'basis' Jarkus-profielen verspreid langs de Nederlandse Noordzeekust (profielopname uit 2020). Als randvoorwaarden zijn de BOI-rekenwaarden voor condities horend bij een kans op doorsnedeniveau gelijk aan de signaleringswaarde op het trajectniveau gehanteerd per profiel (zonder correctie voor het lengte-effect).

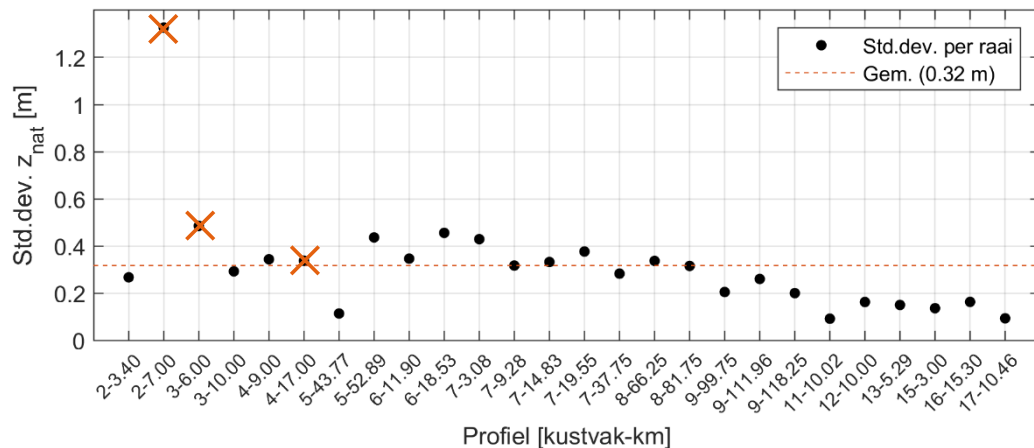
Voor elk profiel is eerst een 'standaard' BOI-XBeach (release BOI-phase2-5924, 15 juli 2022) surfbeatsom gedraaid, met de vaste random-factor ($random = 0$) en morfologische ontwikkeling aan ($morphology = 1$). Voor deze simulatie is de locatie van het natte punt bepaald en het uur waarin dit punt bereikt wordt. Vervolgens is een nieuwe simulatie opgezet met de bodem en de hydraulische randvoorwaarden horend bij de situatie op dit uur. In deze simulatie is de eerdergenoemde randomfactor op 1 gezet, en de morfologie weer uitgezet. Deze simulatie is vervolgens 20 maal opnieuw aangezet voor dit ene uur, dit om te bepalen hoe het lange-golf-oplooppniveau varieert voor de verschillende 'trekkingen' in de golftijdserie.

Voor elke set van 20 berekeningen per profiel is vervolgens de standaarddeviatie in het Z_{nat} -niveau bepaald.

Resultaten XBeach-simulaties

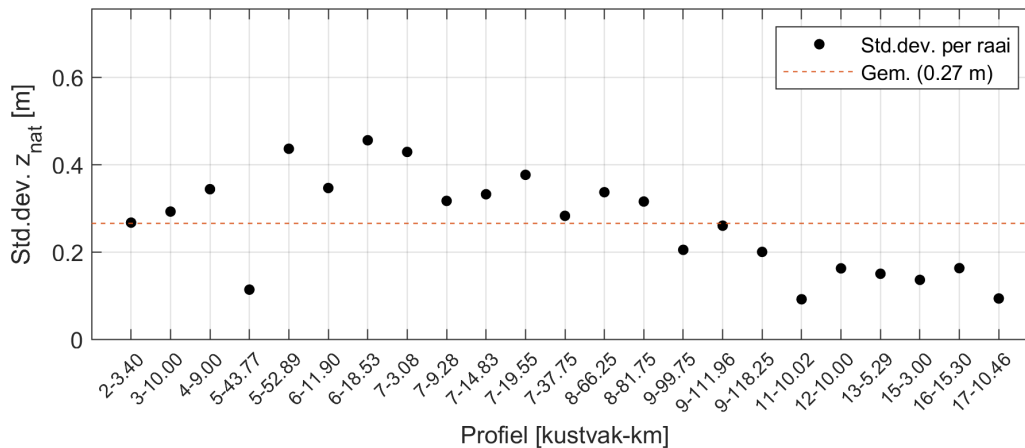
Voor het referentieprofiel bedraagt de standaarddeviatie op basis van deze 20 simulaties met random variatie in de golftijdserie 0,15 m.

De standaarddeviatie over de 20 simulaties voor de 26 basisprofielen is over het algemeen groter en weergegeven in Figuur D - 1. Hierin is te zien dat de standaarddeviatie varieert tussen de 0,09 en 0,48 m, met een uitschieter van maar liefst 1,3 m. In drie van deze dwarsprofielen verspringt het natte punt tussen twee verschillende duinregels doordat de lange golven in de ene simulatie net wel en in de andere simulatie net niet over een duinregel heen lopen. Deze profielen zijn met een kruisje weergegeven in Figuur D - 1. Zeker voor profiel 2-700 resulteert dit in een groot verschil in Z_{nat} en daarmee een zeer grote standaarddeviatie. Aangezien in deze profielen de variatie in Z_{nat} gedomineerd wordt door de profielvorm van het duin in plaats van de random variatie in de golftijdserie, worden deze profielen niet representatief beschouwd voor deze analyse en verder buiten beschouwing gelaten.



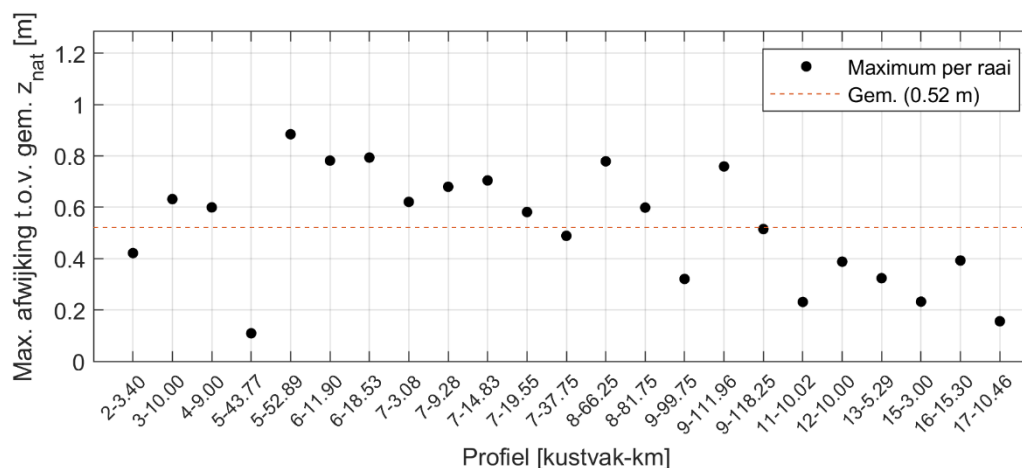
Figuur D - 1 Standaarddeviatie in het lange-golf-oplooppniveau Z_{nat} voor alle 26 basisprofielen. Oranje kruisjes markeren profielen waarbij het natte punt tussen verschillende duinregels verspringt in de 20 simulaties.

Het resultaat voor de 23 overgebleven profielen is weergegeven in Figuur D - 2. Gemiddeld genomen is de standaarddeviatie voor deze profielen 0,27 m, met een maximale waarde van 0,46 m.



Figuur D - 2 Standaarddeviatie in het lange-golf-oploophniveau Z_{nat} voor de 23 basisprofielen waarbij het natte punt in de 20 simulaties op dezelfde duinregel ligt.

Naast de standaarddeviatie, is ook de maximale afwijking naar boven van Z_{nat} ten opzichte van de gemiddelde Z_{nat} per profiel bepaald. Voor het Hollands referentieprofiel is deze maximale afwijking 0,3 m. De maximale afwijking voor de 23 profielen waarbij het natte punt in de 20 simulaties op dezelfde duinregel ligt, is weergegeven in Figuur D - 3 en varieert van 0,1 tot 0,9 m, met een gemiddelde van 0,5 m.



Figuur D - 3 Maximale afwijking (naar boven) ten opzichte van het gemiddelde van het lange-golf-oploophniveau Z_{nat} voor de 23 basisprofielen waarbij het natte punt in de 20 simulaties op dezelfde duinregel ligt.

Conclusie minimaal benodigd kruinniveau alternatief grensprofiel

Als het alternatieve grensprofiel tot maximaal een halve meter boven Z_{nat} wordt verlaagd ($Z_{gp,min} = Z_{nat} + 0,5$ m), kan met voldoende zekerheid gesteld worden dat de lange golven niet over het grensprofiel heen lopen. Daarmee wordt aan het tweede uitgangspunt voor het alternatieve grensprofiel voldaan, namelijk dat de belasting door overloop door lange golven verwaarloosbaar klein is en dus ook de kans op doorbraak als gevolg van deze lange golven verwaarloosbaar klein is. Dit laatste onder de voorwaarde dat de verlaagde kruin wel voldoende breed is (zie Bijlage C voor deze uitwerking).

Deze waarde van 0,5 m boven Z_{nat} betekent namelijk dat:

- Voor *alle* 23 representatief beschouwde profielen én het Holland referentieprofiel de kruin van het grensprofiel *minstens één standaarddeviatie* boven het Z_{nat} in de basissom (met *random* = 0) ligt. Dit betekent dat in alle gevallen de kans groter dan grofweg 84% is dat het maatgevend lange-golf-oplooptniveau in de basissom lager ligt dan de kruin van het grensprofiel als deze verlaagd wordt tot $Z_{nat} + 0,5$ m.
- *Gemiddeld* genomen voor alle 23 representatief beschouwde profielen (en het Holland referentieprofiel) de kruin van het grensprofiel ongeveer *twee standaarddeviaties* boven het Z_{nat} in de basissom (met *random* = 0) ligt. Dit betekent gemiddeld genomen de kans grofweg 98% is dat het maatgevend lange-golf-oplooptniveau in de basissom lager ligt dan de kruin van het grensprofiel als deze verlaagd wordt tot $Z_{nat} + 0,5$ m.

Daarnaast komt een halve meter boven Z_{nat} overeen met de gemiddelde maximale afwijking ten opzichte van de gemiddelde Z_{nat} per profiel.

