Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Technische Leidraad Katern Zandige waterkeringen

22 oktober 2026

Inhoudsopgave

1. Fenomenologische beschrijving faalpad duinafslag 4
Inleiding fenomenologische beschrijving faalpad duinafslag 4
1.1 Duinafslag 4
Inleiding duinafslag 4
Hydraulische belasting op de kust tijdens stormen 4
Duinafslag door kustdwarse processen 5
Duinafslag door kustlangse processen 6
Falen van het duin 7
Hybride waterkeringen en niet-waterkerende objecten 7
1.2 Duinafslag en vervolgprocessen 7
Duinafslag en vervolgprocessen 7
1.3 Overige gerelateerde processen in de kustzone 8
Inleiding overige gerelateerde processen in de kustzone 8
Kustlijnontwikkeling 9
Relatieve zeespiegelstijging irt zandige waterkeringen 9
Windtransport en winderosie 9
2. Falen en overstromen door duinafslag 10
Inleiding falen en overstromen door duinafslag 10
Algemene principes overstromingskansbenadering en duinen 10
Kans op falen versus kans op overstromen 10
Beoordeling van de overstromingskans van een zandige waterkering 11
Van falen van een zandige waterkering, via doorbreken naar overstromen 11
3. Sterktemodellen voor faalpad duinafslag 12
Inleiding sterktemodellen voor faalpad duinafslag 12
Duinafslagmodel Duros+ 12
Duinafslagmodel DurosTA 13
3.4 Duinafslagmodel XBeach 14
3.4.1 Algemene modelbeschrijving XBeach 14
Algemene modelbeschrijving XBeach 14
3.4.2 Specifieke BOI-versie van XBeach 15
Beschrijving XBeach-BOI 15
Specifiek afgeregelde BOI-settings voor XBeach 15
Modelnauwkeurigheid XBeach-BOI 16
Toepassingsbereik XBeach-BOI 16
Gebruikersinterface voor XBeach-BOI 17
3.4.3 Relevante in- en uitvoergegevens XBeach-BOI 17
Overzicht benodigde invoergegevens XBeach-BOI 17
Hydraulische belastingen voor zandige waterkeringen 17
Profielgegevens van zandige waterkeringen 18
Sedimentkarakteristieken van zandige waterkeringen 19
Relevante modelinstellingen XBeach-BOI 19
Relevante modeluitvoer XBeach-BOI 19
Rekenwaarden voor semi-probabilistische model XBeach-BOI 20
4. Grensprofiel voor niet-gemodelleerde processen 22
Inleiding grensprofiel voor niet-gemodelleerde processen 22

Het grensprofielconcept binnen BOI 24
Basisgeometrie van het grensprofiel 25
Alternatieve geometrie van het grensprofiel 26
Gebruik grensprofiel niet verplicht 27
5. Sterkteparameters – zandige waterkeringen 27
Inleiding sterkteparameters van zandige waterkeringen 27
Bodemhoogte en profielligging zandige waterkeringen 27
5.1 Sedimentkarakteristieken 28
Inleiding sedimentkarakteristieken langs de kust 28
Variatie in korrelgrootte langs de kust 28
Beschikbare gegevens zandige waterkeringen 28
5.2 Aanwezigheid van harde constructies 29
Inleiding aanwezigheid van harde constructies in een zandige waterkering 29
Niet-waterkerende objecten in duinen 29
Aansluitingsconstructies in zandige waterkeringen 30
Hybride waterkeringen 30
Aanwezigheid van vegetatie op zandige waterkeringen 30
5.3 Schematisatie dwarsprofiel 31
Inleiding schematisatie dwarsprofiel van zandige waterkeringen 31
Effect ondiepten op golfverloop in XBeach 31
Kritische grens ondiepte relevant voor de golfbelasting op het duin 32
Gevoeligheid berekende duinafslag 32
Advies voor omgang met ondiepten voor de kust 33
6. Gebruikersinterface: MorphAn 34
Gebruikersinterface: MorphAn 34
7. Toepassing basisinstrumentarium voor zandige waterkeringen 34
Inleiding toepassing basisinstrumentarium voor zandige waterkeringen 34
Wettelijke beoordeling van zandige waterkeringen 35
Ontwerp van zandige waterkeringen 35
Beheer en onderhoud van zandige waterkeringen 35
Analyse impact ruimtelijke ontwikkelingen op zandige waterkeringen 36
Analyse impact toekomstscenario's op zandige waterkeringen 36

1. Fenomenologische beschrijving faalpad duinafslag

Inleiding fenomenologische beschrijving faalpad duinafslag

In de fenomenologische beschrijving worden de relevante fysische processen voor het faalpad duinafslag beschreven: processen in zandige kustzones tijdens extreme stormen die kunnen leiden tot het falen van de zandige (duin)waterkering. Dit faalpad betreft het initieel mechanisme duinafslag en de vervolgmechanismen die de sterkte van het na duinafslag resterende duin negatief kunnen beïnvloeden. Voorbeelden van deze vervolgmechanismen zijn (geotechnische) instabiliteit of het eroderen van de kruin en het binnentalud door golfoverslag of golfoverloop. Ook de overige processen die in de kustzone een rol spelen komen hierbij aan bod.

In de 'Handleiding overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen' [Rijkswaterstaat, 2023] wordt beschreven hoe de mate van duinafslag berekend kan worden en daarmee een overstromingskansanalyse voor een zandige waterkering uitgevoerd kan worden.

Achtergronden over het instrumentarium zijn beschreven in de rapportage Achtergrond sterktemodel duinafslaginstrumentarium [Steetzel, et al., 2023].

Versie 1.0: 2 juli 2025

1.1 Duinafslag

Inleiding duinafslag

Duinafslag is het initieel mechanisme binnen het faalpad duinafslag. Het faalpad duinafslag start met afslag van het duin als gevolg van de inkomende golfbelasting waardoor het afslagfront zich in landwaartse richting verplaatst (zie Hydraulische belasting tijdens stormen). Deze landwaartse verplaatsing van de duinvoet en het duinfront treedt op door hoofdzakelijk zeewaarts gericht transport van het duinsediment als gevolg van kustdwarse processen. Ook kustlangse processen kunnen bijdragen aan deze landwaartse verplaatsing van het duinfront. Wanneer het landwaarts van dit afslagfront nog aanwezige duinprofiel te beperkt van omvang is, kan het duin onder invloed van vervolgprocessen doorbreken en zal het duin als waterkering falen. Het al dan niet aanwezig zijn van constructies in het dwarsprofiel heeft daar ook effect op. Deze verschillende processen worden in de volgende artikelen afzonderlijk beschreven.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Hydraulische belasting op de kust tijdens stormen

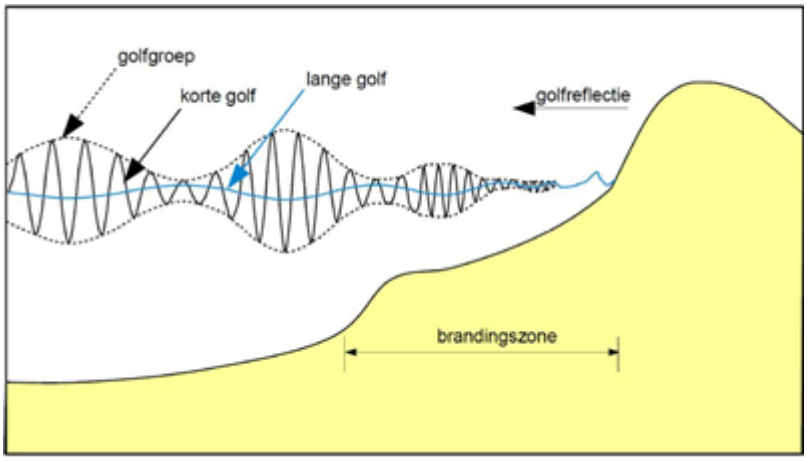
Tijdens zware stormen kunnen de wind en golven resulteren in waterstandopzet: het water wordt opgestuwd tegen de kust. Dit fenomeen staat bekend als stormopzet. Vooral tijdens stormen uit noordwestelijke tot noordelijke richtingen kan deze stormopzet grote waarden bereiken met meerdere meters verhoging van de zeewater-stand als resultaat. In combinatie met het astronomisch getij leidt dit tot een hoge waterstand die tot (ruim) boven de duinvoet uitkomt. Dit wordt het stormvloedpeil genoemd. De timing en amplitude van het getij ten opzichte van de piek van de waterstandsopzet bepaalt het stormverloop van de waterstand. De waterstand bij de duinvoet is hierbij hoger dan de waterstand die op hetzelfde moment plaatsvindt in diep water op zee, dit als gevolg van windopzet en golfopzet. De stormen zijn ook verantwoordelijk voor de groei van (wind)golven. Die laatste worden beschreven met een (significante) golfhoogte en een golfperiode (piekperiode).

Het stormverloop van de waterstand, golfhoogte en golfperiode vormen daarom de basis voor de hydraulische belasting voor duinafslag.

Wanneer deze golven richting de kust migreren, vormen ze golfgroepen die steeds duidelijker worden

naarmate ze de kust naderen (zie figuur 1). Deze golfgroepen voeren spanningen uit op het wateroppervlak en vormen zodoende lange golven. Concreet betekent dit dat de energie van de korte golven wordt overgedragen naar lange golven. De golfvorm en hoeveelheid golfbreking wordt ook bepaald door de lokale waterdiepte. Bij golfbreking gaat een deel van de golfenergie van de korte golven verloren, waardoor de golfhoogte kleiner wordt. Een deel van de golfenergie van de korte golven is echter geassocieerd met golfgroepen (en daarmee met lange golven) met een periode gelijk aan 5 – 10 keer de golfperiode van de gebroken windgolven, zie de Figuur 1.
Deze lange golven breken pas veel later en zijn daarom effectiever in staat om het duinfront te belasten dan de kortere windgolven. De lange golven reflecteren daarbij deels op de kust. Daarnaast vindt er op de top van de lange golf, door de grotere waterdiepte, minder golfbreking plaats van de korte golven en wordt het duinfront door grotere korte golven belast. Lange golven zijn dan ook belangrijk voor de mate van duinafslag die optreedt tijdens een storm.

In het nieuwe sterktemodel XBeach (Duinafslagmodel XBeach) dat voor de kwantificering van de mate van duinafslag wordt gebruikt is expliciet rekening gehouden met de aanwezigheid van deze lange golven.



Figuur 1 Illustratie van de golven, golfgroepen en lange golven die tijdens stormcondities een duinwaterkering belasten, met duinafslag tot gevolg.

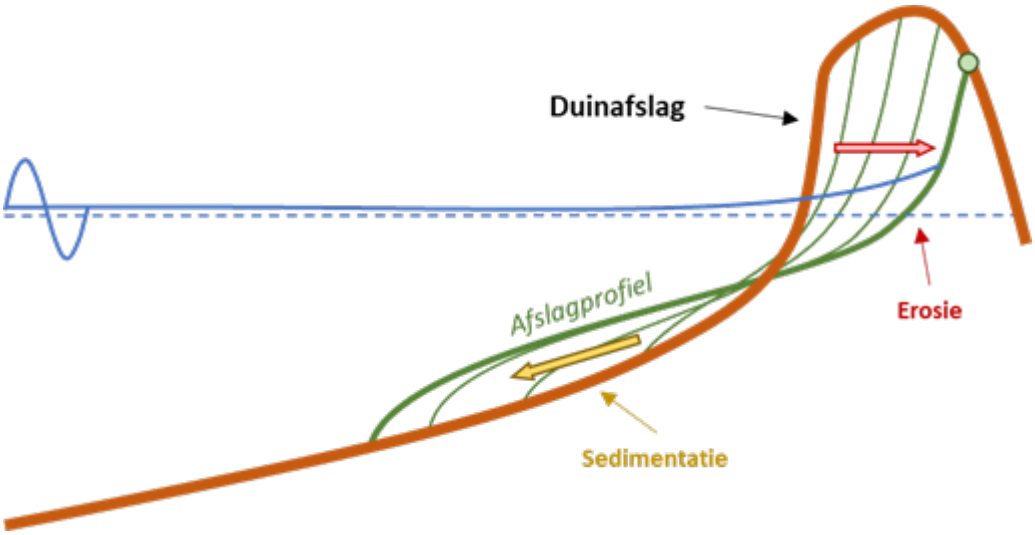
Versie 1.0: 2 juli 2025

Duinafslag door kustdwarse processen

Onder kalme, dagelijkse omstandigheden bereiken het zeewater en de golven de duinen niet: het duin wordt dan dus niet rechtstreeks belast en er vindt geen duinafslag onder invloed van kustdwarse processen plaats. Door verstuiving van zand van het strand naar het duin kan het duin onder deze condities wel geleidelijk groeien.

Tijdens een storm wordt het duin wel belast door de combinatie van de hoge waterstanden en de bijbehorende golven. Die golven slaan dan op een relatief hoog niveau tegen het onbeschermde en steile duinfront aan. Het duinfront wordt daardoor aan de onderkant ondergraven. Zodra een instabiele situatie optreedt, stort een deel van het duinfront in en verplaatst het duinfront zich landwaarts. Dit zeewaarts gericht transport van het duinsediment vindt plaats in het zogenaamde ‘collision-regime’ [Sallenger, 2000]. Door golfbeweging en retourstroom wordt het zand dat aan de duinvoet ligt zeewaarts afgevoerd naar dieper water en eventueel kustlangs verspreid door kustlangse stroming bij scheef invallende golven. Dit resulteert in een zeer steil afgeslagen duinfront (vaak zelfs steiler dan 1 : 1 of zelfs tijdelijk overhangend) met een zeer scherpe overgang naar het strand. Het niveau van deze overgang hangt nauw samen met de maximaal bereikte waterstand tijdens de stormvloed en de hoogte van het duin voor de storm.

Gedurende een storm vindt gedurende kortere of langere tijd aantasting van het duintalud plaats, zie de Figuur. Hierdoor ontstaat onder water een depositieprofiel dat zich geleidelijk uitbreidt, waardoor het ondieper wordt in de zone voor het duinfront. Daardoor bereiken na verloop van tijd steeds minder windgolven het duinfront. Het afslagproces gaat dan in zekere mate nog door omdat lange golven nog steeds in staat zijn om het duinfront te bereiken. Wel neemt de belasting door de lange golven uiteindelijk ook geleidelijk af door het steeds flauwere, ondiepe depositieprofiel. Zodra de waterstand weer daalt, stopt het duinafslagproces. De totale mate van duinafslag (de uiteindelijke terugschrijding van het duinfront) hangt af van de zwaarte en het verloop van de stormomstandigheden. De hoeveelheid afslag neemt daarbij met name tijdens de hoogwaters toe waarbij de maximale afslag vaak kort na het optreden van de maximale hoogwaterpiek bereikt wordt.



Figuur 1 Schematische weergave van het duinafslagproces. De dunne groene lijnen met rode en gele pijl tonen de ontwikkeling van het profiel over tijd.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Duinafslag door kustlangse processen

Wanneer geen sprake is van significant netto kustlangs zandtransport, kan duinafslag worden beschouwd in een dwarsdoorsnede, zonder rekening te houden met kustlangse processen. Er is overigens vrijwel altijd sprake van zandtransport parallel aan de kust, maar in dit geval gaat het vooral om *netto* zandtransport en de vraag of de *instroom* van zand door dat zandtransport langs de kust in een dwarsraai gelijk is aan de *uitstroom* van zand. In- en uitstroom zullen elkaar voor een uniforme rechte kustlijn in evenwicht houden. Maar als bijvoorbeeld de kust gekromd is (waardoor de uitstroom van zand groter is dan de instroom), dan zal de mate van duinafslag groter zijn. Ook als er op de vooroever sprake is van een in langsrichting variërende bodemligging of wanneer het langstransport wordt onderbroken door obstakels als havendammen, dan zal de mate van duinafslag groter zijn als er netto zand verdwijnt. In dergelijke gevallen kan een realistische inschatting van de mate van duinafslag en de overstromingskans alleen vastgesteld worden door dergelijke ruimtelijke (in twee horizontale dimensies; 2DH) effecten te beschouwen.

Overigens heeft ook bij een rechte kust het scheef invallen van de golven een effect op de mate van duinafslag. Dit zal per definitie leiden tot een afname van de effectieve golfaanval op het duin en daardoor resulteren in een reductie van de mate van duinafslag. Anderzijds zal de aanwezigheid van de door de golven geïnduceerde langsstroom ook weer leiden tot een vergroting van de opwoeling van het sediment en daardoor juist tot een toename van het dwarstransport. Over de gecombineerde balans, zijnde het netto-effect van scheef inkomende golven op de mate van duinafslag, is vooralsnog

geen (definitieve) duidelijkheid.
Versie 1.0: 2 juli 2025

Falen van het duin

Als het duinafslagproces door kustdwarse processen zich te ver doorzet, dan ontstaat er een situatie waarin de duinwaterkering, mede als gevolg van het optreden van vervolgprocessen zoals golfoverslag en golfoverloop, doorbreekt en het achterland (gedeeltelijk) overstroomt. Indien er na de storm een bres aanwezig blijft, kan deze door de getijwerking verder uitschuren totdat er uiteindelijk zelfs een zeegat ontstaat.

Dit falen van de (duin)waterkering kan het gevolg zijn van het afslagproces zelf, maar ook van eventuele vervolg-processen rondom het tijdens of na de storm nog aanwezige duinprofiel, als slechts nog een beperkt deel van het duin resteert.

De rol van deze vervolgprocessen wordt in het artikel Duinafslag en vervolgprocessen kort geïntroduceerd en in relatie tot het faalpad nader toegelicht in Falen en overstromen door duinafslag. In de beoordeling speelt het zogenaamde grensprofiel een belangrijke rol. Deze laatste komt in meer detail aan de orde in Grensprofiel voor niet-gemodelleerde processen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Hybride waterkeringen en niet-waterkerende objecten

Op een aantal locaties langs de kust bestaat een zandige waterkering uit een duin versterkt met bijvoorbeeld een achterliggende dijk of boulevard. Dit worden ook wel hybride waterkeringen genoemd. Een doorbraak van een hybride waterkering treedt op bij een combinatie van een aantal mechanismen zoals duinafslag, bezwijken van de bekleding, falen van een constructief deel, macrostabiliteit, overloop en overslag.

Bij aansluitconstructies en niet-waterkerende objecten (de zogenaamde NWO's) zoals een parkeergarage of bunker in het duin kan er, ten opzichte van de situatie zonder constructie, sprake zijn van extra afslag naast de harde constructie. Hierdoor kan er op deze locaties eerder sprake zijn van een doorbraak van de zandige waterkering (zie het artikel Aanwezigheid van harde constructies voor meer details).

Versie 1.0: 2 juli 2025

1.2 Duinafslag en vervolgprocessen

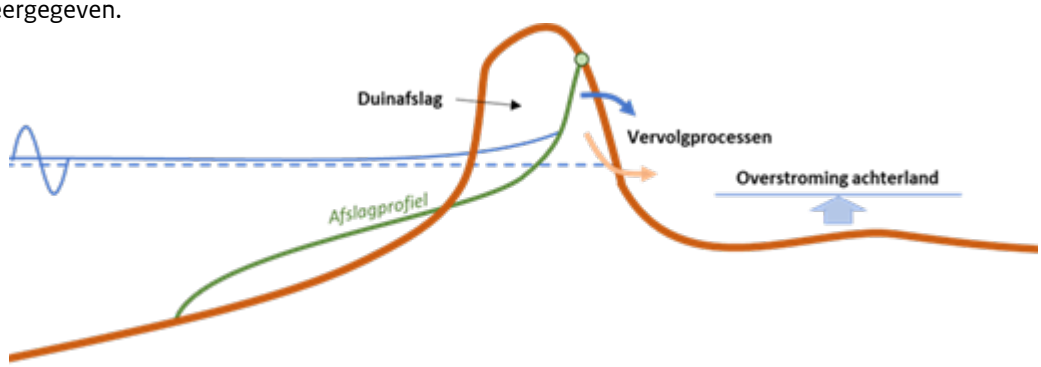
Duinafslag en vervolgprocessen

De resterende sterkte in een duinprofiel tijdens én na het optreden van het initieel mechanisme duinafslag (zoals verkregen met het resultaat van een sterktemodel) wordt volledig ontleend aan de stabiliteit van het resterende (zandige) duinprofiel. Naast duinafslag zijn er echter nog andere processen die de (rest)sterkte van de zandige waterkering nadelig kunnen beïnvloeden.

Mogelijke vervolgprocessen die kunnen leiden tot een doorbraak van het restprofiel zijn (geotechnische) instabiliteit in relatie tot uittredend grondwater of erosie van de kruin en het binnentalud door golfoverslag. Wanneer na afslag een te smal of steil duinprofiel aanwezig is, kan het binnentalud instabiel worden, of afschuiven, met een doorbraak tot gevolg. Een te laag resterend profiel kan leiden tot erosie van de kruin of het binnentalud als gevolg van golfoverslag of in een latere fase overloop, wederom met een doorbraak tot gevolg. De processen afschuiven en overslag kunnen elkaar daarbij ook nog versterken.

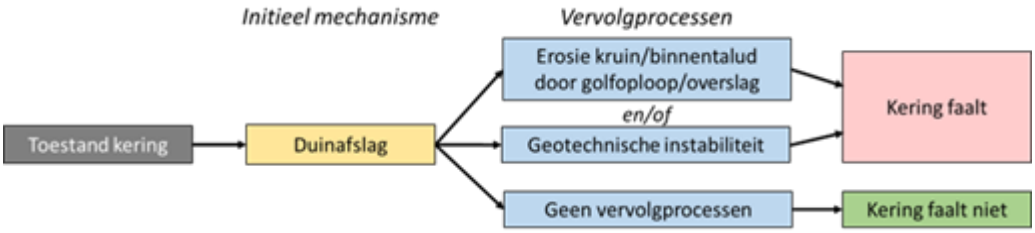
In Figuur 1 zijn de initiële en eventuele vervolgmechanismen van het faalpad duinafslag schematisch

weergegeven.



Figuur 1 Schematische weergave van het initieel mechanisme (duinafslag) en eventuele vervolgmechanismen (golfoploop/overslag en geotechnische instabiliteit) van het faalpad duinafslag.

De positie van deze vervolgprocessen binnen het faalpad duinafslag is schematisch weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Boomweergave van de opeenvolgende gebeurtenissen en processen die kunnen optreden binnen faalmechanisme duinafslag. Vanuit het initieel mechanisme zijn er twee mogelijke vervolgprocessen die kunnen leiden tot falen van de kering.

Binnen faalpad duinafslag worden de vervolgprocessen gezamenlijk beschouwd: het optreden van één van beide vervolgprocessen (of allebei) na duinafslag kan leiden tot het falen van de waterkering en overstroming van het achterland.

De vervolgprocessen kunnen ook optreden als door duinafslag het hele duin afslaat. In dat geval is de bijdrage van de vervolgprocessen aan het falen van de kering gering en is het initieel mechanisme voldoende om tot falen te leiden.

Voor het kwantificeren van het effect van het duinafslagproces kan gebruik worden gemaakt van sterktemodellen voor het faalpad duinafslag. In het BOI (Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium) is voor het kwantificeren van het effect van deze vervolgprocessen het zogenaamde grensprofielmodel beschikbaar gemaakt (zie hiervoor Inleiding grensprofiel voor niet-gemodelleerde processen).

Versie 1.0: 2 juli 2025

1.3 Overige gerelateerde processen in de kustzone

Inleiding overige gerelateerde processen in de kustzone

De belangrijkste (fysische) processen binnen het faalpad duinafslag zijn duinafslag (zie Inleiding duinafslag) en vervolgprocessen na duinafslag tijdens een storm, zoals erosie door golfoverslag of instabiliteit door uittredend water (zie Duinafslag en vervolgprocessen).

Naast deze processen die direct te koppelen zijn aan het faalproces voor een duinwaterkering treden

er echter ook andere relevante processen op in de kustzone. Voorbeelden hiervan zijn kustlijnontwikkeling, relatieve zeespiegelstijging en windtransport en winderosie. Deze processen hebben invloed op het functioneren van een duinwaterkering, maar dragen niet *direct* bij aan het proces van falen tijdens zware stormcondities.
Versie 1.0: 2 juli 2025

Kustlijnontwikkeling

Onder invloed van golven, stromingen en wind hebben duinwaterkeringen een dynamisch karakter. Ook onder normale omstandigheden vindt er transport van zand plaats waardoor op de ene locatie zand verdwijnt en op een andere locatie aanzanding optreedt. Dergelijke morfologische ontwikkelingen in de kustzone vinden plaats op een (veel) langere tijdschaal dan het afslagproces tijdens individuele stormen. Toch kan de lange termijn kustlijnontwikkeling invloed hebben op het functioneren van een duinwaterkering. Door structurele erosie kan de sterkte van een zandige waterkering geleidelijk afnemen, waardoor er op termijn een waterveiligheidsprobleem kan ontstaan.

Ter voorkoming van negatieve effecten van grootschalige en lange termijn kustlijnontwikkeling voert het Rijk sinds 1990 een kustlijnzorgprogramma uit. Dit programma heeft als doel om de kustzone te onderhouden. Door middel van zandsuppleties op de vooroever, op het strand of bij het duin wordt op de locaties waar dit nodig is kustlijnonderhoud uitgevoerd.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Relatieve zeespiegelstijging irt zandige waterkeringen

Een ander langetermijnproces dat invloed heeft op het functioneren van (duin)waterkeringen langs de kust is de relatieve zeespiegelstijging (= combinatie van zeespiegelstijging en bodemdaling). Relatieve zeespiegelstijging zorgt ervoor dat de belasting op de zandige waterkeringen geleidelijk toeneemt en het veiligheidsniveau dus afneemt (toename kans op duindoorbraak). Hier dient rekening mee gehouden te worden bij het langetermijnbeleid voor kustlijnonderhoud en met ruimtelijke ontwikkelingen in de kustzone.

Zandige waterkeringen kunnen *in theorie* 'meegroeien' met relatieve zeespiegel-stijging. Dat kan op natuurlijke wijze of door zandsuppleties, maar het is dan wel van belang dat het extra zand op de juiste plaats in het kustprofiel terechtkomt om op efficiënte wijze bij te kunnen dragen aan de waterveiligheid.

Het huidige kustlijnzorgprogramma streeft ernaar om het kustfundament door middel van suppleties te laten meegroeien met de zeespiegelstijging.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Windtransport en winderosie

Tijdens stormcondities treden de grootste profielveranderingen op door het afslagproces (door waterbeweging en golven), maar tijdens normale omstandigheden zorgt met name wind voor profielherstel en duinvorming. Bij dit profielherstel zijn de processen (zandbankmigratie en landwaarts sedimenttransport door milde golven/deining) cruciaal om zand op het strand te brengen want pas dan kan de wind een rol spelen. Tijdens dagelijkse omstandigheden zorgt wind voor de natuurlijke aangroei van de zeereep en doorstuiving van zand richting het achterliggende duingebied. Dit laatste proces kan worden gefaciliteerd en versneld middels maatregelen, zoals het graven van kerven en aanbrengen van stuifkuilen.

In relatie tot het faalpad duinafslag wordt verondersteld dat het effect van wind nihil is: winderosie of andere vormen van profielverandering door wind dragen niet of nauwelijks bij aan het faalproces van

een duinwaterkering. Aangenomen kan worden dat winderosie op de tijdschaal van een storm (normaal gesproken) geen significante bijdrage levert aan de faalkans van een duinwaterkering.
Versie 1.0: 2 juli 2025

2. Falen en overstromen door duinafslag

Inleiding falen en overstromen door duinafslag

Voor het beoordelen, ontwerpen of beheren van duinwaterkeringen is het van belang om een inschatting te kunnen maken van de kans dat er een overstroming kan optreden van het achterland ten gevolge van het falen van de zandige waterkering langs het betreffende (duinen)traject. Rondom de thema's overstromingskansen, faalkansen en de definitie van falen zijn enkele aan elkaar gerelateerde artikelen opgesteld.

In de volgende artikelen wordt allereerst ingegaan op de overstromingskansbenadering in relatie tot duinen en de faaldefinitie van een duinwaterkering. Vervolgens wordt – vanuit het perspectief van duinen – de relatie tussen falen, doorbreken en overstromen nader beschouwd (zie het artikel Algemene principes overstromingskansbenadering en duinen).

Tot slot wordt stilgestaan bij het (subtiele) onderscheid dat er in sommige gevallen bestaat tussen de fysieke en de juridische begrenzingen van de waterkering en de relevantie daarvan in relatie tot een faalkansanalyse/beoordeling (zie hiervoor het artikel Fysieke versus juridische begrenzing van een duinwaterkering).

Versie 1.0: 2 juli 2025

Algemene principes overstromingskansbenadering en duinen

Bij de beoordeling of het ontwerp van primaire waterkeringen wordt de overstromingskans van het achterland voor een specifiek normtraject bepaald aan de hand van zogenaamde faalpaden (zie ook het artikel Inleiding toepassing basisinstrumentarium voor zandige waterkeringen). Een faalpad betreft hierin de volledige keten van gebeurtenissen van het initieel mechanisme tot en met de daaropvolgende gebeurtenissen die uiteindelijk leiden tot inundatie van het achterland.

De naamgeving van de faalpaden is in de meeste gevallen gekoppeld aan de naam van het initieel mechanisme, in dit geval duinafslag. Voor elk relevant faalmechanisme en dominant faalpad wordt daartoe een inschatting van de overstromingskans (of faalkans) gemaakt, waarbij voor zandige waterkeringen in ieder geval het faalmechanisme *duinafslag* beschouwd wordt.

Het faalmechanisme duinafslag bestaat in principe uit meerdere faalpaden die volgen op het initieel mechanisme duinafslag. De kansen per vak per faalpad worden gecombineerd tot een totale overstromingskans voor het beschouwde traject. Bij een waterveiligheidsbeoordeling wordt een vergelijking gemaakt tussen de op deze wijze bepaalde overstromingskans en de wettelijk vastgestelde waterveiligheidsnorm (omgevingswaarde) en bijbehorende categorieën).

De algemene principes achter de overstromingskansbenadering en het analyseren van faalpaden wordt nader beschreven in de [Handleiding overstromingskansanalyse, 2023], en specifiek voor zandige waterkeringen ook de 'Handleiding overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen' [Rijkswaterstaat, 2023].

Versie 1.0: 2 juli 2025

Kans op falen versus kans op overstromen

De *kans op falen* van de zandige waterkering en de *kans op overstromen* van het achterland zijn niet per definitie hetzelfde.

De faalkans heeft betrekking op het verlies van het waterkerend vermogen (functieverlies) van de zandige waterkering die het achterland beschermt.

De overstromingskans daarentegen heeft nadrukkelijk betrekking op een substantiële overstroming van het achterland, zoals beschreven in [Kok, et al, 2017]

Versie 1.0: 2 juli 2025

Beoordeling van de overstromingskans van een zandige waterkering

Waterkeringen worden met de vigerende wetgeving beoordeeld per normtraject, waarbij *op trajectniveau* een overstromingskansnorm is vastgesteld. Bij de beoordeling en het ontwerp van waterkeringen wordt dus gekeken naar overstromingskansen.

De wettelijke normen voor waterkeringen zijn zodanig gesteld dat het *voldoen* hieraan betekent dat de veiligheidsrisico's in het binnendijks gebied acceptabel zijn. Het uitvoeren van overstromingsberekeningen en overstromingsrisicoanalyses is meestal dan ook geen onderdeel van wettelijke beoordelingen of ontwerpopgaven.

Hierbij wordt feitelijk de aanname gedaan dat het *niet voldoen* aan de norm leidt tot onacceptabele gevolgen.

Dus, de *aanname* is dat het falen van de zandige waterkering resulteert in substantiële overstroming van het achterland: *falen = overstromen*.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Van falen van een zandige waterkering, via doorbreken naar overstromen

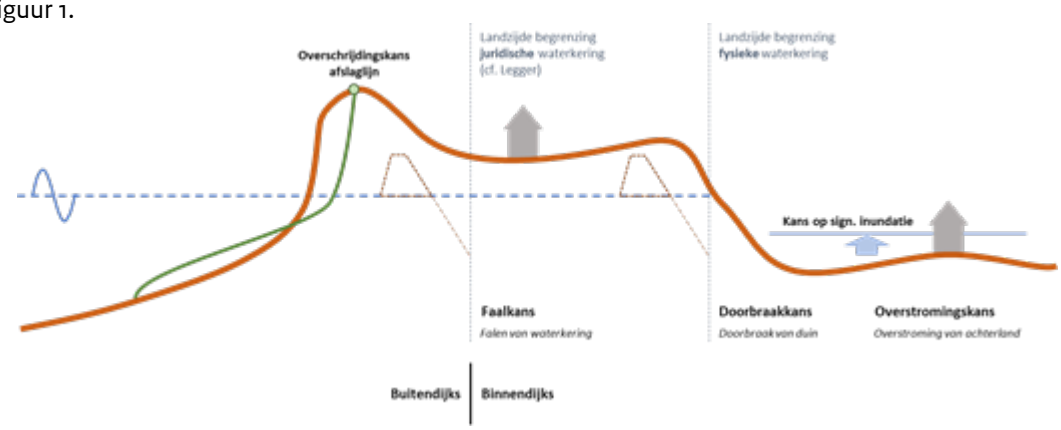
De aanname dat falen van de waterkering automatisch leidt tot overstromen, blijkt voor duinwaterkeringen niet in alle gevallen op te gaan. Voor duinen is het daarom nuttig om onderscheid te maken tussen falen en doorbreken. Het falen heeft daarbij betrekking op de (fysische of juridische) waterkering. Een duindoorbraak heeft daarbij betrekking op het doorbreken van het fysieke duingebied zodanig dat dit onherroepelijk leidt tot inundatie van (een deel van) het achterland. In dat geval kan ook worden aangenomen dat de overstromingskans (voor een alleen uit een duintraject bestaande waterkering) gelijk is aan de doorbraakkans van de zandige waterkering op dit traject.

In dat geval kan ook worden aangenomen dat de overstromingskans van het achterland voor een alleen uit een duintraject bestaande waterkering gelijk is aan de doorbraakkans van de zandige waterkering op dit traject. De uiteindelijke overstromingskans van het achterland wordt ook bepaald door andere trajecten in de dijkring en kleinere keringen in het dijkringgebied.

Er zijn ook situaties denkbaar waarbij een duindoorbraak van een fysiek duingebied niet leidt tot overstroming zoals hierboven gedefinieerd doordat het binnenland amper inundeert. Bijvoorbeeld als het achterland relatief hoog ligtof als de periode tussen doorbraak en het moment waarop de storm (met name de waterstand) weer gaat liggen te kort is om het achterland (volledig) onder te laten lopen.

Met name in bredere duingebieden kan dit relevant zijn. Een andere situatie waar falen niet hoeft te leiden tot overstroming is als het in de legger gedefinieerde waterstaatswerk slechts een deel van het volledige duingebied beslaat (zie ook het artikel Fysieke versus juridische begrenzing van een duinwaterkering). In dat geval resulteert het falen van de (juridische) waterkering niet automatisch in

een duindoorbraak en een overstroming van het achterland. Een voorbeeld hiervan wordt getoond in Figuur 1.



Figuur 1 Schematische weergave van een fictief profiel van een duinwaterkering, met relevante begrippen in relatie tot overstromingskans versus faalkans en juridische versus fysieke begrenzingen van de waterkering.

Als een dijkring uit meer trajecten dan het betreffende duintraject bestaat, is de totale overstromingskans van het achterland ook afhankelijk van de andere trajecten.

Versie 1.0: 2 juli 2025

3. Sterktemodellen voor faalpad duinafslag

Inleiding sterktemodellen voor faalpad duinafslag

Voor het beoordelen, ontwerpen of beheren van duinwaterkeringen is het van belang om een (kwantitatieve) inschatting te kunnen maken van de hoeveelheid duinafslag die kan optreden tijdens stormcondities. In de meeste gevallen vormen rekenkundige analyses de basis voor een faalkansanalyse. Hoe dit moet is in meer detail toegelicht in de Handleiding overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen [Rijkswaterstaat, 2023].

De komende artikelen gaan in op de diverse sterktemodellen die beschikbaar zijn om een faalkansanalyse te kunnen uitvoeren. In dat kader is een drietal duinafslagmodellen in volgorde van het beschikbaar komen uitgelicht: Duros+ (Duinafslagmodel Duros+), DurosTA (Duinafslagmodel DurosTA) en XBeach (Inleiding algemene beschrijving XBeach). Voor het meest recente model XBeach wordt bovendien specifiek ingegaan op de voor het BOI-basisinstrumentarium afgeregelde en gevalideerde sterktemodel XBeach.

In Inleiding grensprofiel voor niet-gemodelleerde processen wordt ingegaan op het grensprofielmodel dat – aanvullend op de duin-afslagmodellen – kan worden. Het grensprofielmodel is een sterktemodel dat gebruikt mag worden om aan te tonen dat de kans op duindoorbraak door niet-gemodelleerde vervolgprocessen verwaarloosbaar klein is.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Duinafslagmodel Duros+

Duros+ (acroniem van DUineROSie) is een relatief eenvoudig empirisch volumebalansmodel. Dit model was vigerend tot en met het WBI2017.

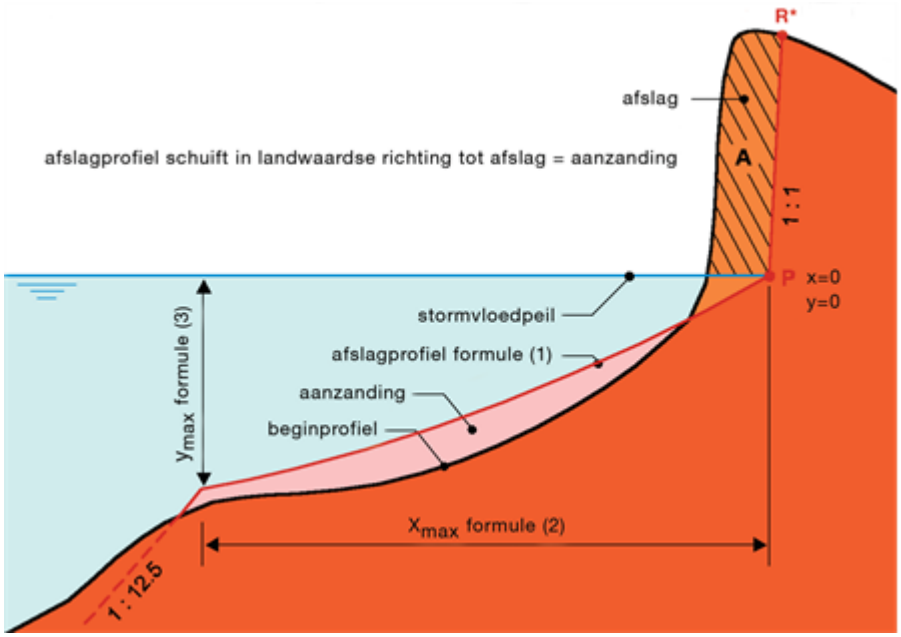
Gebruikmakend van enkele parameters (diep water hydraulische belastingen, de korreldiameter en een initieel kustprofiel) kan op relatief eenvoudige wijze een duinafslagberekening gemaakt worden.

Het model berekent daarbij de positie en de vorm van het afslagprofiel, het daarbij behorende afslagpunt en het duinafslag-volume. Een schematisch voorbeeld is getoond in de Figuur.
Duros+ is de opvolger van het model Duros [Leidraad, 1984]. Het oorspronkelijke model is ontwikkeld in de jaren 1980 en in 2006 is een geactualiseerde variant uitgebracht nadat uit onderzoek was gebleken dat ook de golfperiode een relevante parameter is voor de berekening van de mate van duinafslag [Steetzel, 2002]. Het verschil tussen beide modellen is daarom ook de toevoeging van een golfperiode-afhankelijkheid in het model Duros+ [Van Rijn, 2006].

De vorm van het afslagprofiel dat met Duros+ wordt berekend betreft onderstormvloedpeil een (eindige) paraboolvorm, waarvan de helling en de lengte een functie zijn van de offshore golfhoogte, de golfperiode en de korreldiameter. Bovenstormvloedpeil heeft het afslagprofiel een 1:1 helling (= afslagfront). Het afslagprofiel sluit onder een helling van 1:12,5 aan op het diepere deel van het dwarsprofiel.

De onderliggende formuleringen hiervoor zijn beschreven in het Technisch rapport Duinafslag: de TRDA2006 [Technisch rapport duinafslag, 2007].

Het model Duros+ is geschikt voor toepassing bij geleidelijk in zeewaartse richting aflopende kustprofielen. Als de initiële profielvorm complexer is, bijvoorbeeld als zich vlak voor de kust een ondiepte of een geul bevindt, dan kan dit sterktemodel niet zonder meer worden toegepast en zijn per definitie aanvullende beschouwingen nodig.



Figuur 1 Gehanteerde definities met betrekking tot het model Duros+.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Duinafslagmodel DurosTA

DurosTA (Duros TijdsAfhankelijk) is een tijdsafhankelijk morfologisch model voor duinafslag [Steetzel, 1993]. Het model is in de jaren 1980 en 1990 ontwikkeld als aanvulling op het eenvoudige model Duros, zijnde de voorloper van Duros+ (zie het artikel Duinafslagmodel Duros+). Het betreft een proces-gebaseerd 1D profielmodel waarmee het morfologische gedrag van een zandig (of deels zandig) kustprofiel ten gevolge van hydraulische belasting (golven, waterstand, stroming) wordt gesimuleerd tijdens extreme stormcondities.

Een belangrijk voordeel van DurosTA ten opzichte van Duros is dat veel van de relevante fysische

processen in de kustnabije zone numeriek worden opgelost op basis van de een aan de golfvoortplanting gekoppelde bewegingsvergelijking en relaties voor de sedimentsuspensie. Hierdoor is het model ook in staat om duinafslag te berekenen voor meer complexe profielvormen en genereert het model bovendien veel meer informatie dan alleen de hoeveelheid duinafslag. Het model berekent onder andere ook het golfhoogte- en waterstandsverloop over het dwarsprofiel gedurende een storm. Ook kunnen profielen met harde constructies, zoals een dijk-in-duin, worden doorgerekend. De bruikbaarheid van dit morfologische model voor dergelijke toepassingen is aan de hand van modelonderzoek op kleine en grote schaal gevalideerd. Door deze eigenschappen is het model veelvuldig gebruikt voor het ontwerp en de beoordeling van hybride waterkeringen, zoals dijk-in-duin-constructies, bij Nederlandse badplaatsen zoals Scheveningen, Katwijk en Noordwijk. Tegenwoordig wordt het model in studies in toenemende mate vervangen door het model XBeach (zie Inleiding algemene modelbeschrijving XBeach). XBeach heeft een breder scala aan functionaliteiten dan DurosTA en bevat state-of-the-art modelformuleringen op basis van recentere onderzoeksresultaten.

Voor bepaalde duinafslagtoepassingen is DurosTA desondanks een bruikbaar alternatief voor XBeach. Te denken valt aan hybride keringen waarvoor dit model in de ontwerpfase is gebruikt om de dimensies van het voor een achterliggende dijk gelegen strandprofiel te dimensioneren. Het model is ook geschikt voor het dimensioneren van de diepte van een zich voor een harde constructie ontwikkelende ontgrondingskuil [Steetzel, 1993].

In algemene zin wordt wel aanbevolen om steeds ook het resultaat van de toepassing van het XBeach-model in een finale analyse mee te nemen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

3.4 Duinafslagmodel XBeach

3.4.1 Algemene modelbeschrijving XBeach

Algemene modelbeschrijving XBeach

Inleiding

XBeach is een geavanceerd numeriek sterktemodel, waarmee relevante fysische processen in de kustzone worden doorgerekend die van invloed (kunnen) zijn op duinafslag tijdens extreme stormcondities [Roelvink, et al., 2009]. Het model simuleert onder andere het gedrag van golven, stroming, sedimenttransport en morfologische ontwikkeling in de kustzone en blijkt ook voor minder extreme condities toepasbaar [Coumou, et al., 2022]. Het model is bovendien toe te passen voor zowel 1D toepassingen (raaibenadering) als voor meer complexe (tweedimensionale, horizontale) 2DH toepassingen (ruimtelijke benadering).

XBeach lost simultaan vergelijkingen op voor de waterbeweging, het sedimenttransport en de verandering van de bodemligging. Op dit moment is XBeach geformuleerd in drie modi met toenemende mate van detail in de beschrijving van de processen: *stationaire* modus, *niet-hydrostatische* modus en *surf-beat* modus.

Stationaire modus

In de stationaire modus wordt de golfhoogte als constante (in de tijd) aangenomen. De golfhoogte wordt naar de kust voortgeplant waarbij deze afneemt door bodemwrijving en breken. De XBeach-werkwijze is enigszins vergelijkbaar met die van het spectrale golfmodel 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.

Niet-hydrostatische modus

In de meest gedetailleerde modus van XBeach (niet-hydrostatische modus) wordt de waterbeweging van alle afzonderlijke golven opgelost en deze modus is daarmee analoog aan het SWASH-model [Zijlema, et al., 2011]. Deze modus is rekenintensief, en is daarnaast nog niet gevalideerd voor sedimenttransport van zandige fracties (wel voor bodemtransport van grind). Deze modus is daarom nog niet geschikt voor het modelleren van duinerosie.

Surf-beat modus

De surf-beat modus is de best ontwikkelde en meest gevalideerde modus van het XBeach-model. In deze modus worden korte (wind, deining) golven en lange (infragravity; op de tijdschaal van golfgroepen) golven in de kustnabije zone gesimuleerd, die samen de belangrijkste processen voor duinerosie aandrijven. Daartoe worden de korte golven geparameteriseerd op basis van enkele bulkeigenschappen en de lange golven expliciet en fase-oplossend beschouwd. Hiermee wordt de essentiële fysica van storm-geïnduceerde processen opgelost, inclusief tijdsafhankelijkheid en de lange golven, waardoor het model in staat is om de waterbeweging en de sedimenttransporten in willekeurige topografieën en willekeurige profielvormen op te lossen.

Een uitgebreidere beschrijving van het XBeach-model is (onder andere) gegeven in het rapport Achtergrond sterktemodel duinafslaginstrumentarium [Steetzel, et al., 2023].

Het model kan zowel stand alone worden gebruikt (zie de artikelen Beschrijving XBeach-BOI en Overzicht benodigde invoergegevens XBeach-BOI voor de relevante invoergegevens) als binnen een semi-probabilistische setting (zie hiervoor Rekenwaarden voor semi-probabilistische model XBeach-BOI).

Versie 1.0: 2 juli 2025

3.4.2 Specifieke BOI-versie van XBeach

Beschrijving XBeach-BOI

Voor toepassingen in relatie tot het BOI-basisinstrumentarium is een BOI-specifieke versie van het model XBeach ontwikkeld. Deze BOI-versie van XBeach gaat uit van een 1D-raaibenadering waarbij de zogenaamde surf-beat modus wordt gebruikt. XBeach-BOI is ontwikkeld met de doelstelling dat deze toepasbaar is voor het berekenen van duinafslag bij volledige zandige waterkeringen (duinen) langs de Nederlandse kust, voor een range aan stormcondities (van zware stormen tot extreme stormen). Het model kan zowel voor beoordelings-, ontwerp- als beheerdoeleinden worden gebruikt.

Een nadere beschrijving van de BOI-versie van XBeach en de achterliggende aannamen en uitgangspunten is gegeven in het rapport Achtergrond sterktemodel duinafslaginstrumentarium [Steetzel, et al., 2023].

Versie 1.0: 2 juli 2025

Specifiek afgeregelde BOI-settings voor XBeach

Het model XBeach kent een grote hoeveelheid vrijheidsgraden (vrij te kiezen parameterinstellingen). Dat is nuttig voor onderzoeksdoeleinden en specifieke maatwerkstudies, maar voor BOI-gerelateerde vraagstukken is het juist ook belangrijk om consistente resultaten te kunnen genereren, zodanig dat verschillende gebruikers het model op een vergelijkbare wijze kunnen toepassen. Er is daarom voor gekozen om voor XBeach-BOI een specifieke set met instellingen af te leiden voor alle relevante modelparameters: de zogenaamde BOI-standaardinstelling of BOI-settings.

Voor de modelafregeling (kalibratie, validatie, vaststelling BOI standaardinstellingen) is gebruik gemaakt van een grote hoeveelheid veld- en laboratoriummetingen. De BOI-standaardinstellingen zijn gepresenteerd en toegelicht in het rapport Achtergrond sterktemodel duinafslaginstrumentarium

[Steetzel, et al., 2023].
Het achtergrondrapport 'Validation of dune erosion model XBeach' [Coumou, et al., 2022] en het rapport BOI standaardinstellingen [McCall, et al., 2022] geven meer informatie over de daadwerkelijke afregeling en de validatie van het XBeach-model en de daarbij behorende BOI-standaardinstellingen voor het model.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Modelnauwkeurigheid XBeach-BOI

In een achtergrondrapport van [Coumou, et al,2022] is op basis van een grote en diverse groep met veldvalidatiecases inzicht verschaft in de modelnauwkeurigheid van XBeach 1D in combinatie met de BOI-standaardinstellingen. Op basis van deze studie(s) is geconcludeerd dat de modelnauwkeurigheid van dit sterktemodel voor duinafslag goed is en ook aantoonbaar beter is dan de voorgaande rekenkern (Duros+).

De verkregen inzichten in de gemiddelde modelfout (bias) en de modelonzekerheid (scatter) zijn ook meegenomen bij de ontwikkeling en de afregeling van het semi-probabilistische rekenvoorschrift op basis van XBeach-BOI (1D). Het effect van de modelonzekerheid van XBeach-BOI wordt daarmee vooraf verdisconteerd in de rekenwaarden voor XBeach-BOI, en wordt niet meer achteraf verdisconteerd middels een toeslagvolume zoals dat voor Duros+ gebeurde. Zie hiervoor het artikel Rekenwaarden voor semi-probabilistische model XBeach-BOI en het achtergrondrapport van [Steetzel, 2023].

Versie 1.0: 2 juli 2025

Toepassingsbereik XBeach-BOI

De BOI-versie van XBeach is afgeregeld en gevalideerd – en daarmee dus ook toepasbaar – voor volledig zandige dwarsprofielen langs de Nederlandse kust, in gebieden die min of meer kustlangs uniform zijn.

De complexiteit van de vorm van de dwarsprofielen is – in tegenstelling tot de voorganger van XBeach (Duros+) dat werd aangeboden in het WBI2017 – in principe geen limiterende factor meer in de toepasbaarheid van het model. Dat komt omdat XBeach in staat is om de relevante processen in de kustnabije zone te simuleren, waarbij interactie tussen de profielvorm en de hydrodynamica automatisch wordt meegenomen. Het model is daarom ook toepasbaar in situaties met voorliggende ondiepten, met hoge brede strandvlaktes of met meerdere lage duinenrijen.

Het model is in dergelijke situaties toepasbaar voor zware tot extreme stormcondities, met overschrijdingskansen van *grofweg* 1/100 tot 1/100.000 per jaar.

Het XBeach-BOI model is *niet toepasbaar* in ruimtelijk complexe gebieden die niet kustlangs uniform zijn. Denk hierbij aan kustzones met een (sterke) kustkromming of aan ruimtelijk variërende, brede duingebieden waarbij sprake kan zijn van duindoorbraken of achterloopsheid. In dergelijke gevallen is een 1D raaibenadering ontoereikend en is de standaard BOI-versie van XBeach niet zonder meer bruikbaar. Wel is het mogelijk om in dergelijke gevallen gebruik te maken van de 2DH modus van XBeach; maar deze is momenteel niet specifiek afgeregeld voor BOI-toepassingen. In de 'Handleiding overstromingskansanalyse faalpad duinafslag' wordt de wijze besproken waarop, binnen de beperkingen van de standaard BOI-versie van XBeach 1D, schematisch rekening gehouden kan worden met het effect van kustkromming en achterloopsheid [Rijkswaterstaat, 2023].

Het model XBeach is in de basis geschikt om kustprofielen door te rekenen die deels zandig zijn en deels bestaan uit harde elementen; zoals hybride waterkeringen (dijk-in-duin) of NWO's in duinen. Echter, de BOI-versie van XBeach is nog *niet* afgeregeld en gevalideerd voor dergelijke situaties.

Bovendien zijn voor dergelijke toepassingen aanpassingen nodig aan de faaldefinitie en de analysemethodiek. Momenteel biedt het BOI-basisinstrumentarium nog geen volwaardige ondersteuning voor het analyseren van zandige kustzones met harde elementen. XBeach-BOI is standaard dus (nog) niet geschikt voor situaties waarin harde constructies aanwezig zijn.
Voor meer informatie over de toepasbaarheid van de BOI-versie van XBeach: zie het rapport Achtergrond sterktemodel duinafslaginstrumentarium [Steetzel, et al., 2023].

Versie 1.0: 2 juli 2025

Gebruikersinterface voor XBeach-BOI

In de basis zijn er twee manieren waarop de BOI-versie van XBeach kan worden toegepast voor het uitvoeren van berekeningen en analyses:

1. XBeach-BOI binnen gebruikersinterface MorphAn (standaard).
   In dit geval wordt XBeach-BOI aangestuurd via de relatief gebruikersvriendelijke gebruikersinterface MorphAn. In deze softwaretool kunnen ook de benodigde pre- en postprocessing stappen en analyses doorlopen worden. XBeach-BOI draait hiermee 'achter de schermen'.
2. XBeach-BOI als rekenkern (geavanceerd).
   In dit geval wordt het model toegepast zonder tussenkomst van een gebruikersinterface. Het model wordt gevoed met invoerbestanden en de modeluitvoer is uit te lezen via uitvoerbestanden.

Versie 1.0: 2 juli 2025

3.4.3 Relevante in- en uitvoergegevens XBeach-BOI

Overzicht benodigde invoergegevens XBeach-BOI

Om berekeningen te kunnen uitvoeren met XBeach-BOI is een aantal basisgegevens nodig als input voor de modelopzet. Hieronder wordt een overzicht gepresenteerd met de meest relevante invoergegevens voor het model.

De benodigde modelinvoer voor XBeach-BOI is te classificeren in drie aspecten:

1. De hydraulische belastingen (*belasting*).
2. De profielgegevens (*sterkte*).
3. De sedimentkarakteristieken (*sterkte*).

Versie 1.0: 2 juli 2025

Hydraulische belastingen voor zandige waterkeringen

De te beschouwen stormcondities voor een duinafslagberekening bestaan primair uit de waterstanden en de golfcondities. De golfcondities worden in XBeach gekarakteriseerd door de significante golfhoogte en de piekwaarde van de golfperiode, maar het model vraagt ook informatie over de golfspectrumvorm en de mate van golfrichtingsspreiding. Dergelijke golfinformatie heeft XBeach nodig voor het simuleren van golfgroepen en lange golven.

Aangezien XBeach-BOI een tijdsafhankelijk model is waarmee (de impact van) een volledig stormverloop wordt gesimuleerd, volstaat het niet om enkel de condities tijdens de piek van de storm te beschouwen; in tegenstelling tot de voorganger van XBeach in het WBI: Duros+. Voor het aansturen van XBeach-BOI zijn tijdseries nodig van het waterstands- en golfverloop tijdens een storm.

Voor het genereren van tijdsafhankelijke randvoorwaarden is onder andere informatie nodig over de

vorm en de duur van het stormverloop, de lokale getijdeninformatie (gemiddelde getijamplitude) en het faseverschil tussen getij (hoog water) en de stormopzet (stormpiek). Zie het achtergrondrapport van [Steetzel, 2023 (a)] voor meer informatie.
De relevante invoerparameters voor de hydraulische belastingen zijn te splitsen in de door de gebruiker te definiëren parameters:

- Waterstand tijdens de piek van de storm.
- Significante golfhoogte tijdens de piek van de storm.
- Golfpiekperiode tijdens de piek van de storm.
- Getijdeamplitude.

Daarnaast wordt gebruik gemaakt van standaardwaarden ten aanzien van:

- Golfspectrumvorm (Jonswap).
- Golfrichtingsspreiding (30°).
- Stormverloop van de waterstand (trapeziumvorm).
- Stormduur waterstand (44 uur) en golfhoogte (55 uur).
- Faseverschil tussen getij en stormopzet (3,5 uur).

Het zogenaamde Jonswap-spectrum beschrijft een specifieke verdeling van de golfenergie over de verschillende frequenties voor niet-volledig ontwikkelde zeegang. Bij de ontwikkeling van het BOI-basisinstrumentarium zijn voor meerdere van deze invoerparameters (onderbouwde) standaardwaarden vastgesteld, zie [Steezel, 2023 (b)], zodat het aantal case-specifieke invoergegevens beperkt blijft.

Meer informatie over hydraulische belasting is te vinden in de artikelen Modellering waterstanden Kust - Duinen en Modellering golfcondities Kust - Duinen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Profielgegevens van zandige waterkeringen

Voor het uitvoeren van een duinafslagberekening is ook informatie nodig over de hoogteligging in de kustzone. Als invoer voor XBeach-BOI is een 1D rekenprofiel nodig met de bodemligging van de vooroever, het strand en het duingebied. In de praktijk worden – voor de Nederlandse kust – meestal de zogenaamde JarKus-metingen gebruikt als basisuitgangspunt voor de profielligging in de kustzone (zie ook het artikel Bodemhoogte en profielligging).

Aan de zeezijde moet het rekenprofiel echter 'voldoende lang/diep' zijn om realistische golfrandvoorwaarden te kunnen genereren op de offshore modelrand (zie Advies voor omgang met ondiepten voor de kust). Er is een criterium opgesteld voor de benodigde offshore waterdiepte in een achtergrondrapport van [De Ridder, et al., 2021].

Zo nodig dient het profiel verlengd te worden tot de benodigde diepte. Meer informatie hierover is gegeven in het achtergrondrapport sterktemodel duinafslaginstrumentarium van [Rijkswaterstaat, 2023]. De gebruikersinterface van het softwarepakket MorphAn ondersteunt de gebruiker – met geautomatiseerde verwerkingsroutines ('achter de schermen') – bij deze zeewaartse verlenging van het kustprofiel.

Iets vergelijkbaars geldt voor de landzijde van het rekenprofiel. Het profiel moet minimaal doorlopen worden tot de landwaartse begrenzing van de zandige waterkering. Als de profielmeting te kort is, dan moet deze verlengd worden met aanvullende bodemhoogtegegevens.

De relevante invoerparameters voor de profielschematisering zijn:

- Profielmeting (bijvoorbeeld JarKus).
- Eventuele aanvullende bodemhoogtegegevens:

  - ‘Onder water’ ten behoeve van profielverlenging zeezijde (bijvoorbeeld vaklodingen).
  - ‘Boven water’ ten behoeve van. profielverlenging landzijde (bijvoorbeeld kustlidar of AHN).

Meer informatie over profielgegevens is te vinden in de artikelen Bodemhoogte en profielligging en Inleiding schematisatie dwarsprofiel.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Sedimentkarakteristieken van zandige waterkeringen

Tot slot is het voor een duinafslagberekening van belang wat de karakteristieken zijn van het aanwezige (duin)zand. Het sediment wordt in het model XBeach gekarakteriseerd door de mediane korreldiameter D_{50} [Pluis, 2023].

De relevante invoerparameter voor de sedimentkarakteristieken is dus:

- Mediane korreldiameter: D_{50}

De waarde van de D_{90} wordt daarbij gelijk gesteld aan 2,5 maal de D_{50}-waarde.

Het kan voorkomen dat er voor een specifieke locatie standaard geen informatie beschikbaar is. In dat geval dient de gebruiker van het BOI-basis-instrumentarium een D_{50} te definiëren op basis van de eigen veldmetingen. Van belang hierbij is dat de gehanteerde waarde representatief moet zijn voor de eigenschappen van het tijdens maatgevende omstandigheden afgeslagen duinmateriaal. Een representatieve waarde heeft dus betrekking op het materiaal van het duin en niet op dat van het strand.

Meer informatie over sedimentkarakteristieken is te vinden in het artikel Inleiding sedimentkarakteristieken.

Aanvullende achtergrondinformatie over de relevante modelinvoergegevens en nadere richtlijnen voor de opzet van een XBeach-BOI-model zijn onder andere te vinden in [Coumou, et al., 2023], [Steetzel, et al, 2023] en [De Ridder, et al., 2021].

Versie 1.0: 2 juli 2025

Relevante modelinstellingen XBeach-BOI

Ten behoeve van het BOI-basisinstrumentarium is een specifieke set met standaardmodelinstellingen vastgesteld: de zogenaamde BOI-instellingen. Zie het artikel Inleiding fenomenologische beschrijving faalpad duinafslag voor meer informatie hierover.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Relevante modeluitvoer XBeach-BOI

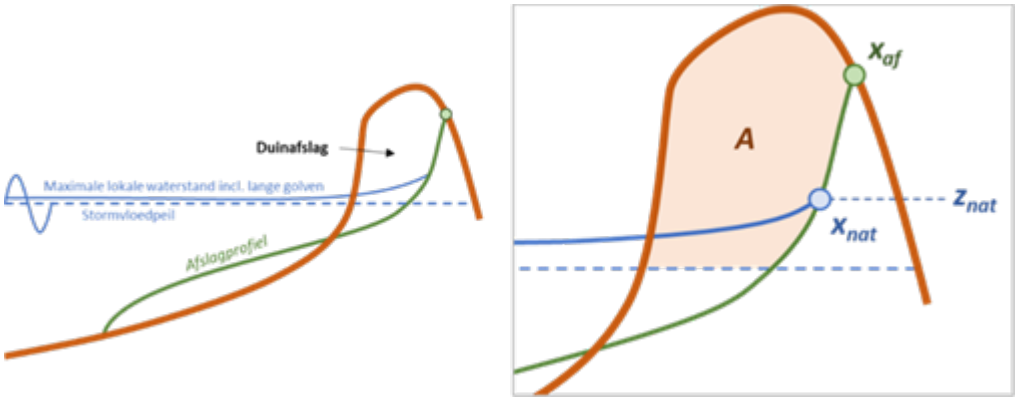
Bij het uitvoeren van berekeningen met XBeach kan voor bijna alle fysische parameters in het model uitvoer worden weggeschreven. Voor een duinafslaganalyse is in praktijk echter vooral de berekende bodemhoogte(verandering) van belang, aangevuld met gegevens over de berekende waterstanden en golfcondities.

De minimaal benodigde uitvoer voor een (eenvoudige) duinafslaganalyse is de profielligging vóór en ná de gesimuleerde stormperiode: het initiële profiel en het afslagprofiel.

Bij het uitvoeren van een volledige faalkansanalyse of een wettelijke beoordeling wordt in veel gevallen gebruik gemaakt van de volgende indicatoren, die kunnen worden bepaald op basis van de standaardmodeluitvoer (zie Figuur 1):

- Het afslagpunt (x_{afslag}).
- Het 'natte punt' (x_{nat},z_{nat}) zijnde het maatgevend golfoplooppunt door lange golven.
- Het afslagvolume (A).

Voor meer informatie over het gebruik van de modeluitvoer van XBeach-BOI ten behoeve van een faalkansanalyse, beoordeling of ontwerp, zie [Coumou, et al., 2023] en [Steetzel, et al., 2023].



Figuur 1 Schematische weergave van enkele relevante uitvoerparameters van het XBeach-BOI- model: het afslagprofiel (groen), het afslagvolume (A), het afslagpunt (x_{af}) en het maatgevende oploopunt (x_{nat}, z_{nat}).

Versie 1.0: 2 juli 2025

Rekenwaarden voor semi-probabilistische model XBeach-BOI

Voor het uitvoeren van een faalkansanalyse voor duinen is, als onderdeel van het BOI-basisinstrumentarium, een semi-probabilistisch rekenvoorschrift ontwikkeld. Dit voorschrift maakt het mogelijk om - rekening houdend met statistische onzekerheden in de belangrijkste modelinvoerparameters – berekeningen uit te voeren met XBeach-BOI op basis van een set met specifiek afgeregelde rekenwaarden.

Met een semi-probabilistische aanpak is het mogelijk om een faalkansinschatting te maken voor een (duin)waterkering. Deze laatste methode is (veel) minder rekenintensief dan een volledig probabilistische rekenmethode, waarbij een veelvoud aan berekeningen nodig is om te komen tot een vergelijkbaar eindresultaat.

Dit neemt niet weg dat de gebruiker voor een specifieke toepassing het gebruik van een onderliggende, volledig probabilistische methode kan overwegen. Een dergelijke uitwerking is veel bewerkelijker en vraagt in combinatie met het XBeach-model om een significant grotere rekeninspanning.

Voor inhoudelijke achtergrondinformatie over de totstandkoming van het semi-probabilistische rekenvoorschrift voor zandige waterkeringen en de daaruit volgende rekenwaarden voor het XBeach-BOI model wordt verwezen naar [Steetzel, 2023]. Hierbij is het van belang om op te merken dat deze rekenwaarden specifiek zijn afgeleid voor het XBeach-BOI model, en dat andere duinerosiemodellen eigen specifieke rekenwaarden behoeven.

Bij de ontwikkeling van het semi-probabilistische rekenvoorschrift is vastgesteld dat er in totaal zes modelparameters zijn waarvan het potentieel relevant is om statistische onzekerheden expliciet te

beschouwen ten behoeve van het afleiden van model-specifieke rekenwaarden:

- De waterstand tijdens de stormpiek.
- De significante golfhoogte tijdens de stormpiek.
- De golfpiekperiode tijdens de stormpiek.
- Het faseverschil tussen getij en stormopzet.
- De sedimentkorreldiameter (D_{50}).
- De modelnauwkeurigheid (bias & scatter).

Voor de statistische beschrijving van waterstand en golfhoogteparameters is gebruik gemaakt van de WBI2017-statistiek, als toegelicht in de artikelen Modellering waterstanden Kust - Duinen en Modellering golfcondities Kust - Duinen. Van deze parameters blijken de statistische onzekerheden in de waterstand en de modelnauwkeurigheid de grootste bijdragen te leveren.

De ontwikkeling en de afregeling van het semi-probabilistische model heeft geresulteerd in een recept voor de bepaling van rekenwaarden in de semi-probabilistische rekenregel voor duinafslag. De rekenwaarden zijn (afhankelijk van de beschouwde parameter) daarmee afhankelijk van de locatie en de beschouwde overschrijdingskans van het afslagpunt (doelkans) P_{ref}.

De algemene formulering van de rekenpeilen (de te gebruiken maximale waterstand), uitgedrukt als een fractie van de lokale decimeringshoogte h_{dec}, luidt:

$C = A + B \log_{10}(P_{ref})$

Waarbij:

- C De correctie op de waterstand die past bij de beschouwde overschrijdingskans, uitgedrukt als fractie van de lokale decimeringshoogte h_{dec}.
- A De correctie voor de 1/1 per jaar doelkans (hier gedefinieerd als de kans op overschrijding van de positie van het erosiepunt).
- B De 'helling' van deze relatie die aangeeft in welke mate de correctie verandert bij een tienmaal soepeler doelkans.

De gekalibreerde waarden van de A- en B-coëfficiënten zijn respectievelijk A = -0,534 en B = -0,20. De negatieve waarde van de B betekent overigens dat de correctie C toeneemt met de doelkans.

Deze correctie (C-waarde) wordt gebruikt door de waterstand, die dezelfde overschrijdings-frequentie heeft als de beschouwde doelkans, te verhogen met de berekende fractie van de lokale decimeringshoogte h_{dec}.

De hiervoor gehanteerde relatie luidt:

$h_{rek} = h(P_{ref}) + C\, h_{dec}$

Waarin:

- h_{rek} De gezochte rekenwaarde voor de waterstand.
- h_{dec} De decimeringshoogte zijnde het waterstandsverschil waarvoor een factor 10 in de overschrijdingsfrequentie aanwezig is.

De decimeringshoogte is afhankelijk van de locatie en bovendien zwak afhankelijk van de overschrijdingsfrequentie.

De hieruit volgende rekenwaarde voor de waterstand h_{rek} wordt gebruikt voor de berekening van het maximale niveau van het met XBeach door te rekenen stormverloop, zie [Technical Design Hydra-

Ring, 2022], [Coumou, et al., 2023].
De rekenwaarden voor de waterstand worden (achter de schermen) 'automatisch' berekend in Hydra-Ring, met het voor een bepaalde doelkans benodigde maximale stormvloedpeil als resultaat. Voor zowel de significante golfhoogte als de piekperiode (zie het artikel Modellering golfcondities Kust - Duinen) kunnen de verwachtingswaarden worden aangehouden. Voor het faseverschil is een vaste waarde van 3,5 uur gehanteerd (zie Modellering waterstanden Kust - Duinen). Voor de rekenwaarde van de korreldiameter geldt de gemiddelde waarde van de D_{50} (zie Inleiding sedimentkarakteristieken).

De onzekerheid en bias van het sterktemodel is gebruikt voor het vaststellen van bovengenoemde waarden en komt niet meer expliciet terug in de door de gebruiker in te voeren waarden. Deze zijn in rekening gebracht door het toepassen van een relatief iets hogere waarde van de rekenwaarde van de waterstand conform de eerder beschreven formulering.

Versie 1.0: 2 juli 2025

4. Grensprofiel voor niet-gemodelleerde processen

Inleiding grensprofiel voor niet-gemodelleerde processen

Binnen het faalpad duinafslag is er sprake van *mogelijk falen* van de zandige waterkering als er na optreden van duinafslag de kans op het falen van de duinwaterkering als gevolg van vervolgprocessen niet verwaarloosbaar klein is.

In het kader van de BOI-uitwerking is deze definitie iets aangescherpt waarbij het net inpasbaar zijn van het grensprofiel overeenkomt met de situatie waarbij de kans op doorbraak van het na duinafslag resterende duinprofiel verwaarloosbaar klein is (zie Het grensprofielconcept binnen BOI). Er zijn op dit moment geen standaardmodellen beschikbaar die een exacte faalkansschatting voor het grensprofiel geven.

Bij het faalpad duinafslag kan er enerzijds sprake zijn van falen door het duinafslagproces (initieel mechanisme) zelf, waarbij er door volledige afslag/erosie van het duinprofiel geen resterend duinprofiel meer aanwezig is na een storm. In dit geval vindt er tijdens het verloop van de storm met erosie en afslag ook overloop over het duin plaats. In dat geval is de bijdrage van de vervolgprocessen aan het falen van de kering gering en is het initieel mechanisme voldoende om tot falen te leiden.

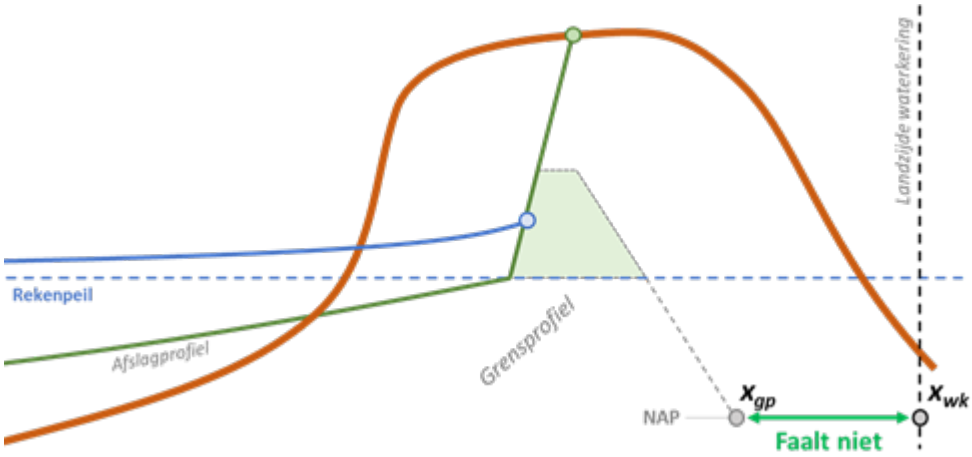
Anderzijds kan er sprake zijn van falen als er nog wel een resterend duinprofiel bestaat na afslag, maar dat deze qua omvang ontoereikend is om te voorkomen dat vervolgprocessen (overslag/overloop of instabiliteit) alsnog resulteren in een duindoorbraak en inundatie van het achterland.

Voor deze faaldefinitie is een kwantitatief faalcriterium te definiëren op dwarsdoorsnedeniveau: de faalfunctie. De faalfunctie markeert hierbij de overgang tussen niet en wel falen van de zandige waterkering. Eén mogelijk criterium is gebaseerd op een afstandsmaat: namelijk de afstand tussen x_{gp} (landzijde grensprofiel) en x_{wk} (landzijde waterkering). Als x_{gp} landwaarts ligt van x_{wk} (ofwel: $x_{gp} < x_{wk}$, waarbij x conform de definitie van de JarKus-profielen *positief* oploopt richting zee), of zelfs niet gedefinieerd is, dan is er sprake van (*mogelijk*) *falen*. Zie Figuur 1 en 2.

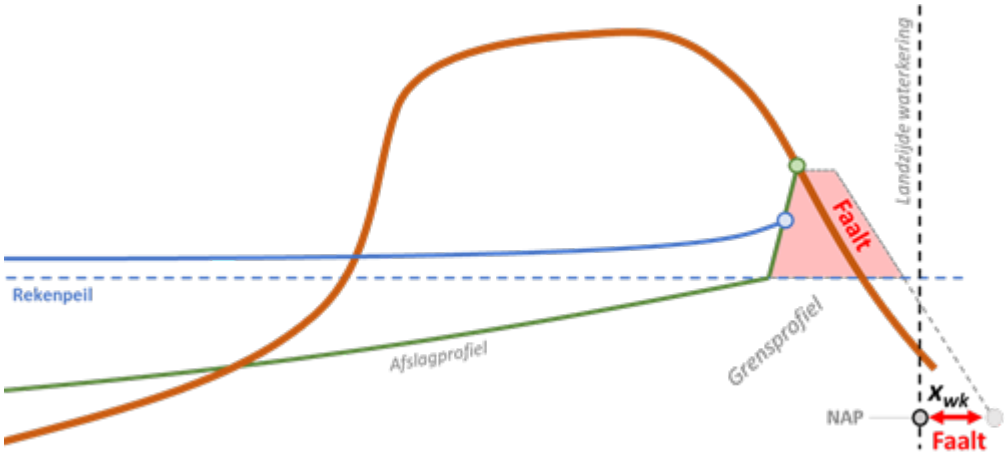
In relatie tot het bovenstaande faalcriterium wordt opgemerkt dat deze vrij generiek bruikbaar is om te bepalen of het grensprofiel inpasbaar is, en dat dan vóór (lees: zeewaarts van) een specifieke begrenzing of referentielijn. Dit is bijvoorbeeld relevant als ervoor gekozen wordt om de juridische begrenzing van de zandige waterkering te beschouwen in plaats van de fysieke begrenzing (zie het artikel Fysieke versus juridische begrenzing van een duinwaterkering). Een consequentie van het gebruik van dit criterium is echter ook dat het in praktijk mogelijk is dat er helemaal geen x_{gp} bestaat.

Als het grensprofiel helemaal niet inpasbaar is in het resterende duinprofiel (ofwel direct achter het afslagprofiel ofwel verder landwaarts), dan is x_{gp} onbekend. In dat geval is ook sprake van falen van de zandige waterkering.
In relatie tot falen behoeven brede, niet-ruimtelijk-uniforme duingebieden, met meerdere duinregels, extra aandacht. In dergelijke situaties is het (extra) van belang dat er ná optreden van duinslag (en ná eventuele doorbraak van voorliggende duinenrijen) nog een *doorlopende duinenrij aanwezig* is van voldoende omvang. Ook hier geldt dat 'voldoende omvang' betekent dat vervolgprocessen zoals overslag of instabiliteit niet tot een duindoorbraak of falen kunnen leiden. Het verschil is echter dat 'het falen' in ruimtelijk complexere gebieden niet alleen op doorsnedeniveau kan plaatsvinden, maar juist ook in of via aansluitende gebieden. Bijvoorbeeld door het optreden van achterloopsheid waarbij het achterland inundeert via een naastgelegen doorsnede.

In de onderstaande faaldefinitie wordt uitgegaan van het gebruik van het zogenaamde grensprofiel om het effect van mogelijke vervolgprocessen te verdisconteren. Als de beheerder vervolgprocessen op een andere manier meeneemt, blijft het principe hetzelfde. In dat geval kan de situatie 'grensprofiel inpasbaar' gelezen worden als 'de kans op het falen van de duinwaterkering als gevolg van deze vervolgprocessen is verwaarloosbaar klein'.



Figuur 1 Voorbeeld van een grensprofiel dat wel inpasbaar is in het resterende duinprofiel na duinafslag en waarbij x_{gp} landwaarts van de x_{wk}-positie is. Conclusie: de zandige waterkering faalt niet op deze locatie (kans op falen verwaarloosbaar klein).



Figuur 2 Voorbeeld van een grensprofiel dat niet inpasbaar is in het resterende duinprofiel na duinafslag en de x_{gp}-positie feitelijk onbepaald is. Conclusie: de zandige waterkering faalt op deze

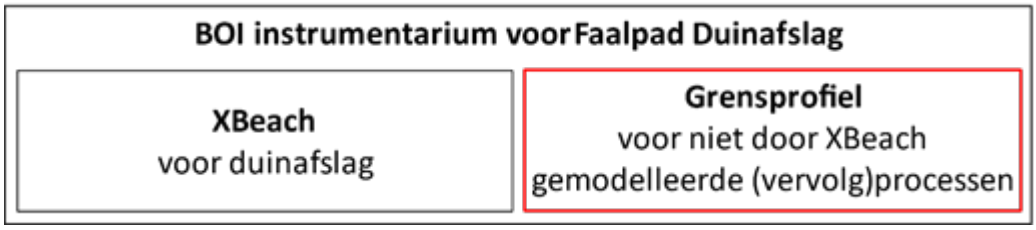
locatie (kans op falen niet verwaarloosbaar klein).
Versie 1.0: 2 juli 2025

Het grensprofielconcept binnen BOI

Zoals eerder toegelicht, zullen ook de vervolgprocessen na het initieel mechanisme duinafslag meegenomen moeten worden om de faalkans van een zandige waterkering te kunnen bepalen. Voor een uitwerking van dit volledige 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.

De BOI-versie van XBeach (artikel Algemene modelbeschrijving XBeach) is niet in staat om op expliciete wijze *alle* (mogelijk) relevante (vervolg)processen te simuleren die kunnen resulteren in het falen van een zandige waterkering.

Een manier om invulling te geven aan de vervolgprocessen, is met behulp van het grensprofielconcept. Het grensprofiel kan in het BOI-basisinstrumentarium worden beschouwd als de benodigde sterkte voor niet-gemodelleerde vervolgprocessen die kunnen optreden na de duinafslag zoals deze is berekend met het BOI-duinafslagmodel XBeach. Dit is weergegeven in Figuur 1.

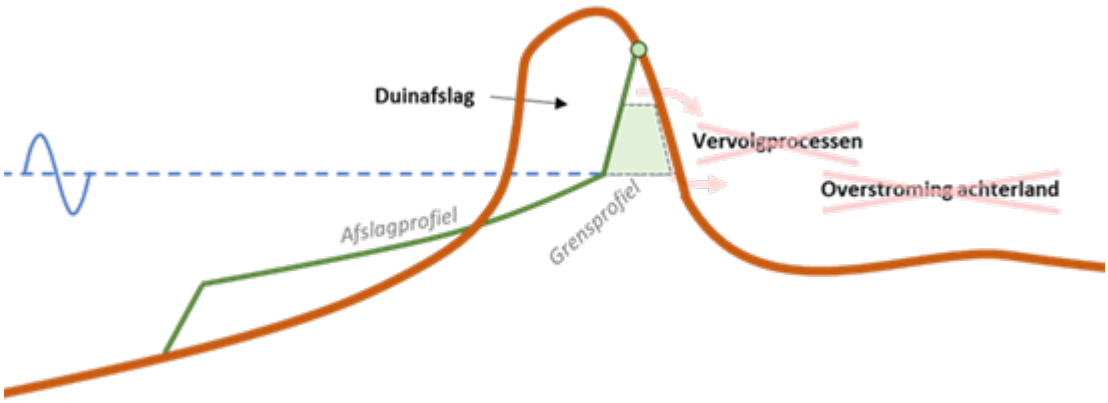


Figuur 1 Basismodellen binnen het BOI-basisinstrumentarium voor faalpad duinafslag.

Het nieuw gedefinieerde en in MorphAn (zie het artikel Gebruikersinterface: MorphAn) ondersteunde grensprofielmodel is een pragmatische maar functionele methode om aan te tonen dat de kans op doorbraak van de zandige waterkering door (niet door XBeach gemodelleerde) vervolgprocessen voldoende 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 voldoende klein is. Dit impliceert ook dat het grensprofiel binair werkt. Het al dan niet inpasbaar zijn van het grensprofiel maakt dat de kans op falen al dan niet verwaarloosbaar klein is.

Het grensprofielconcept dat is geïmplementeerd in het BOI-basisinstrumentarium betreft een pragmatisch rekenrecept om op basis van de – met het XBeach model berekende – *lokale hydraulische belasting bij het duinfront* een inschatting te maken van de minimaal benodigde omvang van het resterende profiel dat ná duinafslag nog aanwezig moet zijn om een doorbraak te voorkomen.

Dit is illustratief weergeven in Figuur 2.



Figuur 2 Voorbeeld van de rol van het grensprofiel in een duinwaterkering: het grensprofiel is het minimaal benodigde resterende profiel ná duinafslag om te voorkomen dat vervolgprocessen kunnen resulteren in een doorbraak van de zandige waterkering en overstroming van het achterland.

Het grensprofielconcept is nadrukkelijk *geen ingebouwd conservatisme* en is ook *niet bedoeld om onzekerheden te ondervangen* in relatie tot het duinafslagproces. Het grensprofiel is een pragmatische methode om aan te tonen dat de kans op een doorbraak van een zandige waterkering als gevolg van niet-gemodelleerde vervolgprocessen voldoende klein is.

Overigens is het gebruik hiervan ook geen verplichting; zie het artikel Gebruik grensprofiel niet verplicht voor een nadere toelichting.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Basisgeometrie van het grensprofiel

De grensprofieldefinitie betreft een onderbouwde definitie van het minimaal benodigde resterende profiel ná duinafslag, waarbij de hoogte van het grensprofiel is gebaseerd op de lokaal optredende condities nabij het duinfront. Met deze definitie kan expliciet rekening worden gehouden met invloed van de profielvorm op de (resterende) belasting ter plaatse van het grensprofiel.

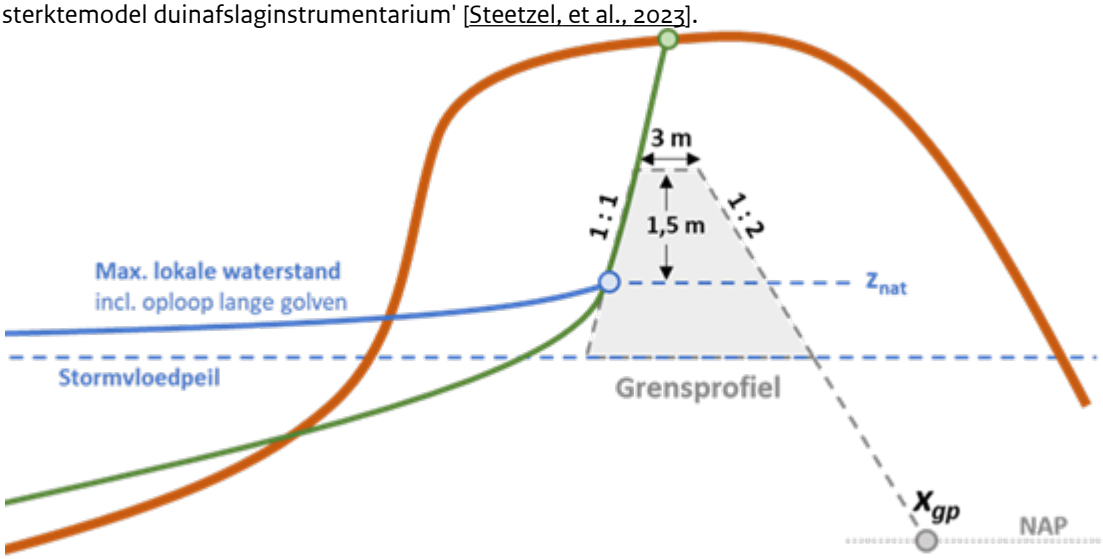
Het grensprofiel wordt daarbij ingepast in het duinprofiel dat nog aanwezig is landwaarts van het met XBeach aan het eind van de storm berekende afslagprofiel. Hierbij wordt overigens gebruik gemaakt van een versimpeling van de werkelijke situatie. De beschouwde vervolgprocessen kunnen immers optreden tijdens de storm en het gebruik van het eindprofiel voor het beschouwen van de effecten van de vervolgprocessen is daarom feitelijk niet correct. Omdat het eindprofiel niet veel afwijkt van het dwarsprofiel dat behoort bij de maatgevende situatie tijdens de storm, is uit pragmatische overwegingen hier wel voor gekozen. Ook kan zo voor het beoordelen van zowel de mate van duinafslag als de vervolgprocessen hetzelfde dwarsprofiel worden gebruikt.

De basisdefinitie van het grensprofiel in schematisch weergegeven in Figuur 1. De hoogte van het grensprofiel is daarbij een functie van de lokaal optredende hydraulische belasting, waarbij expliciet rekening wordt gehouden met het golfoploopniveau door lange golven, plus het niveauverschil tussen het karakteristieke oploopniveau van de lange golven en de kruin van het grensprofiel om overige onbekenden (zoals overslag door korte golven) en onzekerheden te verdisconteren. Deze laatste is voor de basisgeometrie gelijkgesteld aan 1,5 meter.

Zo kan worden bepaald of de kans dat de waterkering faalt op de locatie van het betreffende dwarsprofiel verwaarloosbaar klein is.

Voor meer achtergrondinformatie over de totstandkoming van de grensprofieldefinitie en de achterliggende uitgangspunten en aannames daarbij wordt verwezen naar het rapport 'Achtergrond

sterktemodel duinafslaginstrumentarium' [Steetzel, et al., 2023].



Figuur 1 Schematische weergave van de vorm en de dimensies van het grensprofiel.

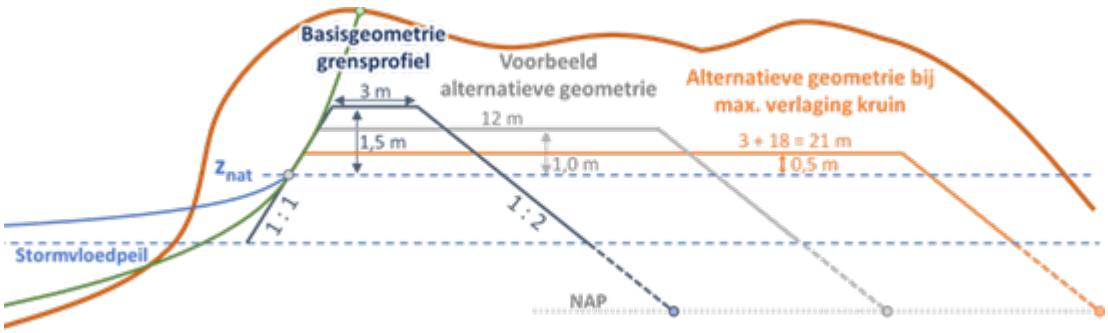
Versie 1.0: 2 juli 2025

Alternatieve geometrie van het grensprofiel

Op basis van aanvullende analyses is vastgesteld dat het kruinniveau van het grensprofiel maximaal 1 meter kan worden verlaagd in het geval een grensprofiel met de basisgeometrie niet in het resterende duin past. Deze ondergrens komt overeen met een niveau dat gelijk is aan 0,5 meter boven het maatgevende oploopniveau van de lange golven.

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.

Dit alternatieve 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. De maximaal toelaatbare verlaging bedraagt 1 meter [Steetzel, et al., 2023]. Een en ander is schematisch toegelicht in Figuur 1.



Figuur 1 Voorbeelden van het alternatieve grensprofiel in vergelijking met de basisgeometrie van het grensprofiel.

Voor meer achtergrondinformatie over de totstandkoming van deze alternatieve definitie en de achterliggende uitgangspunten en aannames wordt verwezen naar het rapport 'Achtergrond sterktemodel duinafslaginstrumentarium' [Steetzel, et al, 2023].

Versie 1.0: 2 juli 2025

Gebruik grensprofiel niet verplicht

Het grensprofielmodel kan feitelijk worden gezien als een pragmatische methode om aan te tonen dat de (niet door XBeach gemodelleerde) vervolgprocessen leiden tot verwaarloosbare kans op doorbraak van de zandige waterkering. Wanneer het grensprofiel landwaarts van het met XBeach berekende afslagfront kan worden ingepast, dan weet de gebruiker dat de kans op een doorbraak van de zandige waterkering voldoende klein is.

Het niet inpasbaar zijn van het grensprofiel kan daarbij worden gezien als een aanbeveling om de relevante vervolgprocessen nader te onderzoeken.

De gebruiker is niet verplicht om voor het meenemen van de vervolgprocessen deze 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, maar ook een goed beargumenteerd expertoordeel behoort tot de mogelijkheden.

Overigens is het al dan niet inpasbaar zijn van het grensprofiel en dus ook het eventuele gebruik slechts relevant op het moment dat er landwaarts van het met XBeach berekende afslagfront nog een restprofiel van beperkte omvang resteert. Voor het geval dat er sprake is van een duidelijk niet-falende kering met een omvangrijk restprofiel of een duidelijk falende kering waarbij XBeach een doorgebroken duin laat zien, speelt dit niet.

Versie 1.0: 2 juli 2025

5. Sterkteparameters – zandige waterkeringen

Inleiding sterkteparameters van zandige waterkeringen

De komende artikelen betreffen een bundeling over de relevante sterkteparameters van duinwaterkeringen. Hierbij wordt allereerst ingegaan op de van belang zijnde bodemhoogte- en profielgegevens in de kustzone (zie Bodemhoogte en profielligging) en de sedimentkarakteristieken die invloed hebben op de sterktebepaling van duinwaterkeringen (zie Inleiding sedimentkarakteristieken). Daarnaast is ook ingegaan op de mogelijke positieve of negatieve invloed van de aanwezigheid van harde constructies (zie Inleiding aanwezigheid van harde constructies) of de aanwezigheid van vegetatie op de sterkte van een duinwaterkering (zie Aanwezigheid van vegetatie).

Tot slot is ook aangegeven op welke wijze dwarsprofielen moeten worden verlengd om het effect van lange golven op een correcte manier in rekening te brengen (zie Inleiding schematisatie dwarsprofiel).

De wijze waarop rekening kan worden gehouden met het effect van kustkromming is beschreven in de 'Handleiding overstromingskansanalyse faalpad duinafslag'. Daarin komt ook het toezien op de aanwezigheid van een doorlopend grensprofiel aan de orde waarmee eventuele achterloopsheid kan worden voorkomen [Coumou, et al., 2023].

Versie 1.0: 2 juli 2025

Bodemhoogte en profielligging zandige waterkeringen

De sterkte van een duinwaterkering wordt hoofdzakelijk bepaald door de vorm en het zandvolume dat in de zandige waterkering en kustzone aanwezig is. Dit kan worden beschreven met dwarsprofielen loodrecht op de kustlijn. Dit dwarsprofiel bevat niet alleen het duin, maar ook het

strand en de bodem onder water tot aan diep water. Het strand en onderwaterprofiel beïnvloeden indirect de sterkte van het duin door interactie met de belasting op het duin (golven en waterstand). Deze interactie vindt bijvoorbeeld plaats via golfoploop en golfbreking over een lang flauw profiel. Bovendien bepaalt het profiel zeewaarts van het duin waar afgeslagen duinsediment wordt afgezet en daarmee in hoeverre dit weer een effect heeft op de belasting.
Langs de zandige kust worden bodemhoogtegegevens landelijk ingewonnen door Rijkswaterstaat. Sinds 1963 worden op vaste locaties jaarlijks bodemraaien ingemeten, de zogenaamde JarKus–profielen. Deze raaien zijn gedefinieerd op vaste locaties langs de RijksStrandPalenlijn (RSP). Daarnaast zijn verschillende vlakdekkende bodemhoogtedatasets beschikbaar die inzicht geven in de sterkte van de zandige waterkeringen. Dit betreft zowel topografische datasets (boven water) zoals de jaarlijkse kusthoogte laseraltimetriedatasets en de verschillende jaargangen van het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN), als bathymetrische datasets (onder water) zoals vaklodingen.

Het dwarsprofiel door de kustzone kan over ruimte en tijd sterk verschillen. Om een realistische inschatting van de mate van duinafslag en de faalkans van een zandige waterkering te maken zullen dan ook beide type variaties meegenomen moeten worden. Hoe hier in een overstromingskansanalyse mee om kan worden gegaan, wordt nader toegelicht in de 'Handleiding overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen' [Coumou, et al., 2023].

Versie 1.0: 2 juli 2025

5.1 Sedimentkarakteristieken

Inleiding sedimentkarakteristieken langs de kust

De sterkte van een duinwaterkering wordt mede beïnvloed door de korrelgrootte van het sediment waar het duin uit bestaat. Grover zand zorgt voor minder duinafslag. De mediane korrelgrootte (D_{50}) wordt veelal als representatieve waarde gebruikt voor de korrelgrootteverdeling van het duinzand.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Variatie in korrelgrootte langs de kust

De korrelgrootte kan zowel langs de kust, in dwarsrichting, in de diepte en over de tijd variëren. Over het algemeen is de korrelgrootte in het duin fijner en minder variabel dan op het strand. Dit heeft te maken met de dominante fysische processen die de sedimentsamenstelling beïnvloeden. Het duin is opgebouwd uit zand dat over vele jaren heen is opgestoven door de wind. Daarbij is het meeste zand dat verstuift relatief fijn. Hoe lager op het strand, hoe kleiner de rol van sedimenttransport door wind en hoe groter de rol van golven en stroming die – afhankelijk van het aanbod – zowel grof als fijn sediment verspreiden. Dit leidt tot sterkere variatie in ruimte en diepte. Voor duinafslag is vooral de korrelgrootte van het voorste duin, dat af kan slaan tijdens stormen, van belang.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Beschikbare gegevens zandige waterkeringen

De meest complete dataset met korreldiametergegevens voor de duinen langs de gehele Nederlandse kust is een dataset uit 1982 [Kohsiek, 1984]. Deze dataset vormt tot op heden de basis voor het bepalen van de te hanteren rekenwaarden voor duinafslagberekeningen, zoals initieel vastgelegd in de [Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering, 1984]. Hierin zijn een aantal correcties doorgevoerd in het kader van de opstelling van het [Technisch rapport duinafslag, 2007].

De actuele korrelgroottegegevens kunnen inmiddels lokaal afwijken van deze dataset, bijvoorbeeld door uitgevoerde suppleties of kustversterkingen. In dat geval is het nuttig om aanvullende datasets

met recentere data over de korreldiameter te beschouwen indien deze beschikbaar zijn voor de lokale situatie.
De basisdatasets bevatten informatie over de gemiddelde waarden van de mediane korreldiameter (D_{50}) op de verschillende locaties langs de kust en de (lokale) spreiding (standaarddeviatie) daarin. Deze gegevens (gemeten waarden) vormen onder andere de basis voor het bepalen van de *rekenwaarden* voor een semi-probabilistische rekenmethode; zie het artikel Rekenwaarden voor semi-probabilistische model XBeach-BOI. Voor meer informatie over (de afleiding van) de huidige rekenwaarden voor de D_{50}: zie [Steetzel, 2023].

Versie 1.0: 2 juli 2025

5.2 Aanwezigheid van harde constructies

Inleiding aanwezigheid van harde constructies in een zandige waterkering

De sterkte van zandige waterkeringen kan in praktijk worden beïnvloed door de aanwezigheid van harde constructies. Dit kan, afhankelijk van de situatie, zowel een positieve als een negatieve invloed zijn. De mate van invloed hangt bovendien ook af van de relatieve omvang van de harde constructie in de zandige kustzone. Ook de positie in het dwarsprofiel is van belang. Het effect neemt immers toe naarmate de constructie voor een groter deel binnen de afslagzone valt.

Voorbeelden van harde constructies die de sterkte van een zandige waterkeringen direct (kunnen) beïnvloeden, zijn:

- Niet-waterkerende objecten (NWO's), zoals bunkers, strandbebouwing, parkeergarages, kelders, boulevards, et cetera.
- Aansluitingsconstructies, zoals dijk-duin-aansluitingen.
- Hybride waterkeringen, zoals: dijk-in-duin-constructies.

Andere harde constructies zoals havendammen en strekdammen kunnen via een effect op de inkomende hydraulische belasting een meer indirect effect hebben op de sterkte van de waterkering en worden hier niet verder beschouwd.

Met het oog op de beoordeling van de overstromingskans van het achterland zijn met name de situaties waarbij er sprake is van extra afslag van belang. Teneinde daar op een pragmatische manier rekening mee te kunnen houden, is de in het artikel Gebruikersinterface: MorphAn beschreven gebruikerssoftware de mogelijkheid voorzien om een, door de gebruiker te definiëren, extra afslagvolume in rekening te brengen. Voor een nadere beschrijving van deze optie wordt verwezen naar de 'Handleiding overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen' [Coumou, et al., 2023].

Versie 1.0: 2 juli 2025

Niet-waterkerende objecten in duinen

Bij niet-waterkerende objecten (NWO's) geldt over het algemeen dat deze géén aantoonbaar positieve invloed hebben op de sterkte van zandige waterkeringen en dat er *mogelijk* sprake is van een negatieve invloed op de sterkte van de zandige waterkering. Dat laatste kan het geval zijn als de NWO (geheel of deels) gepositioneerd is *in* het zandige profiel (bijvoorbeeld kelder, bunker of garage). NWO's *op* het zandige profiel (bijvoorbeeld kleinschalige constructieve elementen of strandbebouwing) hebben in de meeste gevallen geen aantoonbaar positief of negatief effect. Dit effect wordt sowieso klein verondersteld als de constructie in kleinere constructieonderdelen uiteen kan vallen. Voorbeelden daarvan zijn de op palen gefundeerde strandpaviljoens waarvan de bovenconstructie tijdens een zware storm in losse constructie-elementen uiteenvalt.

Voor meer achtergrondinformatie over NWO's in duinen en handvatten voor de beoordeling ervan, zie [Boers, et al., 2014 (a) en (b)].

Versie 1.0: 2 juli 2025

Aansluitingsconstructies in zandige waterkeringen

Bij aansluitingsconstructies geldt dat in de omgeving van de (kustlangse) overgang van een duin naar een dijk (of andersoortige harde constructie) potentieel meer duinafslag kan optreden als gevolg van de overgang van hard naar zacht. Bij het beoordelen, ontwerpen en beheren van een waterkering met dergelijke hard-zacht-overgangen, is het daarom van belang om in te schatten of eventuele extra achteruitgang van de afslaglijn (lokaal) tot een verhoogde kans op falen van de waterkering leidt (bijvoorbeeld door achterloopsheid).

Voor meer achtergrondinformatie over de beoordeling van aansluitingsconstructies, zie [Steetzel, 1995].

Versie 1.0: 2 juli 2025

Hybride waterkeringen

Hybride waterkeringen, zoals dijk-in-duin-constructies, zijn een apart type zandige waterkering: het zijn feitelijk *deels zandige waterkeringen.* Bij dit type waterkering heeft de aanwezige harde constructie nadrukkelijk wél een (gedeeltelijke) waterkerende functie. Het zandige deel van de waterkering zorgt in meer of mindere mate voor een reductie van de belasting op het achter/onderliggende dijklichaam. Het faalpad (inclusief definitie van falen) voor hybride waterkeringen is daarmee ook anders dan voor duinwaterkeringen.

In diverse badplaatsen, zoals Scheveningen, Katwijk en Noordwijk, zijn hybride waterkeringen aangelegd als onderdeel van kustversterkingsprojecten. Voor het ontwerp van deze waterkeringen zijn projectspecifieke (maar onderling enigszins vergelijkbare) rekenmethoden toegepast op basis van destijds beschikbare modellen.

Voor hybride waterkeringen zijn vooralsnog geen standaard beoordelings- of ontwerpmethoden beschikbaar binnen de huidige of voorgaande versies van het basisinstrumentarium voor primaire waterkeringen. De ontwikkeling hiervan is een stap dichterbij gekomen doordat in het huidige instrumentarium de overstap is gemaakt naar de proces-gebaseerde rekenkern XBeach.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Aanwezigheid van vegetatie op zandige waterkeringen

De sterkte van zandige waterkeringen kan in theorie worden beïnvloed door de aanwezigheid van vegetatie. Bijvoorbeeld vegetatie die aanwezig is ter plaatse van het duinprofiel, zoals helmgras, of vegetatie rond de waterlijn of op de vooroever. Hierbij wordt opgemerkt dat het laatste type vegetatie in praktijk niet of nauwelijks voorkomt langs de Nederlandse kust.

Om te bepalen of vegetatie invloed heeft op de sterkte van de zandige waterkering, moet de vraag gesteld worden in hoeverre duinvegetatie een golf- of erosieremmende werking heeft of kan hebben. In relatie tot faalkansanalyses of beoordelingen is het goed om te benadrukken dat met name de extreme stormcondities relevant zijn, waarbij duinafslag optreedt.

In praktijk wordt aangenomen dat duinvegetatie tijdens zware stormcondities volledig wegslaat en dat deze daarom geen bijdrage levert aan de sterkte van zandige waterkeringen tijdens stormcondities.

Maar, daarbij wordt opgemerkt dat er ook studies zijn uitgevoerd waarin wordt gesteld dat vegetatie wel degelijk een positief effect kan hebben op de mate van erosie tijdens stormen, namelijk [Sigren, 2014] en [Feagin, et al., 2019]. Zoals aangegeven wordt hier in de praktijk echter geen rekening mee gehouden.

In theorie kan het lokaal aanwezig zijn van vegetatie ook leiden tot een discontinuïteit in de mate van afslag van het aangevallen duin. Vergelijkbaar met het effect van niet-waterkerende objecten en bij de overgang van hard naar zacht kan dit immers resulteren in enige extra afslag naast een beplantingszone. Dergelijke effecten zijn echter alleen te verwachten voor mildere omstandigheden. Voor echt zware stormen waarbij de vegetatie sowieso wegslaat lijkt dit effect verwaarloosbaar.

Versie 1.0: 2 juli 2025

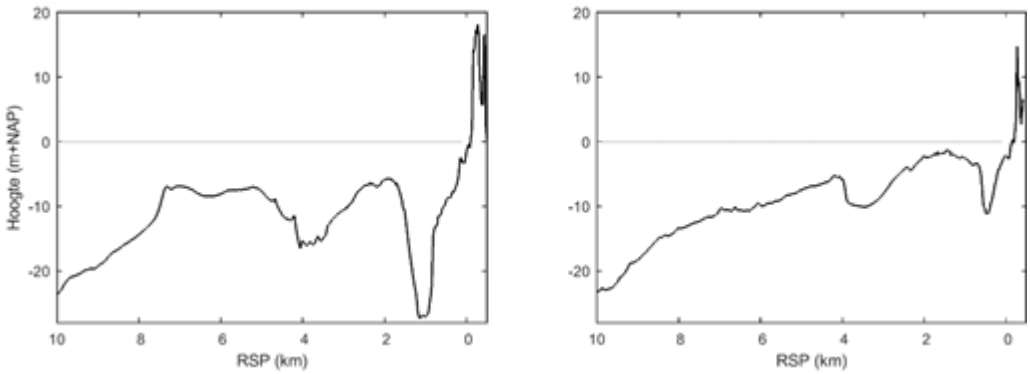
5.3 Schematisatie dwarsprofiel

Inleiding schematisatie dwarsprofiel van zandige waterkeringen

Op verschillende locaties langs de Nederlandse kust neemt de waterdiepte niet continu toe met de afstand uit de kust, maar zijn er geulen en ondiepten aanwezig die de lokale waterdiepte sterk laten variëren, zie bijvoorbeeld onderstaande Figuur 1.

Voor deze locaties is het van belang om het effect van de aanwezigheid van dergelijke ondiepten op de resultaten van een duinafslagberekening met XBeach te kennen. Waar deze ondiepten het XBeach-rekenresultaat significant kunnen beïnvloeden, zal het nodig zijn om deze in de XBeach- berekening mee te nemen, in de bepaling van het overstromingsrisico. De aandacht gaat hierbij in eerste instantie uit naar de effecten in de schematische 1D-situatie.

In werkelijkheid is een ondiepte meer-dimensionaal en betreft dit slechts een eerste schematisatie van een complexere werkelijkheid die pas netjes kan worden beschouwd met het gebruik van een tweedimensionaal (2D) model.



Figuur 1 Voorbeelden van kustprofielen met geulen en ondiepten voor de kust met links het dwarsprofiel in km raai 5.08 van kustvak Noord-Holland (7) en rechts het 2020-dwarsprofiel in km raai 9.82 van kustvak Schouwen (13).

Versie 1.0: 2 juli 2025

Effect ondiepten op golfverloop in XBeach

Het effect van ondiepten op het golfhoogteverloop komt aan de orde in het artikel Modellering golfcondities Kust - Duinen. Daarin wordt aan de hand van een voorbeeld aangegeven wat het bijkomende effect is van het ook voor de Deltakust gebruik maken van offshore golfcondities.

Een conclusie daarvan is ook dat voor het correct meenemen van het effect van voorliggende ondieptes op de voor duinafslag belangrijke lange golven de XBeach-berekening op diep water

worden gestart. Waar relevant moet de waterdiepte op deze laatste locatie nog worden aangepast.
Versie 1.0: 2 juli 2025

Kritische grens ondiepte relevant voor de golfbelasting op het duin

Er is onderzocht tot welke waterdiepte het verloop van de zeebodem significant bijdraagt aan de berekening van de lange golfhoogte bij het duinfront in XBeach. Hierin is aangegeven dat het effect op de lange golfhoogte relatief klein is (algemeen < 10%) als geldt dat:

$n = c_g/c_{fase} < 0{,}95$ (1)

Hierin is n de verhouding tussen de groepssnelheid c_g en loopsnelheid of fasesnelheid (c_{fase}) van de golven. Daarbij is n een functie van de waterdiepte en golf-periode.

Golfperiode T_p (s)	Waterdiepte (m)																							
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22	24	26	28	30
6	0,93	0,89	0,86	0,83	0,80	0,77	0,74	0,72	0,69	0,67	0,65	0,63	0,62	0,60	0,59	0,58	0,57	0,56	0,55	0,53	0,52	0,52	0,51	0,51
7	0,95	0,92	0,90	0,87	0,85	0,82	0,80	0,78	0,76	0,74	0,72	0,71	0,69	0,67	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61	0,59	0,57	0,55	0,54	0,53
8	0,96	0,94	0,92	0,90	0,88	0,86	0,84	0,83	0,81	0,79	0,78	0,76	0,75	0,73	0,72	0,70	0,69	0,68	0,67	0,65	0,63	0,61	0,59	0,58
9	0,97	0,95	0,94	0,92	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	0,83	0,82	0,81	0,79	0,78	0,77	0,76	0,74	0,73	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,63
10	0,97	0,96	0,95	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79	0,77	0,76	0,75	0,73	0,71	0,69	0,68
11	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	0,78	0,77	0,75	0,74	0,72
12	0,98	0,97	0,96	0,95	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,84	0,83	0,81	0,80	0,78	0,77	0,76
13	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95	0,95	0,94	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90	0,89	0,89	0,88	0,87	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,81	0,80	0,79
14	0,99	0,98	0,97	0,97	0,96	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89	0,88	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,82	0,81
15	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84
16	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85
17	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,91	0,90	0,89	0,89	0,88	0,87
18	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90	0,90	0,89	0,88
19	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89
20	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90
21	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,92	0,91
22	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,92	0,92
23	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93
24	1	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,93
25	1	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94

Tabel 1 Waarden van n voor combinaties van golfperiode en waterdiepte. Waarden voor n ≥ 0,95 zijn in rood aangegeven.

De relatie tussen golfperiode, waterdiepte, en deze n-waarde is weergegeven in de tabel hierboven. Hierin is in rood aangegeven welke golfperiode-waterdiepte combinaties leiden tot n ≥ 0,95. In een dergelijke situatie is de golfperiode (en dus de golflengte) relatief groot ten opzichte van de waterdiepte. Er moet dan een grotere waterdiepte worden gehanteerd welke kan worden verkregen door het dwarsprofiel in zeewaartse richting te verlengen.

Indien n < 0,95 is de golfperiode (en dus de golflengte) voldoende klein en is dit laatste niet nodig.

Voor het kwantificeren van n-waarden zijn MatLab-scripts beschikbaar [Steetzel, et al., 2023].

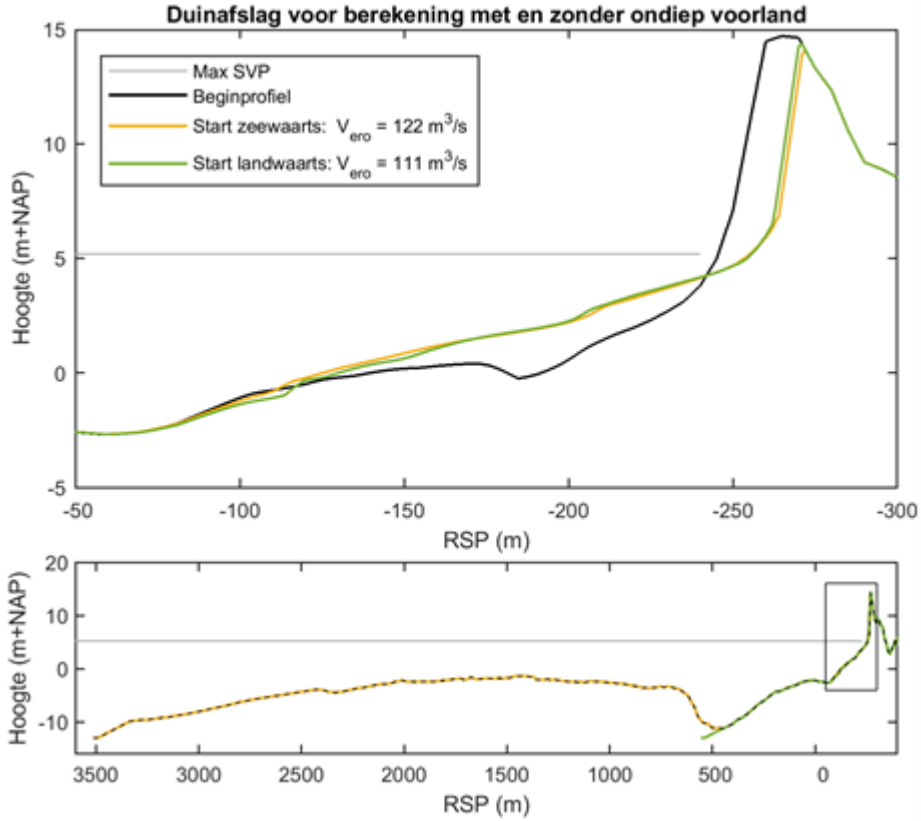
Op basis van de opgelegde golfcondities (maximale piekperiode) en waterstand (getij en opzet) kan worden bepaald of elementen in het kustprofiel zodanig ondiep zijn dat zij de ontwikkeling van de lange golf en de gesimuleerde golfbelasting bij het duinfront substantieel kunnen beïnvloeden. Als dit het geval is, verdient het aanbeveling om deze ondiepten in de XBeach-simulatie te betrekken.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Gevoeligheid berekende duinafslag

Ondiepten voor de kust beïnvloeden de bepaling van de lange golfbelasting bij het duinfront in XBeach. Dit kan ook invloed hebben op de hoeveelheid duinafslag die met het model berekend wordt. Dit speelt ook bij de overstap op het gebruik van de offshore randvoorwaarden voor de Deltakust als toegelicht in Modellering golfcondities Kust - Duinen.

De gevoeligheid van duinafslag voor verschillen in belasting door lange golven is echter niet eenduidig, en onder meer afhankelijk van de lokale hydraulische condities (waterstand, korte golven) en morfologische eigenschappen van het duin- en kustprofiel.



Figuur 1 Boven: profiel duinafslag voor simulatie die zeewaarts van de ondiepte start (geel) en landwaarts van de ondiepte start (groen). Onder: overzicht gesimuleerde kustprofielen voor het 2020-dwarsprofiel in km raai 9.82 van kustvak Schouwen (13).

Ter illustratie van het effect is in Figuur 1 hierboven het duinafslagprofiel weergegeven voor een simulatie die zeewaarts van een ondiepte start (geel), en in een geul landwaarts van de ondiepte start (groen). De simulatie betreft een kustprofiel in kustvak 13 (Schouwen) met een maximale waterstand (stormvloedpeil) van NAP+5,2 meter en maximale golfhoogte van 3,3 meter, en golfperiode van 13,1 seconde (relatieve waterdiepte ondiep voorland *n* = 0,95). In deze situatie berekent XBeach ongeveer 10% meer duinafslag boven stormvloedpeil in de simulatie die zeewaarts van de ondiepte start (122 m^3/m) dan in de simulatie die landwaarts van de ondiepte start (111 m^3/m).

Versie 1.0: 2 juli 2025

Advies voor omgang met ondiepten voor de kust

Voor kustprofielen met een geul en ondiepte voor de kust wordt aangeraden om de simulaties van XBeach te starten *zeewaarts van de ondiepte*, om zo de fysica van de lange golven beter te representeren en om te voorkomen dat XBeach de mate van duinafslag onderschat. Onderdelen van het onderwaterprofiel waarvoor de combinatie van golfperiode en waterdiepte een waarde van *n* hebben die substantieel kleiner is dan 0,95, worden hierin niet als ondiepten gezien. Daar waar JarKus raaien (incidenteel) onvoldoende zeewaarts reiken om de ondiepte te kunnen simuleren, wordt aangeraden om de JarKus-data uit te breiden met data uit vaklodingen.

Dit advies is overgenomen in de Handleiding Overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen in de

toelichting op het schematiseren van het rekenprofiel voor een berekening met XBeach [Coumou, et al., 2023].
Versie 1.0: 2 juli 2025

6. Gebruikersinterface: MorphAn

Gebruikersinterface: MorphAn

MorphAn is een softwareapplicatie voor het uitvoeren van morfologische analyses van de zandige kust, op basis van profiel- en rastermetingen [MorphAn, 2022]. Met MorphAn kan onder andere de veiligheid van duinen tegen overstroming worden vastgesteld ten behoeve van een wettelijke beoordeling of ontwerp van een zandige waterkering. Het is een gebruikersinterface rond het semi-probabilistische rekenmodel voor duinafslag.

In MorphAn kunnen duinafslagberekeningen worden uitgevoerd en het grensprofiel worden ingepast. Sinds Morphan-versie 23.1.1. is de Duros+ rekenmodule (zie het artikel Duinafslag Duros+) binnen het Duinveiligheidsmodel vervangen door de XBeach-rekenmodule (zie Inleiding algemene modelbeschrijving XBeach). De invoer en uitvoer kan binnen MorphAn visueel worden weergegeven en geanalyseerd, waarbij de invoer, zoals raaigegevens, ook kan worden aangepast.

MorphAn beschikt tevens over de mogelijkheid om trends in de kustlijnpositie en in zandvolumes langs de Nederlandse kust uit te rekenen. Hiermee wordt jaarlijks binnen Kustlijnzorg de momentane positie van de kustlijn (MKL) berekend. Hiermee ondersteunt MorphAn ook het regulier beheer van duinen, strand en onderwateroever. Bovendien zijn kustlijn- en volumeontwikkelingen ook relevant voor een overstromingskansanalyse, zoals nader wordt toegelicht in 'Handleiding overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen' [Rijkswaterstaat, 2023].

De hydraulische randvoorwaarden voor het aansturen van de semi-probabilistische versie van XBeach worden via Riskeer beschikbaar gesteld aan de gebruikers. Hierbij zijn ook nieuwe gebieden opgenomen, zoals Maasvlakte II (geen primaire keringen), Brouwersdam, Veerse Gatdam en Neeltje Jans [Pluis en Van Kuik, 2022].

De applicatie MorphAn is primair bedoeld voor medewerkers van Rijkswaterstaat, waterschappen en ingenieursbureaus. Ook ontwerpers, planners of onderzoekers die nieuwe (beheer)maatregelen of de impact van ruimtelijke ontwikkelingen in de zandige kust willen analyseren, kunnen gebruikmaken van MorphAn. Denk hierbij aan baggeraars, kennisinstituten en universiteiten.

Voor meer informatie over MorphAn wordt verwezen naar een actuele versie van de gebruikershandleiding.

Versie 1.0: 2 juli 2025

7. Toepassing basisinstrumentarium voor zandige waterkeringen

Inleiding toepassing basisinstrumentarium voor zandige waterkeringen

Het basisinstrumentarium voor zandige waterkeringen is (en wordt) ontwikkeld met als belangrijke doelstelling een breed spectrum aan toepassingen te kunnen ondersteunen. In de basis dient het instrumentarium ter ondersteuning voor het *beoordelen* van zandige waterkeringen op basis van een faalkansanalyse. Daarnaast is het ook bruikbaar voor andere typen praktijktoepassingen. In afzonderlijke artikelen worden verschillende toepassingen voor het BOI-basisinstrumentarium uitgelicht: wettelijke beoordeling, ontwerp, beheer en onderhoud, analyse impact ruimtelijke ontwikkelingen en analyse impact toekomstscenario's.

Het nu ontwikkelde instrumentarium is primair bruikbaar voor situaties waarin *geen constructies* aanwezig zijn en er sprake is van een min of meer *kustlangs uniforme kustzone*.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Wettelijke beoordeling van zandige waterkeringen

Periodiek dient te worden beoordeeld of de primaire waterkeringen voldoen aan de vigerende wettelijke waterveiligheidsnormen [Omgevingsregeling, 2022]. Het nieuw ontwikkelde BOI-basisinstrumentarium biedt de benodigde handvatten om een wettelijke beoordeling uit te kunnen voeren. Voor de beoordeling van primaire waterkeringen dient een overstromingskans- of faalkansanalyse te worden uitgevoerd. In de overkoepelende Handleiding Over-stromingskansanalyse wordt een algemene beschrijving gegeven van de relevante onderwerpen en aandachtspunten voor het uitvoeren van een overstromings-kansanalyse [Handleiding overstromingskansanalyse, 2023]. Daarnaast is *per faalpad* een aparte handleiding opgesteld met een concreet stappenplan, op basis waarvan een faalkansanalyse kan worden uitgevoerd voor het betreffende faalpad.

Voor de wettelijke beoordeling van duinwaterkeringen wordt verwezen naar de 'Handleiding overstromingskansanalyse - Zandige waterkeringen' voor meer details over de benodigde analysestappen die leiden tot een faalkansinschatting voor een duinentraject en een bijbehorend veiligheidsoordeel [Coumou, et al., 2023].

Binnen het BOI-basisinstrumentarium zijn de benodigde tools, modellen, software-ondersteuning, datasets, et cetera beschikbaar om een faalkansanalyse te kunnen uitvoeren ten behoeve van de beoordeling van een duinwaterkering. Verdere achtergrondinformatie hierover is te vinden in de rapportage 'Achtergrond sterktemodel duinafslaginstrumentarium' [Steetzel, et al., 2023].

Versie 1.0: 2 juli 2025

Ontwerp van zandige waterkeringen

In het geval van een waterveiligheidsopgave vormt de faalkansanalyse die voor een wettelijke beoordeling wordt gevolgd ook de basis voor de ontwerpmethodiek voor duinwaterkeringen. De relevante uitgangspunten en definities, de benodigde gegevens en de te doorlopen stappen om te komen tot een faalkansinschatting zijn bij een beoordeling en een ontwerp feitelijk redelijk vergelijkbaar. Voor het ontwerp van duinwaterkeringen is de 'Handleiding overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen' dus eveneens een bruikbaar naslagwerk [Rijkswaterstaat, 2023]. Van belang is dat voor het ontwerp aangepaste belastingen moeten worden gebruikt die betrekking hebben op de situatie aan het einde van de beoogde levensduur van het beschouwde ontwerp.

De te doorlopen analysestappen zijn bij een ontwerpvraagstuk niet helemaal gelijk aan de stappen voor een beoordeling, maar in beide gevallen moet voor een gegeven situatie (gemeten of ontworpen) een faalkansschatting gemaakt worden om te bepalen of de situatie voldoet aan de wettelijke norm of een daarvan afgeleide ontwerpeis. Het belangrijkste verschil daarin is de volgorde waarin bepaalde stappen moeten worden doorlopen. Bij een beoordeling wordt – gegeven een profielligging – een inschatting gemaakt van de faalkans. Bij een ontwerp wordt – gegeven een faalkanseis – op iteratieve wijze een profielligging ‘ontworpen’ die voldoet aan de gestelde functionele eisen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Beheer en onderhoud van zandige waterkeringen

Het BOI-basisinstrumentarium dient ook ter ondersteuning bij diverse beheer-vraagstukken in relatie tot duinwaterkeringen. De overstap naar het proces-gebaseerde sterktemodel XBeach heeft het toepassingsbereik van de modellen en tools binnen het instrumentarium vergroot ten opzichte van eerdere versies van het instrumentarium (WTI, WBI).

Het afgeregelde duinafslagmodel (XBeach) en het daarvoor afgeleide semi-probabilistische rekenmodel is bruikbaar voor een brede range aan verschillende profielvormen en verschillende stormcondities. Het model is bijvoorbeeld ook geschikt en voldoende nauwkeurig voor toepassing bij hoger frequente stormen met overschrijdingskansen van grofweg 1/10 tot 1/100 per jaar [Steetzel, 2023].

Voorbeelden van beheervraagstukken die kunnen worden beschouwd met behulp van de beschikbare tools, modellen en methoden binnen het BOI-basis-instrumentarium zijn: zorgplicht, relatie tussen kustlijnzorg en kustveiligheid, afwegingen ten aanzien van de positie, de legger, veiligheidsrisicoanalyse bebouwd gebied, stabiliteit van strandbanketten, etc.

Het BOI-basisinstrumentarium, waar ook MorphAn deel van uitmaakt, biedt de benodigde tools en richtlijnen om op kwantitatieve wijze invulling te geven aan deze beheerderstaken.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Analyse impact ruimtelijke ontwikkelingen op zandige waterkeringen

Een toepassing die sterk raakt aan de beheerdersvraagstukken is een analyse van de impact van ruimtelijke ontwikkelingen in de kustzone. Met name in bebouwde kustzones worden continu nieuwe initiatieven voor projectontwikkeling uitgerold. Dergelijke ontwikkelingsplannen bevinden zich geregeld binnen de juridische waterkeringszones en dan moet er aan (soms strenge) vergunningseisen worden voldaan. Zo moet vaak (rekenkundig) worden aangetoond dat voorgestelde ingrepen geen negatieve impact hebben op het waterveiligheidsniveau.

Het BOI-basisinstrumentarium biedt (verbeterde) handvatten om een dergelijke impactanalyse in relatie tot ruimtelijke ontwikkelingen te kunnen uitvoeren. Het sterktemodel XBeach-BOI is goed in staat om de invloed van wijzigingen aan het (zandige) kustprofiel op het waterveiligheidsniveau te kwantificeren. Voor dergelijke analyses is de ‘Handleiding overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen’ een bruikbaar naslagwerk [Rijkswaterstaat, 2023].

Versie 1.0: 2 juli 2025

Analyse impact toekomstscenario's op zandige waterkeringen

Een andere specifieke toepassing die raakt aan het beheer en onderhoud van duinwaterkeringen is een analyse van de impact van toekomstscenario’s. Het beschouwen van het effect van een toekomstig scenario is ook onderdeel van ontwerptoepassing zoals beschreven in het artikel Ontwerp. In relatie tot zorgplicht is het belangrijk dat een waterkeringbeheerder inzicht heeft in de actuele en toekomstige staat van de zandige waterkeringen in zijn beheer. De *actuele* staat om te bepalen of maatregelen nodig zijn, en de *toekomstige* staat om een handelingsperspectief te kunnen opstellen voor beheerinspanningen op de langere tijd. Een impactanalyse voor toekomstscenario’s levert input hiervoor.

Feitelijk is een impactanalyse voor toekomstscenario’s niet veel anders dan het uitvoeren van een beoordeling, maar dan met aangepaste hydraulische belastingen (rekening houdend met zeespiegelstijging en eventueel zwaardere stormen) en kustprofiel. Hiervoor moeten aannames gemaakt worden over de langetermijn ontwikkeling van de kust, en het eventueel ‘meegroeien van de vooroever en het strand’ door langetermijn kustlijnonderhoud. Voor de overige analysestappen die

nodig zijn om een (toekomstige) overstromingskans te bepalen – gegéven een goede schematisering van het toekomstige kustprofiel – kan gebruikt worden gemaakt van de tools en handvatten in het huidige BOI-basisinstrumentarium en specifiek de 'Handleiding overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen' [Rijkswaterstaat, 2023].
Versie 1.0: 2 juli 2025

Literatuurverwijzingen

Coumou, L., R. van Santen, H. Steetzel en R. McCall. *Handleiding Overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen*. Rijkswaterstaat, juli 2023.

Steetzel, H., R. van Santen, L. Coumou, R. McCall, R. de Goede, et al. *Achtergrond sterktemodel duinafslaginstrumentarium ; Definitieve versie 2.1 ; Achtergrondrapport basisinstrumentarium BOI*. Rijkswaterstaat, januari 2023.

_____

Sallenger, A. J. *Storm Impact Scale for Barrier Islands.* Journal of Coastal Research, 16(3), 890-895, 2000.

_____

Coumou, L., R. van Santen, H. Steetzel en R. McCall. *Handleiding Overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen*. Rijkswaterstaat, juli 2023.

Handleiding overstromingskansanalyse - Algemeen. Rijkswaterstaat, december 2022.

_____

Kok, M., R.B. Jongejan, M.W.C. Nieuwjaar en I.C. Tánczos. *Grondslagen voor hoogwaterbescherming ; Tweede herziene druk*. Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW), november 2017.

_____

Coumou, L., R. van Santen, H. Steetzel en R. McCall. *Handleiding Overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen*. Rijkswaterstaat, februari 2023.

_____

Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), 1984.

Van Rijn, L.C. *Dune erosion : Product 1 : Deterministic dune erosion prediction methods*. Delft Hydraulics|WL, rapport H4357, januari 2006.

Steetzel, H.J. *Effect van zwaardere golfcondities op duinenkust : Verkenning effect grotere golfhoogte en langere golfperiode op mate duinafslag en veiligheid duinenkust ; Verslag bureaustudie*. Alkyon, rapport A963, september 2002.

Technisch rapport duinafslag : Beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering ten behoeve van Voorschrift Toetsing op Veiligheid 2006. WL|Delft Hydraulics, rapport H4357, mei 2007.

_____

Steetzel, H.J. *Cross-shore transport during storm surges*. Technische Universiteit Delft, doctoral thesis, 1993.

_____

Coumou, L., R. van Santen, J. van der Baan, R. McCall, A. de Bakker, et al. *Validation of dune erosion model XBeach : Development of 'BOI Sandy Coasts' ; Achtergrondrapport bij het BOI*. Rijkswaterstaat, december 2022.

Roelvink, D., A. Reniers, A. van Dongeren, J. van Thiel de Vries, R. McCall, et al. *Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands.* Coastal Engineering 56(11-12), 1133-1152, 2009.

Steetzel, H., R. van Santen, L. Coumou, R. McCall, R. de Goede, et al. *Achtergrond sterktemodel duinafslaginstrumentarium ; Definitieve versie 2.1 ; Achtergrondrapport basisinstrumentarium BOI*. Rijkswaterstaat, januari 2023.

Zijlema, M., G. Stelling en P. Smit. *SWASH : An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters*. Coastal Engineering (58)10), 992-1012, 2011.

_____

Steetzel, H., R. van Santen, L. Coumou, R. McCall, R. de Goede, et al. *Achtergrond sterktemodel duinafslaginstrumentarium ; Definitieve versie 2.1 ; Achtergrondrapport basisinstrumentarium BOI*. Rijkswaterstaat, januari 2023.

_____

Coumou, L., R. van Santen, J. van der Baan, R. McCall, A. de Bakker, et al. *Validation of dune erosion model XBeach : Development of 'BOI Sandy Coasts' ; Achtergrondrapport bij het BOI.* Rijkswaterstaat, december 2022.

McCall, R., A. de Bakker, E. Quataert, R. de Goede, L. de Vet, et al. *BOI standaardinstellingen : Kalibratie van de XBeach model parameters ; Achtergrondrapport bij het BOI*. Deltares, Arcadis, rapport 11206818-018-GEO-0006, maart 2022.

Steetzel, H., R. van Santen, L. Coumou, R. McCall, R. de Goede, et al. *Achtergrond sterktemodel duinafslaginstrumentarium ; Definitieve versie 2.1 ; Achtergrondrapport basisinstrumentarium BOI*. Rijkswaterstaat, januari 2023.

_____

Coumou, L., R. van Santen, J. van der Baan, R. McCall, A. de Bakker, E. Quataert en R. de Goede. *Validation of dune erosion model XBeach : Development of 'BOI Sandy Coasts' ; Achtergrondrapport bij het BOI*. Rijkswaterstaat, december 2022.

Steetzel, H.J., K. Lenstra, R. Velhorst en R. van der Baan. *Semi-probabilistic model for XBeach : Definition of a semi-probabilistic method for 'BOI Sandy Flood Defences' ; Achtergrondrapport basisinstrumentarium BOI*. Arcadis, Deltares, januari 2023.

_____

Steetzel, H., R. van Santen, L. Coumou, R. McCall, R. de Goede, et al. *Achtergrond sterktemodel duinafslaginstrumentarium ; Definitieve versie 2.1 ; Achtergrondrapport basisinstrumentarium BOI*. Rijkswaterstaat, januari 2023.

_____

Steetzel, H.J., R. van Santen, L. Coumou, R. McCall, R. de Goede en A. de Bakker. *Achtergrond sterktemodel duinafslaginstrumentarium ; Definitieve versie 2.1 ; Achtergrondrapport basisinstrumentarium BOI.* Rijkswaterstaat, januari 2023. (a)

Steetzel, H.J., K. Lenstra, R. Velhorst en R. van der Baan. *Semi-probabilistic model for XBeach : Definition of a semi-probabilistic method for 'BOI Sandy Flood Defences' ; Achtergrondrapport basisinstrumentarium BOI.* Rijkswaterstaat, januari 2023. (b)

_____

Ridder, M. de., A. de Bakker, R.T. McCall en A.R van Dongeren. *Boundary condition guidelines for XBeach simulations : methodology for the representation for the infragravity waves in varying water depth and wave conditions.* Deltares, rapport 11205758-029-GEO-0003, maart 2021.

Steetzel, H., R. van Santen, L. Coumou, R. McCall, R. de Goede, et al. *Achtergrond sterktemodel duinafslaginstrumentarium ; Definitieve versie 2.1 ; Achtergrondrapport basisinstrumentarium BOI*. Rijkswaterstaat, januari 2023.

_____

Coumou, L., R. van Santen, H. Steetzel en R. McCall. *Handleiding Overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen*. Rijkswaterstaat, juli 2023.

Pluis, S. *Uitlevering sterkteparameters BOI zandige waterkeringen ; Achtergronddocument bij het BOI*. Rijkswaterstaat, februari 2023.

Ridder, M. de., A. de Bakker, R.T. McCall en A.R van Dongeren. *Boundary condition guidelines for XBeach simulations : methodology for the representation for the infragravity waves in varying water depth and wave conditions*. Deltares, rapport 11205758-029-GEO-0003, maart 2021.

Steetzel, H., R. van Santen, L. Coumou, R. McCall, R. de Goede, et al. *Achtergrond sterktemodel duinafslaginstrumentarium ; Definitieve versie 2.1 ; Achtergrondrapport basisinstrumentarium BOI*. Rijkswaterstaat, januari 2023.

———————————————————————————

Coumou, L., R. van Santen, H. Steetzel en R. McCall. *Handleiding Overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen*. Rijkswaterstaat, juli 2023.

Steetzel, H., R. van Santen, L. Coumou, R. McCall, R. de Goede, et al. *Achtergrond sterktemodel duinafslaginstrumentarium ; Definitieve versie 2.1 ; Achtergrondrapport basisinstrumentarium BOI*. Rijkswaterstaat, januari 2023.

———————————————————————————

Coumou, L., R. van Santen, H. Steetzel en R. McCall. *Handleiding Overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen*. Rijkswaterstaat, juli 2023.

Steetzel, H.J., K. Lenstra, R. Velhorst en R. van der Baan. *Semi-probabilistic model for XBeach : Definition of a semi-probabilistic method for 'BOI Sandy Flood Defences' ; Achtergrondrapport basisinstrumentarium BOI*. Rijkswaterstaat, januari 2023.

Technical Design Hydra-Ring 22.1.1. : Probabilistic toolbox for the BOI ; Definitieve versie v7.0 ; Onderdeel van basisinstrumentarium BOI. Rijkswaterstaat, november 2022.

———————————————————————————

Steetzel, H., R. van Santen, L. Coumou, R. McCall, R. de Goede, et al. *Achtergrond sterktemodel duinafslaginstrumentarium ; Definitieve versie 2.1 ; Achtergrondrapport basisinstrumentarium BOI*. Rijkswaterstaat, januari 2023.

———————————————————————————

Steetzel, H., R. van Santen, L. Coumou, R. McCall, R. de Goede et al. *Achtergrond sterktemodel duinafslaginstrumentarium ; Definitieve versie 2.1 ; Achtergrondrapport basisinstrumentarium BOI*. Rijkswaterstaat, januari 2023.

———————————————————————————

Coumou, L., R. van Santen, H. Steetzel en R. McCall. *Handleiding Overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen*. Rijkswaterstaat, juli 2023.

———————————————————————————

Actueel Hoogtebestand Nederland.

Coumou, L., R. van Santen, H. Steetzel en R. McCall. *Handleiding Overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen*. Rijkswaterstaat, juli 2023.

———————————————————————————

Kohsiek, L.H.M. *De korrelgrootte karakteristiek van de zeereep (stuifdijk) langs de Nederlandse kust*. Rijkswaterstaat, nota WWKZ-84G.007, januari 1984.

Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), 1984.

Steetzel, H.J., K. Lenstra, R. Velhorst en R. van der Baan.*Semi-probabilistic model for XBeach : Definition of a semi-probabilistic method for 'BOI Sandy Flood Defences' ; Achtergrondrapportbasisinstrumentarium BOI*. Rijkswaterstaat, januari 2023.

Technisch rapport duinafslag : beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering ten behoeve van Voorschrift Toetsing op Veiligheid 2006. WL|Delft Hydraulics, rapport H4357, mei 2007.

_____

Coumou, L., R. van Santen, H. Steetzel en R. McCall. *Handleiding Overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen*. Rijkswaterstaat, juli 2023.

_____

Boers, M., H. Steetzel, P. van Geer en R. van Santen. *Handreiking NWO's in duinen 2014 : Achtergrondrapport*. Deltares en Arcadis, rapport 1208163-001-HYE-0012, november 2014. (a).

Boers, M., H. Steetzel, P. van Geer en R. van Santen. *Handreiking NWO's in duinen 2014 : Schematiseringshandleiding*. Deltares en Arcadis, rapport 1208163-001-HYE-0009, november 2014. (b).

_____

Steetzel, H.J. *Toetsing aansluitingsconstructies : Advies formulering toetsingsregels voor de vormgeving van de aansluiting tussen de verschillende waterkeringsconstructies*. Waterloopkundig Laboratorium (WL), rapport H2178, januari 1995.

_____

Feagin, R., M. Furman, K. Salgado, M. Martinez, R. Innocenti et al. *The role of beach and sand dune vegetation in mediating wave run up erosion*. Estuarine, Coastal and Shelf Science (219), 97-106, 2019.

Sigren, J., J. Figlus en A. Armitage. *Coastal sand dunes and dune vegetation : restoration, erosion, and storm protection*. Shore Beach 82(4), 5-12, december 2014.

_____

Steetzel, H., R. van Santen, L. Coumou, R. McCall, R. de Goede, et al. *Achtergrond sterktemodel duinafslaginstrumentarium ; Definitieve versie 2.1 ; Achtergrondrapport basisinstrumentarium BOI*. Rijkswaterstaat, januari 2023.

_____

Coumou, L., R. van Santen, H. Steetzel en R. McCall. *Handleiding Overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen*. Rijkswaterstaat, juli 2023.

_____

Coumou, L., R. van Santen, H. Steetzel en R. McCall. *Handleiding Overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen*. Rijkswaterstaat, juli 2023.

MorphAn: analysetool voor zandige kusten : gebruikershandleiding. Deltares, september 2024.

Pluis, S. en N. van Kuik. *Uitvoer HR zandige waterkeringen ; Memo ; Achtergronddocument bij het BOI*. Rijkswaterstaat, november 2022.

_____

Coumou, L., R. van Santen, H. Steetzel en R. McCall. *Handleiding Overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen*. Rijkswaterstaat, juli 2023.

Handleiding Overstromingskansanalyse - Algemeen. Rijkswaterstaat, juli 2023.

Omgevingsregeling (wijziging van de) inclusief bijlage XXXIIA (Procedure beoordeling primaire waterkeringen) en XXXIIB (Randvoorwaarden beoordeling primaire waterkeringen). Staatscourant Nr. 29177, 11 november 2022.

Steetzel, H., R. van Santen, L. Coumou, R. McCall, R. de Goede, et al. *Achtergrond sterktemodel duinafslaginstrumentarium ; Definitieve versie 2.1 ; Achtergrondrapport basisinstrumentarium BOI*. Rijkswaterstaat, januari 2023.

_____

Coumou, L., R. van Santen, H. Steetzel en R. McCall.*Handleiding overstromingskansanalyse faalpad duinafslag, definitieve versie 1.0 ; Onderdeel van basisinstrumentarium BOI*. Rijkswaterstaat, februari 2023.

_____

Steetzel, H.J., K. Lenstra, R. Velhorst en R. van der Baan. *Semi-probabilistic model for XBeach : Definition of a semi-probabilistic method for 'BOI Sandy Flood Defences' ; Achtergrondrapport basisinstrumentarium BOI*. Rijkswaterstaat, januari 2023.

_____

Coumou, L., R. van Santen, H. Steetzel en R. McCall. *Handleiding Overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen*. Rijkswaterstaat, juli 2023.

_____

Coumou, L., R. van Santen, H. Steetzel en R. McCall. *Handleiding Overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen*. Rijkswaterstaat, juli 2023.

_____