



Vlaanderen
is wetenschap

18_037_3
WL rapporten

Toetsing kustveiligheid 2021

Toetsingsmethodologie voor dijken en duinen

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Toetsing kustveiligheid 2021

Toetsingsmethodologie voor dijken en duinen

De Roo, S.; Trouw, K.; Suzuki, T.; Thoon, D.; Mostaert, F.

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.

De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.

Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2021
D/2021/3241/148

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

De Roo, S.; Trouw, K.; Suzuki, T.; Thoon, D.; Mostaert, F. (2021). Toetsing kustveiligheid 2021: Toetsingsmethodologie voor dijken en duinen. Versie 2.0. WL Rapporten, 18_037_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Tot en met de datum van vrijgave, kan overname uit en verwijzen naar deze publicatie enkel mits uitdrukkelijke en schriftelijke toestemming van de opdrachtgever of het Waterbouwkundig Laboratorium. Correcte bronvermelding is steeds noodzakelijk.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Agentschap Maritieme Dienstverlening en Kust, Afdeling Kust	Ref.:	WL2021R18_037_3
Trefwoorden (3-5):	Kustveiligheid; golftransformatie; duinafslag; strandafslag; golfoverslag		
Kennisdomeinen:	Kustbescherming > Kustveiligheid bij etreme stormen > Zeedijken > Numerieke modelleringen Kustbescherming > Kustveiligheid bij etreme stormen > Zachte zeeweringen > Numerieke modelleringen		
Tekst (p.):	38	Bijlagen (p.):	/
Vertrouwelijk:	☒ Ja	Vrijgegeven vanaf:	01/01/2025

Auteur(s):	De Roo, S.; Trouw, K.; Suzuki, T.
------------	-----------------------------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Thoon, D.	Getekend door: Daphné Thoon (Signature) Getekend op: 2021-08-03 10:55:56 +02:0 Reden: Ik keur dit document goed 
Projectleider:	De Roo, S.	Getekend door: Dieter Vanneste (Signature) Getekend op: 2021-08-02 14:23:11 +02:0 Reden: Ik keur dit document goed  

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F. Voor het afdelingshoofd, afwezig Patrik Peeters, Ingenieur, belast met de leiding van de afdeling Waterbouwkundig Laboratorium	Getekend door: Stefan Geerts (Signature) Getekend op: 2021-08-03 16:20:17 +02:0 Reden: Ik keur dit document goed 
-----------------	--	---



Abstract

Onze kust wordt gekenmerkt door een aaneenschakeling van duinengordels en dicht bebouwde badplaatsen. Om een veerkrachtige, veilige en klimaatadaptieve zeewering te behouden, dient de status van de eerstelijns zeewering elke 6 jaar getoetst te worden.

Onderhavig rapport behandelt de methodologie voor Toetsing kustveiligheid 2021, i.e. de derde veiligheidstoetsing, die de volledige eerstelijns zeewering, i.e. alle duin- en dijksecties met uitzondering van de havens, zal beoordelen ten opzichte van de maatgevende stormvloed met een terugkeerperiode van 1000 jaar. Hierin zit zowel een basistoetsing (anno 2021) als de toetsing van verschillende zeespiegelstijgingsscenario's vervat.

Als resultaat zal voor elk kustsectie een beoordeling 'voldoende', 'onvoldoende' of 'onzeker' verkregen worden ten opzichte van de gestelde veiligheidsnorm. Daarnaast is ook de procedure beschreven ter bepaling van minimale profielen na het uitvoeren van de veiligheidstoetsing.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
1 Inleiding	1
1.1 Even terugkijken.. het Masterplan Kustveiligheid.....	1
1.2 En vooruitblikken.. een klimaatbestendige kust	1
1.3 Doel van dit rapport	1
1.4 Leeswijzer	2
2 Veiligheidsnorm en concept ‘Veiligheidslijn’	3
2.1 Veiligheidsnorm.....	3
2.2 Veiligheidslijn.....	3
3 Algemene methodologie voor de veiligheidstoetsing.....	4
3.1 Inleiding	4
3.2 Procedure bij de toetsing	4
3.2.1 Duinen	8
3.2.2 Dijken.....	9
4 Hydraulische randvoorwaarden	10
4.1 Basis: het hydraulisch randvoorwaardenboek	10
4.2 Tijdsverloop van de maatgevende stormvloed	10
4.3 Overzicht benodigde randvoorwaarden	12
4.3.1 Duin- en strandafslag.....	12
4.3.2 Golftransformatie en -overslag	12
4.3.3 Stabiliteit dijktaalud.....	12
5 Toetsen van (verdedigde) duinen.....	13
5.1 Inleiding	13
5.2 Toetsspoor: duin.....	13
5.2.1 Duin zonder bewoning	14
5.2.2 Duin met bewoning	15
5.3 Toetsspoor: verdedigde duin.....	16
5.4 Toetsspoor: aansluitingsconstructie.....	18

5.5	Bijkomende toets indien lage (verdedigde) duinen met bewoning	18
5.6	Niet-zeewerende duinvoetverdediging en NWO: negatieve invloed op duin- of strandafslag	19
6	Toetsen van dijken.....	21
6.1	Inleiding	21
6.2	Toetsspoor: dijk	21
7	Modelinstrumentarium	23
7.1	Modellering duin- en strandafslag: XBeach.....	23
7.1.1	Modelachtergrond.....	23
7.1.2	Roosteropbouw	23
7.1.3	Modelinvoer	26
7.1.4	Modelspecificaties.....	26
7.1.5	Modeluitvoer en postprocessing.....	26
7.2	Modellering golfoverslag: Swash.....	27
7.2.1	Modelachtergrond.....	27
7.2.2	Roosteropbouw	27
7.2.3	Modelinvoer	28
7.2.4	Modelspecificaties.....	29
7.2.5	Modeluitvoer en postprocessing.....	30
7.2.6	Modelinstabiliteit	32
7.2.7	Voorbeeld van invoerbestand 'SA21.sws'	32
8	Minimale profielen	34
8.1	Definitie	34
8.2	Kustsectie met het gemiddeld overslagdebiet als toetscriterium.....	34
8.3	Duinen	36
9	Besluit	37
10	Referenties	38

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Modelspecificaties Swash	29
--	----

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Concept bepaling veiligheidsnorm voor duinen en dijken	5
Figuur 2 – Voorbeeld Toetsspoor dijk: A. hard zeewerend talud te Blankenberge – B. golfdempende uitbouw te Wenduine	6
Figuur 3 – Voorbeeld Toetsspoor duin: A. duin te Koksijde – B. verdedigd duin: Spinoladijk te Bredene	7
Figuur 4 – Effect van de herverdeling van het afgeslagen zand ten gevolge van een harde constructie, wat resulteert in extra afslag naast deze constructie	8
Figuur 5 – Verloop van de stormopzet en waterstand tijdens de maatgevende stormvloed	11
Figuur 6 – Verloop van de significante golfhoogte en -piekperiode tijdens de maatgevende stormvloed	11
Figuur 7 – Flowchart voor het toetsen van een duin met of zonder bewoning	14
Figuur 8 – Parameters duinafslag	15
Figuur 9 – Minimum vereisten voor de afstand van het resterend duinvolume tot de bebouwing, en dus de veiligheidslijn (X_v)	16
Figuur 10 – Flowchart voor het toetsen van een verdedigd duin	17
Figuur 11 – Parameters ter bepaling van extra duin- of strandafslag bij bres duinvoetverdediging of naast NWO	20
Figuur 12 – Positie van de -5m TAW lijn (of 1500m uit de kust), de teen van de dijk en de veiligheidslijn in een kustdwarsprofiel	24
Figuur 13 – Opmaak van de bathymetrie in 2D, met aanduiding van zee- en landwaartse begrenzing van het modeldomein	25
Figuur 14 – Opmaak van de bathymetrie in 2D, met aanduiding van de laterale begrenzing van het modeldomein	25
Figuur 15 – Roosteropbouw in Swash	28
Figuur 16 – Swash: Berekening overslagdebiet ter hoogte van de veiligheidslijn	31
Figuur 17 – Zee - en landwaartse verschuiving van het kustdwarsprofiel (na de maatgevende stormvloed) .	35
Figuur 18 – Detail van zee- en landwaartse verschuiving van het kustdwarsprofiel	35
Figuur 19 – Bepaling minimaal profiel voor duinen met een beoordeling ‘onvoldoende’ zonder bresvorming	36

1 Inleiding

1.1 Even terugkijken.. het Masterplan Kustveiligheid

Tien jaar geleden keurde de Vlaamse overheid het Masterplan Kustveiligheid goed, een overstromingsrisicobeheersplan dat als doel heeft onze 67 kilometer lange kust te beschermen tegen de maatgevende stormvloed (die een terugkeerperiode van 1000 jaar heeft). De inhoud is online na te lezen via de website van Afdeling Kust (<https://www.afdelingkust.be/nl/masterplan-kustveiligheid-0>).

In het voorbije decennium zijn tal van de vooropgestelde beschermingsmaatregelen uitgewerkt, zoals bijv. (niet-limitatief) strandsuppleties te De Panne en Oostende en de nieuwe zeedijk in Wenduine. Deze maatregelen garanderen veiligheid tot 2050, waarbij eveneens rekening is gehouden met een beperkte zeespiegelstijging.

Om de vinger aan de pols te houden is gesteld dat elke 6 jaar een veiligheidstoetsing dient uitgevoerd te worden, dewelke de toestand van de eerstelijns zeewering evalueert ten opzichte van de maatgevende stormvloed. Dit jaar, 2021, vindt de derde veiligheidstoetsing plaats; hierna genoemd Toetsing kustveiligheid 2021.

1.2 En vooruitblikken.. een klimaatbestendige kust

Om onze kust aantrekkelijk, veilig en klimaatbestendig te houden voorbij 2050 wordt intussen werk gemaakt van een langere termijn visie, die rekening houdt met een versneld stijgende gemiddelde zeespiegel.

Daartoe wordt in deze toetsronde de toestand van de zeewering ook geëvalueerd ten opzichte van de maatgevende stormvloed in verschillende zeespiegelstijgingsscenario's:

- Basistoetsing: geen zeespiegelstijging = toestand van de zeewering in 2021
- Scenario 1: gemiddelde zeespiegelstijging van 0.3m
- Scenario 2: gemiddelde zeespiegelstijging van 0.8m
- Scenario 3: gemiddelde zeespiegelstijging van 1.5m

1.3 Doel van dit rapport

Onderhavig rapport beschrijft de methodologie die gevolgd dient te worden voor Toetsing kustveiligheid 2021. In deze toetsing zullen alle 255 kustsecties getoetst worden, met uitzondering van de havens van Nieuwpoort, Oostende, Blankenberge en Zeebrugge.

Samen met het hydraulisch randvoorwaardenboek (Vuik *et al.*, 2020) maakt dit rapport integraal deel uit van het bestek 16EH/19/21 'Toetsing zeewering 2021', dat de basis vormt voor de uitvoering van Toetsing kustveiligheid 2021.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de veiligheidsnorm toegelicht, en de veiligheidslijn die bepaalt wat beschermd dient te worden. Hoofdstuk 3 vat de algemene procedure van deze veiligheidstoetsing samen.

Hoofdstuk 4 handelt over de benodigde hydraulische randvoorwaarden. In Hoofdstuk 5 en 6 wordt resp. de toetsing van de duinen en dijken toegelicht. Hoofdstuk 7 beschrijft uitgebreid het modelinstrumentarium dat ingezet dient te worden voor de berekening van duin- en strandafslag, en golfoverslag.

Hoofdstuk 8 bevat de werkwijze ter bepaling van de minimale profielen.

2 Veiligheidsnorm en concept 'Veiligheidslijn'

2.1 Veiligheidsnorm

Bij de uitvoering van de toetsingsopdracht dient per kustsectie nagegaan te worden of er voldaan wordt aan de geldende veiligheidsnorm. In algemene termen:

Geen directe menselijke slachtoffers tijdens de maatgevende stormvloed

Dit wordt vertaald in volgende voorwaarden:

1. een grenswaarde van 1 l/s/m voor het toelaatbare gemiddelde overslagdebiet over een dijk of lage (verdedigde) duin (met bebouwing)
2. eisen omtrent de stabiliteit van de zeedijk;
3. een duinafslag die niet verder terugschrijdt dan de bewoning;
4. een resterend duinvolume, na duinafslag, dat voldoende groot is.

2.2 Veiligheidslijn

De veiligheidslijn, vastgelegd binnen het Masterplan Kustveiligheid, geeft aan welke gebieden beschermd worden tegen een stormvloed. Het gaat hier vooral om woon- en woonuitbreidingsgebieden. De toetsing van de kustsecties dient te gebeuren langs deze veiligheidslijn, en dit voor alle toetsingsscenario's.

Deze lijn is een ononderbroken lijn langs de kust, van de grens met Frankrijk in De Panne tot deze met Nederland in Knokke, inclusief 2 geïsoleerde woonzones in de haven van Zeebrugge.

Deze lijn is bepaald als:

- De meest zeewaartse grens van bewoning,
- Of, in (onbewoonde) dungebieden, als de hoogtelijn overeenstemmend met de maatgevende waterstand aan de landzijde van de duin.

De positie van deze lijn, dewelke afhankelijk is van het te toetsen zeespiegelstijgingsscenario, wordt ter beschikking gesteld door de aanbestedende overheid.

3 Algemene methodologie voor de veiligheidstoetsing

3.1 Inleiding

Bij een toetsing wordt de terugkeerperiode van de maatgevende stormvloed opgelegd, hier is dit $T = 1000$ jaar voor alle zeespiegelstijgingsscenario's. Voor de volledige eerstelijns zeewering, i.e. alle duin- en dijksecties¹, wordt geëist dat deze bij voorkomen van de stormvloed geen faling vertoont.

Faling kan bijvoorbeeld zijn dat de duin verder afslaat dan toegestaan, dat het overslagdebiet het vooropgestelde maximale overslagdebiet overschrijdt, dat de stabiliteit van de dijk niet meer gegarandeerd is, ... Wat de gevolgen (materiële schade en slachtoffers) zijn, wordt niet bepaald.

3.2 Procedure bij de toetsing

De eerstelijns zeewering wordt beoordeeld op het al dan niet falen bij het voorkomen van de maatgevende stormvloed. Concreet betekent dit dat de veiligheid van alle 255 kustsecties wordt geëvalueerd. Hiertoe wordt de kust opgedeeld in kustzones, opdat 2D morfologische veranderingen en hydrodynamische effecten zo accuraat mogelijk meegenomen worden.

Elke kustsectie krijgt na de toetsing een beoordeling:

- **voldoende** indien het profiel de gestelde veiligheidsnorm haalt
- **onvoldoende** indien het profiel de gestelde veiligheidsnorm niet haalt
- **onzeker** indien essentiële data ontbreken of indien de methodologie niet toelaat met zekerheid een oordeel te vellen

Voor het falen van de zeewering geldt een strenge definitie: het aantal slachtoffers tijdens de maatgevende stormvloed dient aanvaardbaar laag te zijn (een nulrisico bestaat niet). Concreet wordt dit vertaald in de eis dat structurele schade aan de zeedijk of bressen in de duinen niet kunnen toegelaten worden (gevaar voor overstromingen van het achterland). Daarnaast mogen gebouwen die zich op de zeewering bevinden niet structureel beschadigd worden en mogen de mensen die in deze gebouwen wonen niet in levensgevaar komen door het overslaande water.

De vertaling van deze algemene eisen naar concrete eisen is verschillend voor dijken en voor duinen. Om het risico voldoende klein te houden, zijn veiligheden toegevoegd die voor beide types zeewering anders zijn, maar wel (bij benadering) dezelfde extra veiligheidsmarge geven.

Dijken worden getoetst met hydraulische belastingen die een overschrijdingsfrequentie hebben gelijk aan de veiligheidsnorm. Er mag dan nog geen initiële schade zijn opgetreden die tot falen kan leiden van enig waterkerend onderdeel van de kering. Door de aanwezige 'reststerkte' wordt verondersteld dat de doorbreekkans kleiner is (Figuur 1). Bijvoorbeeld: het falen van de dijkbekleding zal een beoordeling 'onvoldoende' geven, onafhankelijk van het feit of verdere afslag van het dijkvolume resulteert in bresvorming of schade aan gebouwen. Dit geeft een extra veiligheidsmarge. Daarnaast is de mate van strandafslag tijdens en ten gevolge van de maatgevende stormvloed van groot belang voor de

¹ In Toetsing kustveiligheid 2021 worden de havens van Nieuwpoort, Oostende, Blankenberge en Zeebrugge niet beschouwd

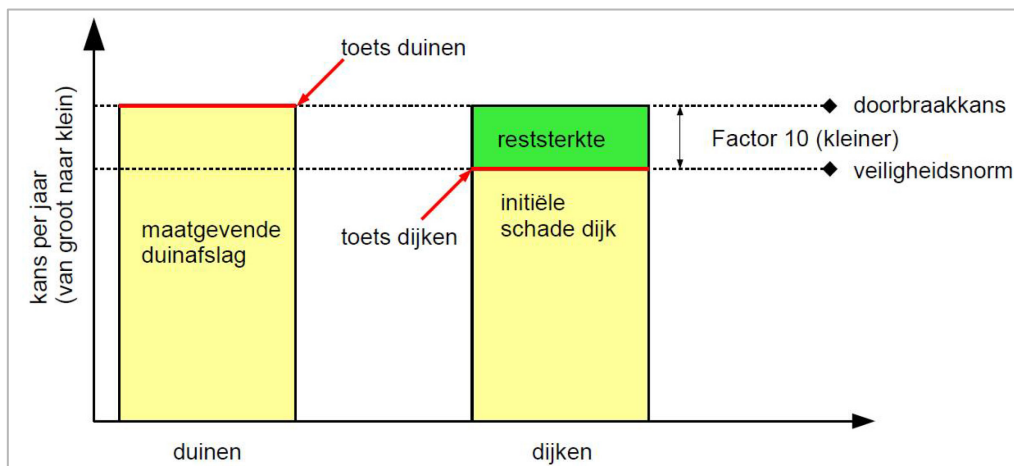
hydrodynamische belasting op de zeedijk. Daarom wordt voor de strandafslagberekening ook een extra veiligheidsmarge ingebouwd, analoog aan deze bij duinen (zie verder).

Duinen worden getoetst onder de aanname dat er net geen doorbraak optreedt bij de maatgevende stormvloed, dus geen bresvorming. Als zeewering ontlenen zij hun sterkte aan de hoeveelheid zand waaruit ze zijn opgebouwd en aan hun geometrie (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007). Er dient bijgevolg steeds een resterend duinprofiel aanwezig te zijn dat overstroming van het achterland net verhindert. De overschrijdingsfrequentie waarmee wordt gerekend, is een factor 10 keer kleiner dan de veiligheidsnorm (deze factor is een veronderstelling) (Figuur 1, Boers, 2012).

Gezien het aantal duinafslagbepalende grootheden en het stochastisch karakter ervan, is bij de ontwikkeling van dit toetsspoor voor een semi-probabilistische aanpak gekozen. Hierbij wordt rekening gehouden met de nauwkeurigheid van het rekenmodel, het stochastische karakter van de duinafslagbepalende factoren en de duur van de maatgevende stormvloed.

Deze toetsingsmethode is zodanig opgesteld dat de gemiddelde jaarlijkse overschrijdingskans van de berekende duinafslag gelijk is aan de toelaatbare bezwijkkans (Boers, 2012). Van een goed waterkeringsontwerp wordt immers geëist dat enige overschrijding van het ontwerppeil niet meteen tot doorbreken zal leiden. De overschrijdingsfrequentie van het ontwerppeil mag dus niet geïnterpreteerd worden als een bezwijkfrequentie. Deze vereiste veiligheidsmarge bij het optreden van een waterstand gelijk aan het ontwerppeil is tot uitdrukking gebracht in een factor waarmee de overschrijdingsfrequentie van het ontwerppeil vermenigvuldigd moet worden om tot een maatgevende doorbreekkans per jaar voor een duinsectie te komen.

Deze factor is vastgesteld op 0.1 en vertaalt zich in het gebruik van 2/3 decimeringshoogte op de hydraulische randvoorwaarden voor duin- en strandafslagmodellering (TAW, 1984). Deze decimeringshoogte is het verschil tussen de waarde van de grootheid voor de terugkeerperiode ($T = 1000$) van de maatgevende stormvloed en een factor 10 keer hogere terugkeerperiode ($T = 10000$). Bijkomend wordt een kleinere korrel diameter (rekenkorrel diameter) gebruikt.



Figuur 1 – Concept bepaling veiligheidsnorm voor duinen en dijken (Boers, 2012)

Een kustsectie wordt als een **dijk** getoetst indien er zich op de zeewering bewoning bevindt en er zich zeewaarts van deze bewoning nog een hard zeewerend talud bevindt (Figuur 2A). De sterkte van de zeewering is hier gebaseerd op de aanwezigheid van een zandlichaam, i.e. het strand, en een harde constructie, waarbij het voorliggende deel reeds bescherming biedt aan het achterliggende (Boers, 2012). Op dit harde zeewerende talud kan tevens een (mobiele) stormmuur gebouwd zijn, of de harde constructie kan als een golfdempende uitbouw gebouwd zijn (Figuur 2B).

Bij een **duin** is er geen hard zeewerend talud of geen bewoning op de zeewering (Figuur 3A). Indien het duin (deels) een hard (al dan niet zeewerend) talud heeft, i.e. een duinvoetverdediging, is het een **verdedigd duin** (Figuur 3B).

Soms is het onderscheid tussen deze 3 types zeewering niet eenduidig te bepalen; voor alle kustsecties wordt daarom opgelegd welk toetsspoor gevolgd dient te worden.



Figuur 2 – Voorbeeld Toetsspoor dijk: A. hard zeewerend talud te Blankenberge – B. golfdempende uitbouw te Wenduine
(foto's W+B – Toetsing kustveiligheid 2015)

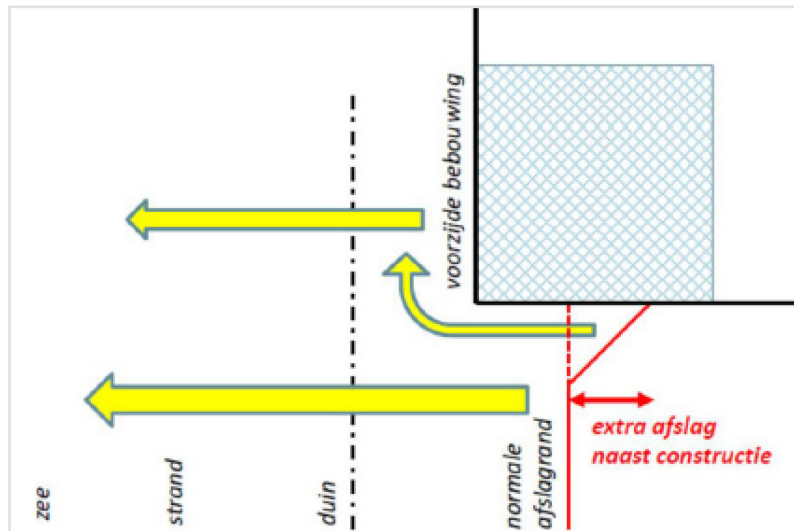


Figuur 3 – Voorbeeld Toetspoor duin: A. duin te Koksijde – B. verdedigd duin: Spinoladijk te Bredene
(foto's W+B – Toetsing kustveiligheid 2015)

Aansluitingsconstructies, waar er een overgang is van het ene type zeewering naar een ander (bijv. overgang van een dijk naar een duin), komen ook vaak voor langs de kust. Deze dienen getoetst te worden voor beide types zeewering.

De aanwezigheid van **bebouwing** kenmerkt de kustlijn. Appartementsblokken, huizen, surf clubs,... hebben primair geen waterkerende functie. Indien deze bebouwing echter bewoond wordt, wordt deze beschermd (cf. Sectie 2.2). Daarom mag er geen duin- of strandafslag tot zo een gebouw komen en beïnvloedt het gebouw bijgevolg de morfologische veranderingen ten gevolge van de maatgevende stormvloed niet. Echter, niet-beschermd bebouwing die zich in de duin- of strandafslagzone bevindt, kan een negatieve invloed hebben op de veiligheid van (een deel van) de kustsectie. Deze **niet-waterkerende objecten (NWO's)** zullen extra afslag naast het betreffende gebouw veroorzaken (Figuur 4). In Toetsing kustveiligheid 2021 dient een gebouw als NWO beschouwd te worden indien aan volgende voorwaarden voldaan wordt:

- Het gebouw ligt in een zone waar de bathymetrie tijdens de stormvloed gewijzigd wordt
- De vloeroppervlakte van het gebouw is groter dan 15m², tenzij het duidelijk is dat het gebouw geen weerstand kan bieden tijdens de maatgevende stormvloed (dient in overleg met de aanbestedende overheid bepaald te worden).
- Het betreft de basistoetsing (toestand van de zeewering in 2021) (cf. Sectie 1.2)



Figuur 4 – Effect van de herverdeling van het afgeslagen zand ten gevolge van een harde constructie, wat resulteert in extra afslag naast deze constructie (Boers *et al.*, 2014)

Verharde wegen (verhard wegdek, straatstenen, asfaltering,...) zijn uiteraard ook een type bebouwing. Aangezien aangetoond werd dat deze bebouwing tijdens de maatgevende storm uit elkaar valt in kleine stukken, dient hiermee geen rekening te worden gehouden bij duin- en strandafslagberekeningen (Van Gent, 2008 in Boers, 2012).

De beoordeling kan door de beheerder (Afdeling Kust) gewijzigd worden indien de score niet voldoende of onzeker is en er gegronde redenen zijn om de beoordeling te wijzigen. Het is hiertoe belangrijk dat de nodige informatie verzameld wordt. Gevallen die aanleiding kunnen geven tot een **beheerdersoordeel** zijn:

- De afslag voor een beschermd gebouw is slechts zeer beperkt meer dan toegelaten (ligging resterend duinvolume minder dan 0.3m onder het grensprofiel (cf. Sectie 5.2.2)
- Het gemiddeld overslagdebiet is lager dan 3l/s/m en de onderkant van het raam van een beschermd gebouw bevindt zich op minstens 0.2m boven het maaiveld of het gelijkvloers van het beschermd gebouw heeft geen woonfunctie (bijv. horeca of winkel).
- Het gemiddeld overslagdebiet is lager dan 3l/s/m en de maximale laagdikte ter hoogte van de veiligheidslijn is minder dan 0.1m.
- Zonder het effect van een NWO/faling van de dijkbekleding zou de beoordeling voldoende zijn, met het effect in rekening gebracht niet voldoende

3.2.1 Duinen

De beoordeling van duinen gebeurt door het berekenen van de duinafslag tijdens de maatgevende stormvloed, en in sommige gevallen ook door het bepalen van het gemiddeld overslagdebiet (zie onder, punt 3). Het oorspronkelijke duinvolume slaat af tijdens de maatgevende stormvloed, en wijkt achteruit.

Drie faalmechanismen worden onderscheiden:

1. Indien het afgeslagen duinvolume (mogelijks gecombineerd met golfoverslag) zo groot is dat een **bres** ontstaat
2. Indien er wel voldoende duinvolume resteert maar er overstroming optreedt landwaarts van de veiligheidslijn ten gevolge van **achterloopsheid**, i.e. er stroomt water kustlangs naar lager gelegen zones en mogelijks over de veiligheidslijn.
3. Indien er wel duinvolume resteert maar het duin te ver is afgeslagen om **schade** aan beschermde **bebouwing** te vermijden

Een verdedigde duin dient initieel getoetst te worden zonder diens harde talud in rekening te brengen, m.a.w. dit wordt als bezwaken beschouwd. Een gedeeltelijk faling van het talud dient wel in rekening gebracht te worden: dit leidt tot extra erosie ter hoogte van de gedeeltelijke faling (cf. Figuur 4). Bemerkt dat, indien deze faling leidt tot een 'onvoldoende' als beoordeling, er soms bijkomend een berekening dient uitgevoerd te worden waarbij dit harde zeewerende talud in de kustsectie is opgenomen (zie verder, Sectie 5.3).

3.2.2 Dijken

De beoordeling van dijken gebeurt door het toetsen van de hoogte en sterkte van de zeewering onder maatgevende stormvloedcondities. Hiertoe wordt eerst de ligging van het voorliggend strand bepaald (ten gevolge van deze stormvloedcondities). De dijk wordt getoetst op golfoverslag en stabiliteit (bekleding), waarbij rekening gehouden wordt met de beschermende werking van het voorliggend strand (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007).

Twee faalmechanismen worden onderscheiden:

1. De golfoverslag overschrijdt de gestelde grenswaarde van 1 l/s/m voor het toelaatbare gemiddelde overslagdebiet. Dit leidt mogelijks tot overstroming en/of een te hoog risico voor de mensen die zich in de gebouwen op de zeewering bevinden (ten gevolge van stabiliteitsproblemen of binnenstromend water).
2. Er treedt initiële schade op aan de bekleding van de dijk.

4 Hydraulische randvoorwaarden

4.1 Basis: het hydraulisch randvoorwaardenboek

Het hydraulisch randvoorwaardenboek (Vuik *et al.*, 2020) bevat de waterstand h , significante golfhoogte H_{m0} , golfpiekperiode T_p en directionele spreiding van de golven voor de maatgevende stormvloed in alle zeespiegelstijgingsscenario's. Tabel 12 en Bijlage A in Vuik *et al.*, 2020 tabelleren resp. alle waarden voor de scenario's zonder zeespiegelstijging en met zeespiegelstijging, uitgezonderd de directionele spreiding van de golven (Tabel 13).

Voor elke kustsectie is er een uitvoerpunt op de zeewaartse rand met deze hydraulische randvoorwaarden. Het uitvoerpunt ligt, bij voorkeur, op de fysische (onder)grens van de golfbrekingszone voor de kust (in maatgevende stormcondities), i.e. op de -5m TAW dieptelijn. Tevens komt de -5m TAW dieptelijn ongeveer overeen met de 'knik' in de bathymetrie die het begin van de strandhelling aangeeft.

De keuze tussen een uitvoerpunt op de -5m TAW contour of 1500m uit de kust is bepaald door de positie van de (meest zeewaarts gelegen) -5m TAW dieptelijn. Indien deze -5m TAW contour zich verder dan 1500m van de zeedijk bevindt, wordt het uitvoerpunt op 1500m gekozen teneinde het modeldomein beheersbaar te houden. Op Figuur 27 t.e.m. 40 in Vuik *et al.*, 2020 worden de hydraulische randvoorwaarden (voor het scenario zonder zeespiegelstijging) weergegeven op elk uitvoerpunt.

Bemerkt dat voor de zeespiegelstijgingsscenario's de (onder)grens van de golfbrekingszone uiteraard verandert, maar dezelfde uitvoerpunten behouden blijven omwille van conformiteit.

4.2 Tijdsverloop van de maatgevende stormvloed

Om de morfologische veranderingen, i.e. duin- en strandafslag, te bepalen ten gevolge van de maatgevende stormvloed dient het verloop van de hydraulische randvoorwaarden, i.e. de waterstand, golfhoogte en golfperiode, berekend te worden. Deze maatgevende stormvloed heeft een duurtijd van 45u.

Het verloop van de waterstand wordt bepaald door het astronomisch getij (tijdens een gemiddeld springtij) en de asymmetrische stormopzet van de theoretische stormvloed:

$$O(t) = O_{max} \cos^2 \left(\frac{\pi \cdot t}{T_s} \right)$$

met $O(t)$ het tijdsverloop van de stormopzet; O_{max} de maximale stormopzet bij hoog water; t de tijd tot de maximale stormopzet, die plaatsvindt op $t = 18u$ (in u) en T_s de duurtijd van de stormvloed (in u). De totale duurtijd T_s bedraagt 45 uur; door dit op te splitsen in $T_s = 35$ uur voor de maximale stormopzet en $T_s = 55$ erna wordt asymmetrie verkregen (Verwaest *et al.*, 2008).

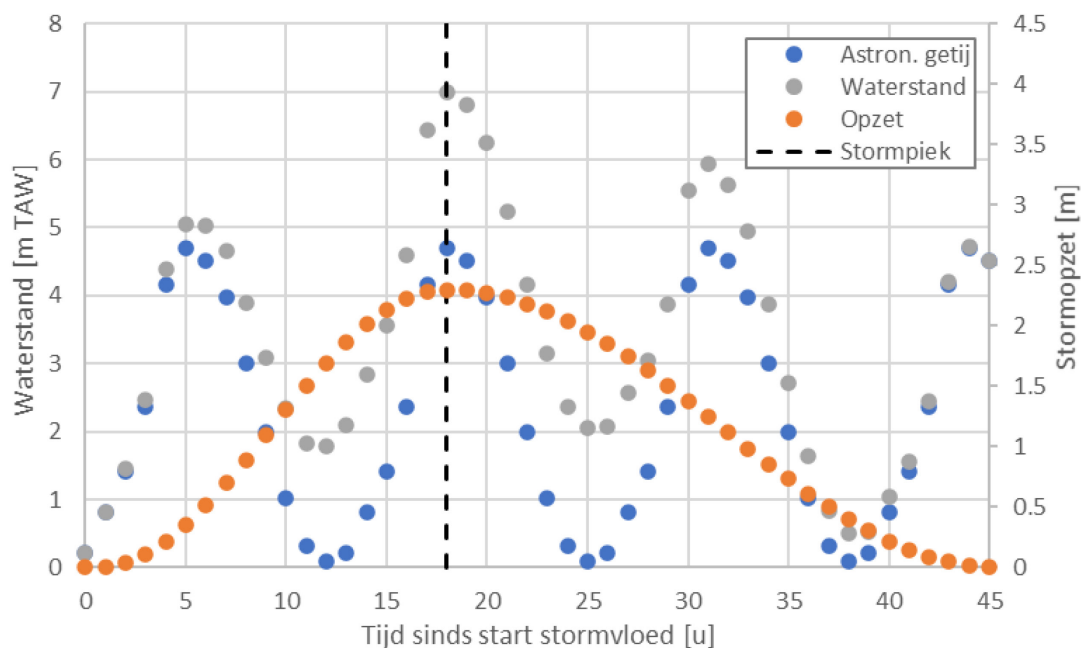
Het golfklimaat van de maatgevende stormvloed valt loodrecht in op de zeewering, weliswaar met een locatiespecifieke richtingsspreiding. Voor de variatie in golfhoogte $H_s(t)$ en -piekperiode $T_p(t)$ tijdens de stormvloed dient een gelijkaardige formule gebruikt te worden:

$$H_s(t) = H_{s,max} \cos^2 \left(\frac{\pi \cdot t}{T_s} \right)$$

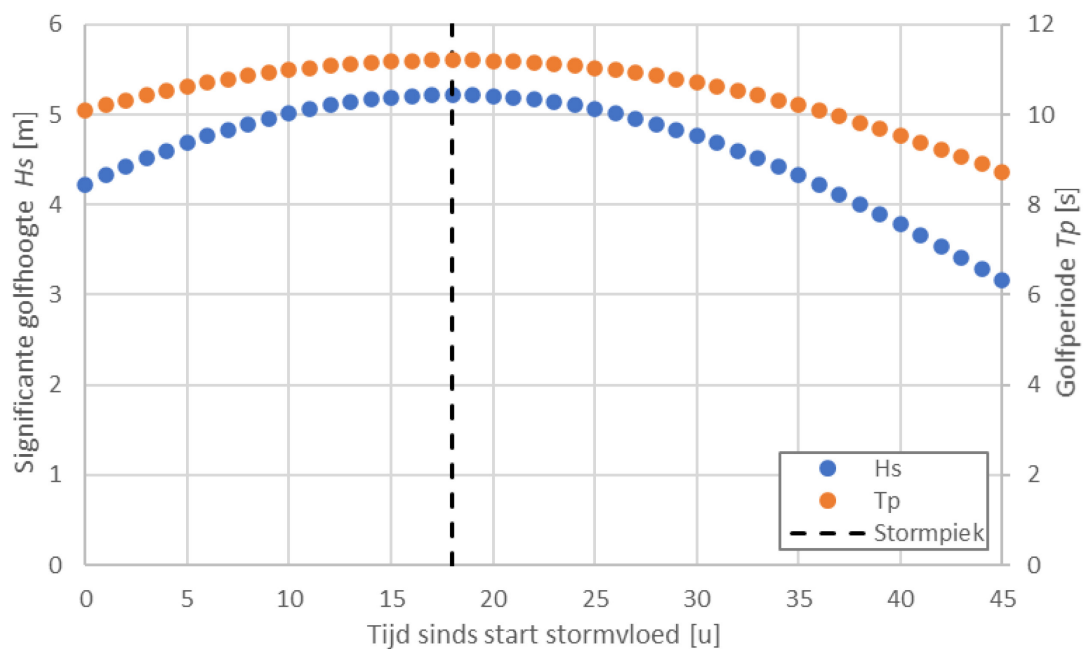
$$T_p(t) = T_{p,max} \cos \left(\frac{\pi \cdot t}{T_s} \right)$$

met $H_{s,max}$ en $T_{p,max}$ de maximale golfhoogte en -periode bij hoog water (op $t = 18u$). De duurtijd van de stormvloed bedraagt $T_s = 125u$. Hierdoor zijn de golfcondities aan het begin en einde van de stormvloed gelijk aan gemiddelde waarden onder normale omstandigheden (en niet gelijk aan nul) (Verwaest *et al.*, 2008).

Figuur 5 en Figuur 6 illustreren resp. het verloop van de waterstand en golfcondities tijdens de maatgevende stormvloed (zonder zeespiegelstijging) voor de haven van Oostende.



Figuur 5 – Verloop van de stormopzet en waterstand tijdens de maatgevende stormvloed (voorbeeld haven Oostende)



Figuur 6 – Verloop van de significante golfhoogte en -piekperiode tijdens de maatgevende stormvloed (voorbeeld haven Oostende)

4.3 Overzicht benodigde randvoorwaarden

Er zijn verschillende hydraulische randvoorwaarden nodig afhankelijk van het te beschouwen mechanisme of te toetsen onderdeel. Hieronder volgt een oplistings van deze randvoorwaarden, waarbij steeds verondersteld wordt dat de golven loodrecht invallen ten opzichte van de kustlijn.

4.3.1 Duin- en strandafslag

De morfologische veranderingen tijdens en ten gevolge van de maatgevende stormvloed worden bepaald door een 45u. durende stormvloed te modelleren met XBeach (zie verder, Sectie 7.1). Als invoer dient een tijdsafhankelijke variatie van de hydraulische randvoorwaarden opgelegd te worden (zie vorige Sectie 4.2).

Hierbij worden zowel de waterstand als de golfcondities van de maatgevende stormvloed verhoogd met 2/3 van de decimeringshoogte (eveneens getabelleerd in Vuik *et al.*, 2020), en wordt er bijkomend met een kleinere korreldiameter, i.e. een rekenkorreldiameter, gerekend (zie bijlage bij bestek 16EH/19/21).

4.3.2 Golftransformatie en -overslag

Golfvoortplanting vanop de zeewaartse rand van de kustsectie tot aan de duin of dijk en de mogelijke golfoverslag over de zeewering wordt bepaald door de stormpiek (rond het hoogste hoogwater) van de maatgevende stormvloed te modelleren met Swash (zie verder, Sectie 7.2). Als invoer dienen de hydraulische randvoorwaarden zonder 2/3 decimeringshoogte, zoals getabelleerd in Vuik *et al.*, 2020, opgelegd te worden.

4.3.3 Stabiliteit dijktaalud

De stabiliteit van het dijktaalud en de blauwe hardsteen wordt getoetst op verschillende faalmechanismen (zie bijlage bij bestek 16EH/19/21). Als invoer dient het invallend golfklimaat ter hoogte van de dijk gebruikt te worden, meer bepaald 25m zeewaarts van het snijpunt tussen de waterstand en het dijktaalud. Daarnaast is de waterstand van de maatgevende stormvloed nodig, alsook het gemiddeld laag en hoog water (zie bijv. getijdenboekje).

Het invallend golfklimaat, i.e. de significante golfhoogte H_{m0} en de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$, wordt bekomen door post-processing van de verheffingstijdreeksen uit het betreffende Swash model ter hoogte van de teen van de dijk (zie Sectie 7.2.5):

- Uit de resulterende totale significante golfhoogte kan de invallende golfhoogte berekend worden door totale reflectie te veronderstellen, i.e. deze totale golfhoogte wordt gedeeld door 1.41
- De spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ blijft gelijk.

5 Toetsen van (verdedigde) duinen

5.1 Inleiding

Als basis voor de toetsing van (verdedigde) duinen en aansluitingsconstructies waarbij minimaal één zeewering tot het type (verdedigde) duin behoort, zijn deze Nederlandse rapporten gebruikt:

- Technisch Rapport Duinwaterkeringen en Hybride Keringen 2011 (Boers, 2012). Dit vervangt het voorgaande Technisch Rapport Duinafslag (ENW, 2007) en de Leidraad Duinafslag (TAW, 1984)
- Handleiding NWOs in duin (Boers *et al.*, 2014)

5.2 Toetsspoor: duin

Voor het toetsen van een duin zijn er 2 hoofdsporen te onderscheiden (Figuur 7):

- **Duin zonder bewoning:** Veiligheidslijn wordt bepaald door de landwaartse grens van de hoogtelijn overeenstemmend met de maatgevende waterstand

Het bezwijkgedrag van een duin zonder bewoning wordt gekenmerkt door:

1. Vermindering van het duinvolume boven het rekenpeil door duinafslag;
2. De duin is zo ver afgeslagen dat water over de veiligheidslijn kan stromen. In dat geval is een grootschalige overstrooming van het achterland mogelijk.

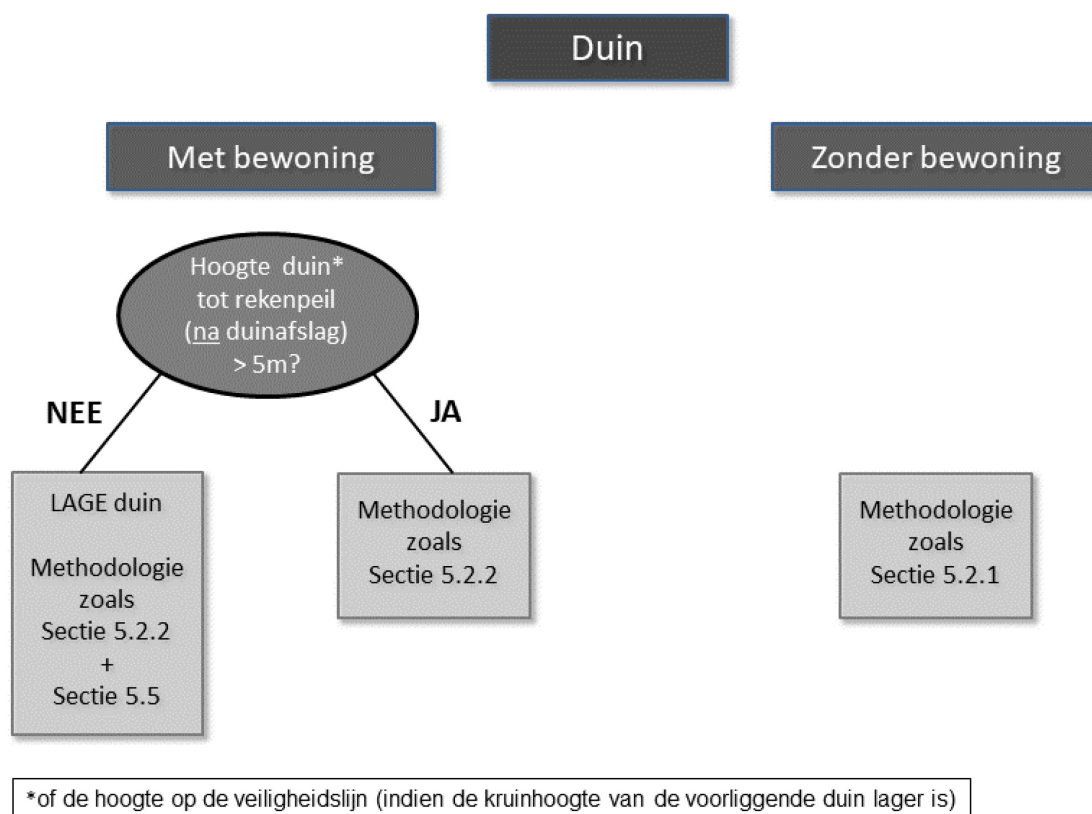
De veiligheid van het achterland is dus gewaarborgd indien punt 2. niet wordt bereikt tijdens of ten gevolge van de maatgevende stormvloedcondities.

- **Duin met bewoning:** Veiligheidslijn wordt bepaald door de zeewaartse grens van het gebouw.

Het bezwijkgedrag van een duin met bewoning wordt gekenmerkt door:

1. Vermindering van het duinvolume boven het rekenpeil door duinafslag;
2. De duin is zo ver afgeslagen dat schade aan het gebouw mogelijk wordt, ten gevolge van golfoverslag of erosie van de grondmassa voor het gebouw

De veiligheid van de bebouwing is dus gewaarborgd indien punt 2. niet wordt bereikt tijdens of ten gevolge van de maatgevende stormvloedcondities.



Figuur 7 – Flowchart voor het toetsen van een duin met of zonder bewoning

5.2.1 Duin zonder bewoning

Duinen zonder bewoning worden getoetst onder de aanname dat er net geen doorbraak optreedt tijdens of ten gevolge van de maatgevende stormvloed.

Na de duinafslagberekening (zie Sectie 7.1 voor bespreking toetsingsmodel en Sectie 5.6 voor toeslag eventuele aanwezigheid van een NWO) worden hiertoe enkele parameters berekend:

- **De kruin van het afgeslagen duinprofiel en de duinvoet van het resterend kustdwarsprofiel na duinafslag**

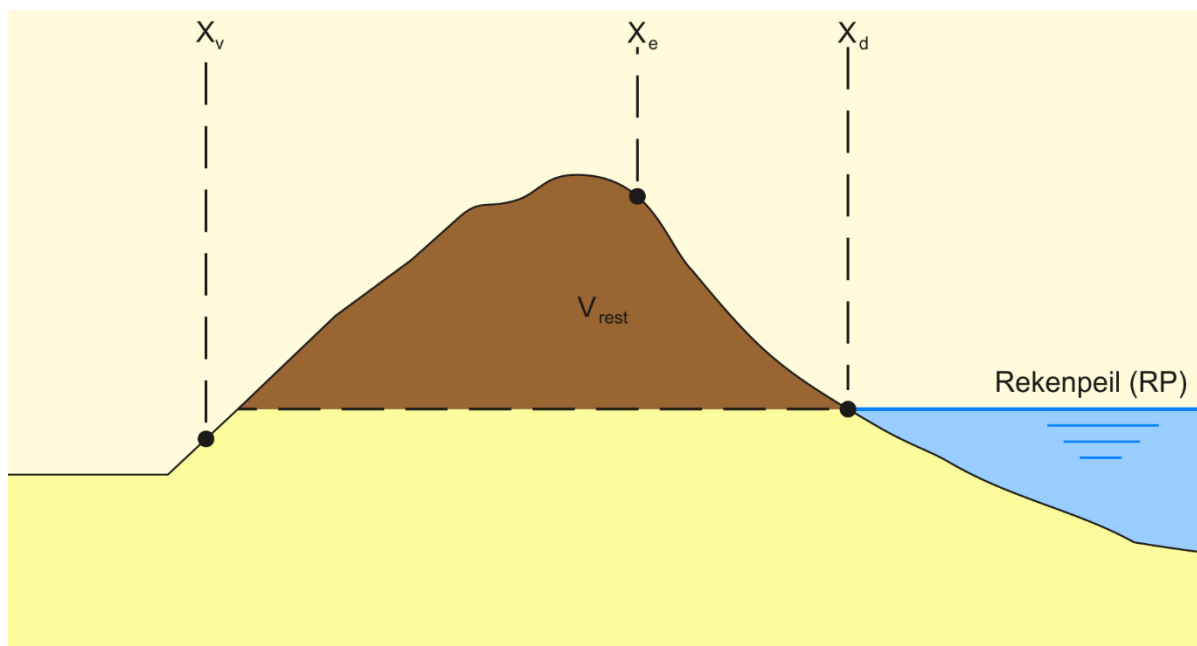
Na de duinafslagberekening, inclusief toeslag (zie Sectie 7.1 en 5.6), resteert een duinvolume met bepaalde kenmerken. De ligging van de kruin van het afgeslagen duinvolume, X_e , en van de duinvoet, X_d , worden bepaald (Figuur 5). De ligging van deze kruin X_e wordt gedefinieerd als het meest landwaartse punt waar duinafslag opgetreden is. De ligging van de duinvoet X_d wordt gedefinieerd als het snijpunt van het rekenpeil en het resterend duinvolume.

Ook de ligging van de veiligheidslijn X_v is weergegeven.

- **Het resterend duinvolume na duinafslag**

Het **restvolume** V_{rest} is het duinvolume dat resteert boven het rekenpeil na de maatgevende stormvloed, waarbij de toeslag reeds in rekening is gebracht (Figuur 8). Bij de berekening van het restvolume V_{rest} wordt het resterende duinvolume, inclusief eventuele achterliggende duinengordels (zeewaarts van de veiligheidslijn), in aanmerking genomen.

Daarnaast wordt ook het **afslagvolume** V_{afslag} berekend; het duinvolume dat afgeslagen is ten gevolge van de maatgevende stormvloed.



Figuur 8 – Parameters duinafslag

De **beoordeling** van de duin zonder bewoning neemt bovenvermelde parameters in beschouwing, en is gestoeld op volgende voorwaarden:

- Er resteert een duinvolume boven het rekenpeil, V_{rest} , waardoor er geen overstroming over de veiligheidslijn in de beschouwde kustsectie optreedt
- Er treedt geen achterloopsheid op: water kan mogelijks kustlangs naar naburige kustsecties stromen achter de eerste (meest zeewaartse) duingordel van deze kustsecties en zo alsnog over de veiligheidslijn stromen. Indien dergelijke faling optreedt en de eerste duingordel is in meerdere kustsecties doorbroken, dan is het niet éénduidig vast te stellen welke kustsecties hiertoe hebben bijgedragen. Er dient bijgevolg een kwalitatieve inschatting gemaakt te worden of de beschouwde kustsectie hiertoe heeft bijgedragen

Indien aan deze voorwaarden voldaan is, wordt de duinsectie beoordeeld als voldoende ten opzichte van de gestelde norm voor kustveiligheid (cf. Hoofdstuk 2). Op het resterend duinvolume na duinafslag dienen de punten X_d , X_e en X_v aangeduid te worden; en de afslag- en restvolumes, V_{afslag} en V_{rest} respectievelijk, berekend te worden.

5.2.2 Duin met bewoning

Duinen met bewoning worden getoetst onder de aanname dat er geen schade aan het gebouw optreedt bij de maatgevende stormvloed. Er dient bijgevolg steeds een minimaal duinvolume aanwezig te zijn landwaarts van het afgeslagen duinvolume teneinde een negatieve beïnvloeding van de duinafslag op het draagvermogen van de (ondiepe) fundering van een gebouw te voorkomen. Dit kan immers leiden tot het bezwijken van het gebouw.

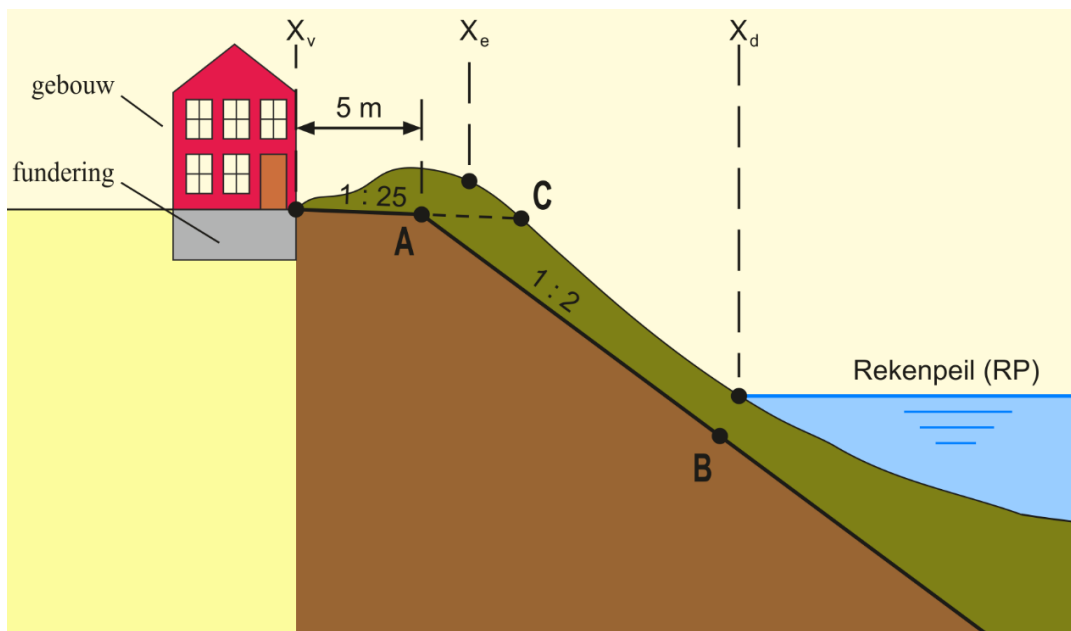
Na de duinafslagberekening, inclusief toeslag (zie Sectie 7.1 voor bespreking toetsingsmodel en Sectie 5.6 voor toeslag eventuele aanwezigheid van een NWO), resteert een duinvolume met bepaalde kenmerken (Figuur 9). De ligging van de kruin van het afgeslagen duinvolume, X_e , en van de duinvoet, X_d , worden bepaald. De ligging van deze kruin X_e wordt gedefinieerd als het meest landwaartse punt waar duinafslag opgetreden is. De ligging van de duinvoet X_d wordt gedefinieerd als het snijpunt van het rekenpeil en het resterend kustdwarsprofiel.

Er dient nagegaan te worden of dit resterend duinvolume zich volledig zeewaarts van het minimale vereiste duinprofiel, i.e. het grensprofiel $X_v - A - B$, voor de bewoning bevindt. Bijkomend wordt het restvolume V_{rest} berekend als het resterend duinvolume boven het rekenpeil dat zeewaarts van het grensprofiel ligt.

De **beoordeling** van de duin met bebouwing is gestoeld op volgende 2 voorwaarden (zie Figuur 9):

- Het punt C, i.e. het punt waar de helling (1/25) gevormd door X_v en het punt A het resterend duinvolume na duinafslag snijdt, dient zeewaarts van het punt A te liggen;
- Het resterend duinvolume na duinafslag dient volledig zeewaarts het grensprofiel te liggen (met limietlijn AB met helling 1/2, beginnend op 5m van X_v).

Indien aan beide voorwaarden voldaan is, wordt het duinprofiel beoordeeld als voldoende ten opzichte van de gestelde norm voor kustveiligheid (cf. Hoofdstuk 2). Op het resterend duinvolume na duinafslag dienen de punten X_d , X_e , X_v , A en C aangeduid te worden, alsook de limietlijn AB.



Figuur 9 – Minimum vereisten voor de afstand van het resterend duinvolume tot de bebouwing, en dus de veiligheidslijn (X_v)

5.3 Toetsspoor: verdedigde duin

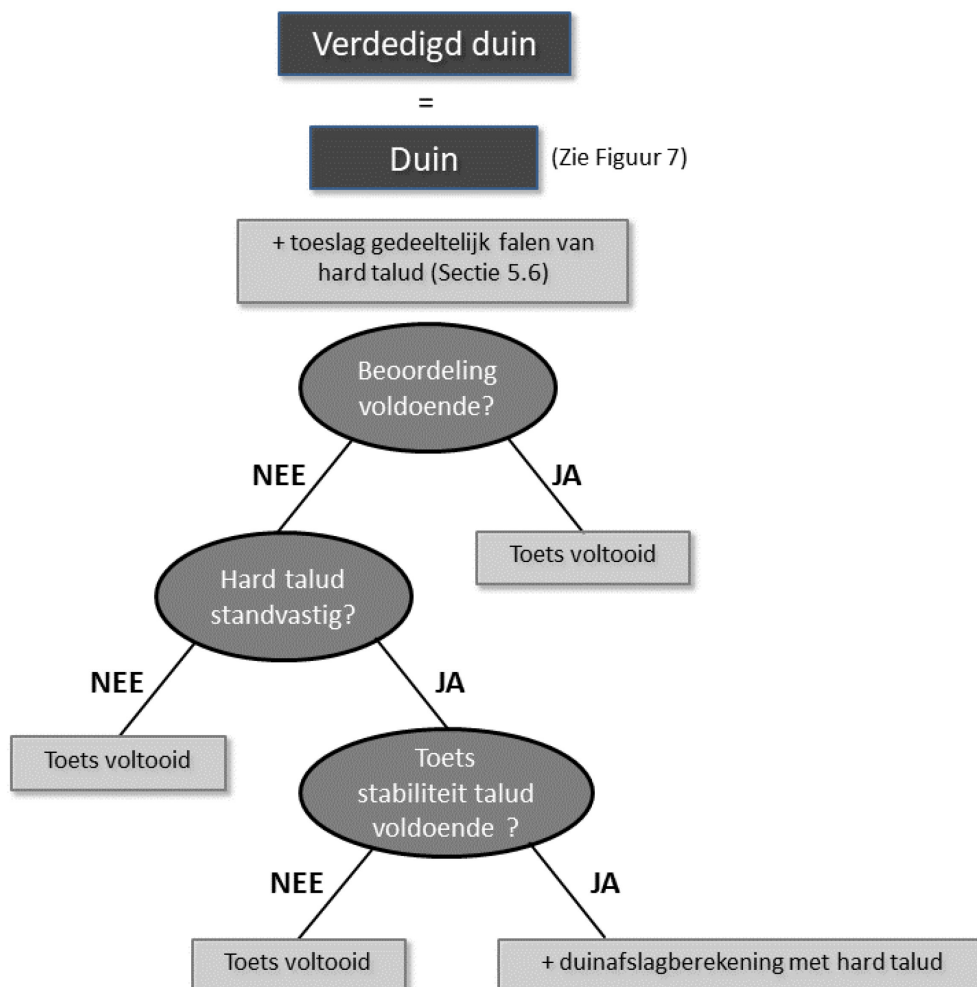
Voor het toetsen van een verdedigd duin wordt er initieel geen rekening gehouden met diens harde talud, en wordt deze getoetst zoals een duin (cf. Sectie 5.2). Bijkomend dient er echter wel rekening gehouden te worden met het potentieel gedeeltelijk falen van dit harde talud. Ter hoogte van het gefaalde deel treedt dan immers meer duinafslag op. Deze extra duinafslag wordt beschouwd als een toeslag op het initieel geërodeerd duinvolume, voor de uitwerking hiervan: zie Sectie 5.6.

Indien aan de voorwaarden van het betreffende toetsspoor van de duin voldaan is, wordt de verdedigde duinsectie beoordeeld als voldoende ten opzichte van de gestelde norm voor kustveiligheid (cf. Hoofdstuk 2). Op het resterend duinvolume na duinafslag dienen de punten X_d , X_e , X_v aangeduid te worden, en dit zowel met als zonder toeslag voor gedeeltelijk falen van het harde talud. De afslag- en restvolumes, V_{afslag} en V_{rest} respectievelijk, dienen eveneens berekend te worden.

Indien de verdedigde duinsectie als onvoldoende beoordeeld wordt, onderscheidt men 2 gevallen:

- Een hard talud als duinvoetverdediging, aan dewelke initiële schade wordt verwacht tijdens de maatgevende storm (stabiliteit twijfelachtig) (vb. duinvoetverdediging ter hoogte van De Panne: verhindert duinerosie tijdens kleine stormen, maar biedt onvoldoende bescherming bij grotere stormen): de beoordeling blijft onvoldoende: geen verdere uitwerking
- Een hard talud als duinvoetverdediging, welke het karakter van een dijk heeft waarvan de stabiliteit te toetsen is (vb. duinvoetverdediging tussen Raversijde en Middelkerke, Spinoladijk tussen Oostende en Bredene):
 - o De stabiliteit van het harde talud wordt getoetst (zie bijlage bij bestek 16EH/19/21)
 - o Indien de stabiliteit als voldoende beoordeeld wordt, dient een bijkomende duinafslagmodellering uitgevoerd te worden, waarbij het harde talud opgenomen wordt in de modelopbouw (zie Sectie 7.1 voor bespreking afslagmodel).

Indien vervolgens aan de voorwaarden van het betreffende toetsspoor van de duin voldaan is, wordt de verdedigde duinsectie beoordeeld als voldoende ten opzichte van de gestelde norm voor kustveiligheid (cf. Hoofdstuk 2). Op het resterend duinvolume na duinafslag dienen de punten X_d , X_e , X_v aangeduid te worden; en de afslag- en restvolumes, V_{afslag} en V_{rest} respectievelijk, berekend te worden.



Figuur 10 – Flowchart voor het toetsen van een verdedigd duin

5.4 Toetsspoor: aansluitingsconstructie

Bij de overgang tussen twee types zeewering, waarbij minimaal één zeewering tot het type (verdedigde) duin behoort, kan er extra duinafslag tijdens de maatgevende stormvloed optreden.

Men onderscheidt deze gevallen:

- Aansluitingsconstructie tussen een duin en een verdedigd duin, in het geval de verdedigde duinafslagberekening met hard talud wordt uitgevoerd
- Aansluitingsconstructie tussen een duin en een dijk
- Aansluitingsconstructie tussen een verdedigde duin en een dijk, in het geval de duinafslagberekening zonder hard talud wordt uitgevoerd

De extra duinafslag bij een aansluitingsconstructie is het gevolg van (Boers, 2012; Boers *et al.*, 2011):

1. een netto sediment transport in kustlangse richting, naar de aansluitende zeewering

Immers, de vrije uitwisseling van sediment (van boven tot onder het stormvloedpeil) is belemmerd ter hoogte van een harde constructie. Dit resulteert in een verminderde depositie van sediment; en dus in een relatief lager afslagvolume ten opzichte van het afgeslagen duinvolume. Bijgevolg wordt er sediment uit de depositiezone van de duin kustlangs getransporteerd (cf. Figuur 2).

2. een concentratie van de golfbelasting op de duin

Een harde constructie beïnvloedt het golfklimaat ter hoogte van de aansluitingsconstructie. Deze reflecteert de invallende golfenergie anders dan een duin, en refracteert mogelijks de golven richting duin. Dit resulteert in een concentratie van de golfenergie op de aansluitende duin.

Na de afslagberekeningen ter hoogte van de aansluitingsconstructie (zie bespreking toetsingsmodel in Sectie 7.1) dient elk type zeewering afzonderlijk getoetst te worden, volgens het van toepassing zijnde toetsspoor.

De **beoordeling** van de aansluitingsconstructie is gestoeld op volgende 2 voorwaarden:

- De duin is getoetst volgens diens relevante toetsspoor, en is beoordeeld als voldoende;
- De verdedigde duin of dijk is getoetst volgens diens relevante toetsspoor, en is beoordeeld als voldoende

Indien aan deze 2 voorwaarden voldaan is, wordt de aansluitingsconstructie beoordeeld als voldoende ten opzichte van de gestelde norm voor kustveiligheid (cf. Hoofdstuk 2).

5.5 Bijkomende toets indien lage (verdedigde) duinen met bewoning

Indien de zeewering bestaat uit een lage (verdedigde) duin met bewoning wordt golfoverslag mogelijks belangrijk. Een (verdedigde) duin is laag indien initieel of na het uitvoeren van de duinafslagberekeningen:

Hoogte (verdedigde) duin (of hoogte op de veiligheidslijn) tot het rekenpeil < 5m

In het geval het een (verdedigde) duin met bewoning betreft, dienen er overslagberekeningen uitgevoerd te worden (zie Sectie 7.2 voor bespreking golfoverslagmodel). De **beoordeling** van de kustsectie met lage (verdedigde) duinen met bewoning is bijkomend gestoeld op de gestelde grenswaarde van 1 l/s/m voor het toelaatbare gemiddelde overslagdebiet (zie Hoofdstuk 2).

In het geval het een (verdedigde) duin zonder bewoning betreft, dient geen bijkomende berekening uitgevoerd te worden, aangezien het toetsingsmodel (zie bespreking in Sectie 7.1) reeds een tijdstapafhankelijk overslagdebiet als uitvoer genereert. Deze uitvoer volstaat aangezien het gemiddelde overslagdebiet een minder belangrijk criterium is voor niet-bewoonde kustzones.

5.6 Niet-zeewerende duinvoetverdediging en NWO: negatieve invloed op duin- of strandafslag

Het principe van extra (duin- of strand)afslag dat uitgelegd werd in Sectie 0 (en geschematiseerd in Figuur 4) geldt eveneens voor een niet-zeewerende duinvoetverdediging (zie Sectie 5.3) of een NWO. Beide zijn types harde constructies die niet worden opgenomen in de modelopbouw.

De extra duin- of strandafslag ter hoogte van de gedeeltelijke faling van de duinvoetverdediging (i.e. potentiële bres) dan wel naast de NWO dient als toeslag op het afslagvolume in rekening gebracht te worden. Figuur 11 illustreert de werkwijze.

Ter bepaling van deze toeslag dient eerst het basisvolume V_1 berekend te worden: dit is het afgeslagen duin- (of strand)volume dat niet zou afgeslagen zijn indien de duinvoetverdediging of NWO niet gefaald had, m.a.w. het onthouden duin (of strand)volume. De toeslag ten gevolge van modelonzekerheid zit hierin begrepen (zie Sectie 7.1.5).

Het toeslagvolume V_2 wordt bepaald als $V_2 = \alpha V_1$. Conform Boers *et al.*, 2014 is factor α op de rand van de NWO of in de potentiële bres:

- 0.88 voor het potentiële falen van een hoge duinvoetverdediging
- 0.52 voor het potentiële falen van een lage duinvoetverdediging
- 0.3 voor NWO's in het duin- of strandafslaggebied

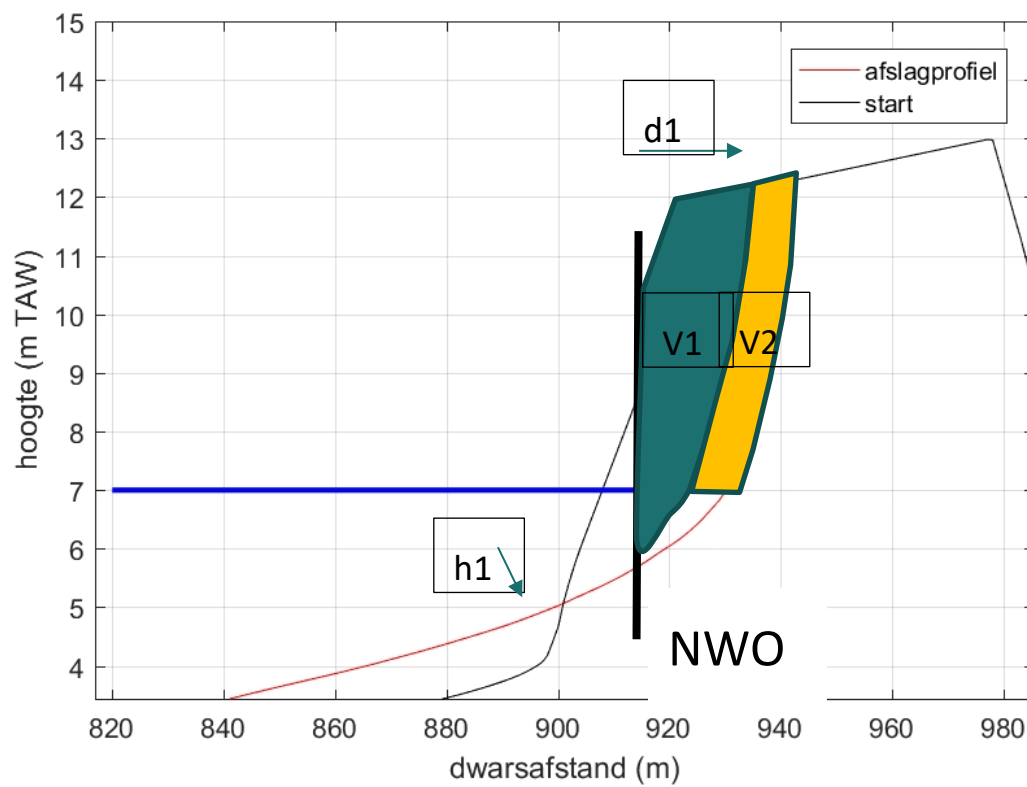
Bemerk dat 'hoge of lage duinvoetverdediging' in bovenstaande oplijsting refereert naar de kruinhoogte van de te beschouwen constructie. Indien deze lager is dan de maximale waterstand + 1m betreft het een lage duinvoetverdediging; indien deze hoger ligt, betreft het een hoge duinvoetverdediging.

De factor α neemt lineair af tot nul over een kustlangse afstand van $10 \times d_1$, waarbij d_1 de kustdwarse afstand is tussen de zeekant van de NWO/talud en het punt X_e (ligging van de kruin van het afgeslagen duinvolume).

Het toeslagvolume V_2 dient ingepast te worden door het afslagprofiel boven de maximale waterstand landwaarts te verschuiven tot V_2 begrepen zit tussen het oorspronkelijk en verschoven afslagprofiel.

Voor een duinvoetverdediging is het niet op voorhand geweten waar er mogelijk gedeeltelijk falen zal optreden. De toeslag dient bijgevolg over de volledige lengte toegepast te worden.

Indien er zich in de zone van het toeslagvolume V_2 een waterkerende constructie (dijk) bevindt, dient het afslagprofiel niet verschoven te worden vanaf de maximale waterstand maar vanaf de hoogte waar het afslagprofiel het initiële pre storm profiel snijdt (h_1 in Figuur 11).



Figuur 11 – Parameters ter bepaling van extra duin- of strandafslag bij bres duinvoetverdediging of naast NWO

6 Toetsen van dijken

6.1 Inleiding

Als basis voor de toetsing van dijken zijn deze Nederlandse rapporten gebruikt:

- Technisch Rapport Duinwaterkeringen en Hybride Keringen 2011 (Boers, 2012). Dit vervangt het voorgaande Technisch Rapport Duinafslag (ENW, 2007) en de Leidraad Duinafslag (TAW, 1984)
- Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007)

6.2 Toetsspoor: dijk

Een dijk bestaat uit een harde zeewering tot aan de veiligheidslijn, welke zeewaarts voorafgegaan wordt door een strand. Het strand reduceert de golfbelasting op en –overslag over de harde zeewering. De beschermingsgraad die aan dit voorliggende zandlichaam mag worden toegekend, wordt bepaald door diens bodemligging (na strandafslag) ten gevolge van de maatgevende stormvloedcondities (Boers, 2012).

Voor het toetsen van een dijk is er slechts 1 hoofdspoor te onderscheiden:

- **Dijk met of zonder bewoning:** Veiligheidslijn wordt bepaald door de zeewaartse grens van het gebouw, of door de landwaartse grens van de dijk zelf.

Het bezwijkgedrag van een dijk wordt gekenmerkt door:

1. Initiële schade aan het dijktaalud;
2. Meer golfoverslag dan de gestelde grenswaarde van 1 l/s/m voor het toelaatbare gemiddelde overslagdebiet.

De veiligheid van de bewoning en het achterland is dus gewaarborgd indien punt 1. en 2. niet worden bereikt tijdens of ten gevolge van de maatgevende stormvloedcondities.

Een dijk wordt getoetst om na te gaan of deze voldoende hoog en sterk is (cf. Sectie 3.2.2). Hiervoor dienen volgende stappen uitgevoerd te worden:

1. Bepaling van de ligging van het voorliggend strand na de maatgevende stormvloed, en toepassing van een eventuele toeslag ten gevolge van een NWO (zie Sectie 5.6). De strandafslagberekening wordt uitgevoerd met XBeach (zie Sectie 7.1).
2. Gebruik makende van deze post storm strandligging, bepaling van de invallende golfcondities (spectrale golfhoogte H_{m0} en - periode $T_{m-1,0}$) ter hoogte van de dijk (zie Sectie 4.3.3) en het gemiddeld overslagdebiet q met Swash. Indien een stormmuur aanwezig is op de dijk, dan wel de dijk als een golfdempende uitbouw geconstrueerd is, dienen deze in rekening gebracht te worden bij de berekening van het gemiddelde overslagdebiet (voor specificaties, zie Sectie 7.2)
3. Gebruik makende van oa. de invallende golfcondities, beoordeling van de stabiliteit van het dijktaalud (zie bijlage bij bestek 16EH/19/21).

De **beoordeling** van een dijk is gestoeld op volgende 2 voorwaarden:

- De gestelde grenswaarde van 1 l/s/m voor het toelaatbare gemiddelde overslagdebiet wordt behaald
- De stabiliteit van het dijktaalud is voldoende

Indien aan beide voorwaarden voldaan is, wordt de dijk beoordeeld als voldoende ten opzichte van de gestelde norm voor kustveiligheid (cf. Hoofdstuk 2). Bemerkt dat, indien de grenswaarde van 1 l/s/m overschreden wordt in een deel van de dijksectie, de beoordeling van deze dijksectie onvoldoende is.

7 Modelinstrumentarium

7.1 Modelling duin- en strandafslag: XBeach

7.1.1 Modelachtergrond

Het numeriek model XBeach (Roelvink *et al.*, 2009) wordt gebruikt voor de modellering van duin- en strandafslag.

XBeach is een vrij toegankelijk, procesgebaseerd morfologisch model dat het sediment transport door stromingen en golven (en het instorten van een duinfront) tijdens de maatgevende stormvloed berekent. Uit dit sediment transport resulteren er veranderingen aan de bodemligging.

Handleiding en verdere informatie is beschikbaar via de Xbeach website: <https://oss.deltares.nl/web/xbeach>. Er is een uitgebreide XBeach Matlab toolbox vrij beschikbaar met handige functies voor oa. modelopbouw en resultatenanalyse via de Open Earth Tools repository van Deltares op Subversion.

7.1.2 Roosteropbouw

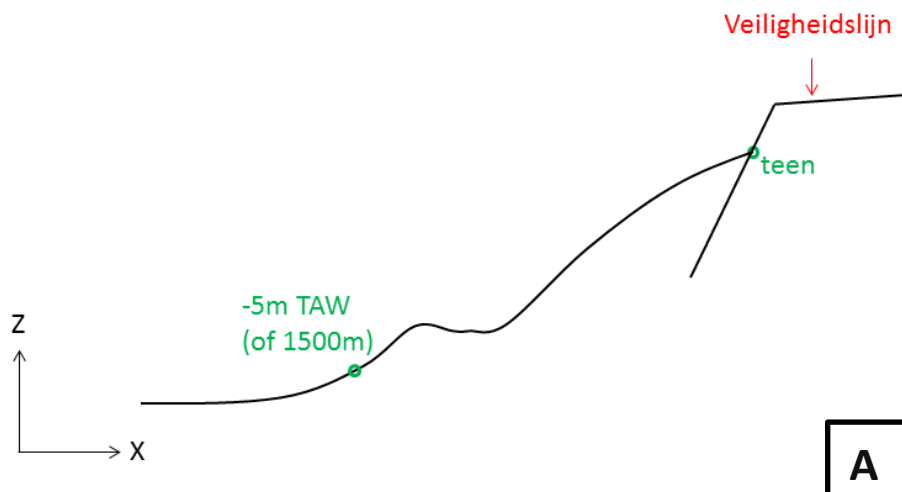
Het opgestelde digitale hoogtemodel van de stranden en duinen, en van de zeedijken (cf. deelopdracht 1 van Toetsing kustveiligheid 2021) vormt de roosterbasis, waarbij het te toetsen modeldomein vastgelegd is in de Toetstabel (bijlage bij bestek 16EH/19/21). De oriëntatie van het modeldomein zorgt dat de hoofdgolfrichting van de golven loodrecht op de kustlijn is. Het modeldomein en de roosterresolutie dienen evenwel nog aangepast te worden.

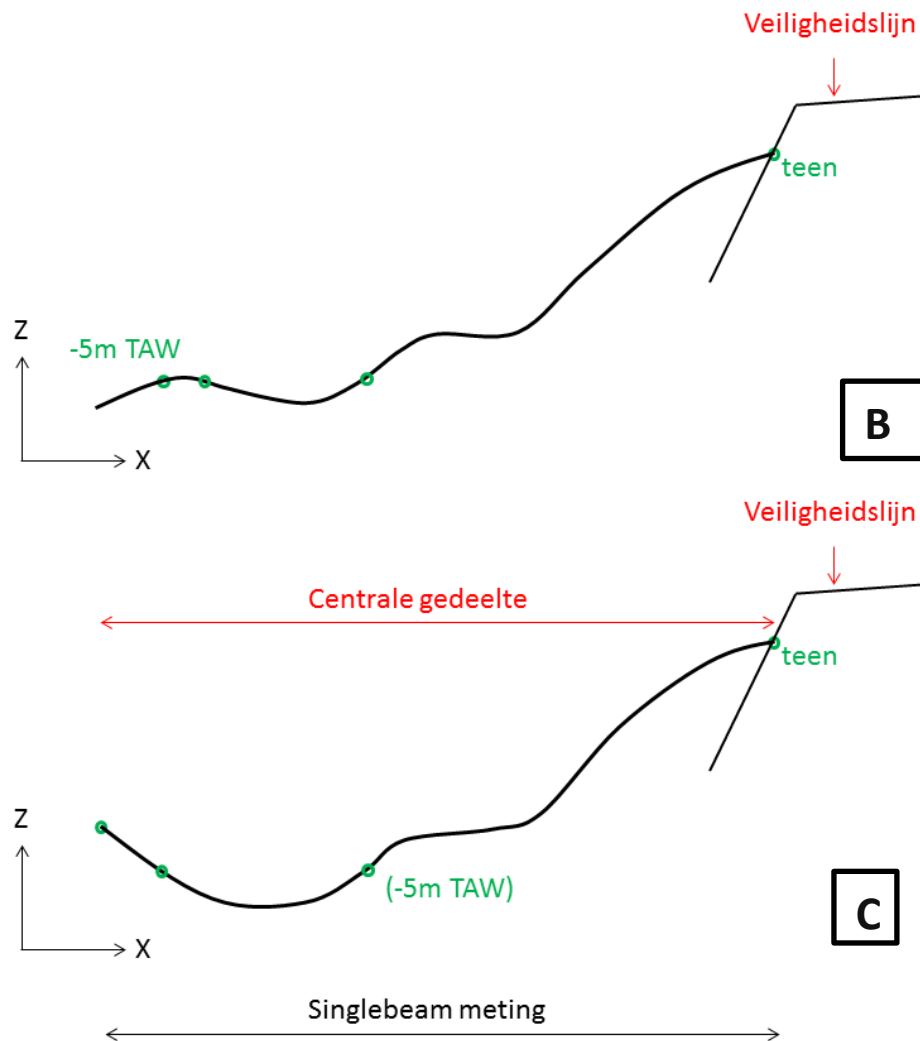
De roosterresolutie:

- Evalueer eerst de meest zeewaartse en landwaartse zone van het modeldomein (Figuur 10):
 - Identificeer de uitvoerpunten
 - Bepaal de positie van de -5m TAW dieptelijn (of 1500m uit de kust)

Bemerk dat, indien meerdere -5m TAW dieptelijnen aanwezig zijn, de meest zeewaartse wordt gekozen (Figuur 10B), of dat, indien de zeewaartse rand boven -5m TAW ligt, deze zeewaartse rand gebruikt wordt als (initiële) zeewaartse begrenzing van het modeldomein (Figuur 10C).

- Bepaal de positie van de veiligheidslijn





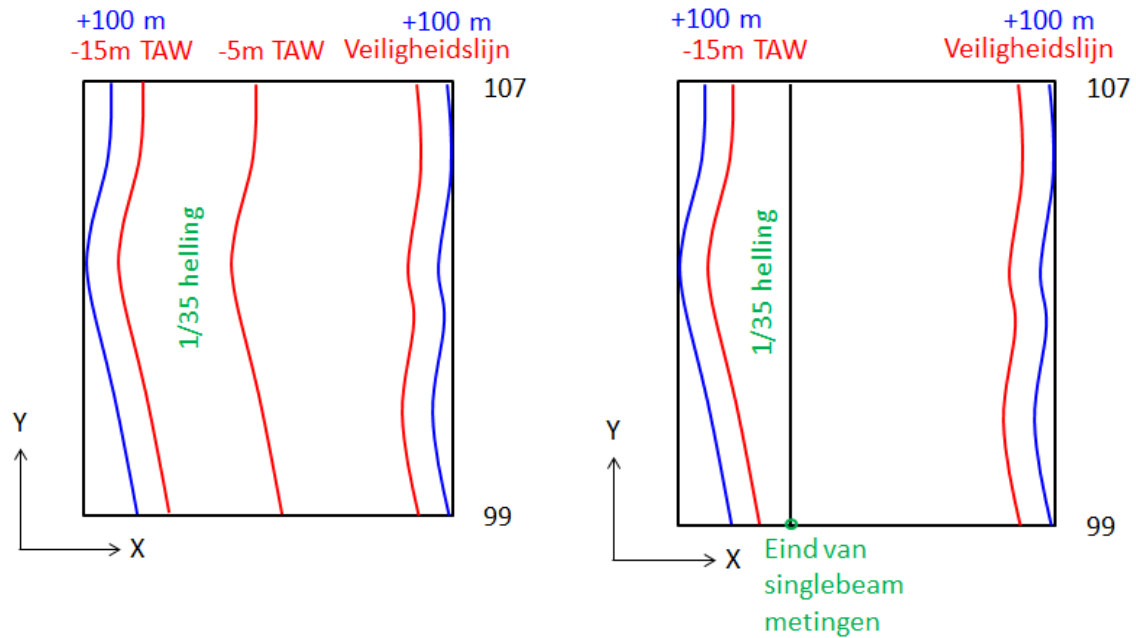
Figuur 12 – Positie van de -5m TAW lijn (of 1500m uit de kust), de teen van de dijk en de veiligheidslijn in een kustdwarsprofiel

- Optimaliseer de kustdwarse resolutie, waarbij de celgrootte varieert, rekening houdende met:
 - Minstens 40 roosterpunten per golflengte in dieper water
 - Maximale roosterresolutie $dx = 1\text{m}$ in de te verwachten afslagzone
 - Maximale roosterresolutie $dx = 2\text{m}$ in duingebied
 de overgang tussen variërende celgroottes dient gradueel te verlopen.
- Optimaliseer de kustlangse resolutie, waarbij de celgrootte varieert, rekening houdende met:
 - Maximale resolutie $dy = 30\text{m}$
 - Maximale resolutie $dy = 10\text{m}$ ter hoogte van een aansluitingsconstructie (tot 100m aan beide zijden van de overgang tussen 2 types zeewering)
 - Uitzonderlijk: resolutie $dy = 2\text{m}$: indien geometrische (3D) kenmerken een fijnere resolutie vergen (bijv. (niet limitatief) een duinpad, Ronde Wenduine).
 de overgang tussen variërende celgroottes dient gradueel te verlopen.

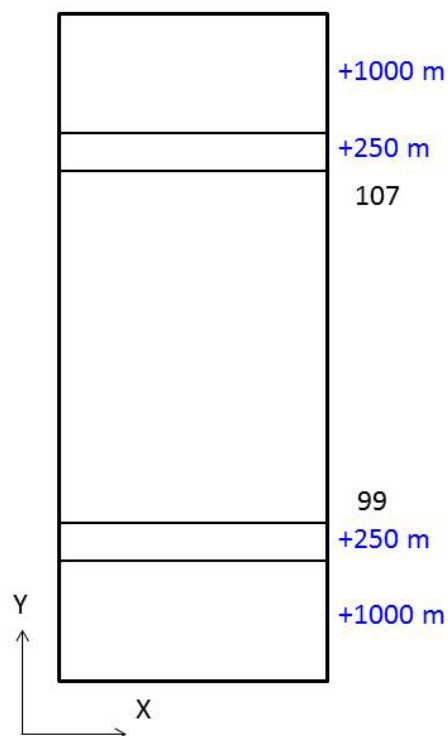
Het modeldomein:

- Breid het modeldomein zeewaarts uit tot -15m TAW onder een negatieve helling van 1/35, voeg minimum 100m horizontale bodem extra toe op -15m TAW
- Breid het modeldomein landwaarts uit voorbij de veiligheidslijn met minimum 100m werkelijke bathymetrie, eindig met (ten minste) 3 roosterpunten met dezelfde bodemligging

- Breid het modeldomein lateraal uit met 250m werkelijke bathymetrie en 1000m artificiële bathymetrie, waarbij de kustlangse resolutie dy gradueel vergroot tot 100m.
De bathymetrie van deze artificiële uitbreidingen is een kopie van de oorspronkelijke zijranden (bijv. kustsectie 99 + 250m en kustsectie 107 + 250m).



Figuur 13 – Opmaak van de bathymetrie in 2D, met aanduiding van zee- en landwaartse begrenzing van het modeldomein



Figuur 14 – Opmaak van de bathymetrie in 2D, met aanduiding van de laterale begrenzing van het modeldomein

7.1.3 Modelinvoer

Om een XBeach simulatie uit te voeren, zijn er, naast een invoerbestand ('params.txt') met alle modelspecificaties, ook verschillende invoerbestanden nodig:

- Bestand met de x-coördinaten van het rekenrooster ('x.grd')
- Bestand met de y-coördinaten van het rekenrooster ('y.grd')
- Bestand met bodemligging zachte zeewering ('bed.dep')
- Bestand met bodemligging harde zeewering (indien relevant) ('nedep.dep'): heeft zelfde grootte als 'bed.dep' en localiseert de harde zeewering door de dikte van de erosieve laag te beschrijven.
- Bestand met het tijdsafhankelijk getij ('tide.txt') – zie het hydraulisch randvoorwaardenboek (Vuik *et al.*, 2020): de 'uitbreidings'waarden (met decimeringshoogte): de hoogste waarde van de waterstand over de te toetsen kustsecties wordt gekozen. In Sectie 4.2 staat de berekening van het tijdsverloop. Het getij mag met een tijdstap van 1800s opgegeven worden.
- Bestand met de tijdsafhankelijke golfcondities (! voor elk uitvoerpunt: dus ook plaatsafhankelijk in 1 XBeach model): significante golfhoogte, golfpiekperiode, richtingsspreiding golven – zie het hydraulisch randvoorwaardenboek (Vuik *et al.*, 2020): de 'uitbreidings'waarden (met decimeringshoogte) worden gebruikt. In Sectie 4.2 staat de berekening van het tijdsverloop. De hoofdgolfrichting is loodrecht op de kustlijn.
Deze parameters mogen met een tijdstap van 1800s opgegeven worden, de discretisatietijdstap van de randvoorwaardentijdreeks heeft een vaste waarde: $dt_{bc} = 0.5$.
- Bestand dat alle coördinaten bevat van de uitvoerpunten en de namen van de golfrandvoorwaardenbestanden ('loclist.txt')

7.1.4 Modelspecificaties

Xbeach dient, specifiek voor Toetsing kustveiligheid 2021, gebruikt te worden met een specifieke versie en vastgelegde parameterinstellingen en -waarden. Deze worden beschikbaar gesteld bij de start van Toetsing kustveiligheid 2021. Parallel rekenen is toegelaten.

7.1.5 Modeluitvoer en postprocessing

De simulatieduur bedraagt 45u.

Het doel van de XBeachmodellering is de bepaling van de bodemligging tijdens en ten gevolge van de maatgevende stormvloed. Hiertoe, en ter controle van de simulatie, wordt periodiek (uurlijks) uitvoer gevraagd van enkele globale en gemiddelde variabelen: H, ue, ve, Susg, Subg, Svsg, Svbg, zs, zb, qx, thetamean

- Toeslag modelonzekerheid

Op een afslagprofiel berekend met XBeach bedraagt deze toeslag een nog te specificeren percentage van het berekende afslagvolume boven het rekenpeil, teneinde rekening te houden met modelonzekerheden.

Deze toeslag zorgt voor een landwaartse verschuiving van het afslagprofiel boven het rekenpeil, begrensd door een maximale verschuiving van de duinvoet ten gevolge van deze toeslag over een kustdwarse afstand van 15m (Boers, 2012). Indien de kruin van het afgeslagen duinprofiel X_e lager ligt dan +8m TAW (bijv. het strand voor een dijk), dan dient de toeslag niet in rekening gebracht te worden.

- Golfoverslagdebiet

XBeach wordt uiteraard in de eerste plaats gebruikt om duin- en strandafslag te berekenen tijdens en na de maatgevende stormcondities. Echter, het model kan ook overslagdebieten per uitvoertijdstap geven (parameter qx_mean).

- **(Verdedigde) duinen zonder bewoning**

De rooster cel na (of ter hoogte van) het hoogste punt van het resterend duinvolume zeewaarts van de veiligheidslijn is de locatie die gebruikt dient te worden ter bepaling van het overslagdebiet. Het maximum

van alle tijdstapafhankelijke overslagdebieten is dan het gemiddelde overslagdebiet voor deze kustsectie. Deze maximale q_{x_mean} -waarde dient gerapporteerd te worden.

- **(Verdedigde) duinen met bewoning, en dijken**

Het gemiddelde overslagdebiet q dient ter hoogte van de veiligheidslijn X_v bepaald te worden. Het maximum van alle tijdstapafhankelijke overslagdebieten, is het gemiddelde overslagdebiet voor deze kustsectie. Deze maximale q_{x_mean} -waarde dient gerapporteerd te worden.

7.2 Modellerings golfoverslag: Swash

7.2.1 Modelachtergrond

Het numeriek model SWASH (Simulating WAVes till SHore) (Zijlema *et al.*, 2011) wordt gebruikt voor de modellering van de golftransformatie van dieper water (zeewaartse rand kustsectie) naar de dijk of lage duin en mogelijke golfoverslag.

Swash is een vrij toegankelijk, tijdsafhankelijk fase-oplossend golfmodel dat gebruik maakt van de niet-lineaire ondiepwater vergelijkingen, met bijkomende niet-hydrostatische termen. Meer informatie kan gevonden worden op <http://swash.sourceforge.net/>.

Deze methodologie is gebaseerd op Swash versie 7.01 (April 2021). Dezelfde versie wordt aanbevolen tenzij er een specifieke reden is om hiervan af te wijken.

Om de gewenste 3D effecten (topografie zachte zeewering, geometrie dijk, golfklimaat) in rekening te brengen, is geopteerd om SWASH in 3D te gebruiken, i.e. 2D horizontaal (x en y) en 2 verticale lagen (z).

7.2.2 Roosteropbouw

De post storm bathymetrie uit (een) XBeach model(len) wordt gebruikt als invoer voor de bodemligging in (een) Swash model(len). Er dient evenwel een oordeelkundige indeling van de Swash modeldomeinen gemaakt te worden. Deze hebben een effectieve kustlangse lengte van min. 1 tot max. 10 kustsecties. Waar mogelijk dient een badplaats in zijn geheel beschouwd te worden.

De oriëntatie van het modeldomein blijft zoveel mogelijk gelijk (hoofdgolfrichting loodrecht op de kustlijn) aan deze van de gebruikte XBeach modellen.

Het modeldomein en de roosterresolutie dienen als volgt aangepast te worden.

Het modeldomein:

- Bepaal de effectieve kustlangse lengte
- Breid het modeldomein lateraal uit met 250m werkelijke bathymetrie
- Voeg 100m toe landwaarts na (het meest landwaarts punt van) de veiligheidslijn onder een negatieve helling van ruwweg 1/20 (tussen 1/15 en 1/25) zodat opslagcapaciteit gecreëerd wordt voor mogelijks overslaand water. Indien een aanzienlijke hoeveelheid golfoverslag te verwachten is ($> 40 \text{ l/s/m}$), dan dient deze capaciteit uitgebreid te worden.

De roosterresolutie:

- Het reken- en bodemrooster zijn identiek, en worden curvilineair opgebouwd. De roosterlijnen snijden elkaar evenwel loodrecht.
- De celgrootte varieert zowel kustdwars (x-richting) als kustlangs (y-richting):
 - Kustdwars:
Resolutie $dx = 2\text{m}$ van zeewaartse rand tot meest zeewaarts gelegen teen van de dijk (of duinvoet lage duin)

Resolutie $dx = 0.5\text{m}$ van meest zeewaarts gelegen teen van de dijk tot meest landwaarts gelegen veiligheidslijn

Resolutie $dx = 2\text{m}$ van meest landwaarts gelegen veiligheidslijn tot einde modeldomein

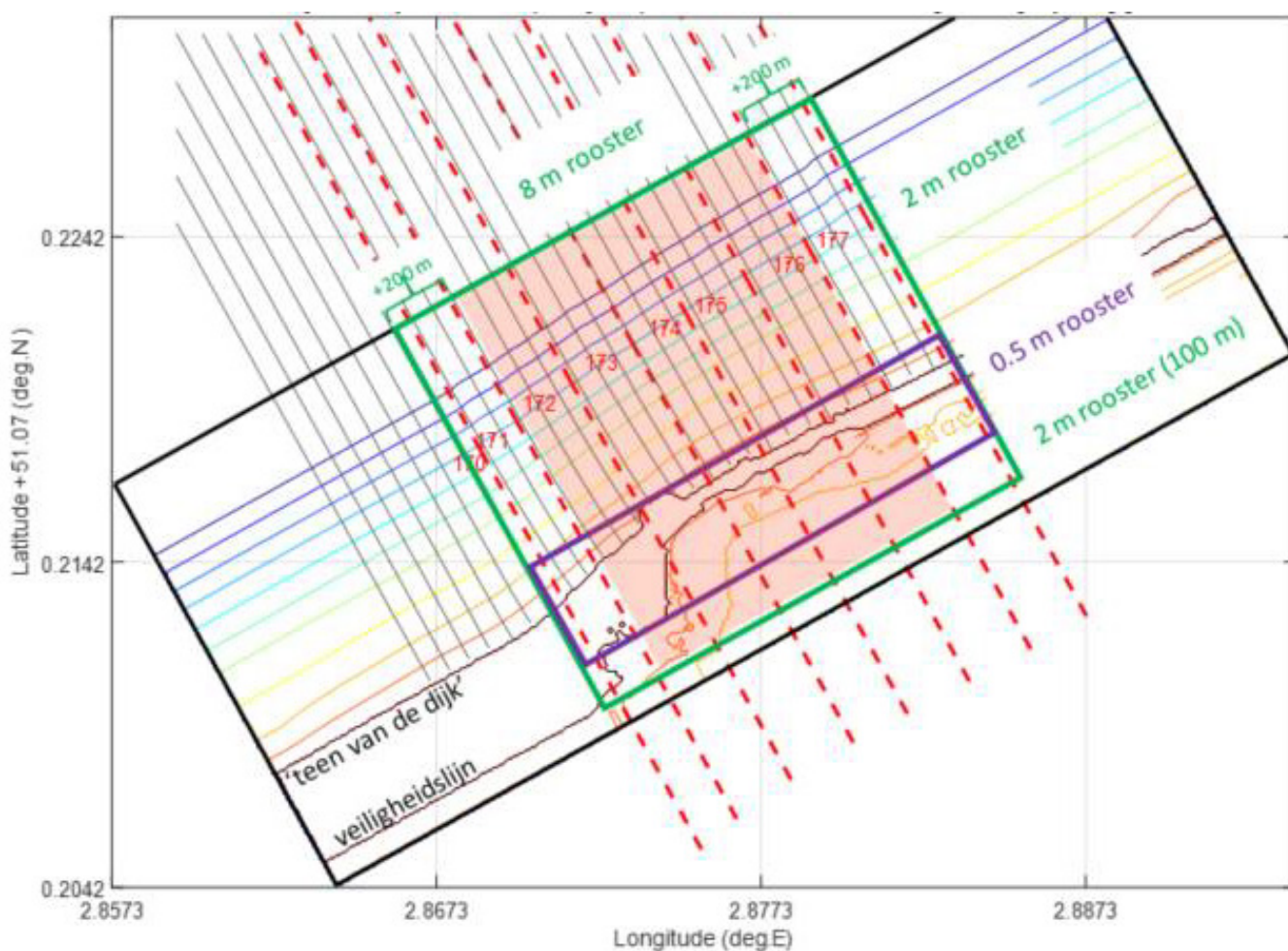
▪ Kustlangs:

Resolutie = 8m standaard.

Uitzonderlijk: resolutie = 1-2m: indien geometrische (3D) kenmerken een fijnere resolutie vergen (bijv. (niet limitatief) een duinpad, Ronde Wenduine). (een graduele overgang tussen beide kustlangse resolutie is niet noodzakelijk).

Bemerkt dat, indien de XBeach roosterresolutie bepaalde geometrische kenmerken landwaarts van de afslagzone niet goed weergeeft, het opgemaakte DHM als invoer gebruikt dient te worden.

Figuur 15 illustreert de opbouw van het rooster.



Figuur 15 – Roosteropbouw in Swash

7.2.3 Modelinvoer

Om een Swash simulatie te doen, zijn er, naast een invoerbestand ('xxx.sws') met alle modelspecificaties, ook verschillende invoerbestanden nodig:

- Bestand met bodemligging (post storm XBeach bathymetrie en evt. Digitaal HoogteModel) en ligging harde constructies (bijv. dijk) (uit DHM, niet uit XBeach)
- Bestand met de xy-roostercoördinaten van het rekenrooster

- Bestand met waterstanden (zelfde formaat als het rekenrooster): deze waarden zijn relatief ten opzichte van de waterstandswaarde in het sws-invoerbestand (LEVEL = xxx)
- Bestanden met coördinaten uitvoerpunten:
 - Uitvoerpunten hydraulische randvoorwaarden
 - Roosterpunten ter hoogte van de dijk, specifiek: 25m zeewaarts van het snijpunt tussen de waterstand en het dijktafval (cf. Sectie 4.3.3)
 - Roosterpunten ter hoogte van de veiligheidslijn

7.2.4 Modelspecificaties

Swash 3D dient, specifiek voor Toetsing kustveiligheid 2021, gebruikt te worden met de parameterinstellingen en -waarden uit Tabel 1. Parameters/functies die niet vermeld zijn, dienen niet geactiveerd te worden om de simulaties uit te voeren. Wind wordt niet gebruikt in de Swash berekeningen.

Tabel 1 – Modelspecificaties Swash

COORDINATES CART	Coördinaten in een cartesisch coördinatenstelsel (in [m] – bijv. Lambert72, WGS84UTM31)
NONST TWOD	Niet-stationaire 2D horizontale (x en y) modus
SEED	Standaardwaarde = 12345678 – indien meerdere berekeningen noodzakelijk zijn, kan bijv. het eerste cijfer verhoogd worden
LEVEL	Waterstand (in [m TAW]) cf. hydraulisch randvoorwaardenboek (Vuik <i>et al.</i> , 2020) – de gemiddelde waarde van alle kustsecties in het Swash model wordt opgelegd aan de zeewaartse rand
DEPMIN	Standaardwaarde = 0.01m
RHOWAT	Massadichtheid van water (in [kg/m ³])
CGGRID CURV REP Y	Rekenrooster curvilineair opgebouwd met een periodieke randvoorwaarde in de Y-richting
VERT 2	2 gelijkmatig verdeelde verticale lagen (z)
INIT zero	Beginconditie: nulstart
BOU SHAP JON 3.3 DSPR DEGR	Jonswap golfspectrum met piekversterkingsfactor $\gamma = 3.3$ en richtingsspreiding in graden
BOU SEGMENT IJ 1 1 1 25 BTYPE WEAK HYPER SMOO 30 SEC ADDB CON SPECT	Expliciteren welke golfrandvoorwaarde voor welk gedeelte van de zeewaartse rand geldt (BOU SEGMENT). In de laterale uitbreidingszones worden de golfrandvoorwaarden van de resp. aangrenzende kustsecties opgelegd. Deze golfrandvoorwaarden worden opgelegd zoals getabelleerd in Vuik <i>et al.</i>, 2020; er is geen kalibratie vereist. Een weinig reflecterende, constante randvoorwaarde wordt gekozen (BTYPE WEAK) Een 30s durende opstartfunctie zorgt voor een geleidelijke opstart van de simulatie (SMOO 30 SEC).

	Een 2 ^{de} orde gebonden lange golf wordt toegevoegd aan de 1 ^{ste} orde onregelmatige golven (ADDB)
FRIC MANN 0.019	Bodemwrijving uitgedrukt met de Manning coëfficiënt
VISC horizontal CON	Een constante horizontale viscositeit
BREAK 0.6 0.3	Golfbreking met deze (standaard) brekingswaarden
NONHYDROSTATIC BOX PREC ILU	Numeriek robuuste keuze voor een simulatie met meerdere verticale lagen
DISCRET UPW MOM DISCRET UPW UMOM HOR MUSCL DISCRET UPW UMOM VER MUSCL DISCRET UPW WMOM HOR MUSCL DISCRET UPW WMOM VER MUSCL	Numerieke discretisatie
BOTCel SHIFT	Noodzakelijk om verticale constructies goed te modelleren (bijv. verticale opstand dijktaalud, stormmuur op de dijk en muren golfdempende uitbouw)
TIMEI 0.2 0.5	Expliciete tijdsintegratie waarbij de tijdstap aangepast wordt rekening houdend met het Courant getal – hier: tussen 0.2 en 0.5

7.2.5 Modeluitvoer en postprocessing

De simulatieduur bedraagt 1u 45min (~500 golven).

Naast de ruimtelijke verdeling van de significante golfhoogte, de golfopzet en het bodempeil is er ook puntuitvoer gewenst op 3 locaties: de (zeewaarts gelegen) uitvoerpunten, de roosterpunten ter hoogte van de dijk (specifiek: 25m zeewaarts van het snijpunt tussen de waterstand en het dijktaalud) en de roosterpunten ter hoogte van de veiligheidslijn (zie voorbeeld invoerbestand in Sectie 7.2.7). Ter hoogte van de laatste 2 locaties dient uitvoer elke 20m kustlangs weggeschreven te worden (in de te toetsen kustsecties). Belangrijk hierbij is dat mogelijke knelpunten en aandachtzones zeker opgenomen worden.

Deze puntuitvoer (bodempeil, waterspiegelverheffing, snelheid en debiet (laatste 2 variabelen enkel op de veiligheidslijn)) wordt weggeschreven met een tijdstap van 0.2s (5 Hz).

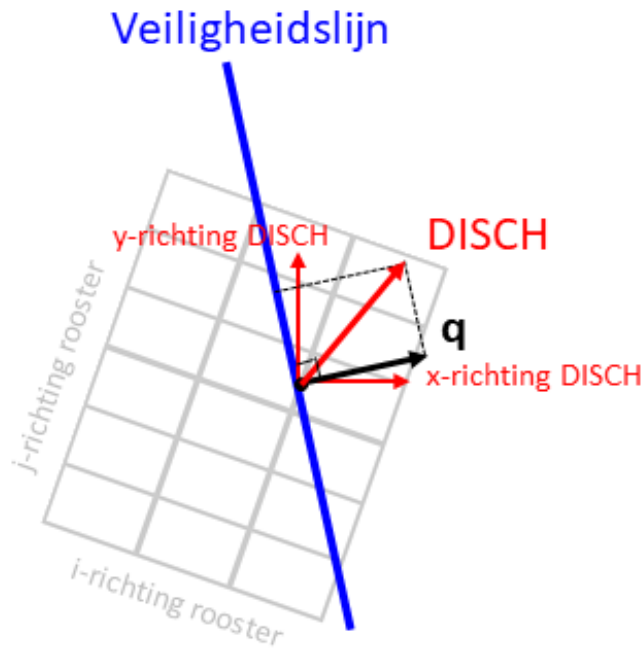
- Berekening golfkarakteristieken

Uit de verheffingstijdreeksen worden de locatiespecifieke significante golfhoogte, -piekperiode, spectrale golfperiode en -opzet berekend. Een hoogdoorlaatfilter dient hierbij gebruikt te worden met afsnijfrequentie op 0.005s. Let hierbij op dat de breedte van de frequentiebin deze afsnijfrequentie accuraat benadert.

Door visualisatie van de ruimtelijke verdeling van de golfhoogte en -opzet kan nagegaan worden of de simulatie naar wens verlopen is (bijv. door een video te maken).

- Berekening golfoverslag

Uit de tijdreeks van het overslagdebiet wordt het gemiddelde overslagdebiet q berekend. Dit kan gebruik makende van de parameter 'DISCH' die een kustdwarse en -langse component (zie Figuur 16). Merk dat het gemiddelde overslagdebiet q dat loodrecht over de veiligheidslijn stroomt, berekend dient te worden i.e. 'DISCH' dient verticaal geprojecteerd te worden.



Figuur 16 – Swash: Berekening overslagdebiet ter hoogte van de veiligheidslijn

Om een deterministische waarde voor het golfoverslagdebiet te bepalen, dienen er 3 simulaties uitgevoerd te worden (indien $q \in [0.3, 3]$ l/s/m).

Het rekenkundig gemiddelde van het gemiddeld overslagdebiet van deze 3 simulaties ($n = 3$) is het steekproefgemiddelde m , dat de beste schatting van het werkelijke populatiegemiddelde μ is (aangezien er maar 1 steekproef is) (normale verdeling wordt verondersteld) (Ottevaere, 2011):

$$m = \frac{1}{n} \sum_i q_i$$

De steekproefvariantie s^2 is daarom de beste schatting voor de variantie σ^2 van de populatie:

$$\sigma^2 \cong \frac{n}{n-1} s^2 \equiv \hat{s}^2$$

Wetende dat $s^2 = \frac{1}{n} \sum_i (q_i - m)^2$, wordt de variantie σ^2 van de populatie geschat als:

$$\sigma^2 \cong \frac{1}{n-1} \sum_i (q_i - m)^2$$

Aangezien elke steekproef leidt tot een ander gemiddelde m , en bijgevolg schatting van μ , dient de betrouwbaarheid op de schatting van μ aangegeven te worden. Vermits we steunen op een normale verdeling, is er 68% kans om voor het steekproefgemiddelde m een resultaat te vinden zodat (Ottevaere, 2011):

$$\mu = m \pm \sqrt{\frac{\sum_i (q_i - m)^2}{n(n-1)}}$$

Een deterministische waarde voor het gemiddelde overslagdebiet q wordt aldus bekomen door de bovengrens van bovenstaande vergelijking te bepalen.

- Bepaling maximale laagdikte en snelheid

Ter hoogte van de roosterpunten op de veiligheidslijn dient de maximale laagdikte en snelheid van het overslaande water bepaald te worden.

7.2.6 Modelinstabiliteit

Indien er een modelinstabiliteit optreedt, zijn er enkele zaken mogelijk om dit te verhelpen.

- De standaard drempelwaarde voor de waterdiepte (depmin = 0.01m) kan verhoogd worden tot (maximaal) 0.02m.
- Courant getal kan gewijzigd worden tot bijv. TIMEI 0.1 0.4
- Andere 'seed' kiezen
- Het modeldomein (kustlangs) verkleinen

7.2.7 Voorbeeld van invoerbestand 'SA21.sws'

```
$*****HEADING*****
```

```
$
```

```
PROJ 'SA21_15' '01'
```

```
$ Section 172-176
```

```
$
```

```
$*****MODEL INPUT*****
```

```
$
```

```
COORDINATES  CART
```

```
MODE NONST  TWOD
```

```
SET SEED  12345678
```

```
SET LEVEL  6.93
```

```
SET DEPMIN  0.010
```

```
SET RHOWAT  1025
```

```
$
```

```
CGRID  CURV 815 231 REP Y
```

```
READGRID COOR  1 'SA21_15_172-176_01_xy.bot' 1 0 FREE
```

```
VERT 2
```

```
$
```

```
INPGRID BOTTOM CURV
```

```
READINP BOTTOM -1 'SA21_15_172-176_01_zz.bot' 1 0 FREE
```

```
$
```

```
INPGRID WLEVEL CURV
```

```
READINP WLEVEL 1 'SA21_15_172-176_01_zz.dwl' 1 0 FREE
```

```
$
```

```
INIT zero
```

```
$
```

```
BOU SHAP JON 3.3 DSPR DEGR
```

```
BOU SEGMENT IJ  1  1  1  25 BTYPE WEAK HYPER SMOO 30 SEC ADDB CON SPECT 4.97 11.23 -61.0 19.0 100 MIN
```

```
BOU SEGMENT IJ  1 26  1 78 BTYPE WEAK HYPER SMOO 30 SEC ADDB CON SPECT 4.97 11.23 -61.0 19.0 100 MIN
```

BOU SEGMENT IJ 1 79 1 120 BTYPE WEAK HYPER SMOO 30 SEC ADDB CON SPECT 4.97 11.23 -61.0 18.8 100 MIN
BOU SEGMENT IJ 1 121 1 146 BTYPE WEAK HYPER SMOO 30 SEC ADDB CON SPECT 4.95 11.23 -61.0 18.6 100 MIN
BOU SEGMENT IJ 1 147 1 176 BTYPE WEAK HYPER SMOO 30 SEC ADDB CON SPECT 4.94 11.23 -61.0 18.5 100 MIN
BOU SEGMENT IJ 1 177 1 205 BTYPE WEAK HYPER SMOO 30 SEC ADDB CON SPECT 4.93 11.23 -61.0 18.3 100 MIN
BOU SEGMENT IJ 1 206 1 231 BTYPE WEAK HYPER SMOO 30 SEC ADDB CON SPECT 4.93 11.23 -61.0 18.3 100 MIN
\$
FRIC MANN 0.019
BREAK 0.6 0.3
VISC Horizontal CON
\$
NONHYDROSTATIC BOX PREC ILU
DISCRET UPW MOM
DISCRET UPW UMOM HOR MUSCL
DISCRET UPW UMOM VER MUSCL
DISCRET UPW WMOM HOR MUSCL
DISCRET UPW WMOM VER FIRST
BOTCel SHIFT
TIMEI 0.2 0.5
\$
\$***** OUTPUT *****
\$
POINTS 'off_WVG' FILE 'SA21_15_172-176_01.off'
TABLE 'off_WVG' NOHEAD 'SA21_15_172-176_01.wgo' TSEC BOTL WATL VEL OUTPUT 000000.000 0.2 SEC
POINTS 'toe_WVG' FILE 'SA21_15_172-176_01.toe'
TABLE 'toe_WVG' NOHEAD 'SA21_15_172-176_01.wgt' TSEC BOTL WATL VEL OUTPUT 000000.000 0.2 SEC
POINTS 'saf_OVT' FILE 'SA21_15_172-176_01.saf'
TABLE 'saf_OVT' NOHEAD 'SA21_15_172-176_01.wgs' TSEC BOTL WATL VEL DISCH OUTPUT 000000.000 0.2 SEC
\$
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'SA21_15_172-176_01.mat' XP YP BOTL HSIG SETUP
QUANT HSIG dur 100 min
QUANT SETUP dur 100 min
\$
TEST 1 0
COMPUTE 000000.000 0.0200 SEC 014500.000
STOP
\$

8 Minimale profielen

8.1 Definitie

Een minimaal profiel is de theoretische ligging van het strand in een kustsectie waarbij de grenswaarde van het toelaatbaar gemiddeld overslagdebiet, i.e. 1 l/s/m, bereikt wordt en/of er net geen faling door duinafslag optreedt. Deze bodemligging kan bijgevolg enkel berekend worden na uitvoering van het desbetreffende toetsspoor.

De bepaling van het minimale profiel dient enkel te gebeuren voor de basistoetsing (cf. Sectie 1.2), en dient per kustsectie uitgevoerd te worden.

8.2 Kustsectie met het gemiddeld overslagdebiet als toetscriterium

Indien het gemiddeld overslagdebiet een vereiste is in de beoordeling van een kustsectie (met uitzondering van lage geïsoleerde duindoorgangen) dient bijkomend het minimaal profiel berekend te worden.

Hiertoe wordt gebruik gemaakt van het Swash 3D model dat opgesteld werd ter bepaling van het gemiddeld overslagdebiet. De invoer betreft een 2D horizontale bathymetrie waarbij alle dwarsprofielen binnen het Swash 3D model land- of zeewaarts dienen verschoven te worden over eenzelfde horizontale afstand.

Indien landwaarts verschoven wordt, dient het gedeelte dat zo onder de dijk komt te liggen uiteraard vervangen te worden door de dijk zelf.

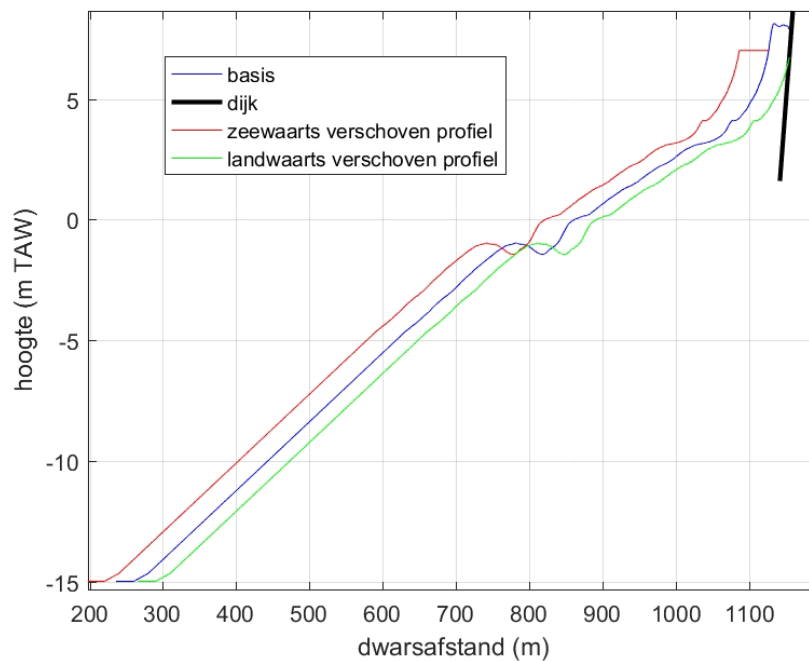
Indien zeewaarts verschoven wordt, gebeurt dit enkel met het deel van het strand dat onder de maximale waterstand van de maatgevende stormvloed (niet het rekenpeil) gelegen is. Zo ontstaat een berm ter hoogte van dit maximale waterpeil.

Figuur 17 illustreert voor 1 kustdwarsprofiel de zeewaartse verschuiving met x meter en de landwaartse verschuiving met y meter.

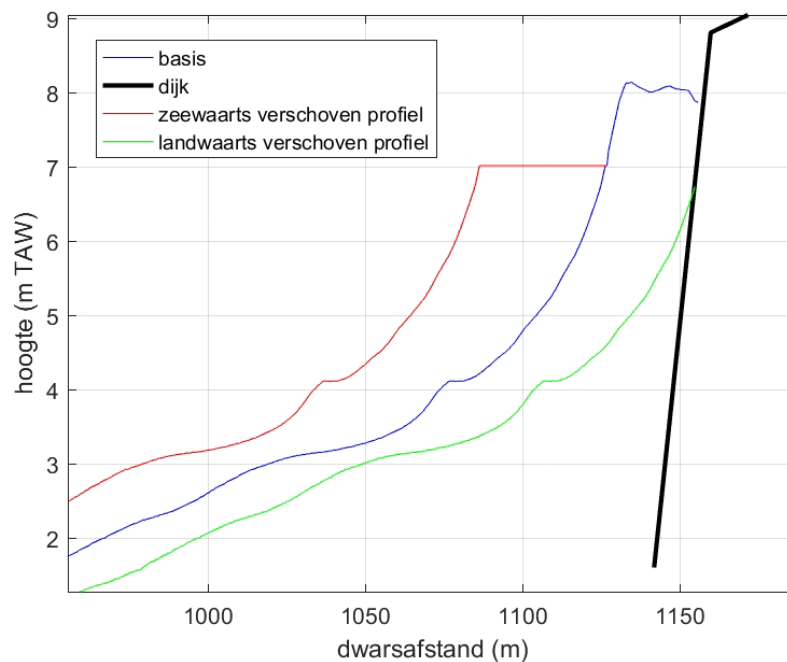
Berekeningen dienen uitgevoerd te worden met 2 verschillende horizontale translaties:

- Indien alle gemiddelde overslagdebieten $q < 0.1$ l/s/m:
 - o de contourlijn dient 20 en 40m landwaarts verschoven te worden
- Indien alle gemiddelde overslagdebieten $q \in [0.1; 1]$ l/s/m:
 - o de contourlijn dient 10 en 20m landwaarts verschoven te worden
- Indien zowel gemiddelde overslagdebieten groter en kleiner dan 1 l/s/m:
 - o de contourlijn dient 20m landwaarts en 20m zeewaarts verschoven te worden
- Indien alle gemiddelde overslagdebieten $q > 1$ l/s/m:
 - o de contourlijn dient 10 en 30m zeewaarts verschoven te worden.

Zodoende worden in het ganse Swash 3D model per uitvoerpunt (ter hoogte van de veiligheidslijn) 2 bijkomende gemiddelde overslagdebieten bekomen. De analyse gaat vervolgens verder per kustsectie.



Figuur 17 – Zee- en landwaartse verschuiving van het kustdwarprofiel (na de maatgevende stormvloed)



Figuur 18 – Detail van zee- en landwaartse verschuiving van het kustdwarprofiel

In een kustsectie is het kustdwarprofiel met het (uitvoerpunt ter hoogte van de veiligheidslijn met het) hoogste gemiddeld overslagdebiet maatgevend. Door deze 3 waarden voor het gemiddeld overslagdebiet wordt een exponentiële curve gefit zodat de definitieve horizontale translatie berekend kan worden, welke resulteert in een gemiddeld overslagdebiet van de grenswaarde 1 l/s/m.

Vervolgens wordt verondersteld dat deze verschuiving van de post storm bathymetrie een gelijke translatie geeft van de pre storm bathymetrie, i.e. deze voor de maatgevende stormvloed. Om tot het minimaal profiel

te komen, dient immers de berekende verschuiving toegepast te worden op het betreffende kustdwarsprofiel uit de initiële bathymetrie. Deze translatie wordt op dezelfde manier uitgevoerd als hierboven beschreven (en geïllustreerd in Figuur 17 en Figuur 18).

Zo bekomt men per kustsectie een minimaal profiel.

8.3 Duinen

Voor een duinsectie (lage duinen uitgezonderd) die voldoende krijgt bij de basistoetsing dient geen minimaal profiel bepaald te worden. Het restvolume V_{rest} is een goede indicator voor hoeveel zand er bijkomend mag verdwijnen vooraleer het profiel onveilig wordt.

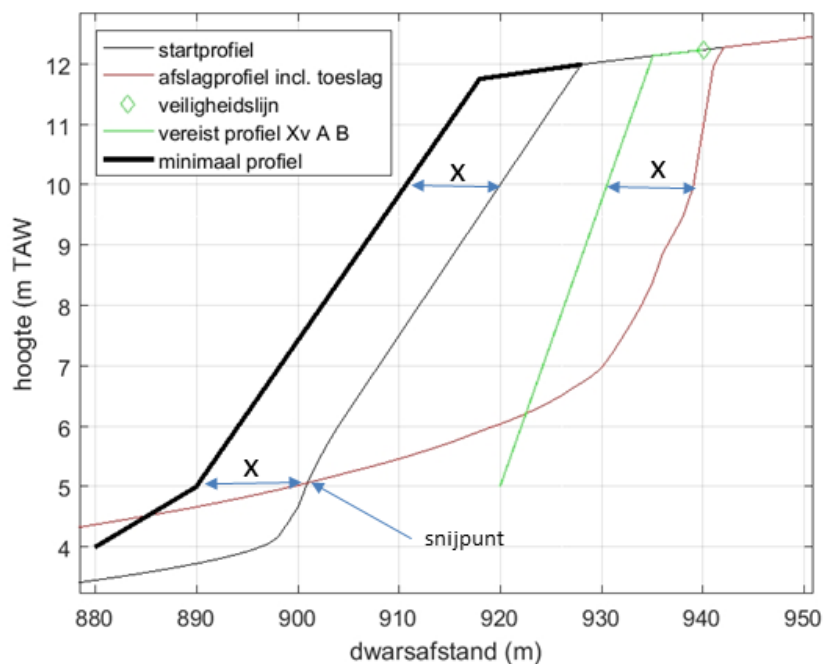
Voor een duinsectie die onvoldoende krijgt bij de basistoetsing wordt er onderscheid gemaakt tussen een onvoldoende doordat een bres ontstaat of doordat bewoning bedreigd wordt.

Indien er een bres ontstaat, dient er geen minimaal profiel bepaald te worden. Er zal (buiten deze studie) een ontwerp op maat gebeuren.

Indien er bewoning bedreigd wordt, dient wel een minimaal profiel bepaald te worden (Figuur 19). Hiertoe wordt het afslagprofiel (incl. toeslag) zeewaarts verschoven over een afstand x , totdat dit verschoven profiel volledig zeewaarts van het grensprofiel $X_v - A - B$ ligt (cf. Sectie 5.2.2).

Het minimale profiel wordt vervolgens bekomen door het initiële pre storm kustdwarsprofiel te verschuiven over eenzelfde afstand x tussen ofwel de veiligheidslijn ofwel de meest landwaartse rand van de boulevard en het snijpunt van het afslagprofiel met het oorspronkelijke profiel. Onder dit snijpunt dient aansluiting met het bestaande kustdwarsprofiel gemaakt te worden onder een helling 1 op 15.

Indien een onvoldoende beoordeling resulteert ten gevolge van zowel te ver teruggeschreden duinafslag en een te hoog gemiddeld overslagdebiet dienen er 2 minimale profielen opgesteld te worden (voor beide faalmechanismes afzonderlijk) en dient het meest zeewaarts gelegen kustdwarsprofiel als resulterend minimaal profiel gerapporteerd te worden.



Figuur 19 – Bepaling minimaal profiel voor duinen met een beoordeling 'onvoldoende' zonder bresvorming

9 Besluit

Dit rapport beschrijft de methodologie voor Toetsing kustveiligheid 2021, i.e. de derde veiligheidstoetsing, die de volledige eerstelijns zeewering, i.e. alle duin- en dijksecties met uitzondering van de havens, zal beoordelen ten opzichte van de maatgevende stormvloed met een terugkeerperiode van 1000 jaar. Hierin zit zowel een basistoetsing (anno 2021) als de toetsing van verschillende zeespiegelstijgingsscenario's vervat.

Dit document bevat de toetsingsmethodologie voor (verdedigde) duinen en dijken (Hoofdstuk 5 en Hoofdstuk 6 respectievelijk). Als resultaat wordt voor elk kustsectie een beoordeling 'voldoende', 'onvoldoende' of 'onzeker' verkregen ten opzichte van de gestelde veiligheidsnorm (cf. Hoofdstuk 2). Daarnaast is ook de procedure beschreven ter bepaling van minimale profielen na het uitvoeren van de veiligheidstoetsing (Hoofdstuk 8).

10 Referenties

- Boers, M.** (2012). Technisch rapport duinwaterkeringen en hybride keringen 2011 (TRDH). 1206018-001-Hye-0009. Deltares: Delft, Nederland. 53 pp. Available at:
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A8ab1c44-e5aa-4b49-a5d8-98d9e4044878>
- Boers, M.; Steetzel, H.; van Geer, P.; van Santen, R.** (2014). Handreiking NWO's in Duinen 2014. 1208163-001-HYE-0012. Deltares: Delft, Nederland
- Boers, M.; Van Geer, P.; Van Gent, M.** (2011). Dike and Dune Revetment Impact on Dune Erosion, *in*: (2011). *Proceedings of Coastal Sediments*. pp.810–823. doi:10.1142/9789814355537_0061
- ENW.** (2007). Technical report dune erosion (Dutch: Technisch Rapport Duinafslag)
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat.** (2007). Voorschrift toetsen op veiligheid primaire waterkeringen 2006 (VTV). Ministerie van Verkeer en Waterstaat: Den Haag, Nederland. 463 pp.
- Ottevaere, H.** (2011). Meten en experimenteren. Deel 1: Theorie der meetfouten. *1ste Bachelor in Ingenieurswetenschappen*. Vrije Universiteit Brussel. Faculteit Ingenieurswetenschappen: Brussel, België
- Roelvink, D.; Reniers, A.; van Dongeren, A.; van Thiel de Vries, J.; McCall, R.; Lescinski, J.** (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coast. Eng.* ISBN 0378-3839 56(11–12): 1133–1152. doi:10.1016/j.coastaleng.2009.08.006
- TAW.** (1984). Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
- Van Gent, M.** (2008). Large-scale tests to analyse the influence of collapsed dune revetments on dune erosion, *in*: (2008). *Proceedings of ICCE2008*
- Verwaest, T.; Vanpoucke, P.; Vanderkimpfen, P.; Van der Biest, K.; Reyns, J.; Peeters, P.; Kellens, W.; Vanneuville, W.; Mostaert, F.** (2008). Overstromingsrisico's aan de Vlaamse kust. Evaluatie van de zeewering: deel 1. Methodologie. *WL Rapporten*, 718_2A. Waterbouwkundig Laboratorium/Universiteit Gent: Antwerpen
- Vuik, V.; Kuijper, B.; Geerse, C.P.M.; Strijker, B.; Gautier, C.; Trouw, K.; Vanneste, D.; Suzuki, T.; Nossent, J.; Thoon, D.; De Roo, S.; Mostaert, F.** (2020). Het hydraulisch randvoorwaardenboek (2020): rapport. Versie 2.0. *WL Rapporten*, 18_037_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at:
<http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=332127>
- Zijlema, M.; Stelling, G.; Smit, P.** (2011). SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coast. Eng.* 58(10): 992–1012

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be