

Handreiking NWO's in Duinen 2014

Achtergrondrapport

Marien Boers
Henk Steetzel
Pieter van Geer
Robbin van Santen

Een samenwerkingsproject van:

Deltares

 **ARCADIS**

1208163-001

Titel
Handreiking NWO's in Duinen 2014

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving Locatie Lelystad	1208163-001	1208163-001-HYE-0012	120

Trefwoorden
Duinwaterkeringen, Niet Waterkerende Objecten (NWO's), Toetsregels, Laboratoriumonderzoek, DUROS+, DuroSTA, XBeach

Samenvatting

In dit achtergrondrapport zijn de rekenregels uitgewerkt voor het toetsen van solitaire bebouwing in duingebieden. Het rapport bevat een beschrijving van de achtergronden van het project NWO's in duinen en werkt vervolgens eenvoudige toetsregels uit. Hierbij is uitgegaan van twee mogelijke effecten van bebouwing op duinafslag:

- In Spoor 1 wordt ervan uitgegaan dat vanwege de ontgraving ten gunste van de aanleg van het NWO minder zand in het profiel aanwezig is. Bij het bezwijken van het NWO resulteert dit in extra achteruitgang.
- In Spoor 2 wordt ervan uitgegaan dat bij een niet bezwijken van een NWO extra afslag optreedt naast het NWO omdat het afgeslagen zand naar de voorkant van het NWO wordt getransporteerd. Dit betreft het zogenaamde onthoudingseffect.

De rekenregels zijn afgeleid voor toepassing met de wettelijke detailtoets DUROS+. Voor Spoor 1 zijn vergelijkende berekeningen uitgevoerd met de procesgebaseerde modellen DUROSTA en XBeach. Voor Spoor 2 zijn vergelijkende berekeningen uitgevoerd met XBeach.

Het achtergrondrapport is één van de drie rapporten die gezamenlijk de Handreiking NWO's in Duinen 2014 vormen. De twee andere rapporten zijn:

- Schematiseringshandleiding. Dit rapport is vooral bedoeld als praktische ondersteuning bij het toepassen van de toetsregels.
- Evaluatie en vooruitblik. Dit rapport bevat een evaluatie van de toetsregels aan de hand van casussen voor Scheveningen, Zandvoort en Egmond en doet aanbevelingen voor vervolgonderzoek voor NWO's in duinen.

Referenties

RWS SPA opdracht 4500211955

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	nov. 2014	Marien Boers Henk Steetzel Pieter van Geer Robbin van Santen		Marcel van Gent		Wiel Tilmans	

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding en positionering van de handreiking in het ontwikkeltraject	1
1.1.1 Aanleiding van de handreiking	1
1.1.2 Positionering handreiking	2
1.2 Probleemstelling en doelstelling van de handreiking	2
1.2.1 Probleemstelling	2
1.2.2 Doelstelling	2
1.3 Juridische positionering van de handreiking	3
1.4 Gevolgde aanpak	3
1.5 Toelichting bij de Handreiking NWO	5
1.5.1 Leeswijzer	5
1.5.2 Totstandkoming	6
2 Inleiding tot de theoretische uitwerking NWO's	7
2.1 Effect van constructieve elementen in een zandige kering	7
2.1.1 Invloed NWO op duinveiligheid	7
2.1.2 Werking zandige keringen	7
2.1.3 Effect constructieve elementen	9
2.2 Schematisatie van het effect van NWO's	9
2.2.1 Specifiek effect NWO	9
2.2.2 Spoor 1: Effect van ontgraving (wel bezweken NWO; in doorsnede)	10
2.2.3 Spoor 2: Effect van onthouding (niet bezweken NWO; in bovenaanzicht)	11
2.3 Uitgangspunten voor theoretische uitwerking	14
3 Uitwerking ontgravingseffect wel bezweken NWO (Spoor 1)	17
3.1 Inleiding en uitgangspunten	17
3.2 Theoretische uitwerking	18
3.2.1 Basisrelatie >> <i>Ontgraving volledig binnen afslagzone</i>	19
3.2.2 Overgangssituatie [1] >> <i>Ontgraving nog net binnen afslagzone</i>	19
3.2.3 Overgangssituatie [2] >> <i>Ontgraving deels binnen afslagzone</i>	21
3.2.4 Situatie met ontgraving landwaarts van ongestoorde afslagzone	25
3.2.5 Samenvatting	26
3.2.6 Voorbeeld	27
3.3 Analyse beschikbare metingen	29
3.4 Analyse uitgevoerde berekeningen 1D	30
3.4.1 Inleiding	30
3.4.2 Aanpak	30
3.4.3 Resultaten balansmodel DUROS+	31
3.4.4 DurosTA	35
3.4.5 XBeach	38
3.4.6 Analyse resultaten	41
3.5 Analyse uitgevoerde berekeningen 2D	44
3.6 Conclusie	46
4 Uitwerking onthoudingseffect niet bezweken NWO (Spoor 2)	47
4.1 Inleiding en uitgangspunten	47

4.2	Theoretische uitwerking	48
4.2.1	Inleiding	48
4.2.2	Basisuitwerking	48
4.2.3	Pragmatische vertaling	49
4.3	Analyse beschikbare metingen	51
4.4	Analyse uitgevoerde berekeningen XBeach 2D	52
4.5	Conclusie	54
5	Conclusies	55
	Referenties	59
A	Detailuitwerking theoretisch onthoudingseffect (Spoor 2)	61
A.1	Inleiding en achtergronden	61
A.2	Definitie balansbegrenzings	62
A.3	Aansluiting in het overgangsprofiel	63
A.4	Continuïteit in volume op vakniveau	64
A.5	Afleiding basisrelatie (na substitutie α -factor)	66
A.6	Uitwerking omvang overgangszones	67
A.7	Geavanceerde afleiding	69
A.8	Samenvatting resultaten	70
B	Resultaten laboratoriumonderzoek	73
C	Berekeningen DUROSTA en XBEACH1D	77
C.1	Inleiding	77
C.2	Uitgangspunten modelberekeningen	78
C.3	Modelopzet	80
C.4	Resultaten van modelberekeningen	81
C.5	Analyse van modelresultaten	88
D	Berekeningen XBEACH2D	97
D.1	Inleiding	97
D.2	Uitgangspunten modelberekeningen	98
D.3	Resultaten berekeningen zonder NWO	100
D.4	Resultaten Spoor 1	102
D.5	Resultaten Spoor 2	110

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en positionering van de handreiking in het ontwikkeltraject

1.1.1 Aanleiding van de handreiking

In opdracht van het Deltaprogramma worden er in de Handreiking NWO¹ in duinen eenvoudige richtlijnen gepresenteerd voor het beoordelen van NWO's in duingebieden. De aanleiding hiervoor vormde het rapport 'Voorverkenning NWO's in duinen' [Deltares (2012)] waarin een inventarisatie van de problematiek rond NWO's in duinen langs de Nederlandse kust is uitgevoerd en een plan van aanpak is voorgesteld voor de ontwikkeling van nieuwe toetsregels voor de korte en de middellange termijn. Deze voorverkenning geeft een beeld van de problematiek rond de huidige NWO's op de veiligheid van de duinwaterkeringen langs de Nederlandse Kust. Uit de reacties van de waterschappen en de Werkgroep Kust van het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW) op de voorverkenning blijkt, dat er dringend behoefte is aan een handreiking met toetsregels voor veiligheid en richtlijnen voor vergunningverlening van NWO's op of in zandige waterkeringen.

De belangrijkste conclusies uit de inventarisatie zijn [Deltares (2012)]:

- *In beleidsmatig opzicht worden waterkeringbeheerders geconfronteerd met NWO's vanuit twee verschillende verantwoordelijkheden. Als bevoegd gezag maken zij een afweging of nieuwe bouwwerken kunnen worden toegestaan. Als beheerder van de waterkering voeren ze een wettelijke toets uit, waarin wordt beoordeeld of de NWO's een te negatief effect hebben op de veiligheid van de waterkering.*
- *Bij de beoordeling van een vergunningaanvraag beoordeelt de waterkeringbeheerder of door het werk een nadelig effect mag worden verwacht ten aanzien van de veiligheid. Voor deze beoordeling ontbreken door het rijk geaccordeerde toetsregels. Daarnaast spelen belemmeringen rond beheer en onderhoud en kostenafwegingen een rol.*
- *Het niet beschikbaar zijn van geaccordeerde toetsregels komt voort uit gebrek aan kennis met betrekking tot de effecten van NWO's op de zandige kering. Door dit kennisgebrek zijn de bestaande methoden voor de beoordeling van NWO's niet generiek toepasbaar. Dit betreft specifiek NWO's in dicht bebouwd gebied.*
- *NWO's komen in verschillende vormen voor, bijvoorbeeld bebouwing, wegen, bunkers, waterbouwkundige constructies, kabels en leidingen, windmolens en industriële objecten. Nieuwe bouwplannen betreffen onder andere uitbreiding van bestaande gebouwen, parkeergarages en de bouw van windmolens.*
- *In de derde toetsronde zijn NWO's in duinwaterkeringen alleen getoetst voor Rijnland en Delfland. Hiervoor zijn de eenvoudige vuistregels uit Deltares (2009) toegepast. Voor de overige kustgebieden zijn geen toetsen uitgevoerd.*

Voor de ontwikkelingen van nieuwe toetsregels worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- *Rond 2013 is het mogelijk om met bestaande methoden richtlijnen te ontwikkelen voor solitaire bebouwing². Het betreft hier zandverlies in de centrale raai en in de raai naast*

¹ Een (hard) object in een primaire waterkering dat geen waterkerende functie heeft wordt in het jargon van de toetsmethode voor waterkeringen aangeduid als een Niet Waterkerend Object (NWO).

² Solitaire bebouwing wil zeggen dat de afstand met de naastgelegen bebouwing zo groot is dat er geen gezamenlijk effect op de hoeveelheid duinafslag wordt verwacht.

het object. Dit kan eveneens bijdragen als een start voor verdere ontwikkeling voor de periode 2014 - 2017.

- *Voor de periode 2014 - 2017 is het plan om op basis van waarnemingen en expert-judgement toetsregels voor NWO's in duinen te ontwikkelen. Hiervoor is nieuw laboratoriumonderzoek noodzakelijk. Ook kan in internationaal kader worden gezocht naar veldmetingen en richtlijnen. Met behulp van deze gegevens kan een betrouwbaar numeriek model worden ontwikkeld, waarmee de effecten van NWO's op duinen kunnen worden gesimuleerd.*

1.1.2 Positionering handreiking

Met de Handreiking NWO's in Duinen 2014 wordt invulling gegeven aan de eerste aanbeveling uit de Voorverkenning. Deze handreiking bevat eenvoudige richtlijnen op basis van bestaande kennis die waterkeringbeheerders kunnen gebruiken bij de uitvoering van het beheer van waterkeringen met solitaire bebouwing. Verder vormt de handreiking een voorbereiding op het vervolgonderzoek dat dient te leiden tot uniforme toetsregels voor de beoordeling van de waterveiligheid rond NWO's in duinwaterkeringen.

Na het gereedkomen van de handreiking kan worden gestart met de aanpak van de tweede aanbeveling, namelijk het verhogen van het kennisniveau zodat het mogelijk moet zijn om uniforme toetsregels voor bebouwing in duinwaterkeringen te ontwikkelen.

1.2 Probleemstelling en doelstelling van de handreiking

1.2.1 Probleemstelling

NWO's in duinen kennen een grote verscheidenheid van vormen, zoals enkelvoudige (solitaire) bouwwerken als een strandpaviljoen of een flatgebouw of een combinatie van bouwwerken langs het strand met voorbeelden van de (lint)bebouwing langs de boulevards van Zandvoort en Scheveningen. De NWO's in duinwaterkeringen stellen de waterkeringbeheerder voor de volgende vraagstukken:

- 1 Hoe moet bij de veiligheidstoets van de primaire waterkering rekening worden gehouden met het effect op duinafslag van een NWO in of op de duinwaterkering?
- 2 Kan er vergunning worden verleend aan initiatiefnemers bij aanvragen voor nieuwe bouwwerken in of op de waterkering waarbij de toe te voegen bebouwing zelf geen waterkerende functie heeft?
- 3 Hoe dient er bij het opstellen van een legger rekening te worden gehouden met de aanwezigheid van NWO's?

Voor de beantwoording van beide vragen zijn er nu nog geen geaccordeerde toetsregels beschikbaar. De waterschappen hebben aangegeven hier dringend behoefte aan te hebben Deltares (2012).

1.2.2 Doelstelling

Voor de korte termijn is de doelstelling gericht op de afleiding van eenvoudige richtlijnen voor solitaire bebouwing. Deze solitaire bebouwing wordt gerepresenteerd in de vorm van een kustlangs uniforme constructie in een kustlangs uniform duingebied. Van deze constructie wordt expliciet onderscheid gemaakt tussen twee verschillende sporen, te weten:

- **Spoor 1:** Het directe effect van een NWO in de dwarsdoorsnede (in het dwarsprofiel dwars door de constructie), waarbij wordt verondersteld dat het wel bezwijken van deze NWO leidt tot extra achteruitgang van het afslagpunt in de dwarsdoorsnede ten opzichte van de situatie zonder NWO. Hierbij is de diepte van de fundering en de positie van de voorzijde van de constructie ten opzichte van de ongestoorde afslaglijn van belang.
- **Spoor 2:** Het indirecte effect van een NWO in bovenaanzicht en dan specifiek aan de kustlangse rand van de constructie, waarbij wordt verondersteld dat het niet bezwijken van deze NWO leidt tot extra afslag naast het NWO ten opzichte van de situatie zonder NWO. De bepalende variabele is hierbij de positie van de voorzijde van de constructie ten opzichte van de ongestoorde afslaglijn.

Er wordt in deze handreiking ervan uitgegaan dat er geen specifieke informatie beschikbaar is over of een NWO gedurende een storm wel of niet bezwijkt. Dat betekent dat de gebruiker (waterkeringsbeheerder) in principe de rekenregels van beide sporen toepast, waarmee de meest ongunstige uitkomst wordt meegenomen in de verdere besluitvorming.

Uit de ervaringen met het opstellen van de handreiking met de richtlijnen en inbreng van expertise van deskundigen worden aanbevelingen geformuleerd voor vervolgonderzoek.

1.3 Juridische positionering van de handreiking

De handreiking heeft geen formele status zoals bedoeld in Artikel 2.6 van de Waterwet. Wel kan de handreiking worden gebruikt bij een geavanceerde toets of als maatwerk bij een vergunningaanvraag. Aangezien er in de periode tot en met 2017 geen wettelijke toetsen hoeven te worden uitgevoerd zullen deze richtlijnen vooral worden toegepast bij aanvragen voor een watervergunning voor solitaire bebouwing. Hiermee kan de waterkeringbeheerder beoordelen of het NWO een belemmering vormt voor de huidige en toekomstige veiligheid. Voorzichtigheid bij het toepassen van de handreiking blijft geboden, vooral voor complexe en/of potentieel kwetsbare situaties. Vooral bij toepassing van de handreiking in dicht bebouwd gebied wordt aanbevolen om aanvullend beroep te doen op experts.

Over het gebruik van deze toetsregels binnen een wettelijke toets op de veiligheid van de duinwaterkeringen vanaf 2017 is bij het verschijnen van deze handreiking nog niets bekend.

1.4 Gevolgde aanpak

De richtlijnen die in deze handreiking worden beschreven zijn initieel gebaseerd op een *theoretische uitwerking* die een voortzetting is van de richtlijnen die zijn beschreven in WL | Delft Hydraulics (1993, 1994). Deze theoretische uitwerking is vervolgens met modellen en metingen vergeleken om te bezien of de uitgewerkte richtlijnen een realistisch beeld geven.

Voor normale afslagberekeningen zonder rekening te hoeven houden met harde elementen vormt de detailtoets DUROS+ het uitgangspunt³. Voor modelberekeningen van duinen met harde elementen is in plaats van DUROS+ gebruik gemaakt van de volgende twee procesmodellen:

³ In het concept TRDH2011 is voor de Waddeneilanden een nieuwe detailtoets D++ ontwikkeld. Daar waar in dit rapport wordt gesproken over DUROS+ kan ook het model D++ worden ingevuld.

- Het model DurosTA berekent duinafslag en erosie voor harde elementen in een dwarsraai. Met dit model worden berekeningen uitgevoerd ten behoeve van de rekenregels voor Spoor 1.
- Het model XBeach berekent duinafslag en erosie rond harde elementen in een kustvak. Met dit model worden 1D berekeningen uitgevoerd ten behoeve van de rekenregels voor Spoor 1. Tevens worden er 2D berekeningen uitgevoerd ten behoeve van de Sporen 1 en 2.

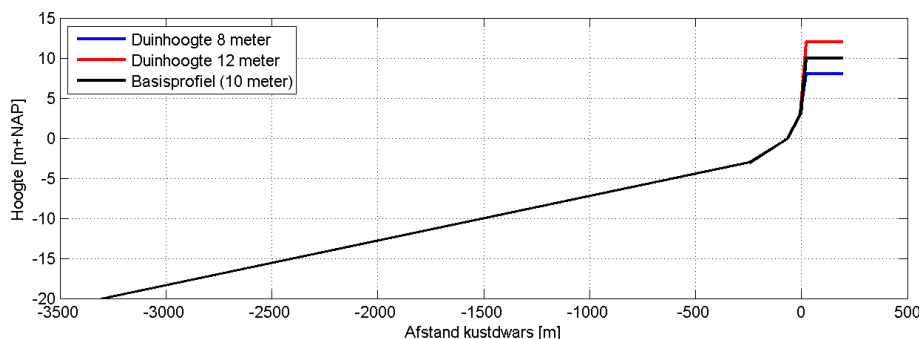
Van beide procesmodellen wordt verondersteld dat het effect van harde elementen nog onvolledig is gemodelleerd. Dit betekent dat deze procesmodellen nu nog niet direct kunnen worden toegepast voor de beoordeling van het effect van NWO's in duinen op de veiligheid. Er wordt wel verondersteld dat de analyse van de rekenresultaten van verschillende modelschematisaties zinvol bijdraagt aan de onderbouwing van de rekenregels die in deze handreiking worden beschreven. Het is de doelstelling van het lange termijnonderzoek om de procesmodellen verder te ontwikkelen tot toetsinstrumenten waar wel een kwantitatief betrouwbare uitkomst met betrekking tot NWO's in duinen mee kan worden verkregen. Hiervoor zullen in Fase 3 nadere voorstellen worden uitgewerkt.

In zowel de theoretische uitwerking als in de modelberekeningen wordt er uitgegaan van de referentiesituatie die gebruikt is voor de afleiding van de gedetailleerde toets DUROS+. Dit heeft zowel voor- als nadelen:

- Een groot voordeel is dat het overgrote deel van de laboratoriumexperimenten met duinafslag eveneens is gerelateerd aan de referentiesituatie. Hierdoor kan een aantal experimenten worden gebruikt voor vergelijking met de theoretische uitwerking.
- Een ander groot voordeel is dat met deze aanpak goed inzicht kan worden verkregen in het relatieve effect van NWO's op een duinwaterkering.
- Een nadeel is dat de werkelijke situatie meestal complexer is dan de referentiesituatie. Daarom vindt in fase 2 een evaluatie plaats voor een drietal voorbeelden uit de praktijk.

Referentieprofiel en de korreldiameter

Voor de berekeningen wordt uitgegaan van een basisprofiel dat een variatie is op het zogenaamde referentieprofiel [Figuur 1.1]. Voor de basishoogte van het horizontale/vlakke kruinniveau wordt uitgegaan van NAP+10 m (als representatief niveau voor een zandige waterkering met NWO's)⁴. De gevoeligheid voor dit niveau wordt onderzocht door berekeningen uit te voeren voor zowel een niveau van NAP+8 m (2 m lager) als NAP+12 m (2 m hoger).



⁴ Bij het oorspronkelijke referentieprofiel ligt het niveau van het duin op 15 m [Vellinga (1986)]. In dit rapport wordt een lager niveau gehanteerd, waardoor er een kleiner hoogteverschil tussen het NWO en het stormvloedpeil ontstaat.

Figuur 1.1 Basisprofiel met varianten op de duinhoogte welke zijn gebruikt in de handreiking.

Er wordt verondersteld dat het profiel volledig uniform is in langsrichting (met uitzondering van de aanwezigheid van een NWO) en dat er sprake is van een niet-gekromde kust.

Voor de sedimenteigenschappen worden de gebruikelijke referentiewaarden gebruikt, namelijk een korreldiameter van 225 μm en een bijbehorende valsnelheid van 0,0268 m/s. Er zal niet worden gekeken naar de gevoeligheid voor de grootte van de korreldiameter.

Hydraulische belastingen

Voor de berekeningen wordt uitgegaan van de volgende hydraulische belastingparameters:

- een stormvloedpeil op NAP+5,0 m
- een significante golfhoogte $H_s = 9$ m (op diep water; NAP-20 m contour)
- een piekperiode $T_p = 16$ s (op diep water; NAP-20 m contour).

De berekeningen gaan standaard uit van een stationaire belasting met een duur van 5 uur [Vellinga (1986)]. Er wordt uitgegaan van loodrecht invallende golven.

Eigenschappen NWO

Voor de NWO's wordt uitgegaan van rechthoekige objecten met de wanden parallel aan of loodrecht op de kustlijn. De muren van de objecten zijn verticaal. Voor Spoor 1 wordt verondersteld dat het NWO tijdens een storm direct in kleine onderdelen uiteen valt, zodra deze belast wordt door (bijvoorbeeld) golven, waardoor er feitelijk een rechthoekige ontgraving in het duinprofiel overblijft. Voor Spoor 2 wordt verondersteld dat het NWO juist blijft staan, en dat de hoogte dusdanig is dat er geen golfoverslag over het NWO plaatsvindt. Tevens is de diepte dusdanig dat er geen erosie onder de fundering plaatsvindt.

Er wordt in deze handreiking geen rekening gehouden met het verplaatsen van NWO's als gevolg van ondergraving en/of golfkrachten.

Er wordt uitgegaan van solitaire bebouwing. Dit betekent dat wordt verondersteld dat er geen effecten van andere NWO's meespelen.

Bij de modelberekeningen zijn verschillende varianten van NWO's voor de sporen 1 en 2 uitgewerkt. Samen met de variatie in duinhoogte levert dit een aantal modelschematisaties op die zijn beschreven in Bijlagen C en D.

1.5 Toelichting bij de Handreiking NWO

1.5.1 Leeswijzer

In 2013 is door Rijkswaterstaat WVL opdracht gegeven aan Deltares en Arcadis om een eenvoudige Handreiking tot stand te brengen en voorstellen te doen voor vervolgonderzoek. Dit heeft geresulteerd in een eerste concept van de handreiking welke is opgeleverd in 2013. In een aanvullende opdracht zijn in 2014 de toetsregels verder ontwikkeld. Bovendien is er een schematiseringshandleiding gemaakt, met daarin een procesbeschrijving voor het toetsen, een voorbeelduitwerking voor het Atlantic Hotel in Scheveningen, en tips voor het rekenen aan NWO's in MorphAn [Deltares (2014A)]. Een derde product betreft de evaluatie en vooruitblik met daarin een uitwerking voor de casussen Atlantic Hotel in Scheveningen, Palace Hotel in Zandvoort en plannen voor een parkeergarage in Egmond. Dit rapport geeft ook aan welke openstaande vragen er zijn voor vervolgonderzoek [Deltares (2014B)].

Bij het schrijven van dit rapport wordt de inhoud van deze voorverkenning als bekend verondersteld.

In het achtergrondrapport worden de volgende hoofdstukken beschreven:

- Hoofdstuk 2 is een inleidend hoofdstuk bedoeld om de sporen 1 en 2 toe te lichten
- Hoofdstuk 3 beschrijft het eerste NWO-spoor (ontgravingseffect)
- Hoofdstuk 4 beschrijft het tweede NWO-spoor (onthoudingseffect)
- Hoofdstuk 5 geeft de conclusies

Het rapport bevat verder referenties en een aantal bijlagen:

- Bijlage A bevat de gedetailleerde theoretische uitwerking van Spoor 2
- Bijlage B bevat de resultaten van enkele laboratoriumexperimenten voor sporen 1 en 2
- Bijlage C beschrijft de modeluitwerkingen met de 1D rekenmodellen voor Spoor 1
- Bijlage D beschrijft de modeluitwerkingen met XBeach (2DH) voor de sporen 1 en 2

1.5.2 Totstandkoming

De Handreiking NWO's in Duinen 2014 is tot stand gekomen in opdracht van het Deltaprogramma Kust, waarbij Rijkswaterstaat WVL de rol van gedelegeerd opdrachtgever heeft gekregen. Voor het project is een begeleidingsgroep samengesteld met de volgende personen:

- Ranie Kapoerchan, RWS-WVL (opdrachtgever voor het project tot 2014);
- Wout de Vries, RWS-WVL (opdrachtgever voor het project vanaf 2014)
- Nicoline van den Heuvel, Deltaprogramma Kust
- Marius Schwartz, Deltaprogramma Kust
- Kees Jan van Westen, Deltaprogramma Kust
- Jeroen Rietdijk, Hoogheemraadschap Delfland (vertegenwoordiger van de Themagroep Kust van de Unie van Waterschappen)
- Quirijn Lodder, RWS-WVL

De opdracht voor het project is gegeven aan Deltares, die het werk heeft uitgevoerd in samenwerking met Arcadis. Het projectteam is als volgt samengesteld:

- Marien Boers, Deltares (*projectleider*)
- Henk Steetzel, Arcadis
- Pieter van Geer, Deltares
- Robbin van Santen, Arcadis

Bij de evaluatie van de afgeleide toetsregels met casussen is informatie aangedragen door:

- Jeroen Rietdijk, Hoogheemraadschap Delfland
- Joost Veer, Hoogheemraadschap Rijnland
- Petra Goessen, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier

2 Inleiding tot de theoretische uitwerking NWO's

2.1 Effect van constructieve elementen in een zandige kering

2.1.1 Invloed NWO op duinveiligheid

De aanwezigheid van een NWO in een zandige waterkering kan een effect hebben op de veiligheid van de (primaire) waterkering. Afhankelijk van een groot aantal factoren kan een dergelijke constructie tijdens de maatgevende stormvloed omstandigheden (met hoge waterstanden en zware golfaanval) plaatselijk leiden tot een zekere toename van de hoeveelheid duinafslag en daarmee tot een lokaal verder landwaarts gelegen positie van de maatgevende afslaglijn ten opzichte van een situatie zonder NWO's.

Deze laatste verschuiving kan vervolgens weer worden vertaald in een effect op de veiligheid. Dit kan variëren van enige afname van het 'veiligheidsoverschot' (voor een duinwaterkering welke zonder de aanwezigheid van een NWO ruim voldoende veilig is), tot een duinwaterkering die niet meer aan de veiligheidsnorm voldoet. In dat geval is de toename van de hoeveelheid afslag en daarmee de extra verschuiving van het maatgevende afslagpunt zodanig groot dat er sprake is van onvoldoende ruimte voor de inpassingen van een grensprofiel met gevolg het overschrijden van de landwaartse leggerbegrenzing van de waterkering.

Bij het beoordelen van het effect van een NWO op de veiligheid, gaat het specifiek om het verschil tussen de veiligheidssituatie van:

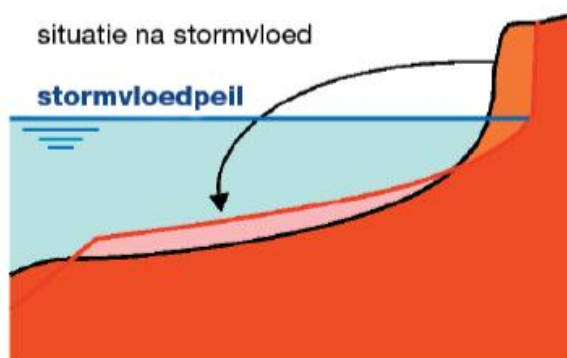
- een volledig zandige kering (zonder NWO) en
- een zandige kering waarop/waarin een NWO aanwezig is.

Zoals al aangegeven is de (gewijzigde) positie van de maatgevende afslaglijn als gevolg van de aanwezigheid van een NWO daarbij een belangrijke indicator. Van belang is het daarbij op te merken dat het dus expliciet niet gaat om de veiligheid van het NWO zelf. De handreiking richt zich daarom op het kwantificeren van de extra optredende verschuiving van de afslaglijn als gevolg van de aanwezigheid van een NWO.

2.1.2 Werking zandige keringen

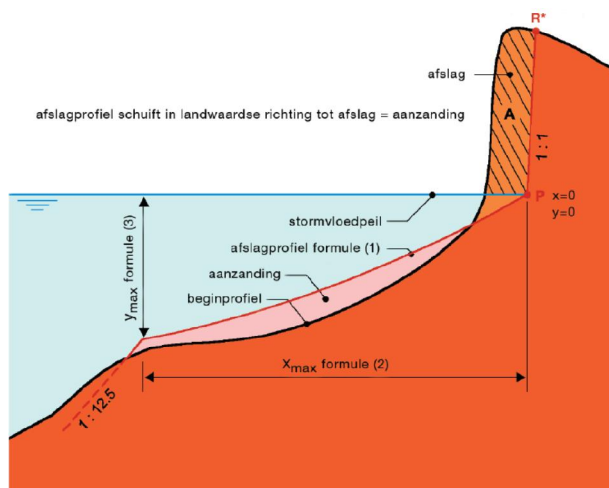
Uitgangspunt voor de veiligheidsbeschouwing van zandige kering (het geheel van vooroever, strand en duinen), is dat het aanwezige dwarsprofiel onder invloed van de tijdens een stormvloed optredende golfaanval zal vervormen. Deze vervorming resulteert in een zogenaamd duinafslagprofiel, waarbij er materiaal uit het duinfront afslaat en op het voorliggende strand en vooroever wordt afgezet. In Figuur 2.1 is dit principe schematisch weergegeven.

Het tijdens de storm vervormde dwarsprofiel is daarbij in staat om de zware golfaanval 'op te vangen' en voorkomt daarmee dat er nog meer materiaal van het duin afslaat. De situatie na afslag biedt zo voldoende weerstand tegen het doorbreken van het duin. Bij de beoordeling van een duinwaterkering wordt er getoetst of er landwaarts van het verwachte afslagpunt nog voldoende duin overblijft (het zogenaamde grensprofiel). De positie van het maatgevende afslagpunt (de doorsnijding van het ontstane afslagfront met de bovenkant van het aanwezige duin) is daarbij een belangrijke maat.



Figuur 2.1 Effect van stormvloed op een zandige waterkering [TRDA2006]

Voor het periodiek beoordelen van de veiligheid van duinwaterkeringen op grond van de Waterwet is de detailtoets DUROS+ beschikbaar. Centraal onderdeel van dit model betreft de beschrijving van het zogenaamde afslagprofiel. Voor de beschrijving van de vorm van dit afslagprofiel is een eenvoudige formule beschikbaar die vorm van de zogenaamde afslagparabool beschrijft. De verticale positie van deze afslagparabool is gekoppeld aan het stormvloedpeil. De horizontale positie volgt uit de balans tussen de hoeveelheid erosie (afslag) uit het duin en afzetting op de vooroever. Uiteindelijk volgt hier dus ook de positie van het meest landwaartse afslagpunt uit. In Figuur 2.2 is deze positie aangegeven met de R^* -aanduiding (rechts bovenin).



Figuur 2.2 Effect van stormvloed op een zandige waterkering [TRDA2006]

De hoeveelheid overblijvend duin (in dit geval landwaarts/rechts van de R^* -positie) vormt hierbij een maat voor de veiligheid. Overigens is de feitelijke toetsing iets ingewikkelder dan hierbij geschetst, omdat daarbij ook nog rekening gehouden wordt met allerlei onzekerheden in de duinafslagbepalende factoren. Dit betekent onder andere dat er gerekend wordt met rekenwaarden voor de vorm van de afslagparabool bepalende parameters en dat er bovendien nog een toeslag op het initieel berekende afslagvolume in rekening moet worden gebracht. Aanvullend speelt ook het zogenaamde grensprofiel en de variatie van de JARKUS-profielen in de tijd een rol.

Voor het eerste begrip is een dergelijke (meer ingewikkelde) verdieping niet noodzakelijk en voldoet de eerder hier gegeven schematische uitwerking. Omdat het geschetste duinafslagprincipe is gebaseerd op een vrije uitwisseling van materiaal, zal een NWO hier ontegenzeggelijk invloed op hebben. De mate waarin dit het geval is hangt mede af van het type constructief element [Deltares (2012)]. Bij het toetsen van deze constructieve elementen dient onderscheid te worden gemaakt tussen:

- Niet-waterkerende objecten (de NWO's).
- Waterkerende constructies zoals duinvoetverdedigingen, boulevardconstructies en dijk-in-duin-constructies (zogenaamde hybride keringen).

In deze handreiking wordt alleen aandacht besteed aan de beoordeling van NWO's.

2.1.3 Effect constructieve elementen

Het effect van een constructief element in een zandige waterkering uit zich in een verstoring van de vrije uitwisseling van zand binnen het afslagprofiel. Voor een waterkerende constructie is dit ook expliciet de bedoeling en zal dit (ten opzichte van de situatie zonder constructie) in principe ook leiden tot een zeewaartse verplaatsing van het maatgevende afslagpunt en daarmee tot een toename van de veiligheid van de (hybride) waterkering. Dit vereist echter wel een inherent stabiele waterkerende constructie. Indien een dergelijke constructie ergens faalt, kan er echter juist sprake zijn van een afname van de veiligheid. Dit laatste is meestal ook het geval ter plaatse van de aansluiting van een waterkerende constructie op een gewoon duin.

Ook de aanwezigheid van een NWO in het dwarsprofiel kan leiden tot een beïnvloeding van de vrije uitwisseling van sediment en daarmee tot een (negatief) effect op de positie van het afslagpunt en als gevolg daarvan ook tot een effect op de veiligheid van de waterkering. Dit effect is in de volgende sectie iets verder uitgewerkt.

2.2 Schematisatie van het effect van NWO's

2.2.1 Specifiek effect NWO

Er wordt bij de beoordeling van het veiligheidseffect van een NWO onderscheid gemaakt tussen twee sporen [zie paragraaf 1.2.1]:

- Spoor 1: Het directe effect van een wel bezwaken NWO in de dwarsdoorsnede (dus over de centrale raai, in het dwarsprofiel dwars door de constructie);
- Spoor 2: Het indirecte effect van een niet bezwaken NWO in bovenaanzicht en dan specifiek ter plaatse van de rand van de constructie (overgang van constructie naar naastliggend duinprofiel).

Beoordelingsspoor	NWO	Positie	Effect op afslagpunt
1 – Ontgraving	Wel bezwaken	Centrale raai over object	Extra teruggang bij bezwijken van constructie
2 – Onthouding	Niet bezwaken	Overgang/rand	Extra teruggang naast constructie bij niet bezwijken constructie

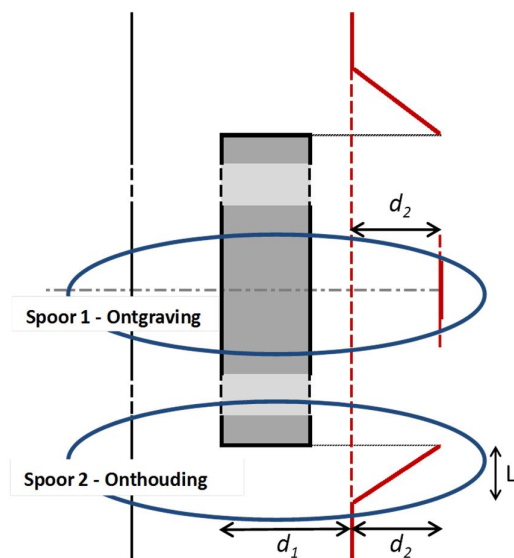
Tabel 2.1 Overzicht (te definiëren) beoordelingssporen voor NWO's

Feitelijk gaat het hier om twee verschillende beoordelingssporen welke beide kunnen leiden tot een landwaartse verschuiving van het afslagpunt ten opzichte van de situatie zonder

NWO. Deze sporen zijn in Tabel 2.1 weergegeven en worden in de volgende paragrafen verder uitgewerkt. Daarbij is in deze handreiking een beschrijving gegeven van de effecten van een enkel object. De vertaling hiervan naar meerdere objecten komt in het vervolgonderzoek aan de orde.

In Figuur 2.3 is een bovenaanzicht gegeven van een in kustlangse richting (lange) constructie. Deze bevindt zich landwaarts (rechts) van de voorzijde van het duin, maar zeewaarts (links) van de maatgevende afslaglijn (de rode lijn). In deze figuur komen drie parameters voor, namelijk d_1 , d_2 en L :

- De interactiemaat is aangeduid met de d_1 -waarde en geeft aan hoever de voorzijde van de constructie zeewaarts van de ongestoorde afslaglijn is gelegen. Hierbij wordt de ongestoorde afslaglijn berekend met de detailtoets zoals voorgeschreven door het VTV.
- Het effect van een NWO in de vorm van extra afslag wordt weergegeven in de vorm van de d_2 . Dit betreft het verschil tussen de ongestoorde afslaglijn en de afslag als gevolg van de aanwezigheid van een NWO.
- De lengte in kustlangse richting waarover een effect van het NWO aanwezig is wordt gekenmerkt door de parameter L .



Figuur 2.3 Overzicht beschouwde uitwerkingssporen ter kwantificering van de d_2 -waarde

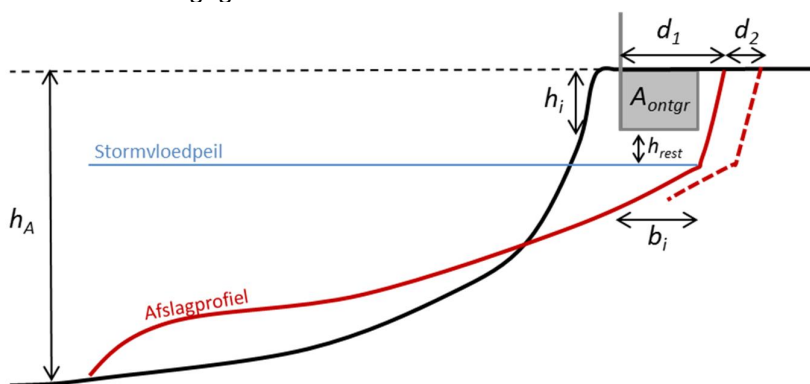
In het midden van de constructie is het effect van een ontgraving in het duin weergegeven. Als gevolg hiervan zal er sprake zijn van een landwaartse verschuiving van het afslagpunt over een afstand d_2 . Nabij de beëindiging van de constructie is het effect van de overgang van duin met constructie naar het onbebouwde duin gegeven. Ook dit leidt tot een achteruitgang van het duin welke ook hier met een d_2 -waarde is aangegeven. In het volgende zijn deze twee kwantificeringssporen nog iets nader toegelicht.

2.2.2 Spoor 1: Effect van ontgraving (wel bezweken NWO; in doorsnede)

Bij een beschouwing van de situatie in de doorsnede (zandig profiel met NWO) is natuurlijk de omvang en de positie van de constructie van belang. In het geval dat de constructie zich in het afslagprofiel bevindt en daarmee (deels) in de plaats komt van een zekere hoeveelheid

duinzand, zal er per definitie een effect zijn op de vrije ontwikkeling van het afslagprofiel in dwarsrichting. De in het volgende gegeven uitwerkingen hebben steeds betrekking op de positie van de NWO ten opzichte van de ongestoorde afslagzone, dit onafhankelijk van de beschouwde maatgevende situatie (toetsing, beschermingszone).

Indien de bouw van een NWO leidt tot een lokale ontgraving, is er mogelijk een positief effect vanwege de sterkte van het object dat dan immers de plaats inneemt van het losse zand. Een dergelijk positief effect is in deze veiligheidsbeschouwing echter niet van belang; een NWO wordt in principe immers als niet-waterkerend beschouwd en daarom wordt een dergelijk voordeel ook niet in rekening gebracht. Feitelijk wordt de constructie daarmee dus als volledig bezwijkend verondersteld. In dit geval is er in de beschouwde doorsnede dus 'slechts' sprake van een gat in het duinprofiel ter plaatse van de constructie. De (waterkerende) constructie wordt dan als bezweken en afwezig verondersteld. Een dergelijke benadering geldt specifiek voor objecten/gebouwen met kelders. De hiermee verband houdende ontgraving leidt dus ter plaatse van het NWO tot lokale verlaging van het maaiveld in het duin. In Figuur 2.4 is een voorbeeld ingetekend van een ontgraving in het duin, en daarbij zijn ook de van belang zijnde parameters weergegeven.



Figuur 2.4 Locatie ontgraving binnen ongestoorde afslagzone

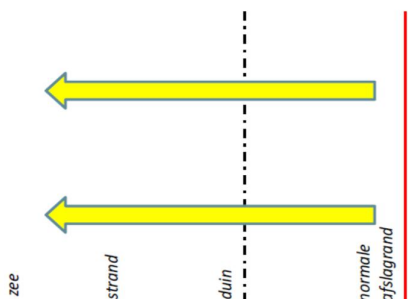
Het doorrekenen van deze (conservatief ingestoken) situatie resulteert uiteindelijk tot een iets verder landwaarts gelegen afslagpunt. Om te voldoen aan een sluitende zandbalans moet de rode afslagparabool (zie figuur) immers iets opschuiven. In deze benadering leidt de NWO tot extra teruggang van het afslagpunt en daarmee tot een afname van de veiligheid van de waterkering.

2.2.3 Spoor 2: Effect van onthouding (niet bezweken NWO; in bovenaanzicht)

Ook bij een beschouwing van de situatie in bovenaanzicht (zandig profiel met een NWO), is de omvang en de positie van de constructie in dwarsrichting van belang. In het geval dat de constructie zich in afslagzone bevindt en bovendien tijdens de maatgevende storm intact blijft, kan er ter plaatse van de constructie geen afslag van onder de constructie plaatsvinden. Er is sprake van een zogenaamd 'onthouden afslagvolume' (het volume van het ongestoorde afslagprofiel dat in beslag wordt genomen door de constructie). Deze verminderde uitwisseling leidt aan de voorzijde van de constructie tot een relatief lager dwarsprofiel.

Tijdens de maatgevende storm zal een herverdeling van zand optreden, waardoor er naast het bouwwerk extra afslag zal plaatsvinden. Dit principe is geïllustreerd aan de hand van drie

figuren. De gele pijlen in deze figuren vormen hierin een maat voor deze dwarsuitwisseling van materiaal. De voorzijde van het duin wordt weergegeven met een zwarte streep-stip-lijn, de afslaglijn wordt weergegeven met een rode doorgetrokken lijn.

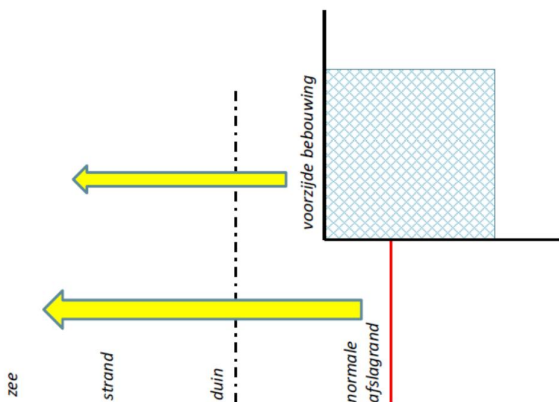


Figuur 2.5 Situatie in bovenaanzicht met effect dwarsverdeling afgeslagen zand (zonder NWO / bebouwing)

In Figuur 2.5 is in bovenaanzicht het effect gegeven van een zware stormvloed waarbij er, geheel conform het eerder beschreven principe, materiaal vanuit het duinfront in zeewaartse richting wordt afgezet. Voor een in langsrichting uniforme doorgaande zandige waterkering is deze uitwisseling in alle dwarsraaien gelijk (en zijn de gele pijlen even groot).

Indien er een NWO aanwezig is, zal ter plaatse van het constructieve element (in dit specifieke geval gemakshalve aangeduid als bebouwing), de vrije dwarsuitwisseling van materiaal worden belemmerd. Dit effect is weergegeven in Figuur 2.6, waarin de gele pijl die zich voor de constructie bevindt, dus beperkter van omvang is. In deze figuur is het effect van een NWO gemakshalve beschouwd als half-oneindig lange constructie (met voldoende lengte in langs- en dwarsrichting). Deze uitwerking richt zich enkel en alleen op de dwarspositie van de hoek van de constructie in het duin. Hierbij mag duidelijk zijn dat een constructie alleen effect kan hebben indien de voorzijde van de constructie zich zeewaarts van de normale afslagrand bevindt.

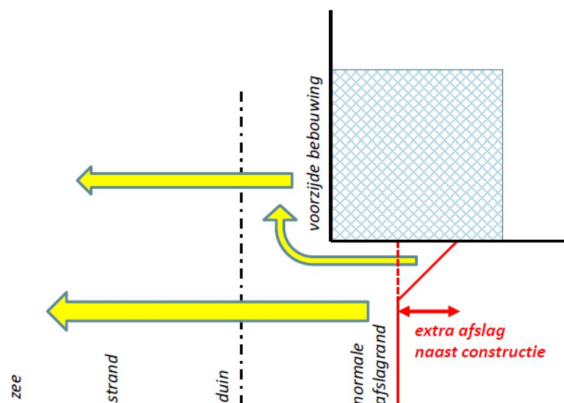
Feitelijk is de benadering voor Spoor 2 in hoofdlijnen gelijk aan de methodiek die in VTV2006 is beschreven voor de bepaling van (extra) teruggang van de afslaglijn ter plaatse van aansluitingsconstructie (bijv. dijk – duin aansluitingen). De verschillen zitten onder andere in de bepaling van het zogenaamde onthoudingsvolume (A_{onth}); zie verderop.



Figuur 2.6 Situatie in bovenaanzicht met dwarsverdeling afgeslagen zand voor NWO / bebouwing

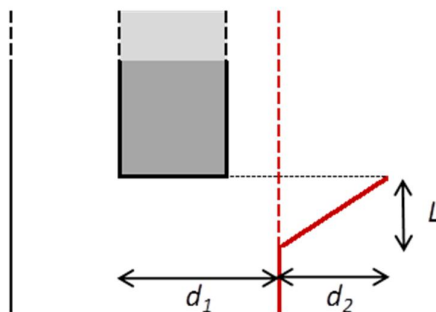
Zoals al eerder aangegeven leidt dit tot een discontinuïteit in profielvorm en profielniveau voor de constructie; het afslagprofiel voor de constructie ligt hier dus iets lager dan het afslagprofiel *naast* de constructie.

Deze onnatuurlijk abrupte 'sprong' in het bodemniveau zal tijdens de afslagontwikkeling grotendeels worden genivelleerd door het toevloeien van afslagmateriaal uit de naastgelegen doorsnede. Het uiteindelijke gevolg hiervan is dat er enige extra afslag naast de constructie zal optreden (Figuur 2.7). Dit volume komt ten goede aan het lager gelegen profieldeel voor de constructie. De extra afslag naast de constructie kan dan ook gezien worden als het negatieve effect van de NWO op de veiligheid van de waterkering (zie ook Figuur 2.8).



Figuur 2.7 Effect herverdeling afgeslagen zand van gevolg NWO / bebouwing met extra afslag

Voorwaarde voor deze teruggang is dat het object tijdens het afslagproces onaangetast in het duin aanwezig is. Hierdoor ontstaat immers het niveauverschil welke feitelijk de oorzaak is van de extra teruggang.



Figuur 2.8 Effect NWO-constructie leidend tot extra afslag d_2

De extra afslag ligt in de orde van meters tot enkele tientallen meters, maar is sterk afhankelijk van de locatie en de omvang van het NWO. Met name de positie van de voorzijde van de constructie ten opzichte van de maatgevende (ongestoorde) afslaglijn is van groot belang. Deze waarde is in de bovenstaande afbeelding weergegeven door middel van de d_1 -parameter.

De basisuitwerking zal zich richten op een overgang van een kaal duin naar een constructie van voldoende lengte. Indien de lengte van de constructie beperkt van omvang is zal er sprake zijn van een wederzijdse beïnvloeding van de uitwisselingsprocessen. Dit zal leiden tot enige afname van de mate van extra teruggang. Anderzijds zal er juist sprake zijn van een vergroting van de extra afslag als er twee constructies zich vlak naast elkaar bevinden.

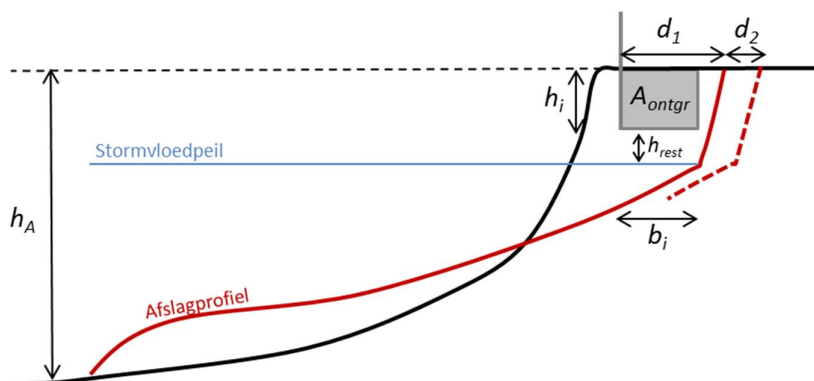
2.3 Uitgangspunten voor theoretische uitwerking

De theoretische uitwerking van de sporen 1 en 2 zullen zich richten op het vinden van relaties die de omvang van de extra afslag afdoende beschrijven. Dit levert inzicht in de bepalende parameters en de wijze waarop deze een effect hebben op de extra teruggang. Zoals al aangegeven zal één en ander langs twee verschillende sporen worden uitgewerkt, waarbij Spoor 1 (het ontgravingseffect) is beschreven in hoofdstuk 3 en Spoor 2 (het onthoudingseffect) in hoofdstuk 4 aan de orde komt.

Als startpunt voor het bepalen van het effect van een NWO in het duin is steeds de ongestoorde situatie gebruikt. Belangrijk is daarbij de (te verwachten) hoeveelheid afslag in het ongestoorde duin, en daarmee ook de positie van het maatgevende afslagpunt. De theoretische uitwerkingen voor het kwantificeren van het effect van NWO's spitsen zich vervolgens toe op het bepalen van de *extra* hoeveelheid afslag ten gevolg van de constructie. Van belang zijn daarbij de relatieve *positie* van de constructie (d_1), de *diepte* van de constructie (h_i), de *breedte* van de constructie (b_i ; dwars op de kust gemeten), en ook de *lengte* van de constructie (langs de kust gemeten). Op basis van deze parameters kan een inschatting gemaakt van de mate van *extra* achteruitgang van het afslagpunt (d_2).

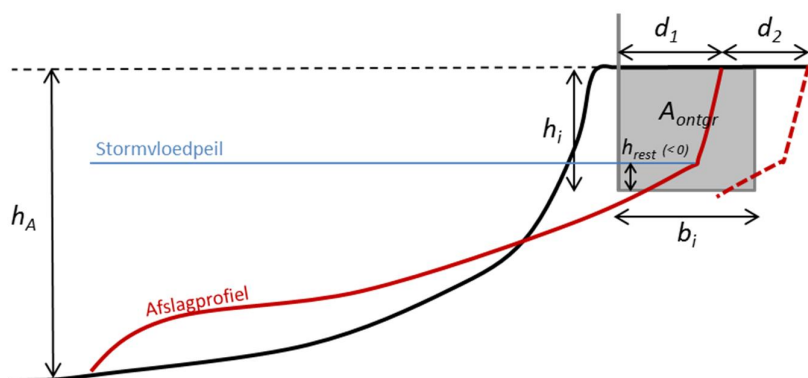
Bij alle uitwerkingen in deze rapportage wordt verder uitgegaan van een constructie met verticale wanden [paragraaf 1.4], en wordt ook geen rekening gehouden met effecten van eventuele ondergraving van de constructie. In de basisuitwerkingen is bovendien uitgegaan van alleenstaande constructies met een grote (oneindige) lengte in kustlangse richting; en dus geen complexere situaties met meerdere constructies naast elkaar.

Ten behoeve van Spoor 1 (ontgravingseffect) geldt voor de constructie-ontgraving dat steeds sprake is van een rechthoekige ontgraving in vlak maaiveld. Daarbij zullen verschillende afmetingen (niveau onderzijde, positie voor- en achterzijde) in beschouwing worden genomen. In Figuur 2.9 is een voorbeeld gegeven van een ontgraving van beperkte omvang waarbij de gehele ontgraving zich zeewaarts van het afslagpunt bevindt.



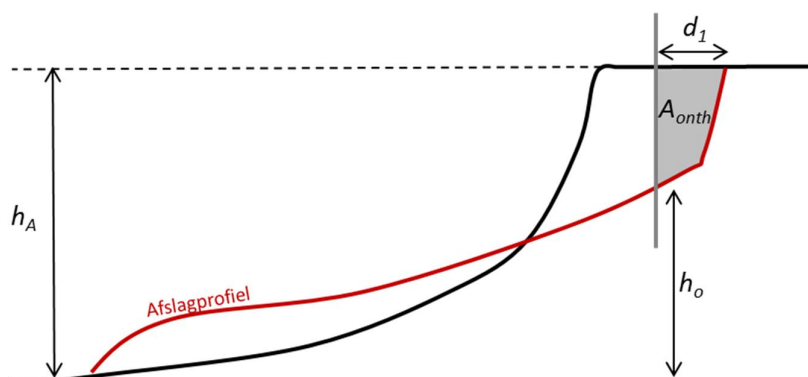
Figuur 2.9 Schematische weergave van kleine ontgraving in het duin; met alle relevante parameters t.b.v. Spoor 1

Figuur 2.10 geeft een voorbeeld van een veel grotere ontgraving, die tot achter de ongestoorde afslagzone reikt en waarvan het minimale ontgravingsniveau bovendien onder het stormvloedpeil ligt. Zowel de extra breedte als de extra ontgravingsdiepte hebben tot gevolg dat de ontgraving leidt in een grotere achteruitgang van het afslagpunt (d_2) dan in het vorige voorbeeld.



Figuur 2.10 Schematische weergave van grote ontgraving in het duin; met alle relevante parameters t.b.v. Spoor 1

Ten behoeve van Spoor 2 is vooral de positie van de voorzijde van de constructie van belang. Deze voorzijde is in Figuur 2.11 weergegeven met de verticale grijze lijn. Het niveau van de constructie is feitelijk niet meer van belang, er wordt verondersteld dat deze onder het niveau van het afslagprofiel ligt. Dit geldt ook voor de positie van de achterzijde van de constructie. De constructie wordt daarbij verondersteld volledig stabiel te zijn. Daarbij wordt uitgegaan van een (oneindig) diepe fundering en een (oneindig) hoge constructie.



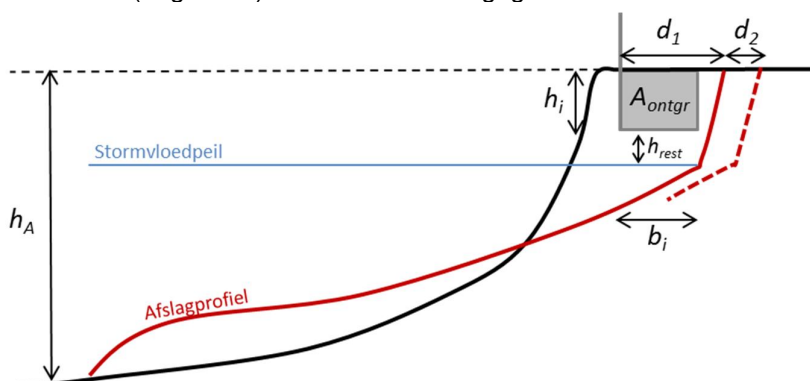
Figuur 2.11 Schematische weergave van stabiele NWO in het duin; met alle relevante parameters t.b.v. Spoor 2

3 Uitwerking ontgravingseffect wel bezwaken NWO (Spoor 1)

3.1 Inleiding en uitgangspunten

Door een NWO te schematiseren als zijnde een ontgraving wordt feitelijk verondersteld dat de constructie volledig is bezwaken en daarmee geen enkele remmende functie heeft in het afslagproces. Bij dit uitwerkingsspoor wordt dus uitgegaan van een dwarsdoorsnede van het duinprofiel waarbij er ter plaatse van de constructie dus een 'gat' aanwezig is. Een dergelijke benadering, met een verlaging van het maaiveld, is bijvoorbeeld specifiek van toepassing voor objecten zoals parkeergarages en/of gebouwen met kelders.

Voor het bepalen van de mate van extra achteruitgang van het afslagpunt, ten gevolge van een ontgraving, zijn meerdere parameters relevant. In Figuur 3.1 zijn de van belang zijnde parameters (nogmaals) schematisch weergegeven.



Figuur 3.1 Schematische weergave van ontgraving in het duin; met alle relevante parameters t.b.v. Spoor 1

Voor de kwantificering van het ontgravingseffect zijn de relatieve positie van de ontgraving (d_1) en de grootte van de ontgraving van belang. Deze laatste wordt gekarakteriseerd door het ontgravingsvolume A_{ontgr} (uitgedrukt in m^3/m^1), alsmede de ontgravingshoogte h_i , de breedte b_i en het niveau van de onderkant van de ontgraving ten opzichte van het stormvloedpeil, h_{rest} . De laatste relevante parameter is de zogenaamde 'actieve hoogte' van de afslagzone (h_A), die is gedefinieerd als zijnde het verschil tussen het minimale en het maximale niveau van de afslagzone.

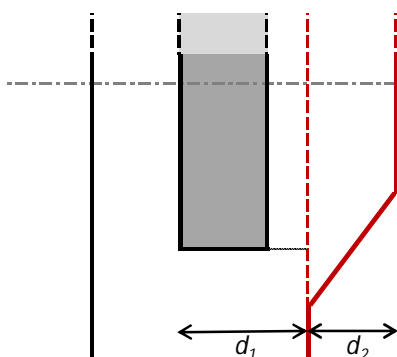
Merk op dat bij de uitwerkingen zowel voor de positie van de ontgraving als ook voor de positie van het afslagpunt relatieve maten zijn gehanteerd: afstanden ten opzichte van het ongestoorde afslagpunt. Het resultaat van de uitwerkingen is hierdoor breder toepasbaar dan alleen voor maatgevende situaties (toetsing, beschermingszone).

Doel van de verdere uitwerking van het ontgravingseffect, in het vervolg van dit hoofdstuk, is om de extra teruggang van het afslagpunt eenduidig te relateren aan enkele eenvoudig te kwantificeren parameters, zoals bijvoorbeeld het ontgravingsvolume A_{ontgr} en de d_1 -waarde.

Van belang is dat de beschreven uitwerkingen in dit hoofdstuk feitelijk betrekking hebben op (het effect van) een in kustlans richting lange doorgaande ontgraving ('sleuf') in het duin. Voor een constructie (of feitelijk ontgraving) van beperkte omvang in kustlans richting levert

deze benadering in principe een bovengrens qua effect op het afslagpunt. In de omgeving van de overgang van de ontgraving naar het onverstoorde duin zal immers sprake zijn van een zijdelingse herverdeling van materiaal. Dit effect is schetsmatig ingetekend in Figuur 3.2.

Op grotere afstand van de overgang geldt de eerder toegelichte centrale raaibenadering. De (maximale) extra teruggang van de afslaglijn is daarbij dus gelijk aan de d_2 -waarde. In de beschouwde uitwerkingen is primair gekeken naar de raaibenadering voor Spoor 1, omdat dit een bovengrensbenadering is voor de extra te verwachten hoeveelheid afslag ten gevolge van een ontgraving.



Figuur 3.2 Schetsmatige weergave (bovenaanzicht) van effect van langgerekte ontgraving ('sleuf') in een duin

3.2 Theoretische uitwerking

In het geval van een duin met een zekere ontgraving in de afslagzone ligt de positie van het afslagpunt in principe altijd verder landwaarts liggen dan bij eenzelfde duin zonder ontgraving. Om deze landwaartse verschuiving te verklaren en te kwantificeren is het nuttig om het basisprincipe van duinafslag opnieuw te bekijken.

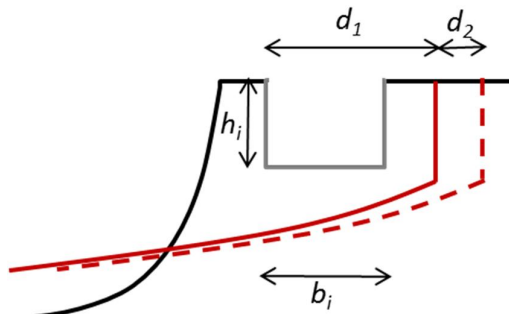
In feite vindt er bij een (onverstoord) duinprofiel afslag plaats tijdens een storm omdat zich door hogere waterstanden en zwaardere golfaanval een nieuw evenwichtsprofiel zal vormen. Bij het instellen van dit evenwichtsprofiel blijft de hoeveelheid zand in het kustprofiel (bij een kustlangs uniforme kust) gelijk, en is de hoeveelheid erosie dus gelijk aan de hoeveelheid sedimentatie. Er is dus sprake van een gesloten zandbalans. Gegeven de vorm van het nieuwe evenwichtsprofiel (die afhankelijk is van de stormcondities en de sedimenteigenschappen) en uitgaande van een gesloten zandbalans, is de positie van het afslagpunt in het duin te bepalen. Deze volumebalans-benadering is ook het basisprincipe achter het rekenmodel DUROS+.

Zodra er een bepaald zandvolume dat wordt onttrokken uit het duin, door een ontgraving, dan is de hoeveelheid 'beschikbaar' zand in het duin lager, waardoor er een andere herverdeling van zand plaatsvindt tijdens een storm. Uitgaande van dezelfde stormcondities en sedimenteigenschappen, blijft de vorm van het evenwichtsprofiel in principe hetzelfde, en daardoor zal het uiteindelijke afslagprofiel (en daarmee dus ook de positie van het afslagpunt) verder landwaarts moeten opschuiven om een gesloten zandbalans te behouden (erosie = sedimentatie). Hieronder wordt dit principe verder uitgewerkt.

3.2.1 Basisrelatie >> Ontgraving volledig binnen afslagzone

Zoals hierboven beschreven zal het onttrekken van een zeker zandvolume uit het duin (ontgraving) leiden tot een landwaartse verschuiving van het afslagpunt, omdat de zandbalans (bij een kustlangs uniform duin) per definitie gesloten is. De methode voor de bepaling van het afslagpunt is grotendeels gebaseerd op het principe van deze constante volumebalans, en daardoor is het relatief eenvoudig om het basiseffect van een ontgraving te kwantificeren.

Het zogenaamde basiseffect is van toepassing op ontgravingen die zich volledig in de "ongestoorde" afslagzone bevinden. Een voorbeeld hiervan is schematisch weergegeven in Figuur 3.3. De gehele ontgraving ligt in dit geval dus zeewaarts van het ongestoorde afslagpunt, waarbij de afstand tussen de zeezijde van de ontgraving en het ongestoorde afslagpunt groter is dan de breedte van de ontgraving; ofwel: $d_1 \geq b_i$.



Figuur 3.3 Schematische weergave situatie met ontgraving zeewaarts van ongestoord afslagpunt

De extra achteruitgang van het afslagpunt (d_2) is in deze basissituatie gelijk aan het ontgravingsvolume A_{ontgr} ($= h_i \cdot b_i$) gedeeld door de zogenaamde actieve hoogte van het afslagprofiel h_A (= verschil tussen het maximale en het minimale niveau van de afslagzone; zie Figuur 3.1):

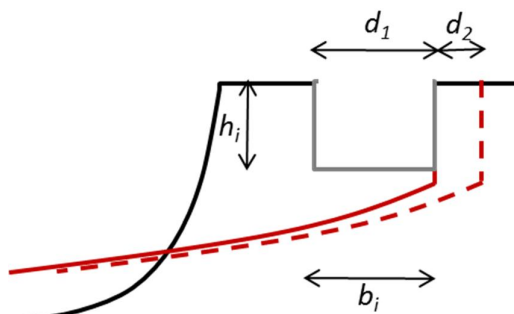
$$d_{2,basis} = \frac{A_{ontgr}}{h_A} \quad (3.1)$$

Voor deze basisrelatie geldt dat de extra achteruitgang van het afslagpunt in principe onafhankelijk is van de positie en de vorm van de ontgraving, mits deze zich dus *volledig* in de afslagzone bevindt. Benadrukt wordt dat dit een *basisrelatie* is, en dat er weldegelijk situaties zijn waarbij de hoeveelheid extra afslag afhankelijk is van de vorm en/of de positie van de ontgraving.

3.2.2 Overgangssituatie [1] >> Ontgraving nog net binnen afslagzone

Als de ontgraving in het duin dichterbij de positie van het ongestoorte afslagpunt is gepositioneerd, dan wordt het kwantificeren van de extra achteruitgang van het afslagpunt iets complexer. Zodra een deel van de ontgraving landwaarts van de ongestoorte afslagzone blijft, moet bekeken worden in hoeverre dit deel nog bijdraagt aan eventuele extra achteruitgang van het afslagpunt.

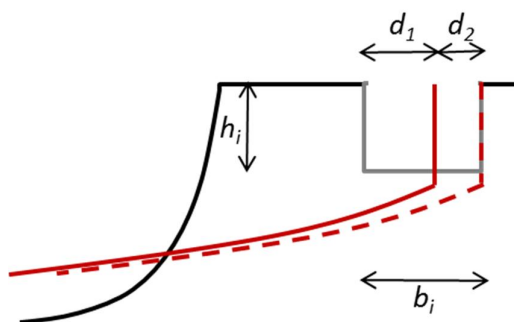
Om de beginnen is bekeken in welke situatie de eerder beschreven basisrelatie in ieder geval nog *wel* toepasbaar is. Dit is het geval als de ontgraving zich nog volledig zeewaarts van het afslagpunt bevindt, ofwel: $d_1 \geq b_i$. Een eventueel omslagpunt bevindt zich dus bij de situatie $d_1 = b_i$ (zie Figuur 3.4).



Figuur 3.4 Schematische weergave situatie met ontgraving net zeewaarts van ongestoord afslagpunt

Als de ontgraving verder landwaarts schuift ($d_1 < b_i$) dan is er allereerst een overgangssituatie te identificeren waarbij de landzijde van de ontgraving *landwaarts* ligt van het ongestoorde afslagpunt, maar dat de ontgraving nog wél volledig *zeewaarts* ligt van de positie die wordt beschreven met $d_{2,basis}$ (= positie van afslagpunt incl. ontgraving). Feitelijk ligt de ontgraving in dat geval namelijk nog steeds binnen de afslagzone, want de afslagzone is breder geworden ten opzichte van de onverstoorde situatie. Dit betekent dus ook dat de situatie in 'eigenlijk' geen 'omslagpunt' is, want d_2 blijft op eenzelfde wijze afhankelijk van het *totale* ontgravingsvolume.

Het uiterste (minimale) punt d_1 waarvoor de basisrelatie voor d_2 toepasbaar is, en waarbij het volledige ontgravingsvolume dus een bijdrage levert aan de extra achteruitgang, is het punt waarbij de landwaartse begrenzing van de ontgraving op dezelfde positie ligt als de positie van het afslagpunt dat wordt bepaald op basis van $d_{2,basis}$. Deze situatie is schematisch weergegeven in Figuur 3.5.



Figuur 3.5 Schematische weergave situatie met ontgraving deels landwaarts van ongestoord afslagpunt

In Figuur 3.5 is te zien dat de landzijde van de ontgraving en het uiteindelijke afslagpunt op dezelfde plek liggen. Een consequentie hiervan is dat de som van d_1 en d_2 hierbij gelijk is aan de breedte van de ontgraving (b_i):

$$d_1 + d_2 = b_i \quad (3.2)$$

Deze relatie is bruikbaar om de d_1 -waarde (= relatieve positie van de ontgraving) vast te stellen waarbij de basisrelatie van d_2 nog net geldig is. Deze zogenaamde grenswaarde voor

d_1 (= $d_{1,grens}$) is uiteindelijk alleen afhankelijk van de basiswaarde voor d_2 (= $d_{2,basis}$) en de breedte van de ontgraving b_i . De formulering van grenswaarde $d_{1,grens}$ is dan als volgt:

$$d_{1,grens} = b_i - d_{2,basis} \quad (3.3)$$

$$d_{1,grens} = b_i - \frac{A_{ontgr}}{h_A} \quad (3.4)$$

Deze definitie voor de grenswaarde is eenvoudig om te schrijven naar een relatie zonder ontgravingsvolume A_{ontgr} , maar met de parameters b_i (breedte) en h_i (diepte):

$$d_{1,grens} = b_i - \frac{(b_i \cdot h_i)}{h_A} = b_i \cdot \left(1 - \frac{h_i}{h_A}\right) \quad (3.5)$$

Omschrijving van de relatie leidt tot:

$$d_{1,grens} = \frac{h_A - h_i}{h_A} b_i \quad (3.6)$$

De belangrijkste conclusie van bovenstaande uitwerking is dat de mate van extra achteruitgang van het afslagpunt (d_2), voor situaties waarbij $d_1 \geq d_{1,grens}$ (positie van ontgraving is voldoende ver zeewaarts), kan worden vastgesteld op basis van het ontgravingsvolume A_{ontgr} en de actieve hoogte van de afslagzone h_A : zie vergelijking (3.1).

3.2.3 Overgangssituatie [2] >> *Ontgraving deels binnen afslagzone*

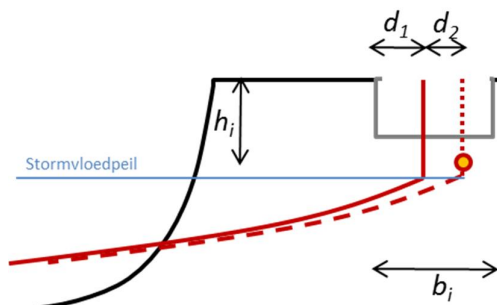
Bij d_1 -waarden die kleiner zijn dan $d_{1,grens}$ – ofwel de landzijde van de ontgraving ligt landwaarts van het afslagpunt dat wordt berekend met de basisrelatie voor d_2 – ontstaat een ander soort situatie. De mate van extra achteruitgang is in dat geval direct gerelateerd aan de positie van de ontgraving, en de formulering hiervan is bovendien afhankelijk van de diepte van de ontgraving.

Hieronder is een tweetal situaties uitgewerkt, waarbij de positie van het ongestoorde afslagpunt *in* de ontgraving ligt. Specifiek gaat het hierbij om situaties waarbij voor d_1 geldt dat: $0 \leq d_1 < d_{1,grens}$. De eerste uitwerking heeft betrekking op een situatie met een relatief ondiepe ontgraving, waarvan de onderkant van de ontgraving *ruim boven* het stormvloedpeil ligt. En voor de tweede uitwerking is specifiek gekeken naar een ontgraving waarvan de onderkant *onder* het stormvloedpeil ligt.

Onderkant van ontgraving ligt boven maximale waterstand (droog)

Bij ontgravingen waarvan de onderkant (ruim) boven het stormvloedpeil ligt, zoals schematisch weergegeven in Figuur 3.6, zal de d_2 -waarde afnemen naar mate de ontgraving verder landwaarts komt te liggen ($d_1 \downarrow$). Dit komt doordat er een steeds kleiner deel van de ontgraving zich in de actieve afslagzone bevindt, en het 'effectieve ontgravingsvolume' dus afneemt. Zodra de d_1 -waarde is gereduceerd tot nul, is er ook geen extra teruggang van het afslagpunt (d_2) meer.

Feitelijk ligt het uiteindelijke afslagpunt in de beschreven situatie altijd *in* de ontgraving. Dat is in dit geval mogelijk omdat het uitgangspunt is dat de onderkant van de ontgraving boven het stormvloedpeil ligt.



Figuur 3.6 Schematische weergave situatie met relatief ondiepe ontgraving nabij ongestoord afslagpunt

De relatie tussen d_1 en d_2 , voor het overgangsgebied waarbij $0 \leq d_1 < d_{1,\text{grens}}$, kan worden vastgesteld op basis van de informatie uit de eerdere uitwerkingen. Zoals eerder al opgemerkt zijn ter plaatse van de grenswaarde $d_{1,\text{grens}}$ zijn de volgende twee relaties geldig:

$$d_2 = \frac{A_{\text{ontgr}}}{h_A} = \frac{b_i \cdot h_i}{h_A} \quad (3.7)$$

$$b_i = d_1 + d_2 \quad (3.8)$$

Een eenvoudige invuloefening laat vervolgens zien dat de relatie tussen d_2 en d_1 , voor d_1 -waarden die kleiner zijn dan $d_{1,\text{grens}}$, er als volgt uit ziet:

$$d_2 = \frac{(d_1 + d_2) \cdot h_i}{h_A} \quad (3.9)$$

$$h_A d_2 = h_i d_1 + h_i d_2 \quad (3.10)$$

$$(h_A - h_i) \cdot d_2 = h_i d_1 \quad (3.11)$$

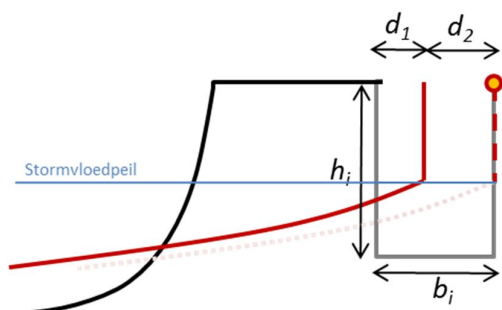
$$d_2 = \frac{h_i}{h_A - h_i} d_1 \quad (3.12)$$

In het overgangsgebied waarbij de zeezijde van de ontgraving dicht bij het onverstoorde afslagpunt ligt is met bovenstaande uitwerking een lineaire afhankelijkheid vastgesteld tussen d_1 en d_2 .

Onderkant van ontgraving ligt onder stormvloedpeil (nat)

Er ontstaat een hele andere situatie zodra de ontgraving dusdanig diep is dat er tijdens een storm water *in* het uitgegraven deel van het duin kan stromen. In dat geval kunnen stormgolven de achterzijde van de ontgraving bereiken, en springt ook het afslagpunt over naar de landzijde van ontgraving. Dit principe is weergegeven in Figuur 3.7.

Een situatie met een dergelijke diepe ontgraving is zeer vergelijkbaar met een kuststelsel met een dubbele duinregel. Zodra de eerste duinregel (duin landwaarts van ontgraving) doorbreekt, dan zal het uiteindelijke afslagpunt verschuiven naar de tweede duinregel.



Figuur 3.7 Schematische weergave situatie met relatief diepe ontgraving nabij ongestoord afslagpunt

De mate van extra achteruitgang (d_2) bij een ontgraving tot onder stormvloedpeil, waarvan de relatieve positie van de voorzijde (d_1) kleiner is dan de grenswaarde $d_{1,\text{grens}}$, kan met een eenvoudige relatie worden vastgesteld. In Figuur 3.7 is te zien dat de d_2 -waarde gelijk is aan het verschil tussen de breedte van de ontgraving (b_i) en de d_1 -waarde:

$$d_2 = b_i - d_1 \quad (3.13)$$

Opvallend is dat deze afhankelijkheid tussen d_1 en d_2 tegenovergesteld is aan de afhankelijkheid die geldig is voor een ondiepe ontgraving waarvan het minimale niveau (ruim) boven het stormvloedpeil ligt. In het geval van een ondiepe ontgraving neemt d_2 af voor een afnemende d_1 -waarde, terwijl in het geval van een diepe ontgraving een toename van d_2 is vastgesteld bij een afnemende d_1 -waarde. De maximale d_2 -waarde, voor ontgravingen die in de (onverstoorde) afslagzone liggen, is daarmee gelijk aan de breedte van de ontgraving.

Merk op dat bij de theoretische uitwerkingen, voor deze overgangssituatie met een ontgraving tot onder stormvloedpeil en een relatief kleine d_1 -waarde ($d_1 < d_{1,\text{grens}}$), voorsnog geen rekening is gehouden met eventuele *extra* afslag in het duin achter de ontgraving. In werkelijkheid zal het duin aan de landzijde van de ontgraving mogelijk verder instorten of eroderen doordat golven kunnen doordringen in de ontgraving. De fysische processen die hierbij een dominante rol spelen zijn te complex en te situatieafhankelijk om in een (fysisch te onderbouwen) basisregel te vatten. Specifieke numerieke modelberekeningen en/of fysische modelproeven zullen uitsluitend moeten geven of de beschreven rekenregel in dit geval voldoende robuust is.

Gecombineerde formulering voor d_2 (afhankelijk van relatief ontgravingsniveau)

In bovenstaande secties is een tweetal formules vastgesteld waarmee de mate van extra teruggang van het afslagpunt (d_2) kan worden berekend, voor situaties waarbij de zeezijde van de ontgraving relatief dicht bij het ongestoorde afslagpunt ligt ($0 < d_1 < d_{1,\text{grens}}$). Er is onderscheid gemaakt tussen twee uiterste situaties:

1. Een relatief ondiepe ontgraving, waarbij de onderkant van de ontgraving (ruim) boven het stormvloedpeil ligt;
2. Een relatief diepe ontgraving, waarbij de onderkant van de ontgraving onder het stormvloedpeil ligt.

In principe kan ook worden gesteld dat er onderscheid is gemaakt tussen een ‘droge’ en een ‘natte’ situatie. Waarbij met droog en nat bedoeld wordt dat een ontgraving wel of niet ‘vol’ loopt met water tijdens een storm (met als directe consequentie dat de afslagzone tot aan de landzijde van de ontgraving reikt).

In praktijk blijkt het vrij lastig om het daadwerkelijke omslagpunt tussen een ‘natte’ en een ‘droge’ situatie vast te stellen. Feitelijk is er ook geen sprake van een specifiek omslagpunt, maar eerder van een overgangsgebied tussen beide ‘uiterste’ situaties (volledig droog en volledig nat). Dit overgangsgebied is de reden dat voor de ‘droge situatie’ eerder al bewust is benoemd dat de onderkant van de ontgraving *ruim* boven het stormvloedpeil moet liggen. Als de ontgraving *net* boven het stormvloedpeil ligt, dan kan er alsnog veel water in de ontgraving komen door golfwerking en waterstandvariaties ten gevolge van zogenaamde lange golven.

Meer concreet kan worden gesteld dat de ondergrens van het overgangsgebied gelijk is aan het stormvloedpeil, omdat dit waterniveau tijdens een storm *minimaal* bereikt wordt. De bovengrens van het overgangsgebied is vervolgens gerelateerd aan het waterniveau dat, *maximaal* bereikt zal worden tijdens een storm. Dit niveau is per definitie hoger dan het stormvloedpeil.

Om bovengenoemde overgang tussen een volledig natte en een volledig droge ontgraving te verwerken in de uiteindelijke rekenregel voor de bepaling van d_2 , moeten twee extra parameters worden geïntroduceerd:

1. Het relatieve niveau van de onderkant van de ontgraving ten opzichte van het stormvloedpeil (= h_{rest} ; resthoogte);
2. Het (minimale) relatieve niveau waarbij verondersteld kan worden dat de ontgraving droog blijft (= $h_{rest,crit}$; kritische resthoogte).

De definitie van h_{rest} is ter illustratie ook weergegeven in Figuur 3.1.

Ten behoeve van de rekenregel voor d_2 is vast te stellen dat het overgangsgebied tussen ‘droog’ en ‘nat’ direct afhankelijk is van de parameter h_{rest} , en dat het specifieke interessegebied ligt in de range $0 < h_{rest} < h_{rest,crit}$. Als $h_{rest} \leq 0$ dan is er dus geen ‘resthoogte’ (ofwel de onderkant van de ontgraving ligt op of onder het stormvloedpeil) en is de rekenregel voor de diepe ontgraving van toepassing. Als $h_{rest} \geq h_{rest,crit}$ dan is er ruim voldoende resthoogte (ofwel onderkant van de ontgraving ligt *ruim* boven stormvloedpeil) en is de rekenregel voor de ondiepe ontgraving van toepassing. Hieronder zijn (nogmaals) de rekenregels voor de twee uitersten weergegeven:

$$d_2 = \frac{h_i}{h_A - h_i} d_1 \quad \text{als } h_{rest} \geq h_{rest,crit} \quad (3.14)$$

$$d_2 = b_i - d_1 \quad \text{als } h_{rest} \leq 0$$

In het tussenliggende gebied is een overgang tussen beide rekenregels noodzakelijk. Aangezien in dit overgangsgebied nog te weinig bekend is over de fysische processen die invloed hebben op de extra teruggang van de afslaglijn, is voornamelijk de aanname gedaan dat een gelijkmatige (lineaire) overgang tussen beide rekenregels van toepassing is, afhankelijk van de resthoogte h_{rest} . Ook hier geldt dat numerieke modelberekeningen en/of fysische modelproeven uitsluitend zullen moeten geven in hoeverre deze aanname correct is.

De lineaire overgang tussen beide rekenregels is mogelijk gemaakt door op beide formules een schalingsfactor (f_s) toe te passen waarin de (lineaire) afhankelijkheid van h_{rest} is verwerkt:

$$f_s = \frac{h_{rest}}{h_{rest,crit}} \quad (3.15)$$

Opgemerkt wordt dat deze schalingsfactor alleen van toepassing is voor waarden van h_{rest} tussen 0 en $h_{rest,crit}$. Dit betekent dat schalingsfactor f_s begrensd is tussen de waarden 0 en 1. In formulevorm:

$$f_s = \max \left(0 ; \min \left(1 ; \frac{h_{rest}}{h_{rest,crit}} \right) \right) \quad (3.16)$$

De samengestelde rekenregel voor d_2 (in de range $d_1 < d_{1,grens}$) ziet er na inpassing van de schalingsfactor dan als volgt uit:

$$d_2 = (1 - f_s) \cdot (b_i - d_1) + f_s \cdot \frac{h_i}{h_A - h_i} d_1 \quad (3.17)$$

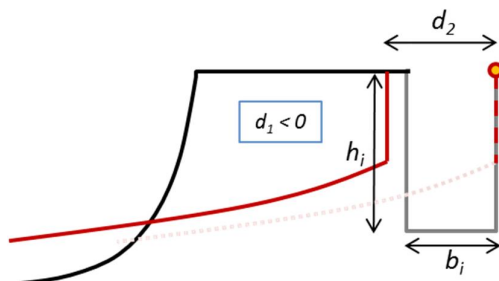
Onder de restrictie dat f_s tussen 0 en 1 ligt (ofwel: h_{rest} tussen 0 en $h_{rest,crit}$), kan de formulering voor d_2 ook als volgt worden gepresenteerd:

$$d_2 = \left(1 - \frac{h_{rest}}{h_{rest,crit}} \right) \cdot (b_i - d_1) + \left(\frac{h_{rest}}{h_{rest,crit}} \right) \cdot \frac{h_i}{h_A - h_i} d_1 \quad (3.18)$$

Deze formulering voor d_2 is geldig in het geval dat $d_1 < d_{1,grens}$, waarbij de voorzijde van de ontgraving dus relatief dicht in de buurt van het ongestoorde afslagpunt ligt.

3.2.4 Situatie met ontgraving landwaarts van ongestoorde afslagzone

In de vorige (sub-)secties zijn formuleringen afgeleid om de mate van extra achteruitgang van het afslagpunt (d_2) ten gevolge van een ontgraving in het duin te kunnen kwantificeren, als functie van enkele karakteristieke parameters die betrekking hebben op de grootte en de (relatieve) positie van de ontgraving. Deze formuleringen zijn vooralsnog enkel toegespitst op ontgravingen die zich (geheel of deels) in de ongestoorde afslagzone bevinden, en waarbij de d_1 -waarde dus positief is ($d_1 \geq 0$). Hieronder is als aanvulling ook kort aandacht besteed aan de situatie waarbij de ontgraving *net landwaarts* van de ongestoorde afslagzone ligt (zie Figuur 3.8).



Figuur 3.8 Schematische weergave situatie met relatief diepe ontgraving achter ongestoord afslagpunt

Een situatie met een ontgraving landwaarts van de ongestoorde afslagzone lijkt op het eerste gezicht niet relevant in het kader van vaststelling van een rekenregel voor d_2 . Toch heeft een ontgraving op een locatie *net* buiten de afslagzone weldegelijk invloed op het afslagproces. Een zeer smalle resterende duinregel aan de zeezijde van de ontgraving (zoals te zien in Figuur 3.8) kan tijdens een storm namelijk niet stabiel overeind blijven staan, want deze stort in door toedoen van golfwerking. In dat geval kan er (bij een diepe ontgraving) alsnog water in de ontgraving stromen en verschuift het afslagpunt uiteindelijk naar de landzijde van de ontgraving.

Op eenzelfde manier als voor positieve d_1 -waarden geldt ook hier dat er een onderscheid bestaat tussen diepe en ondiepe ontgravingen. Bij een ondiepe ontgraving zal er uiteraard geen extra achteruitgang van het afslagpunt zijn als de ontgraving landwaarts van de ongestoord afslagzone ligt. Voor negatieve d_1 -waarden geldt daarom ook dezelfde overgang van een 'natte' naar een 'droge' situatie, waardoor er feitelijk niets verandert aan de rekenregels; behalve dat deze in principe ook toepasbaar zijn voor (beperkt) negatieve waarden voor d_1 .

De minimale (negatieve) d_1 -waarde, $d_{1,\min}$, kan als volgt worden gedefinieerd:

$$d_{1,\min} = -(1 - f_s) \Delta \quad (3.19)$$

waarbij schalingsfactor f_s gerelateerd is aan de diepte van de ontgraving, en Δ de minimale afstand representeert dat relatief diepe ontgravingen achter de ongestoorde afslagzone moeten liggen om *geen* effect te hebben op de mate van afslag.

De waarde voor Δ , waarbij de samengestelde regelregel (3.17) nog geldig is, is zonder verdere inhoudelijke onderbouwing niet concreet vast te stellen.

Het vaststellen van een negatieve d_1 -waarde is echter *alleen* relevant als er daadwerkelijk kans is dat een resterend duinprofiel aan de zeezijde van de betreffende ontgraving bezwijkt. In dit specifieke geval met niet-waterkerende objecten kan daar geen sprake van zijn, omdat als uitgangspunt is opgenomen dat niet-waterkerende objecten (t.b.v. Spoor 1) als ontgraving geschematiseerd worden, als deze (kunnen) *bezwijken ten gevolge van golfaanval*. Zolang een NWO landwaarts van de afslaglijn ligt, wordt deze niet belast door golven en is er geen reden om aan te nemen dat de constructie bezwaken is (en daarmee als ontgraving beschouwd kan worden). Met andere woorden, negatieve d_1 -waarden zullen niet resulteren in extra achteruitgang van de afslaglijn (ofwel: $d_2 = 0$, voor $d_1 < 0$).

Bovenstaand voorstel kan als volgt worden samengevat: $\Delta = 0$ en $d_{1,\min} = 0$.

3.2.5 Samenvatting

Op basis van de theoretische uitwerkingen ten behoeve van de Spoor 1-benadering is te concluderen dat de extra teruggang van het afslagpunt sterk afhankelijk is van de positie, breedte en diepte van een ontgraving. Met betrekking tot de positie van de ontgraving zijn daarbij drie karakteristieke situaties geïdentificeerd. Wat betreft de ontgravingsdiepte zijn er twee uiterste situaties vastgesteld.

In zijn totaliteit ziet de rekenregel voor de extra teruggang d_2 er, voor Spoor 1, als volgt uit:

$$\begin{aligned}
 d_2 &= 0 && \text{als } d_1 < d_{1,\min} \\
 d_2 &= (1 - f_s) \cdot (b_i - d_1) + f_s \cdot \frac{h_i}{h_A - h_i} d_1 && \text{als } d_{1,\min} \leq d_1 \leq d_{1,\text{grens}} \\
 d_2 &= \frac{A_{\text{ontgr}}}{h_A} = \frac{b_i \cdot h_i}{h_A} && \text{als } d_1 > d_{1,\text{grens}}
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

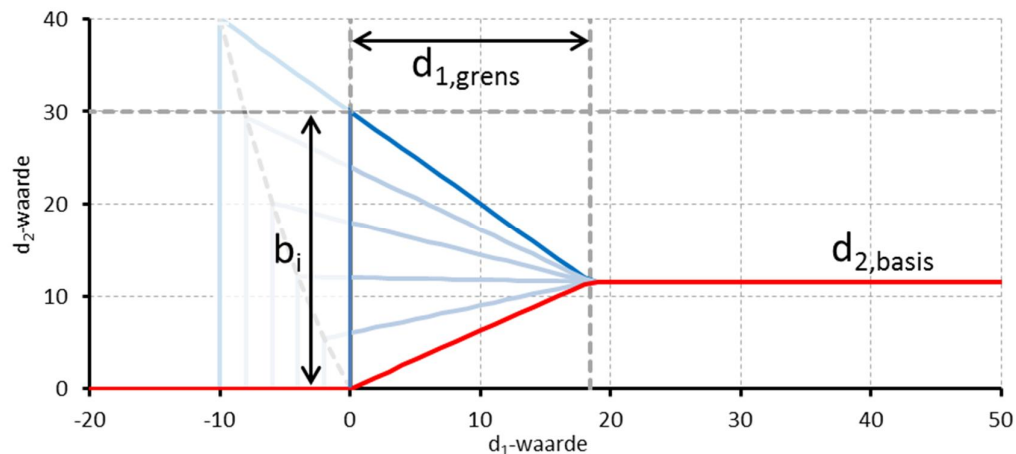
waarbij:

$$\begin{aligned}
 f_s &= \max \left(0 ; \min \left(1 ; \frac{h_{\text{rest}}}{h_{\text{rest,crit}}} \right) \right) \\
 d_{1,\text{grens}} &= \frac{h_A - h_i}{h_A} b_i \\
 d_{1,\min} &= 0
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

Voor de nieuw gedefinieerde 'kritische resthoogte' de volgende getalwaarde voorgesteld: $h_{\text{rest,crit}} = 2.5$ m. Deze getalwaarde zijn als vanzelfsprekend alleen geldig voor situaties op 'werkelijke' schaal.

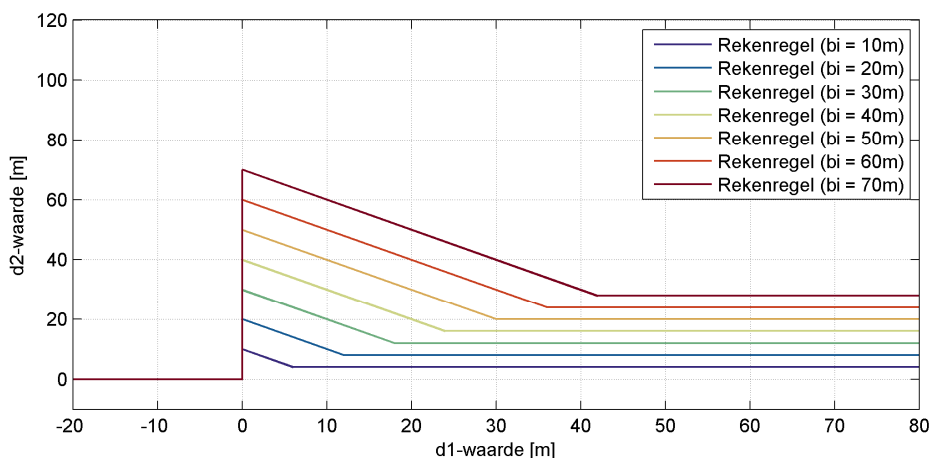
3.2.6 Voorbeeld

Als voorbeeld is de rekenregel voor Spoor 1 grafisch weergegeven in Figuur 3.9. Het figuur laat de relatie zien tussen de positie van de ontgraving (d_1) en de mate van extra teruggang van het afslagpunt (d_2). De rode lijn geeft de relatie weer voor een ontgraving die ruim boven het stormvloedpeil ligt ('droge situatie'), en de donkerblauwe lijn geeft de relatie weer voor exact dezelfde ontgraving maar dan voor een relatief hoog stormvloedpeil (zodat de onderkant van de ontgraving onder stormvloedpeil ligt). De lichtblauwe lijnen geven het verloop *tussen* beide relaties aan voor verschillende tussenliggende stormvloedpeilen.

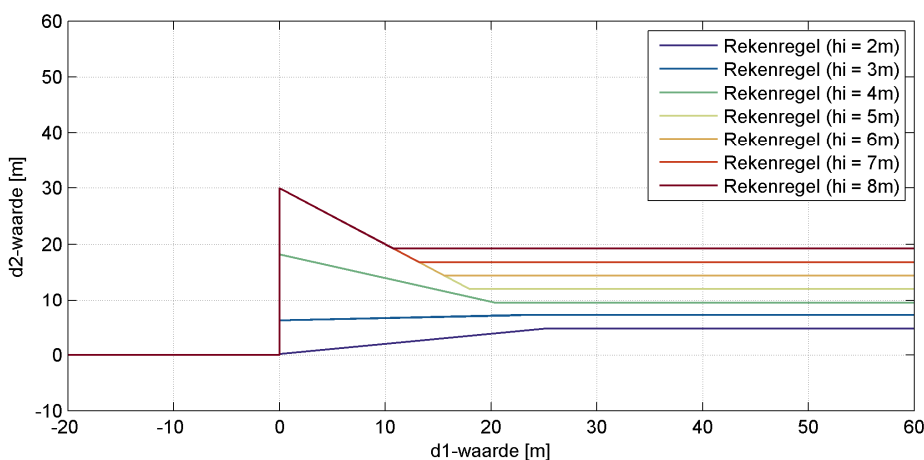


Figuur 3.9 Voorbeeld van de relatie tussen de d_2 -waarde en de d_1 -waarde voor Spoor 1

Het voorbeeld in Figuur 3.9 heeft betrekking op een ontgraving met een breedte b_i van 30 m en een ontgravingsdiepte h_i van 5 m. Het ontgravingsvolume A_{ontgr} is dus $150 \text{ m}^3/\text{m}^1$. Uitgaande van een duin met een topniveau op NAP +10 m, en een actieve hoogte h_A van 13 m, wordt met de voorgeschreven rekenregel een extra teruggang van het afslagpunt berekend van $150/13 = 11,5 \text{ m}$, indien de ontgraving grotendeels zeewaarts van het ongestoord afslagpunt ligt. In het figuur is deze situatie, die resulteert in 11,5 m extra achteruitgang, te herkennen aan de horizontale rode lijn voor d_1 -waarden die groter zijn dan de grenswaarde $d_{1,grens}$. Deze grenswaarde ligt op $((13-4)/13) \times 30 = 18,5 \text{ m}$ afstand van het ongestoorde afslagpunt.



Figuur 3.10 Voorbeeld van relatie tussen d_2 en d_1 voor verschillende ontgravingsbreedten en een constante ontgravingsdiepte (Spoor 1)



Figuur 3.11 Voorbeeld van relatie tussen d_2 en d_1 voor verschillende ontgravingsdiepten en een constante ontgravingsbreedte (Spoor 1)

Voor een verder landwaarts gelegen ontgraving geldt dat de d_2 -waarde afhankelijk wordt van de relatieve positie d_1 . Bij een stormvloedpeil op het niveau NAP +5 m zal de d_2 -waarde op de donkerblauwe lijn liggen. Dit komt omdat de resthoogte h_{rest} in deze situatie gelijk is aan $(10-5)-5 = 0 \text{ m}$; het ontgravingsniveau (vijf meter onder de duintop) is hier namelijk gelijk aan het stormvloedpeil. Als de zeezijde van de ontgraving vervolgens bijvoorbeeld op dezelfde

positie ligt als het ongestoorde afslagpunt, dan kan een extra teruggang verwacht worden die net zo groot is als de breedte van de ontgraving: 30 m.

Merk op dat de relatie die is ingetekend is in het voorbeeldfiguur voor elke vorm en/of grootte van een ontgraving verschillend is. Zowel de breedte als de diepte van de ontgraving heeft invloed op deze relatie, waarbij bijvoorbeeld de positie van het knikpunt bij $d_{1,\text{grens}}$ en het niveau van $d_{2,\text{basis}}$ veranderen.

In Figuur 3.10 en Figuur 3.11 zijn twee voorbeelden weergegeven waaruit blijkt hoe de relatie tussen d_2 en d_1 verandert bij verschillende ontgravingsbreedtes en bij verschillende ontgravingsdieptes.

3.3 Analyse beschikbare metingen

De richtlijnen voor Spoor 1 zoals geformuleerd in paragraaf 3.2.5 zijn gevalideerd aan de hand van laboratoriumproeven die zijn uitgevoerd in de Deltagoot. Het betreft hierbij een basissituatie waarbij de afslaglijn achter het NWO komt te liggen en een situatie met afnemend effect waarbij de afslaglijn niet achter het NWO komt te liggen.

Basissituatie: afslaglijn achter het NWO

Voor deze situatie is een vergelijking gemaakt tussen de experimenten H4357.T03 [WL|Delft Hydraulics (2006A)] en H4357.T08 [WL|Delft Hydraulics (2006B). Van Gent *et al.* (2008)]. Deze experimenten zijn identiek met betrekking tot de hydraulische condities, de korreldiameter en het referentieprofiel, met uitzondering van een ontgraving in het afslagprofiel gedurende experiment T08.

Uitgaande van een ontgravingsvolume van $A_{\text{ontgr}} = 6 \text{ m}^3/\text{m}$ en een hoogte $h_A = 3 \text{ m}$ resulteert dit in een horizontale verplaatsing van het afslagprofiel met een afstand van $d_2 = 2 \text{ m}$.

In figuur B.1 worden de metingen van beide experimenten getoond na 6 uur golven in de Deltagoot. In de onderste grafiek van deze figuur zijn beide afslagprofielen samengevoegd. Bovendien is het afslagprofiel van experiment T03 weergegeven met een verschuiving over de berekende afstand d_2 . Het blijkt dat de profielen wat de vorm betreft nagenoeg overeenkomen. Ook is duidelijk dat de ontgraving leidt tot extra achteruitgang van het afslagpunt.

Situatie met afnemend effect: afslaglijn niet achter het NWO

Voor deze situatie is een vergelijking gemaakt tussen de experimenten H4357.T01 [WL|Delft Hydraulics (2006A)] en H4731.T14 [WL|Delft Hydraulics (2007)]. Deze experimenten zijn identiek met betrekking tot de hydraulische condities en de korreldiameter. In experiment H4731.T14 is de voorkant van het duin met 1,35 m ontgraven over een afstand van 14 meter. Als gevolg hiervan ligt de kruinhoogte tijdens het experiment slechts 0,35 m boven het stormvloedpeil.

Door de relatief diepe ontgraving tot vlak boven het stormvloedpeil is de waarde h_{rest} dusdanig klein dat de rekenformule resulteert in een d_2 -waarde die correspondeert met een afslagpunt ter plaatse van de achterzijde van de ontgraving. Opgemerkt moet worden dat het hier een *kleinschalige* fysische modelproef betreft, waardoor de waarde $h_{\text{rest,crit}}$ eigenlijk moet worden geschaald. In dit geval blijkt uit figuur B.2 duidelijk dat de rekenregel voor een 'natte situatie' van toepassing is, want het afslagpunt ligt ook daadwerkelijk achterin de ontgraving.

Opvallend in deze situatie is ook dat het afslagprofiel flauwer is dan in de ongestoorde situatie, en dat er depositie heeft plaatsgevonden tegen de landwaartse rand van de ontgraving. Deze verschillen worden veroorzaakt door golfoverslag op/over het duin, waardoor er (mogelijk) sprake is van een andere dominante afslagprocessen. Mogelijk is hier sprake van een overwash regime in plaats van een collision regime [Sallanger (2000)].

3.4 Analyse uitgevoerde berekeningen 1D

3.4.1 Inleiding

In navolging op de theoretische uitwerkingen om een relatief eenvoudige rekenregel af te leiden om het effect van een ontgraving in een duin te kunnen kwantificeren, is in deze sectie een vergelijking gemaakt tussen de rekenregel en een groot aantal resultaten van uitgevoerde numerieke modelberekeningen. Specifiek is gekeken naar (1D) situaties waarbij een NWO wordt gerepresenteerd als zijnde een 'gat' (ontgraving) in een duinprofiel. In het kader van de vergelijking zijn met drie verschillende rekenmodellen berekeningen uitgevoerd voor duinontgravingen met verschillende afmetingen en posities op het duin.

De drie gebruikte rekenmodellen zijn:

DUROS+	Het volumebalansmodel DUROS+ is onderdeel van het wettelijk toetsings-instrumentarium (VTV2006). Het model is alleen toepasbaar voor 'eenvoudige' (1D) dwarsprofielen.
DurosTA	DurosTA is een tijdsafhankelijk en proces-gebaseerd rekenmodel waarmee profielveranderingen kunnen worden gesimuleerd gedurende stormperiodes. In tegenstelling tot DUROS+, is DurosTA ook in staat om te rekenen met complexere dwarsprofielen en met niet-erodeerbare bodemlagen.
XBeach	Het meest recent ontwikkelde duinafslagmodel dat is beschouwd, is XBeach. Het model is, net als DurosTA, een proces-gebaseerd rekenmodel waarmee morfologische veranderingen tijdens stormcondities kunnen worden gesimuleerd. XBeach is in meerdere opzichten een geavanceerder model dan DurosTA, en is in staat om zowel (1D) profielberekeningen als ook 2DH berekeningen uit te voeren.

3.4.2 Aanpak

Om meer inzicht te krijgen in de effecten van duinontgravingen op de positie van de afslaglijn tijdens stormcondities, is een reeks modelberekeningen uitgevoerd met elk van de drie hierboven genoemde duinafslagmodellen. Deze uitwerkingen beperken zich tot 1D situaties met enkelvoudige ontgravingen in het duin. In totaal zijn er drie 'variabelen' beschouwd voor de definitie van de grootte en de positie van de duinontgraving:

- (1) minimale niveau van ontgraving,
- (2) positie zeezijde ontgraving, en
- (3) positie landzijde ontgraving.

Door de instellingen voor elk van deze parameters te variëren worden alle (realistische) combinaties van grootte en positie beschouwd, waarvoor het effect op de positie van de afslaglijn wordt berekend.

Voor een uitgebreidere beschrijving van de modelopzet en de hierbij gehanteerde uitgangspunten wordt verwezen naar Bijlage C. In het volgende zijn de belangrijkste resultaten van de verschillende berekeningen in beschouwing genomen.

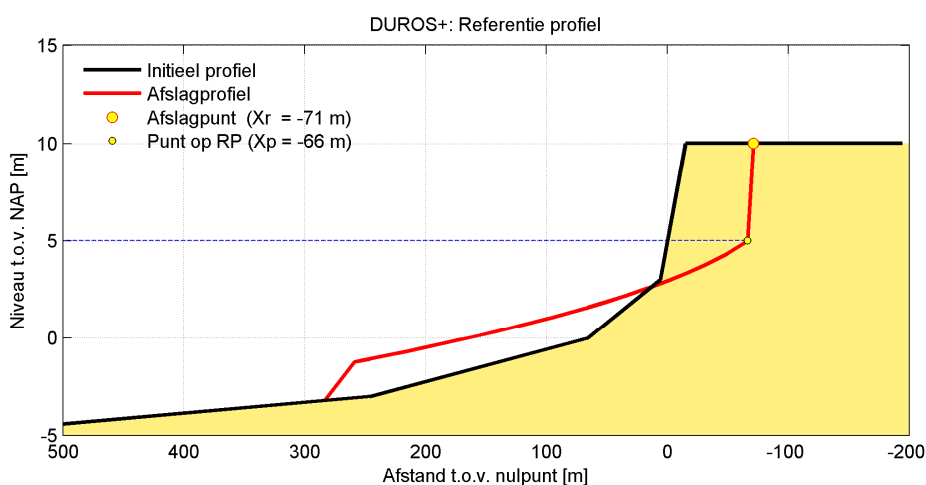
3.4.3 Resultaten balansmodel DUROS+

Het eerste model waarvan de resultaten van de duinafslagberekeningen zijn gepresenteerd, is DUROS+. Aangezien dit model volledig gebaseerd is op een eenvoudige volumebalansbenadering, is de verwachting dat de resultaten ervan vergelijkbaar zijn met die van de rekenregel. Allereerst is gekeken naar het mate van afslag dat wordt berekend voor een ongestoord duin *zonder* ontgraving, en daarna zijn verschillende situaties *met* ontgraving beschouwd. Tot slot is een gecombineerd resultaat gepresenteerd van alle uitgevoerde berekeningen, op basis waarvan een vergelijking met de rekenregel gemaakt kan worden.

Resultaat van berekening voor referentiesituatie zonder ontgraving

Figuur 3.12 laat het resultaat zien van de basisberekening voor het originele referentieprofiel *zonder* ontgraving. In het figuur is het initiële profiel, het basis afslagprofiel (zonder toeslagen) en de positie van het maatgevend afslagpunt weergegeven. Het figuur laat zien dat het afslagpunt voor het onverstoord duinprofiel is gelegen op $x = -71$ m (ten opzichte van de initiële NAP +5 m doorsnijding).

Bij alle DUROS+ berekeningen voor situaties *met* ontgraving is deze positie van het afslagpunt als referentiepunt gebruikt. Zowel de positie van de zeezijde van de ontgraving, als de positie van het (door de ontgraving beïnvloede) afslagpunt, kan daarbij worden omgerekend naar een afstand ten opzichte van het ongestoorde afslagpunt. Dit resulteert respectievelijk in de eerder gedefinieerde d_1 - en d_2 -waarden.



Figuur 3.12 Resultaat duinafslagberekening met DUROS+, voor het referentieprofiel

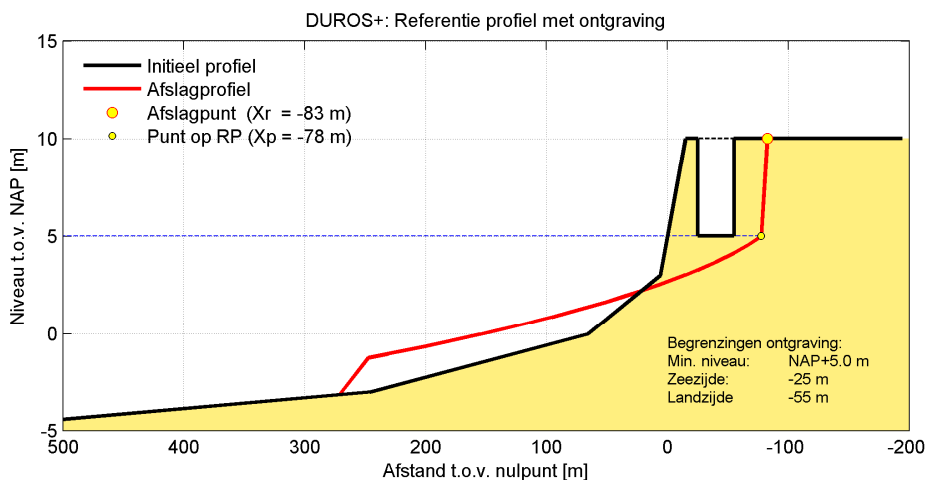
Resultaten van berekeningen voor verschillende situaties met ontgraving

Aanvullend op het resultaat voor de ongestoord referentiesituatie zijn hieronder enkele voorbeeldresultaten gepresenteerd voor situaties *met* ontgraving. In Figuur 3.13 is een rekenresultaat gepresenteerd voor een dwarsprofiel met een relatief smalle en diepe ontgraving, en in Figuur 3.14 is een vergelijkbaar resultaat te zien voor een relatief brede en ondiepe ontgraving. In elk van de figuren zijn de kenmerkende parameters van de ontgraving

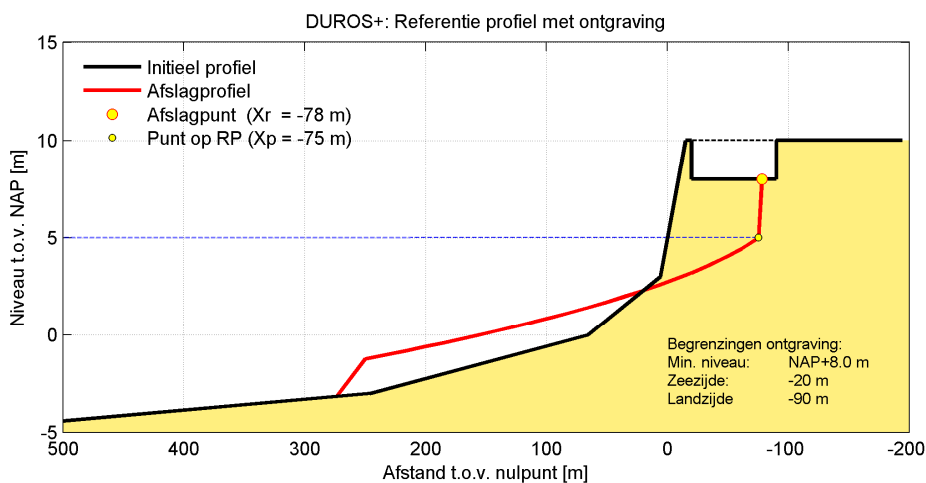
genoemd: [1] minimaal niveau van ontgraving, [2] positie van zeezijde ontgraving, en [3] positie van landzijde ontgraving.

In Figuur 3.13 is het effect te zien van een ontgraving van $150 \text{ m}^3/\text{m}$ (30 m breed en 5 m diep), die volledig binnen de (ongestoorde) afslagzone ligt. Het afslagpunt komt met een dergelijke ontgraving te liggen op de positie $x = -83 \text{ m}$. Het afslagpunt is dus, ten gevolge van de ontgraving, met 12 m verschoven ten opzichte van de referentiesituatie.

Op basis van de rekenregel wordt in deze specifieke situatie hetzelfde resultaat gevonden. De actieve hoogte h_A is hier ongeveer 13 m. De d_1 -waarde bedraagt $(-25 - -71) = 46 \text{ m}$, wat ruim groter is dan de grenswaarde $d_{1,\text{grens}}$ ($((13-4)/13 * 30 = 19 \text{ m})$), waardoor voor d_2 geldt: $d_2 = 150/13 = 12 \text{ m}$; en dat is hetzelfde resultaat als dat volgt uit de berekening met DUROS+.



Figuur 3.13 Resultaat duinafslagberekening met DUROS+, voor het referentieprofiel met ontgraving [1]



Figuur 3.14 Resultaat duinafslagberekening met DUROS+, voor het referentieprofiel met ontgraving [2]

Op eenzelfde manier kan ook naar het rekenresultaat in Figuur 3.14 gekeken worden. Het figuur laat een situatie zien met een ontgraving van 70 m breed en 2 m diep. Het berekende afslagpunt ligt *in* de ontgraving op de positie $x = -78 \text{ m}$; waarbij moet worden opgemerkt dat

het niveau van het duin ter plaatse lager ligt dan in de ongestoorde situatie. Om de mate van achteruitgang van het afslagprofiel te kwantificeren is daarom in dit geval gekeken naar de verschuiving van punt X_p ; de extra achteruitgang bedraagt in dit geval $(-75 - -69 =) 9$ m.

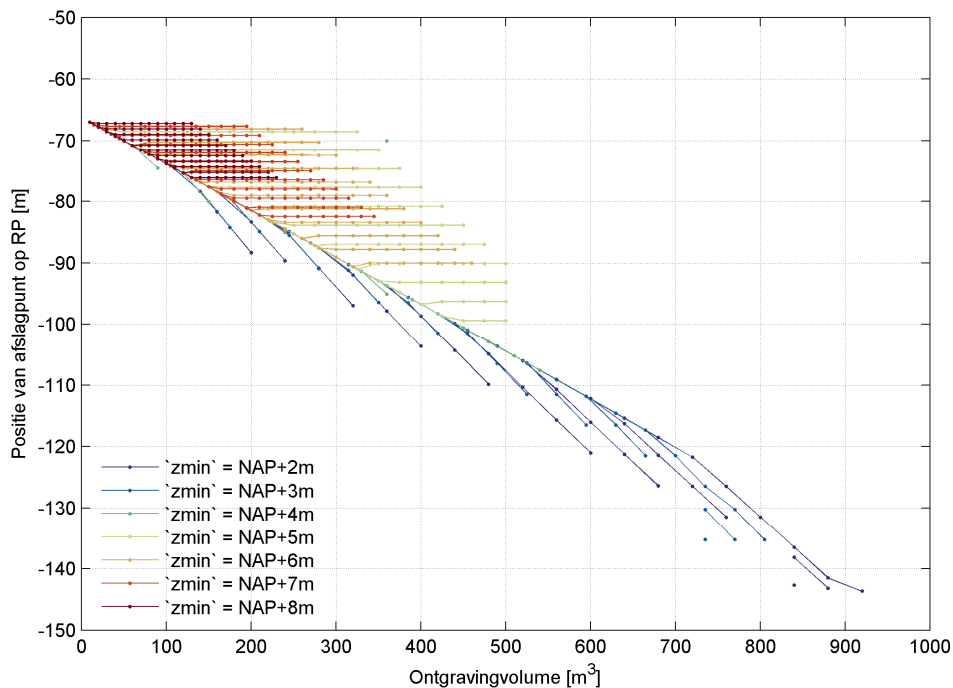
Toepassing van de rekenregel geeft het volgende resultaat: de d_1 -waarde is 51 m, de waarde voor $d_{1,grens}$ is 59 m. Dit betekent dat $d_1 < d_{1,grens}$, waardoor d_2 wordt bepaald op basis van de formulering voor relatief kleine d_1 waarden. Het is hierbij relevant of het een diepe of ondiepe ontgraving betreft; en dat wordt bepaald met de parameter h_{rest} . De resthoogte is hier $(5 - 2 =) 3$ m, en dat is hoger dan de kritische resthoogte van 2,5 m, waardoor geconcludeerd kan worden dat dit een 'ondiepe' ontgraving is. De berekende waarde voor d_2 is in dit geval $(2/(13-2) * 51 =) 9$ m. En dat is wederom hetzelfde resultaat als dat volgt uit de DUROS+ berekening.

Gecombineerd resultaat van alle uitgevoerde berekeningen

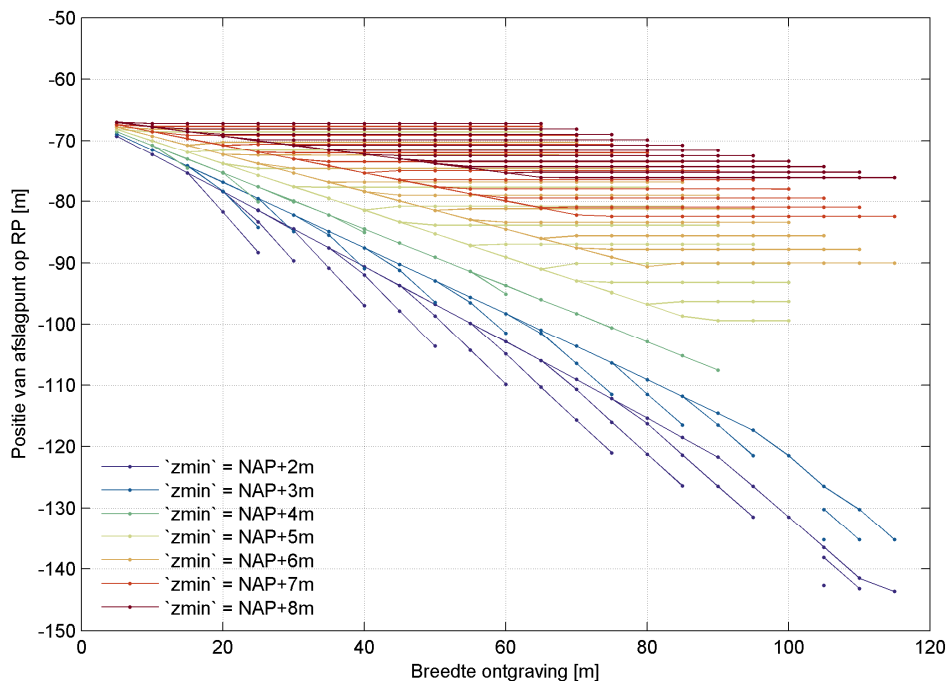
Aanvullend op de individuele resultaten is hier gekeken naar het totaalplaatje van alle rekenresultaten. Een gecombineerd overzicht van alle individuele resultaten is weergegeven in Figuur 3.15 en Figuur 3.16. De belangrijkste uitvoerparameter voor de modelberekeningen is de positie van het afslagpunt. In beide figuren is deze positie van het afslagpunt ingetekend als functie van enerzijds het totale ontgravingsvolume (Figuur 3.15), en anderzijds de breedte van de ontgraving (Figuur 3.16). De verschillende kleuren in de figuren representeren de verschillende ontgravingsniveaus (= ' z_{min} '), en de verschillende datapunten binnen één kleur behoren bij de verschillende posities (= ' x_{zee} ') van de ontgravingen in het duin.

Zowel in Figuur 3.15, als in Figuur 3.16, is duidelijk een lineaire afhankelijkheid te herkennen tussen de positie van het afslagpunt en het ontgravingsvolume / de ontgravingsbreedte. Voor relatief ondiepe ontgravingen is bovendien een omslagpunt te herkennen in de relaties, waarna de positie van het afslagpunt constant blijft. Dit is te verklaren doordat de mate van achteruitgang van het afslagpunt in principe toeneemt bij toenemende ontgravingsbreedte (omdat het ontgravingsvolume in dat geval toeneemt), maar op een zeker punt zal de ontgraving dusdanig breed zijn dat de landzijde ervan landwaarts van het afslagpunt ligt. In dat laatste geval zal de 'effectieve' breedte niet meer toenemen, en blijft de positie van het afslagpunt dus gelijk. De landzijde van de ontgraving heeft simpelweg geen invloed meer op de hoeveelheid afslag.

In beide figuren zijn, naast de hierboven beschreven afhankelijkheden, ook een aantal afwijkingen te herkennen. Deze afwijkingen betreffen vooral berekende afslagpunten die verder landwaarts liggen dan dat in eerste instantie verwacht zou worden op basis van de lineaire afhankelijkheid die te zien is in de figuren. Er kan in dit geval daadwerkelijk gesproken worden over 'afwijkingen' omdat het enkel rekenresultaten betreffen voor situaties met ontgravingen die een bodemniveau hebben dat onder het stormvloedpeil ligt. Het model DUROS+ is echter beperkt toepasbaar voor dergelijke situaties, omdat er feitelijk gekeken wordt naar een kuststelsel met twee losse duinregels. Zodra een 'duindoorkraak' plaatsvindt blijkt de vaststelling van een afslagpunt in de tweede duinregel (landwaarts van ontgraving) in bepaalde gevallen niet correct te verlopen (met dit type balansmodel). De afwijkingen zijn dus te relateren aan een modelbeperking.



Figuur 3.15 Gecombineerd resultaat van alle DUROS+ berekeningen: positie afslagpunt versus ontgravingsvolume



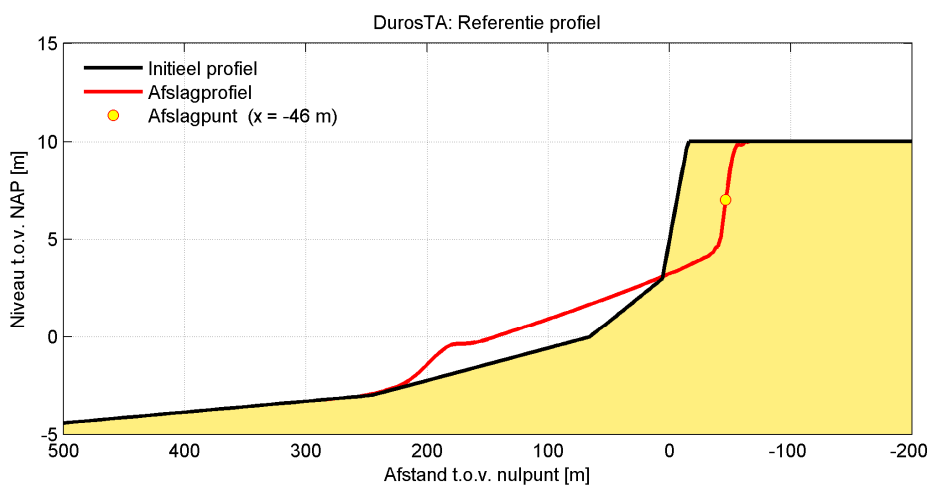
Figuur 3.16 Gecombineerd resultaat van alle DUROS+ berekeningen: positie afslagpunt versus ontgravingsbreedte

3.4.4 DurosTA

Het tweede model waarvan de resultaten van de duinafslagberekeningen zijn gepresenteerd, is DurosTA. Voor dit model zijn dezelfde figuren gepresenteerd als hierboven voor DUROS+, maar dan met resultaten van simulaties met het proces-gebaseerde model DurosTA. Allereerst is het resultaat van de basisberekening *zonder* ontgraving gepresenteerd, en daarna zijn enkele voorbeeldsituaties *met* ontgraving beschouwd. Tot slot is ook voor dit model een gecombineerd resultaat van alle uitgevoerde berekeningen beschouwd.

Resultaat van berekening voor referentiesituatie zonder ontgraving

Figuur 3.17 laat het resultaat zien van de basisberekening voor het originele referentieprofiel *zonder* ontgraving. In het figuur is het initiële kustprofiel ingetekend (zwarte lijn) en het resulterende afslagprofiel van de modelsimulatie. Merk op dat de definitie van het afslagpunt in dit specifieke geval afwijkt van de 'gebruikelijke' definities (zoals bijvoorbeeld het afslagpunt op maaiveldniveau), en dus ook iets afwijkt van de definitie die is gebruikt voor het model DUROS+. Voor de modelresultaten van DurosTA (en ook van XBeach) is gekozen voor een alternatieve definitie van het afslagpunt, waarbij feitelijk de horizontale positie van het afslagfront is gebruikt (op het niveau NAP +7 m). Voor de basisberekening ligt de positie van het (alternatieve) afslagpunt op $x = -46$ m.



Figuur 3.17 Resultaat duinafslagberekening met DurosTA, voor het referentieprofiel

De belangrijkste reden om voor DurosTA en XBeach een alternatieve definitie te hanteren voor de positie van het afslagpunt is dat het voor proces-gebaseerde modellen een veel robuustere oplossing blijkt te zijn (minder verstoringen) om het duinfront te beschouwen dan een 'toevallige' ligging van het afslagpunt op maaiveldniveau (=duintop). Kleine verstoringen in het afslagprofiel nabij de duintop, blijken (zeker bij situaties met ontgravingen) regelmatig te resulteren in afwijkende afslagpunten op het niveau van de duintop. De positie van het duinfront blijkt een stabielere maat om een vergelijking te kunnen maken tussen verschillende modelresultaten. Het voornaamste doel van dit onderzoek is immers om de *extra* teruggang van het afslagpunt te kwantificeren. De absolute positie van het afslagpunt is hierbij dus niet direct relevant; het gaat vooral om de relatieve verschillen. Het consequent toepassen van een alternatieve definitie voor het afslagpunt is in dit geval dus geen probleem.

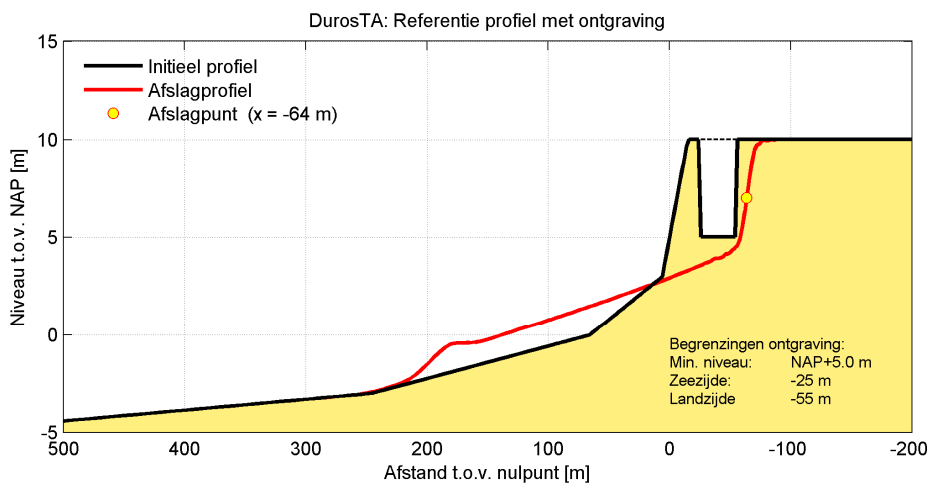
Merk op dat de berekende hoeveelheid duinerosie (en de positie van het afslagpunt) bij het model DurosTA afwijkt van de resultaten van het model DUROS+. Dergelijke verschillen

tussen de modellen zijn in deze studie echter niet in meer detail beschouwd. Het gaat in dit geval vooral om de relatieve verschillen tussen modelresultaten *per model*.

Resultaten van berekeningen voor verschillende situaties met ontgraving

Figuur 3.18 geeft een voorbeeldresultaat voor een dwarsprofiel *met* ontgraving. Het figuur laat het effect zien van een ontgraving van $150 \text{ m}^3/\text{m}$ (30 m breed en 5 m diep). Het (alternatieve) afslagpunt komt met een dergelijke ontgraving te liggen op de positie $x = -64 \text{ m}$. Het afslagpunt is daarmee, ten gevolge van de ontgraving, met 18 m verschoven ten opzichte van de referentiesituatie. De berekende verschuiving van 18 m is 6 m meer dan de teruggang die is berekend met DUROS+ en de teruggang die volgt uit de regelregel (beiden 12 m). Een precieze oorzaak van dit verschil is niet direct te benoemen, maar het lijkt erop dat voor deze specifieke situatie bepaalde erosieprocessen rondom de ontgraving onvoldoende worden ondervangen in de rekenregel.

Bij de analyse van het gecombineerde resultaat van *alle* modelberekeningen is in meer detail gekeken in hoeverre de met DurosTA berekende achteruitgang van het afslagpunt (t.g.v. een ontgraving) structureel groter is dan de resultaten van de rekenregel. Consequente verschillen tussen de modelresultaten en de rekenregel kunnen eventueel aanleiding zijn om de rekenregel te herzien.

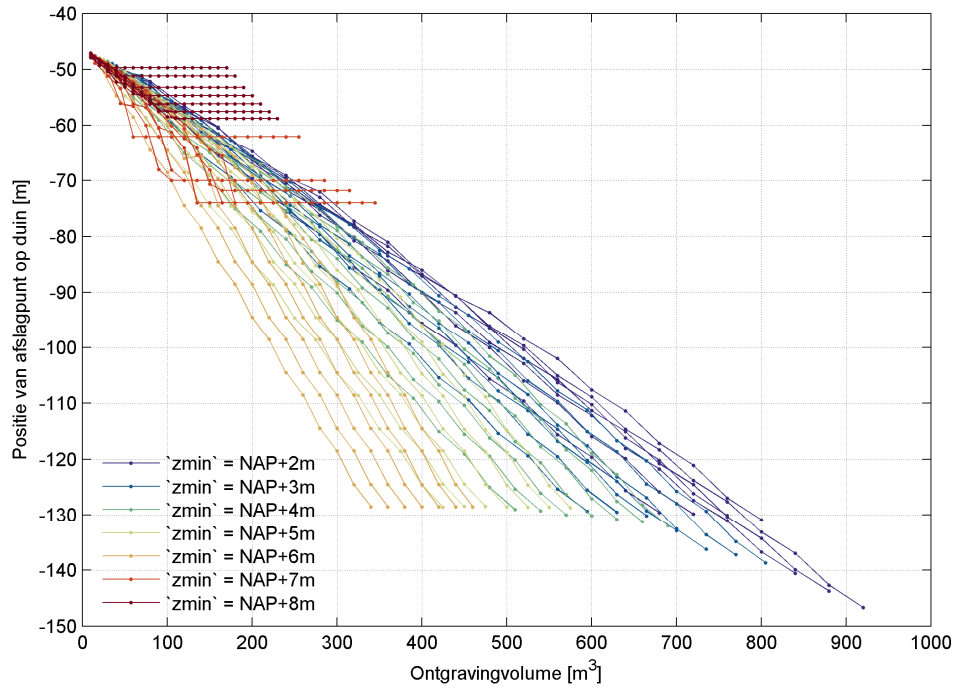


Figuur 3.18 Resultaat duinafslagberekening met DurosTA, voor het referentieprofiel met ontgraving [1]

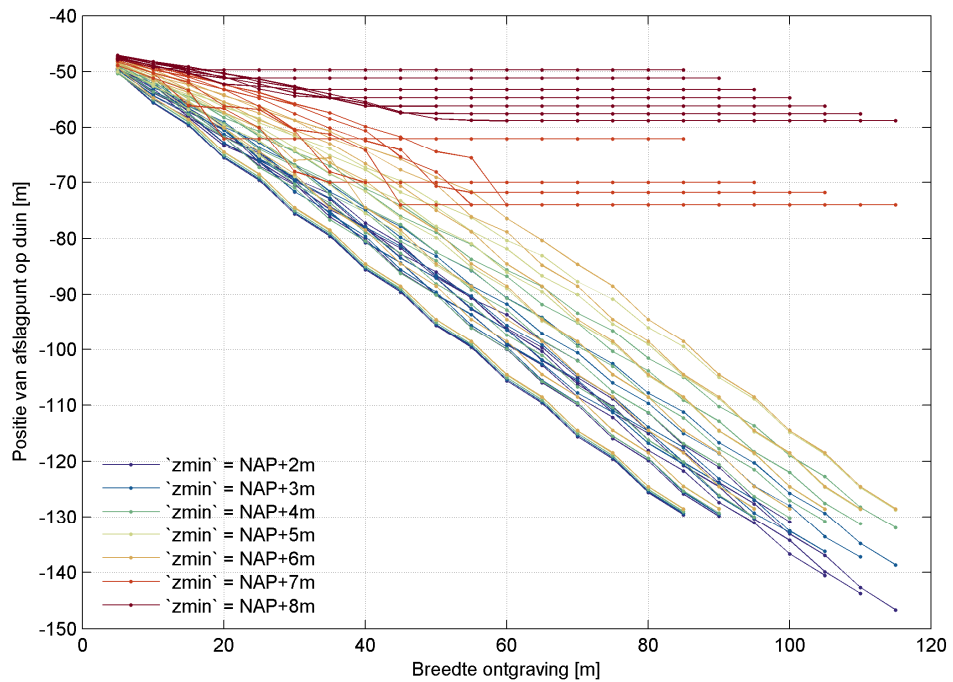
Gecombineerd resultaat van alle uitgevoerde berekeningen

In Figuur 3.19 en Figuur 3.20 zijn de resultaten gepresenteerd van alle uitgevoerde berekeningen met DurosTA. De figuren zijn qua invulling gelijk aan de figuren voor het model DUROS+, en geven de relaties weer tussen de berekende posities van het afslagpunt en de twee parameters A_{ontgr} (ontgravingsvolume) en b_i (ontgravingsbreedte).

In algemene zin laten de resultaten van DurosTA een vergelijkbaar beeld zien als de eerdere resultaten van DUROS+. Het voornaamste verschil zit in de 'hellingen' van de lineaire verbanden tussen de variabelen. De spreiding in de DurosTA resultaten voor beide relaties is bovendien aanmerkelijk groter dan bij de DUROS+ resultaten. Deze spreiding laat zien dat niet alleen de ontgravingsdiepte h_i en de ontgravingsbreedte b_i invloed hebben op de positie van het afslagpunt, maar dat ook de (kustdwarse) positie van de ontgraving in het duin een belangrijk effect heeft op de uiteindelijke locatie van het afslagpunt.



Figuur 3.19 Gecombineerd resultaat van alle DurosTA berekeningen: positie afslagpunt versus ontgravingsvolume



Figuur 3.20 Gecombineerd resultaat van alle DurosTA berekeningen: positie afslagpunt versus ontgravingbreedte

Uit beide figuren concluderen we ook dat de met DurosTA berekende afhankelijkheid tussen de achteruitgang van het afslagpunt en de ontgravingsdiepte iets complexer is dan dat volgt uit de DUROS+ berekeningen. Dit komt uiteraard omdat de DUROS+ berekeningen volledig zijn gebaseerd op een volumebalans, en daarmee in principe onafhankelijk zijn van de exacte profielvorm, terwijl de profielvorm in DurosTA direct invloed heeft op het golfhoogteverloop en de erosieprocessen bij het duin.

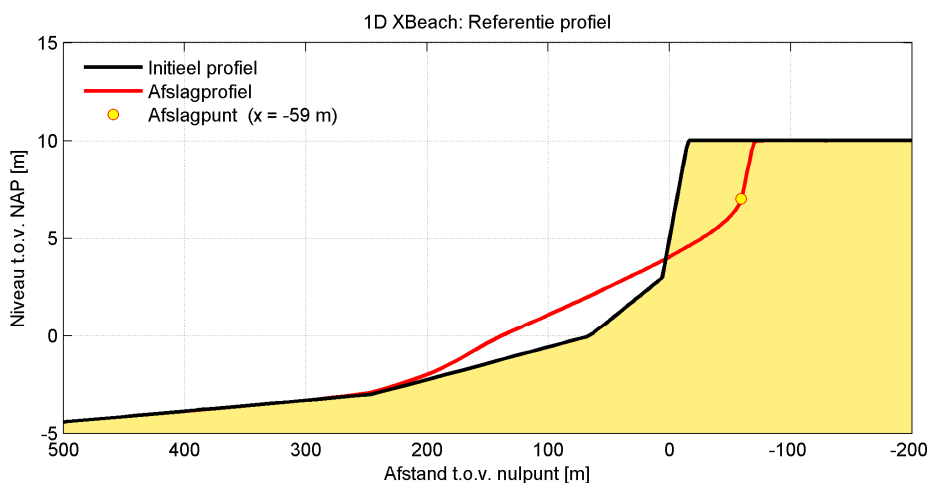
3.4.5 XBeach

Het laatste model dat is beschouwd voor de duinafslagberekeningen is XBeach. Wederom is gekozen om hetzelfde type figuren te presenteren als bij de vorige modellen: allereerst een figuur met het rekenresultaat voor de basissituatie *zonder* ontgraving, gevolgd door een karakteristiek voorbeeld van een situatie *met* ontgraving, en tot slot een gecombineerd resultaat van alle berekeningen.

Resultaat van berekening voor referentiesituatie zonder ontgraving

Figuur 3.21 laat zien dat het afslagpunt voor het onverstoorde duinprofiel is gelegen op de positie $x = -59$ m, waarbij wordt benadrukt dat hier (wederom) gewerkt is met de alternatieve definitie voor het afslagpunt die ook voor DurosTA is gebruikt. Met deze definitie wordt feitelijk de positie van het duinfront op het niveau NAP +7 m gebruikt als afslagpunt. Dit is een degelijke oplossing voor de verdere analyses in dit onderzoek omdat hier enkel de relatieve verschillen tussen berekende afslagpunten relevant zijn.

De met XBeach berekende positie van het (alternatieve) afslagpunt ligt verder landwaarts dan het punt dat is berekend met DurosTA. Ter vergelijking: DurosTA berekent voor dezelfde situatie een afslagpunt op de positie $x = -46$ m. Het verschil is daarmee 13 m, maar zoals eerder aangegeven hebben de onderlinge verschillen tussen de drie rekenmodellen geen directe invloed op de analyses in dit onderzoek, omdat *per model* is gekeken naar relatieve verschillen tussen verschillende rekenresultaten.

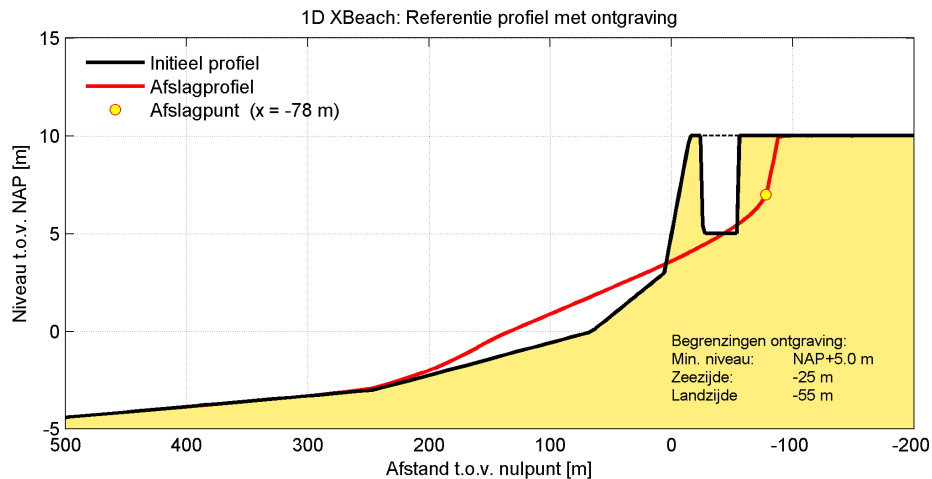


Figuur 3.21 Resultaat duinafslagberekening met 1D XBeach, voor het referentieprofiel

Resultaten van berekeningen voor verschillende situaties met ontgraving

In Figuur 3.22 is het met XBeach berekende effect te zien van een ontgraving van $150 \text{ m}^3/\text{m}$ (30 m breed en 5 m diep); de positie van het afslagpunt komt met deze ontgraving te liggen

op de positie $x = -78$ m. Het afslagpunt is dus 19 m verschoven ten opzichte van de referentiesituatie. Dit is ongeveer dezelfde teruggang als dat is berekend met het model DurosTA (18 m). Maar, XBeach en DurosTA berekenen dus allebei een *grotere* achteruitgang van het afslagpunt dan dat volgt uit de rekenregel (= 12 m).



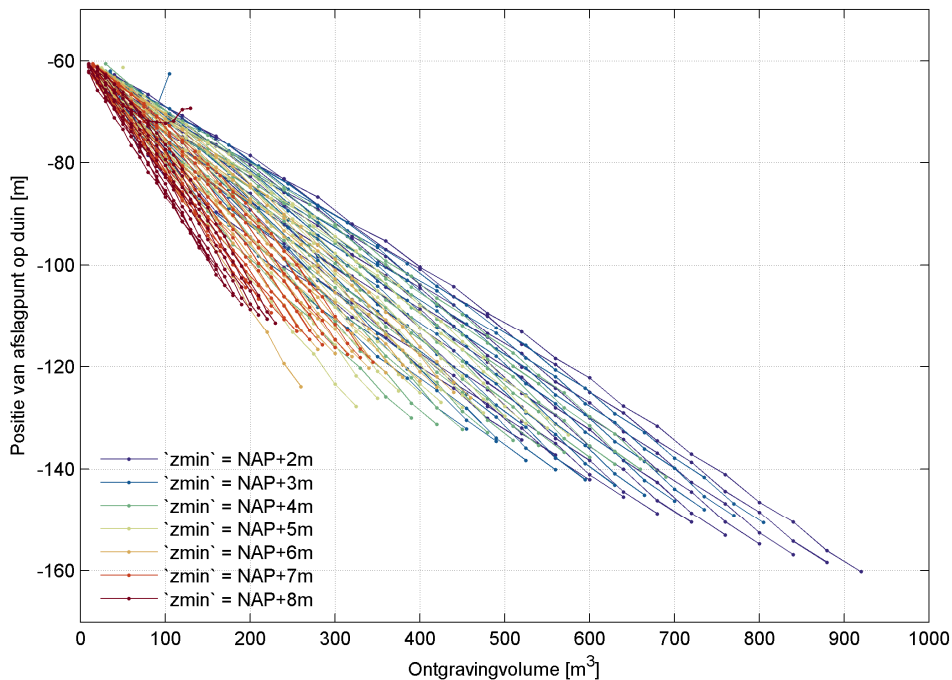
Figuur 3.22 Resultaat duinafslagberekening met 1D XBeach, voor het referentieprofiel met ontgraving [1]

Gecombineerd resultaat van alle uitgevoerde berekeningen

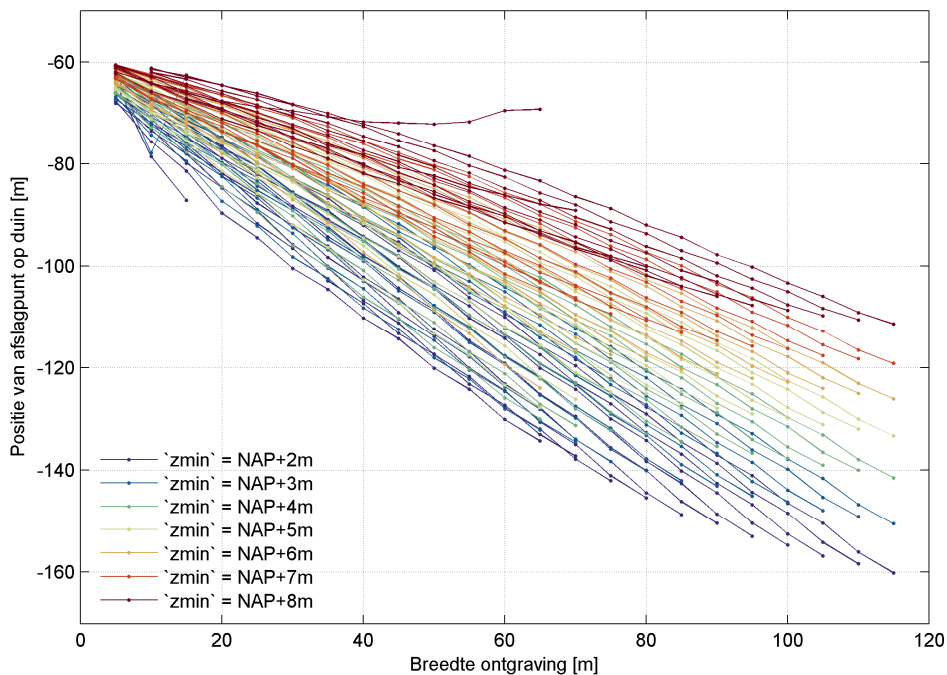
In Figuur 3.23 en Figuur 3.24 zijn de resultaten gepresenteerd van alle met XBeach uitgevoerde berekeningen. Het eerste figuur laat de afhankelijkheid zien tussen de positie van het afslagpunt en het totale ontgravingsvolume, en in het tweede figuur is de relatie tussen afslagpunt en ontgravingsbreedte weergegeven.

In algemene zin zijn de resultaten van de XBeach berekeningen vergelijkbaar met de resultaten van DurosTA. Voor beide modellen geldt dat de afhankelijkheid tussen de positie van het afslagpunt en de positie van de ontgraving veel groter is dan is vastgesteld op basis van de DUROS+ berekeningen. Het effect van de positie van de ontgraving is feitelijk te herkennen als zijnde de (verticale) spreiding van de datapunten, want voor een constante waarde van het ontgravingsvolume (= punt op x-as) en een constante waarde van de ontgravingsdiepte (= kleur in grafiek) is de breedte per definitie ook constant ($b_i = A_{\text{ontgr}}/h_i$), waardoor er één parameter over is die de variatie in afslagpositie kan verklaren: de positie van de ontgraving (x_{zee}).

Het belangrijkste verschil tussen de resultaten van XBeach en DurosTA is dat er bij de XBeach resultaten geen horizontale lijnen (constante positie van afslagpunt) bestaan voor toenemende ontgravingsbreedte (en -volume) bij de relatief ondiepe ontgravingen. In principe geldt dat de positie van het afslagpunt bij ondiepe ontgravingen niet meer afhankelijk is van de ontgravingsbreedte als de landzijde van de ontgraving ver genoeg landwaarts ligt (landwaarts van het afslagpunt). Het water kan de landzijde van de ontgraving in dat geval simpelweg niet bereiken. Bij diepere ontgravingen zal de positie van het afslagpunt juist per definitie bij de landzijde van de ontgraving liggen, omdat het water dan *in* de ontgraving kan stromen tijdens stormcondities.



Figuur 3.23 Gecombineerd resultaat van alle XBeach berekeningen: positie afslagpunt versus ontgravingvolume



Figuur 3.24 Gecombineerd resultaat van alle XBeach berekeningen: positie afslagpunt versus ontgravingbreedte

Er zijn in dit onderzoek blijkbaar geen situaties beschouwd waarvoor geldt dat (de landzijde van) de ontgraving “droog” blijft tijdens XBeach berekeningen. Dit suggereert dat zelfs ontgravingen met een bodemniveau op NAP +8 m dusdanig “nat” worden tijdens een XBeach simulatie, dat er erosie optreedt tot nabij de landzijde van de ontgraving. Het punt waarop de positie van de landzijde van de ontgraving geen invloed meer heeft op de positie van het met XBeach berekende afslagpunt, wordt simpelweg nog niet bereikt met het scala aan ontgravingen dat hier is beschouwd.

Bovenstaande betekent ook dat het kritische niveau waarop de omslag plaatsvindt tussen een volledige “droge” en een “natte” situatie *in* de ontgraving, vrij hoog ligt volgens het model XBeach. Bij het opstellen van de rekenregel is uitgegaan van een kritische resthoogte $h_{rest,crit}$ (= minimaal benodigde hoogteverschil tussen het stormvloedpeil en de onderkant van de ontgraving om de ontgraving “droog” te houden) van 2,5 m. De resultaten van XBeach suggereren dat dit niveau mogelijk iets hoger zou moeten liggen (>3 m). Voordat deze suggestie daadwerkelijk wordt overgenomen als advieshoogte voor de rekenregel moet echter eerst in meer detail onderzoek worden gedaan naar de berekende “lange golf – amplitudes” in het model XBeach. Er zijn nog te weinig validatie-cases ‘op werkelijke schaal’ beschikbaar, om met voldoende zekerheid te kunnen vaststellen of de berekende amplitudes van lange golven in XBeach werkelijk kunnen optreden, en of het effect ervan op de erosieprocessen in de hier beschouwde situaties realistisch is.

3.4.6 Analyse resultaten

In voorgaande secties zijn de resultaten gepresenteerd van de modelberekeningen die zijn uitgevoerd om het effect van ontgravingen in een duin (op de positie van het afslagpunt) te kwantificeren. Er is daarbij gebruikt gemaakt van een drietal rekenmodellen: DUROS+, DurosTA en XBeach. Voor elk van deze modellen zijn de resultaten in eerste instantie apart geanalyseerd en beschreven. In deze sectie wordt in meer detail een vergelijking gemaakt tussen de resultaten van de drie rekenmodellen en de rekenregel is afgeleid op basis van een theoretische uitwerking; zie vergelijking (3.20).

Om de modelresultaten te kunnen vergelijken met de rekenregel, zijn eerst de relevante parameters afgeleid voor alle situaties die zijn doorgerekend. Voor elk van de modelresultaten zijn de volgende parameters vastgesteld:

- d_1 >> afstand tussen voorzijde ontgraving en ongestoord afslagpunt
- d_2 >> afstand tussen afslagpunt en ongestoord afslagpunt (= extra teruggang)

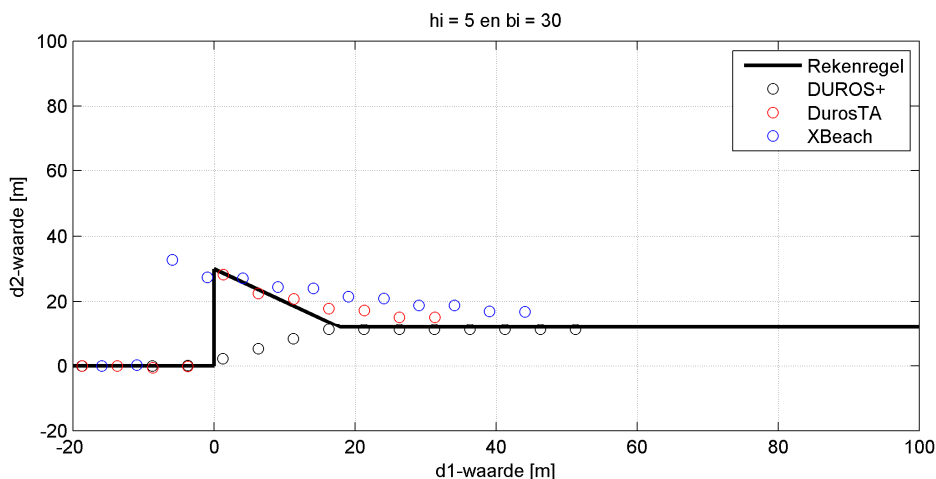
De resultaten van de modelberekeningen zijn vervolgens vergeleken met de rekenregel, waarbij de overige parameters die nodig zijn voor het invullen van de rekenregel (h_i , b_i , h_{rest} , h_A) direct volgen uit de karakteristieken van de beschouwde ontgraving.

Voor elke combinatie van ontgravingsbreedte en ontgravingsdiepte kan een apart figuur worden gemaakt waarin de relatie tussen d_2 en d_1 is weergegeven, op basis van de rekenregel enerzijds en de drie modelresultaten anderzijds. Gezien de grote hoeveelheid combinaties van breedte en diepte zijn in deze rapportage enkele karakteristieke voorbeelden uitgelicht. Op basis van deze voorbeelden is vervolgens vastgesteld in hoeverre de modelresultaten gelijkenissen vertonen met de afgeleide rekenregel.

In Figuur 3.25 zijn de resultaten ingetekend voor een situatie met een ontgraving van 5 m diep en 30 m breed. De dikke zwarte lijn geeft de relatie tussen d_2 en d_1 weer die volgt uit de rekenregel, en de gekleurde markers geven de (omgerekende) modelresultaten weer. De situatie met een ontgravingsdiepte van 5 m resulteert in een bodemniveau van de ontgraving op NAP +5 m, en dat is gelijk aan het niveau van het stormvloedpeil. De zogenaamde resthoogte is in dit geval dus gelijk aan 0 m, waardoor de rekenregel zich in het “natte regime” bevindt voor d_1 -waarden kleiner dan $d_{1,grens}$. Dit is duidelijk te zien aan de zwarte lijn, want d_2 neemt af voor toenemende d_1 ($d_2 = 30 - d_1$).

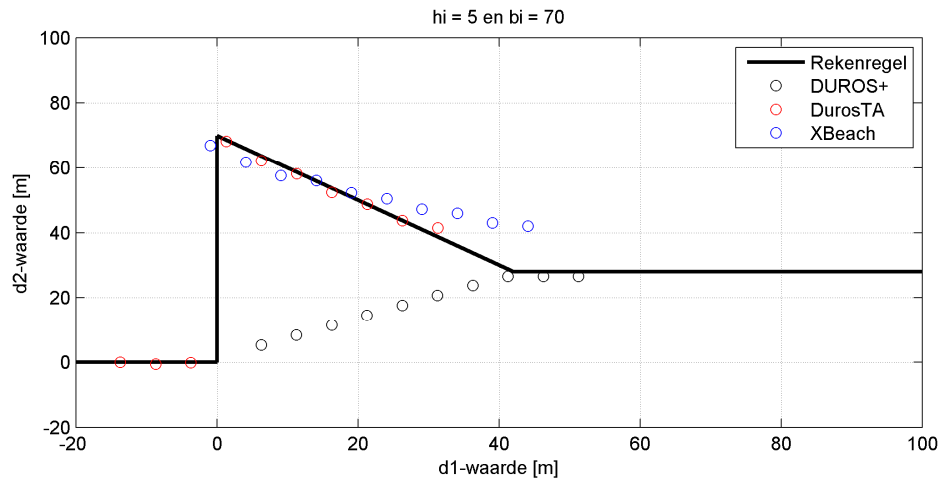
Opvallend in Figuur 3.25 is dat de resultaten van DUROS+ gelijk zijn aan de waarden volgens rekenregel, voor d_1 -waarden die groter zijn dan $d_{1,grens}$ (= 18 m). Voor $d_1 < 18$ m lopen de DUROS+ resultaten lineair af naar $d_2 = 0$, terwijl de rekenregel oploopt naar $d_2 = 30$ m (voor $d_1 = 0$ m). Dit verschil is eenvoudig te verklaren, omdat in DUROS+ een strikte scheidslijn bestaat tussen ‘nat’ en ‘droog’. Aangezien de onderkant van de ontgraving precies op het stormvloedpeil ligt, berekent het model afslagpunten *in* de ontgraving terwijl de rekenregel suggereert dat het afslagpunt aan landzijde van de ontgraving ligt.

De modellen XBeach en DurosTA laten, in tegenstelling tot DUROS+, wel een oplopende d_2 -waarde zien voor een afnemende d_1 -waarde ($d_1 < 18$ m). Rondom $d_1 = 0$ m komt de berekende teruggang van het afslagpunt (d_2) voor beide modellen goed overeen met de rekenregel. Rondom de grenswaarde $d_{1,grens}$ ($d_1 = 18$ m) liggen de modelresultaten echter wel boven de waarden die volgen uit de rekenregel. Het verschil bedraagt maximaal 10 m.

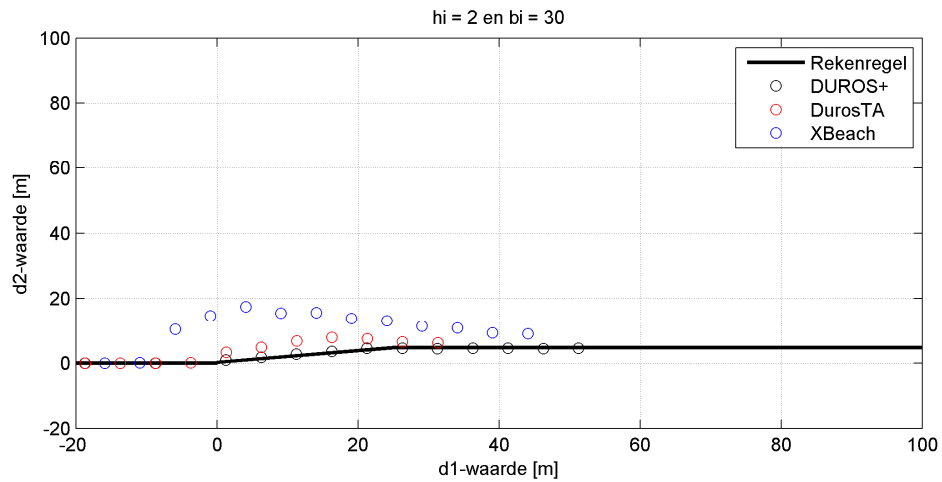


Figuur 3.25 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 5$ m en $b_i = 30$ m

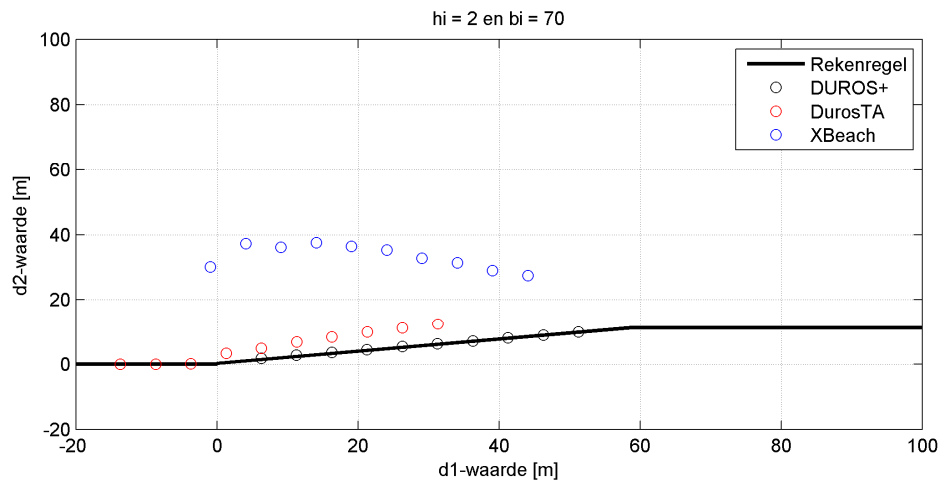
In Figuur 3.26 zijn de resultaten gepresenteerd voor een ontgraving met een breedte van 70 m en met dezelfde ontgravingsdiepte als in het vorige voorbeeld. Door de grotere breedte verschuift de grenswaarde $d_{1,grens}$ naar $d_1 = 42$ m, en is de maximaal haalbare d_2 -waarde ook groter. Vergelijkbaar met het vorige voorbeeld blijken de resultaten van de modellen DurosTA en XBeach netjes de rekenregel te volgen voor relatief kleine d_1 -waarden. Maar ook hier geldt dat de modellen een grotere achteruitgang voorspellen rondom de grenswaarde van d_1 . Het constante d_2 -niveau voor relatief grote waarden voor d_1 blijkt wederom overeenkomstig met de DUROS+ resultaten.



Figuur 3.26 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 5$ m en $b_i = 70$ m



Figuur 3.27 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 2$ m en $b_i = 30$ m



Figuur 3.28 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 2$ m en $b_i = 70$ m

Aanvullend op een “relatief diepe ontgraving” ($h_i = 5$ m) zijn in Figuur 3.27 en Figuur 3.28 ook de resultaten gepresenteerd voor een “relatief ondiepe ontgraving” ($h_i = 2$ m). Aangezien de resthoogte h_{rest} in dit geval groter is dan de kritische waarde van 2,5 m (namelijk: $h_{rest} = 3$ m) bevindt de rekenregel zich in het zogenaamde “droge regime”. Dit betekent dat de d_2 -waarden evenredig oploopt met d_1 , voor d_1 -waarden die kleiner zijn dan de grenswaarde.

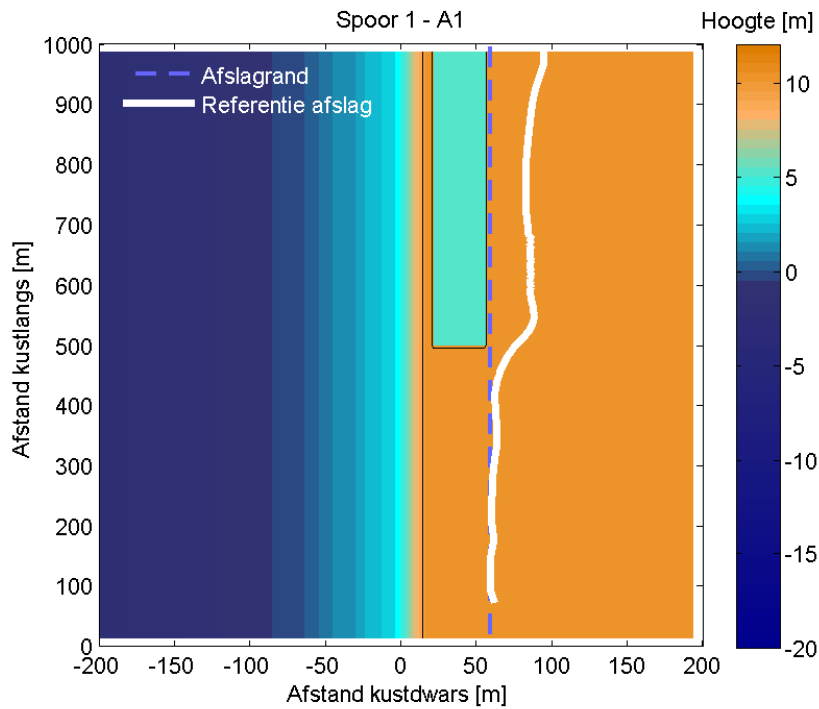
In beide figuren is te zien dat de rekenregel en de DUROS+ resultaten min of meer gelijk zijn aan elkaar, en dat ook DurosTA eenzelfde afhankelijkheid tussen d_2 en d_1 laat zien. De berekende waarden voor DurosTA liggen alleen consequent iets boven de rekenregel.

XBeach laat in tegenstelling tot de andere modellen wel een totaal andere relatie zien tussen de teruggang van het afslagpunt en de positie van de ontgraving. De berekende afhankelijkheid lijkt in dit geval ook sterk op de rekenresultaten voor het “natte regime”. Het resultaat is overigens alsnog eenvoudig te verklaren, want eerder is al opgemerkt dat ook ontgravingen met een diepte van 2 m (en dus een bodemniveau op NAP +8 m) tijdens stormsimulaties met XBeach ‘nat’ worden. Het afslagpunt ligt in dergelijke gevallen dus alsnog aan de landzijde van de ontgraving. Indien een grotere kritische resthoogte wordt gekozen in de rekenregel (bijv. 5 m i.p.v. 2,5 m) dan zal het resultaat van de rekenregel veel beter overeenkomen met de XBeach resultaten (maar weer in mindere mate met de resultaten van DurosTA!).

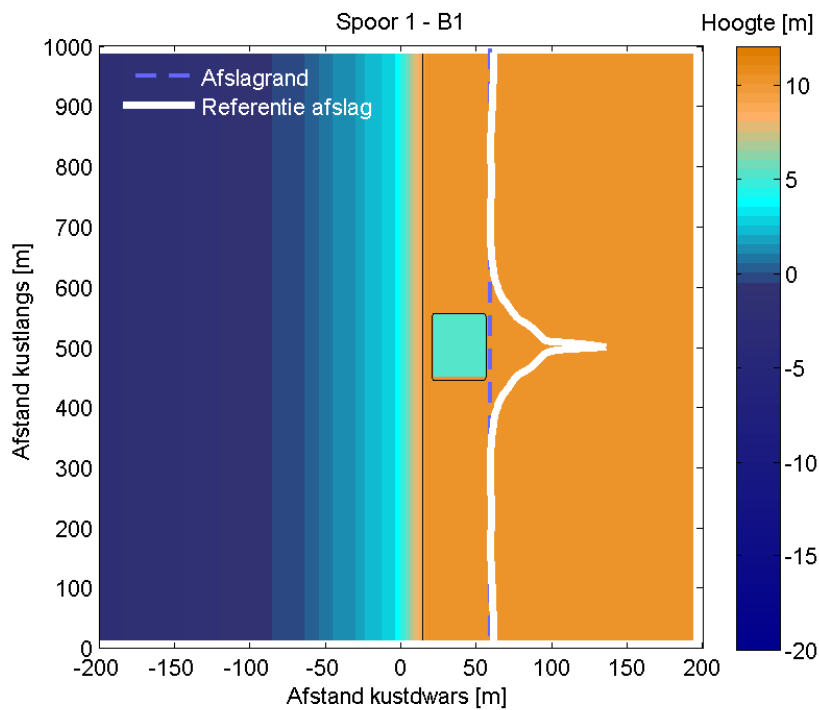
3.5 Analyse uitgevoerde berekeningen 2D

De berekeningen in bijlage D tonen de berekende afslaglijn voor configuraties waarbij het NWO is meegenomen met behulp van een gat in de bathymetrie. Het blijkt dat in alle modelconfiguraties erosie achter het NWO optreedt nadat de afslaglijn de voorkant van het NWO bereikt heeft. De bodem van het gat waarmee het NWO is gemodelleerd ligt immers niet ver boven het rekenpeil. Uit de 2D Berekeningen met XBeach waarbij ontgravingen in het duin zijn aangebracht komt een allesbehalve rechte afslaglijn, hetgeen afwijkt van het beeld in Figuur 3.2. De meeste afslag treedt op achter het NWO. Daarnaast is er ook een aanzienlijke hoeveelheid extra erosie te zien naast de constructie.

Als we naar de details kijken dan vallen de volgende zaken op. Voor een ontgraving met een half-oneindige lengte is er sprake van een maximum in de duinerosie nabij de overgang met het kale duin. Dit wordt bijvoorbeeld geïllustreerd in Figuur 3.29, maar we zien dit terug in andere modelberekeningen. Voor modelberekeningen met een ontgraving over een beperkte lengte treedt er een lokaal maximum op in de centrale raai achter het NWO. Voor een aantal berekeningen is er sprake van een zeer forse achteruitgang, zoals wordt geïllustreerd in Figuur 3.30. Deze achteruitgang verschilt afhankelijk van de lengte van de ontgraving. Voordat we gedetailleerde conclusies verbinden aan de uitkomsten van deze resultaten dient eerst duidelijk worden of hier sprake is van een numeriek effect of een fysisch proces dat nog niet goed bekend is. Hier zal in fase 3 nader onderzoek naar worden verricht.



Figuur 3.29 Afslagberekeningen voor een half-oneindige ontgraving met XBeach 2D



Figuur 3.30 Afslagberekeningen voor een ontgraving met beperkte lengte met XBeach 2D

3.6 Conclusie

De resultaten van de uitgevoerde berekeningen leiden tot de volgende conclusies. Indien wordt vastgehouden aan het gebruik van het wettelijk vastgestelde balansmodel, dan sluiten de resultaten van de sommen aan op de eerder geformuleerde regel. Bij een ontgraving op grotere afstand uit de ongestoorde afslagrand kan de extra afslag worden afgeleid uit de omvang van het ontgravingsvolume. Op kleinere afstand is de extra afslag direct afhankelijk van de d_1 -waarde (= relatieve positie van ontgraving).

Bij de inzet van procesmodellen blijkt dat de rekenregel voor Spoor 1 op een aantal punten goed overeenkomst met de rekenresultaten. Vooral voor ontgravingen die ver zeewaarts van het ongestoorde afslagpunt liggen blijkt de rekenregel goed te werken. Bij constructies die maar deels in de ongestoorde afslagzone liggen blijken de resultaten van de procesmodellen niet in alle gevallen overeen te komen met de rekenregel. De rekenregel blijkt zelfs niet in alle gevallen conservatief te zijn. Dit geldt voor zowel de 1D als de 2D berekeningen. Het blijkt dat er specifieke situaties zijn (combinaties van positie en grootte van ontgraving) waarbij de fysische processen nog onvoldoende doorgrond zijn om ze op een robuuste mee te nemen in een eenvoudige rekenregel.

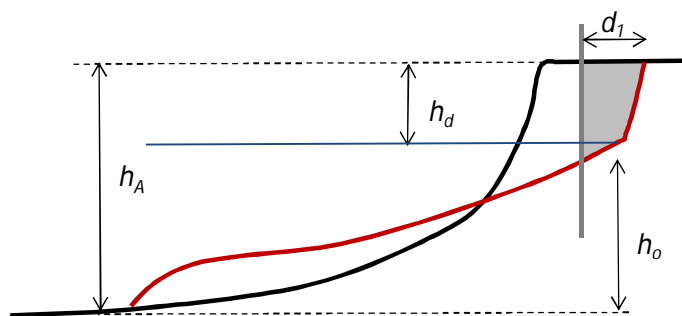
Aangezien de rekenregel in veel (maar niet alle) gevallen een goede indicatie geeft van de extra teruggang van het afslagpunt, is het voorstel om ten behoeve van de rekenregel vooralsnog toch vast te houden aan de theoretisch afgeleide rekenregel. Als op basis van vervolgonderzoek nieuwe inzichten komen over afhankelijkheid tussen d_2 en de ontgravingsparameters, dan kan dit later worden toegevoegd als correctie op de huidige basisregels.

4 Uitwerking onthoudingseffect niet bezwaken NWO (Spoor 2)

4.1 Inleiding en uitgangspunten

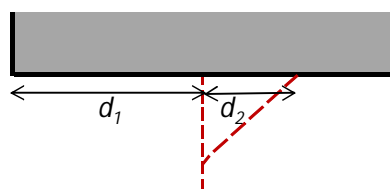
Hierbij is vooral de positie van de voorzijde van de constructie van belang. In het geval deze zich in het afslagprofiel bevindt, zal er immers een effect zijn op de vrije ontwikkeling van het afslagprofiel in dwarsrichting. Dit principe is reeds uitgebreid toegelicht in paragraaf 2.2.3 en leidt uiteindelijk tot een extra achteruitgang naast de constructie.

In de onderstaande figuur zijn de van belang zijnde parameters schematisch weergegeven. Van belang daarbij is dus dat de voorzijde van de constructie zich in de ongestoorde afslagzone bevindt. Deze interactiemaat is aangegeven met de eerder genoemde d_1 -waarde.



Figuur 4.1 Relevante maten voor kwantificering omvang extra afslag naast constructie (onthoudingsspoor).

Voor de verdere kwantificering van het effect is de grootte van de zogenaamde onthouding van belang: A_{onth} (uitgedrukt in m^3/m^1), alsmede de in de figuur aangegeven verticale maten. Doel van de voorliggende uitwerking is om de extra teruggang van het afslagpunt naast de constructie eenduidig te relateren aan eenvoudig te kwantificeren parameters zoals het onthoudingsvolume of nog mooier de interactiemaat.



Figuur 4.2 Definitie d_1 - en d_2 -waarde voor het onthoudingsspoor.

In de in de volgende paragraaf beschreven theoretische uitwerking zijn twee opeenvolgende stappen onderscheiden, namelijk:

- Het kwantificeren van de maximale extra teruggang als functie van de direct sturende parameters;
- Het vertalen van dit theoretische resultaat naar een meer pragmatische formulering die, vergelijkbaar met het resultaat van het ontgravingsspoor, een relatie legt met de interactiemaat.

Bij deze uitwerking is uitgegaan van een sterk geschematiseerde situatie door slechts te kijken naar een situatie met een zogenaamd half-oneindige constructie in een overigens kaal duin. Voor deze constructie geldt dat deze:

- Oneindig hoog is waardoor er geen rekening wordt gehouden met de effecten van eventueel overslaand water;
- Oneindig diep is gefundeerd, waardoor er geen rekening wordt gehouden met de effecten van eventuele ondergraving van de constructie
- Stabiël is en er geen rekening wordt gehouden met het bezwijken van de constructie.
- Oneindig breed (dwars op de kustlijn) is waardoor er geen rekening wordt gehouden met de eventuele erosie van achter de constructie.
- Oneindig lang (evenwijdig aan de kustlijn) is waardoor er geen rekening wordt gehouden met de wisselwerking tussen randeffecten.

De als laatste genoemde karakteristieken zouden overigens leiden tot een zekere reductie van het thans beschouwde effect. Door het vrijkomen van materiaal van achter de constructie zal de extra afslag dwars op de kust (in termen van afstanden) reduceren. Het aanbod van zand neemt hierdoor immers toe. Dit reducerende effect geldt ook voor de situatie met een NWO van beperkte lengte. In dat geval kan er immers sprake zijn van een combinatie van zijdelingse toevoer van sediment naar het voor de NWO gelegen lagere deel van het afslagprofiel. Hierdoor neemt de vraag naar extra afslagvolume af en reduceert dus ook de extra afslag qua afstand dwars op de kust.

De gevolgde benadering leidt dus per definitie tot een bovenschatting van het te verwachten effect. Indien er echter sprake is van twee naast elkaar gelegen NWO's geldt deze bovenschatting niet meer. In dat geval kan het extra afgeslagen materiaal immers aan de zeezijde van beide NWO's worden geborgen en neemt de vraag aan extra afslagvolume toe en zal er dus ook sprake zijn van extra afslag dwars op de kust. Dit vraagstuk wordt echter in deze handreiking niet verder uitgewerkt.

4.2 Theoretische uitwerking

4.2.1 Inleiding

In de volgende uitwerking is een tweetraps aanpak gevolgd. In eerste instantie is getracht de extra teruggang van het duinfront naast de constructie te relateren aan de grootte van het onthoudingsvolume en de hierbij van belang zijnde verticale maten. Vervolgens is, uitgaande van dit basisresultaat, een relatie gelegd met de interactiemaat d_f .

4.2.2 Basisuitwerking

Voor de definitie van de extra teruggang is een gedetailleerde volumetrische uitwerking beschreven in bijlage A. Daarin is een relatie gelegd met de grootte van het onthoudingsvolume. Deze (theoretische) afleiding resulteert in de volgende formulering:

$$d_2 = A_{onth} \left[\sqrt{h_A \cdot h_o} + h_o \right]^{-1} \quad (4.1)$$

waarin:

A_{onth} het zogenaamde onthouden afslagvolume [m^3/m^1]

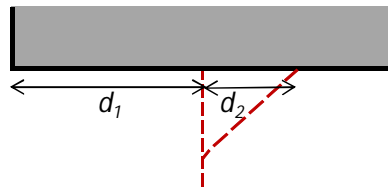
h_A de hoogte van de totale afslagzone [m]

h_0 de hoogte van de afslagzone tot het snijpunt van de harde constructie [m]

Genoemde parameters zijn reeds aangegeven in een eerdere figuur.

4.2.3 Pragmatische vertaling

Voor het kwantificeren van de extra teruggang naast de constructie (d_2 -waarde) moet gebruik worden gemaakt van de relatief lastig te kwantificeren parameters h_A en h_0 . Het zou in dit verband veel handiger zijn als er voor praktijktoepassingen een nog eenvoudiger relatie zou kunnen worden toegepast. Een voorbeeld van een dergelijk verband is een directe relatie tussen de mate waarin de constructie in de ongestoorde afslagzone steekt (d_1 -waarde) en deze extra teruggang (d_2 -waarde; zie onderstaande figuur).

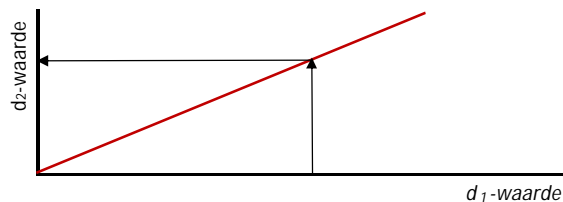


Figuur 4.3 Definitie d_1 - en d_2 -waarde.

In het volgende is dan ook onderzocht in hoeverre het mogelijk is om de d_2 -waarde uit te drukken in een fractie van de d_1 -waarde en wel volgens de relatie:

$$d_2 = \alpha d_1 \quad (4.2)$$

Een dergelijke lineaire relatie is immers ook van toepassing voor het ontgravingsspoor, mits de constructie zich niet te ver zeewaarts van de ongestoorde afslaglijn bevindt. Gegeven een eenvoudig op te meten d_1 -waarde kan de bijbehorende d_2 -waarde eenvoudig worden vastgesteld (zie onderstaande figuur).



Figuur 4.4 Illustratie gezochte pragmatische relatie voor onthoudingsspoor.

Op weg naar een dergelijke relatie kan als eerste stap het onthouden afslagvolume (het volume materiaal dat uitgaande van ongestoorde situatie wordt ingenomen door het bouwwerk) worden benaderd door het product van de d_1 -waarde en de hoogte van het duin boven de maatgevende waterstand h_d (Figuur 4.1):

$$A_{onth} = d_1 \cdot h_d \quad (4.3)$$

Zeker voor grotere d_1 -waarden lijkt dit een valide aanname. Omdat in de praktijk de doorsnijding met de voorzijde van de constructie veelal rond het rekenpeil gelegen is, kan nog een aanname worden gedaan. In dat geval geldt immers dat de totale hoogte van de afslagzone h_A in goede benadering gelijk is aan de som van de h_o - en de h_d -waarde (zie Figuur 4.1), ofwel:

$$h_A = h_o + h_d \quad (4.4)$$

Indien vervolgens de h_o -waarde wordt uitgedrukt in de h_d -waarde:

$$h_o = \gamma \cdot h_d \quad (4.5)$$

kan de d_2 -waarde worden uitgedrukt in de d_1 -waarde en dus de α -waarde worden gekwantificeerd. Lagere γ -waarden gaan daarbij samen met een situatie met een zeer ver zeewaarts gelegen constructie. De h_o -waarde is dan klein ten opzichte van de h_d -waarde. Voor een meer landwaarts gelegen constructie geldt juist een grotere h_o -waarde en dus een ook een grotere γ -waarde.

Substitutie van een en ander in de oorspronkelijk vergelijking voor d_2 levert nu:

$$d_2 = d_1 \cdot h_d \left[\sqrt{(h_o + h_d) \cdot h_o} + h_o \right]^{-1} = d_1 \cdot h_d \left[\sqrt{(\gamma \cdot h_d + h_d) \cdot \gamma \cdot h_d} + \gamma \cdot h_d \right]^{-1} \quad (4.6)$$

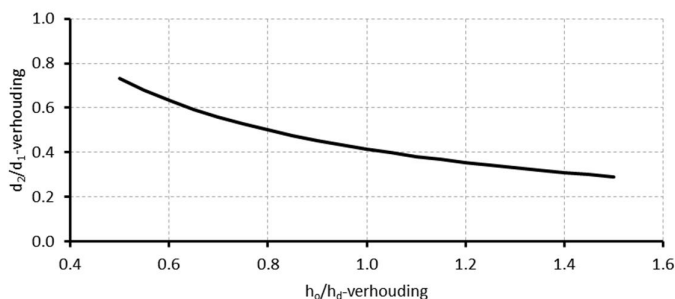
ofwel:

$$d_2 = d_1 \cdot \left[\sqrt{(\gamma + 1) \cdot \gamma} + \gamma \right]^{-1} \quad (4.7)$$

De gezochte α -waarde is dus gelijk aan:

$$\alpha = \left[\sqrt{(\gamma + 1) \cdot \gamma} + \gamma \right]^{-1} \quad (4.8)$$

De α -waarde hangt dus enkel en alleen af van de γ -waarde. Dit is weergegeven in Figuur 4.5.



Figuur 4.5 Relatie tussen impact-waarde en relatieve extra afslag.

Omdat deze laatste ongeveer gelijk is aan de eenheid leidt dit in ieder geval tot de conclusie dat voor de α -waarde als zeer conservatieve bovengrens de waarde van 1 kan worden gebruikt. De extra teruggang is dus maximaal gelijk aan de interactiemaat d_1 .

Voor $\gamma = 1$ volgt immers $\alpha = 0,4$ terwijl voor grotere γ -waarden nog lagere α 's worden gevonden. Een waarde van $\alpha = 1$ wordt pas gevonden voor $\gamma = 0,35$ en dus voor een zeer ver zeewaarts gelegen positie van de voorzijde van de bebouwing.

Voor meer realistische omstandigheden zal de α -waarde 0,2 tot 0,4 bedragen. De grootte van de extra teruggang d_2 bedraagt dan 20 tot 40 % van de interactiemaat d_1 .

Samenvattend kan de aanname dat de extra afslag naast de constructie (de d_2 -waarde) gelijk kan worden gesteld aan een percentage van de d_1 -waarde in principe als pragmatisch uitgangspunt worden gehanteerd.

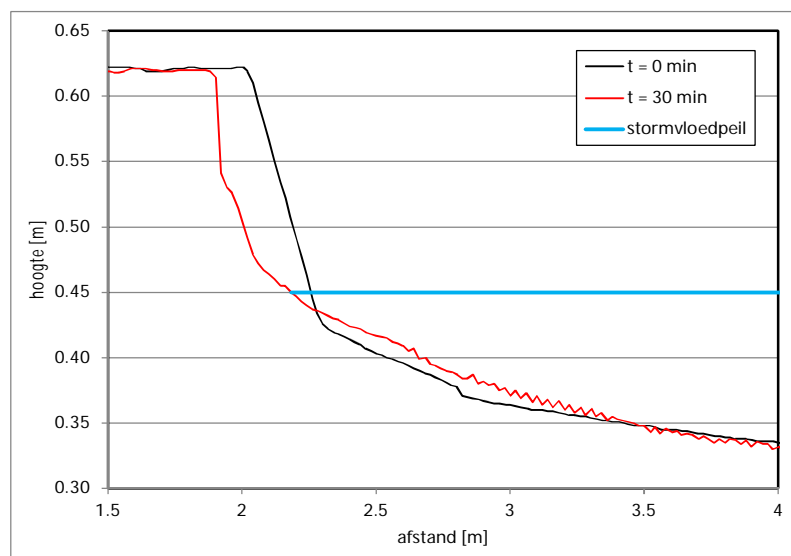
4.3 Analyse beschikbare metingen

In een paper van Boers *et al.* (2011) zijn duinafslagexperimenten met aansluitingen en bressen in het Deltabassin geanalyseerd. Het betrof aansluitingen van het type dijk – duin en dijk – duinvoetverdediging, en bressen in een dijk en in een duinvoetverdediging. Hierbij lag de voorkant van de dijk of duinvoetverdediging op dezelfde dwarspositie als het initieel duinfront.

Door vergelijking van de duinerosie bij de aansluiting of in de bres met de ongestoorde situatie zijn met behulp van een regressieanalyse waarden afgeleid voor de coëfficiënt α in vergelijking (4.2). De uitkomsten hiervan zijn weergegeven in Tabel 4.1. Figuur B.3 toont de uitgevoerde regressie door de metingen.

Type aansluiting / bres	Waarde α
Dijk en duin	0,27
Dijk en duinvoetverdediging	0,51
Bres in dijk	0,88
Bres in duinvoetverdediging	0,52

Tabel 4.1 Waarden voor α voor verschillende typen aansluitingen en bressen afgeleid uit metingen

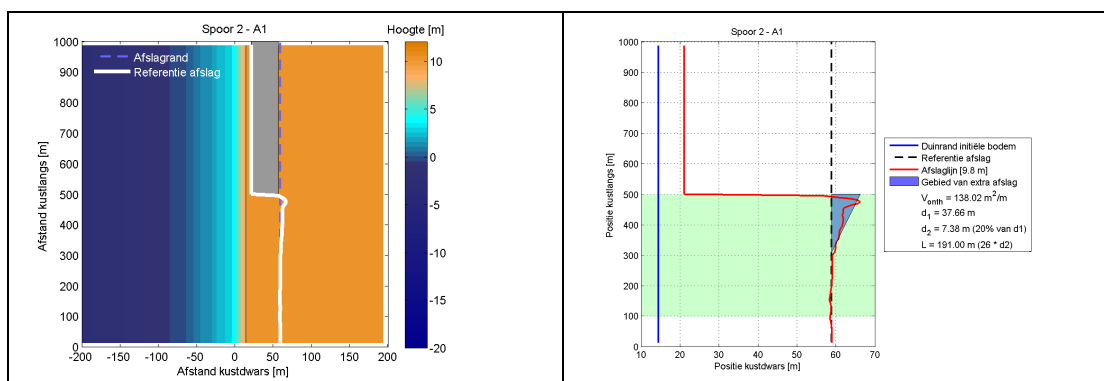


Figuur 4.6 Gemeten profielen tijdens Experiment H5019.V2

Wanneer we de waarde voor α uitrekenen met behulp van vergelijking (4.8) dan dienen we de waarden voor h_d en h_0 af te lezen uit de gemeten dwarsprofielen. Een overzicht van alle gemeten profielen tijdens het experiment H5019.V2 is weergegeven in Figuur 4.6. Uit de profielen met duinafslag (de rode lijnen) leiden we de volgende waarden af voor h_d (0,17 m) en h_0 (0,09 m). Dit leidt tot een waarde voor γ van 0,53 en een waarde voor α van 0,70 [Figuur 4.5]. Dit is fors hoger dan de waarde van 0,27 die is afgeleid uit de regressieanalyse. Er dient hier echter wel te worden opgemerkt dat er sprake is van een sterk zeewaarts gelegen dijkprofiel met een talud-helling van 1:3, wat de vraag oproept in hoeverre deze experimenten representatief zijn.

4.4 Analyse uitgevoerde berekeningen XBeach 2D

Bij de totstandkoming van de handreiking zijn er uitgebreide 2D berekeningen uitgevoerd met behulp van het model XBeach. De resultaten hiervan worden gepresenteerd in bijlage D. Het basisgeval met een half-oneindig NWO (configuratie A1) geeft een goed beeld van de erosie die volgens XBeach naast een constructie plaatsvindt. Figuur 4.7 laat zien dat direct naast de constructie de afslaglijn een extra teruggang heeft. Dit is conform de verwachting van de theoretische uitwerking van Spoor 2.



Figuur 4.7 Modelresultaten met XBeach 2D ten behoeve van Spoor 2 (modelschematisatie A1). Duidelijk zichtbaar is de extra duinerosie naast het NWO

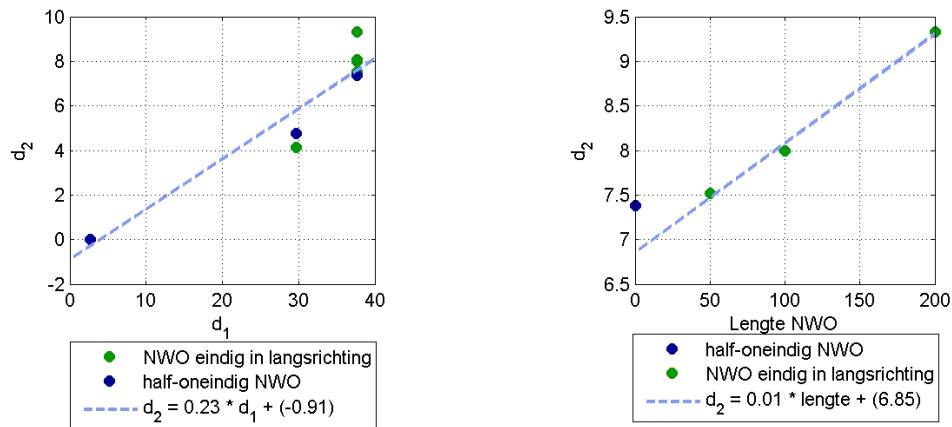
Het doel van deze berekeningen is om de richtlijnen met betrekking tot Spoor 2 te onderbouwen. Hierbij wordt gezocht naar de volgende relaties:

- Relatie tussen d_1 en d_2
- Relatie tussen d_2 en L

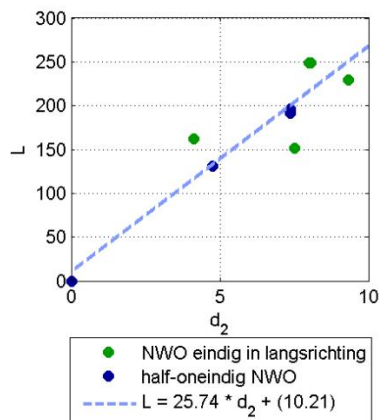
Relatie tussen d_1 en d_2

Met de vergelijking (4.2) wordt er een lineaire relatie verondersteld tussen de afstand d_1 en d_2 . De verkennende uitwerking geeft aan dat er coëfficiënt van 0,2 a 0,4 van toepassing zou kunnen zijn. Uit laboratoriumonderzoek is een waarde van 0,27 voor de coëfficiënt α afgeleid. Met behulp van de modelresultaten uit XBeach is onderzocht of hier ook een dergelijk verband aanwezig is. Dit blijkt inderdaad het geval te zijn, zoals is weergegeven in Figuur 4.8. In dit geval volgt een waarde van 0,23 voor de coëfficiënt α , hetgeen niet sterk afwijkt van de resultaten uit de laboratoriumgegevens. Hierbij is het opvallend dat berekeningen waarbij de voorkant van de constructie op dezelfde plaats in het profiel zat en alleen achterkant van het NWO varieerde (bijvoorbeeld A1 en A3, of B1 en B3) vrijwel hetzelfde erosiepatroon laten zien (en dus dezelfde waarde voor d_2).

Ondanks de relaties die kunnen worden gevonden in algemene zin, kan ook worden geconcludeerd dat de resultaten van de berekeningen met een half-oneindig NWO meer op een lijn liggen dan de resultaten van berekeningen met een NWO met eindige breedte. Dit wordt verder verduidelijkt door de resultaten van berekeningen waarbij alleen de lengte van het NWO varieert (de positie van het NWO in dwarsrichting is dus constant). Uit Figuur 4.9 volgt dat er een relatie lijkt te zijn tussen de lengte van het NWO langs de kust en de berekende d_2 . Naast de positie van de voorkant is dus (zoals verwacht) ook de lengte van het NWO belangrijk bij het bepalen dat een d_2 waarde. Daarbij wordt de d_2 groter naarmate het NWO breder wordt. Alleen de berekening met een half-oneindig NWO wijkt hierbij af. Deze geeft juist de kleinste d_2 . Nader onderzoek zou uit moeten maken of dit bijvoorbeeld een gevolg is van de verschillen in model invoer. Berekeningen met eindige breedte van het NWO zijn symmetrisch, terwijl de berekening met een half-oneindig NWO niet symmetrisch zijn. Dit zou een ander stromingspatroon tot gevolg kunnen hebben dat wellicht wordt weerkaatst op de laterale randen van het model.



Figuur 4.8 Links: Relatie tussen d_1 en d_2 ; Rechts: Relatie tussen de lengte van een NWO en d_2 voor berekeningen waarbij de voorkant en achterkant van het NWO gelijk zijn



Figuur 4.9 Relatie tussen d_2 en L

Relatie tussen d_2 en L

Met behulp van de modelberekeningen is eveneens nagegaan of er een verband bestaat tussen de afstand d_2 en de lengte L [Figuur 2.8]. Dit naar aanleiding van vergelijking (A.58) uit de theoretische afleiding in bijlage A:

$$L = \lambda d_2 \quad (4.9)$$

Vanwege de ruis op de afslaglijn is het niet eenvoudig om betrouwbare schattingen te maken van de parameter L in de modelresultaten [Figuur 4.7]. Het is desondanks toch gelukt om in Figuur 4.9 een relatie te leggen tussen d_2 en L . Uit de regressieanalyse volgt een kenmerkende waarde voor de coëfficiënt $\lambda = 26$.

4.5 Conclusie

Bovenstaande afleidingen voor Spoor 2 zijn terug te brengen tot twee eenvoudige rekenregels: [1] een relatie voor de bepaling van de mate van extra achteruitgang van de afslaglijn langs de constructie (d_2), en [2] een relatie voor de bepaling van de kustlangse invloedzone aan weerszijde van de constructie (L).

Een robuuste (conservatief geachte) relatie voor de d_2 -waarde is:

$$d_2 = 0,3 d_1 \quad (4.10)$$

Voor de invloedzone L is de volgende relatie voorgesteld als rekenregel:

$$L = 30 d_2 \quad (4.11)$$

5 Conclusies

Waterkeringbeheerders van duinwaterkeringen hebben behoefte aan toetsregels om de effecten van bestaande en nieuwe bebouwing op duinveiligheid te kunnen beoordelen. Er is daarom door Rijkswaterstaat opdracht gegeven tot het schrijven van een Handreiking NWO's in duinen dat bestaat uit een achtergrondrapport, een schematiseringshandleiding en een evaluatie en vooruitblik. In het voorliggend achtergrondrapport zijn eenvoudige rekenregels afgeleid voor solitaire bebouwing. De uitgangspunten hierbij zijn:

- Er is sprake van een in kustlangse richting uniforme situatie.
- Voor de NWO's wordt uitgegaan van rechthoekige objecten met de wanden parallel aan of loodrecht op de kustlijn.
- Er wordt in deze handreiking geen rekening gehouden met het verplaatsen van NWO's als gevolg van ondergraving en/of golfkrachten.
- Er is sprake van loodrecht invallende golven.
- Er wordt geen rekening gehouden met golfoverslag.

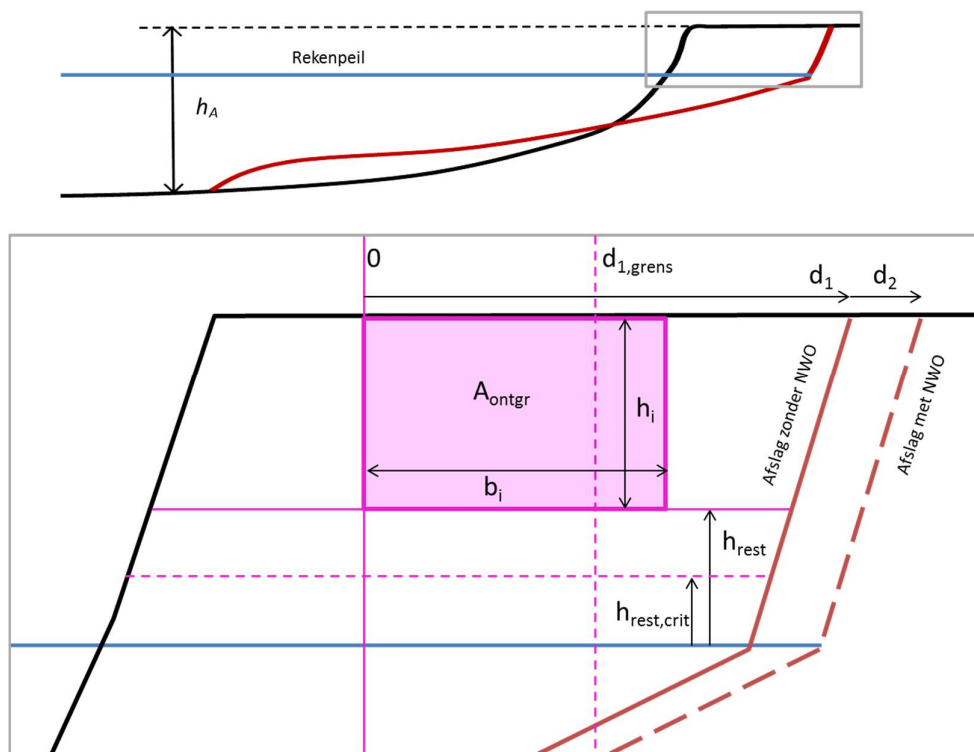
In Spoor 1 wordt het effect van een NWO op duinafslag berekend met betrekking tot het ontgravingsvolume. Hierbij gaat de bouw van het NWO onder het maaiveld ten koste van het daar aanwezige zand. Indien het NWO tijdens storm bezwijkt, levert dit extra afslag op in vergelijking met de situatie zonder NWO [vergelijkingen (3.20) en (3.21)]. De toetsregels hiervan zijn uitgewerkt in hoofdstuk 3. Uitgaande van een waarde 0 voor de parameter $d_{1,min}$ luidt de toetsregel als volgt:

$$\begin{aligned}
 d_2 &= 0 && \text{als } d_1 < 0 \\
 d_2 &= (1 - f_s) \cdot (b_i - d_1) + f_s \cdot \frac{h_i}{h_A - h_i} d_1 && \text{als } 0 \leq d_1 \leq d_{1,grens} \\
 d_2 &= \frac{A_{ontgr}}{h_A} = \frac{b_i \cdot h_i}{h_A} && \text{als } d_1 > d_{1,grens}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

$$f_s = \max \left(0 ; \min \left(1 ; \frac{h_{rest}}{h_{rest,crit}} \right) \right) \tag{5.2}$$

$$d_{1,grens} = \frac{h_A - h_i}{h_A} b_i$$

Voor deze toetsregels zijn de volgende parameters van belang die zijn weergegeven in [Figuur 5.1 en Tabel 5.1].



Figuur 5.1 Definities formules Spoor 1 voor situatie met een zeewaarts van het ongestoorde afslagfront gelegen ondiepe (boven maatgevende waterstand gelegen) ingraving.

Parameter	dimensie	toelichting
d_1	[m]	Afstand tussen de voorkant van het NWO en het afslagpunt
d_2	[m]	Extra effect in afslaglengte vanwege de aanwezigheid van het NWO
b_i	[m]	Breedte van de ontgraving
h_i	[m]	Diepte van de ontgraving ten opzichte van het maaiveld
h_A	[m]	Werkende profielhoogte
A_{ontgr}	[m ²]	Ontgravingsvolume per meter kust
h_{rest}	[m]	Hoogte van de ontgraving ten opzichte van de maatgevende waterstand
$d_{1,grens}$	[m]	Grenswaarde voor d_1 die aangeeft dat de extra afslag achter het NWO komt te liggen
$h_{rest,crit}$	[m]	Grenswaarde voor h_{rest} waarbij een waarde van 2,5 m wordt gehanteerd. Als deze grens wordt overschreden wordt een extra effect door golfoverslag verondersteld.

Tabel 5.1 Parameters Spoor 1

Voor Spoor 2 dat betrekking heeft op het onthoudingseffect in kustlangse richting zijn de vergelijkingen (4.10) en (4.11) afgeleid. De eerste vergelijking betreft het effect in dwarsrichting:

$$d_2 = 0,3 d_1 \tag{5.3}$$

De tweede vergelijking betreft het effect in langsricting:

$$L = 30 d_2 \quad (5.4)$$

Bovengenoemde toetsregels zijn geanalyseerd aan de hand van vergelijkende berekeningen met XBeach en DurosTA en meetgegevens. Doordat er in algemene zin nog weinig meetgegevens beschikbaar zijn kan hier echter nog het nodige op af worden gedongen.

Referenties

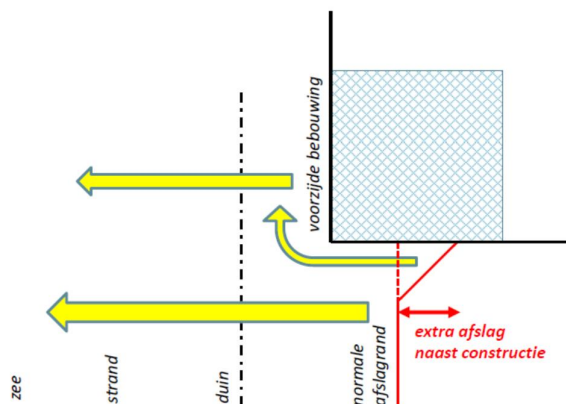
- Boers, M., P. Van Geer en M. Van Gent. 2011. *Dike And Dune Revetment Impact On Dune Erosion*. Coastal Sediments 2011.
- Deltares. 2012. *Voorverkenning NWO's in duinen*. Een gezamenlijke productie met Arcadis. 1206423-002.
- Deltares. 2014A. *Handreiking NWO's in duinen - Schematiseringshandleiding*. Een gezamenlijke productie met Arcadis. 1208163-001.
- Deltares. 2014B. *Handreiking NWO's in duinen – Evaluatie en vooruitblik*. Een gezamenlijke productie met Arcadis. 1208163-001.
- Expertise Netwerk Waterkeringen. 2007. *Technisch Rapport Duinafslag 2006. Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering ten behoeve van voorschrift toetsen op veiligheid 2006*. TRDA2006. WL|Delft Hydraulics (H4357).
- Sallanger, A.H.J. 2000. *Storm impact scale for barrier islands*. Journal of Coastal Research, pp.890 - 895.
- Van Gent, M.R.A. 2008. *Large-Scale Tests to Analyse the Influence of Collapsed Dune Revetments on Dune Erosion*. ICCE 2008. Pag. 2583-2595.
- Vellinga, P. 1986. *Beach and dune erosion during storm surges*. PhD – Report TU Delft.
- Waterloopkundig Laboratorium, 1993. *Effect bebouwing op de mate van duinafslag. Deel I: Eerste verkenning inzake bebouwingseisen voor de zeereep*. Rapportage bureaustudie met kenmerk H1696 i.o.v. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen; Werkgroep C. Juni 1993.
- Waterloopkundig Laboratorium, 1994. *Effect bebouwing op de mate van duinafslag. Deel II: Nadere kwantificering effecten*. Rapportage bureaustudie met kenmerk H1696-2 i.o.v. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen; Werkgroep C. April 1994.
- WL | Delft Hydraulics. 2006A. *Dune Erosion, Product 2: Large-scale model tests and Dune Erosion Prediction Methods*. H4357. Kennisalliantie met TU Delft en Alkyon.
- WL | Delft Hydraulics. 2006B. *Dune Erosion, Measurement report large-scale model tests*. H4357. Kennisalliantie met TU Delft, Universiteit Twente en Universiteit Utrecht.
- WL | Delft Hydraulics. 2007. *Influence of collapsed revetments on dune erosion*. H4731.

A Detailuitwerking theoretisch onthoudingseffect (Spoor 2)

A.1 Inleiding en achtergronden

De hier beschouwde situatie heeft betrekking op de overgang tussen een ongestoord kaal duinprofiel en een dwarsprofiel waarin zich een verticale constructie in de afslagzone bevindt. Dit laatste profiel wordt in het volgende gemakshalve aangeduid als het bebouwde profiel. In dit bebouwde profiel zal de grootte van de afslag uit het duinfront worden beperkt door aanwezigheid van de hierin aanwezige constructie. De hiermee samenhangende onthouding van afslagmateriaal zal voor de constructie leiden tot een afslagprofiel (of eigenlijk post-storm-profiel) dat – ten opzichte van het afslagprofiel bij een onbebouwd profiel – relatief lager is gelegen.

Ter plaatse van de overgang tussen het kale en bebouwde profiel leidt dit tot een discontinuïteit in de theoretisch aanwezige post-storm-profielen. Verwacht mag worden dat deze discontinuïteit, door zijdelingse uitwisseling tussen de naburige dwarsprofielen grotendeels teniet zal worden gedaan. Hiervoor zal er deels ook materiaal worden onttrokken aan het onbebouwde kale duin en worden toegeleverd aan de dwarsprofielen welke voor de constructie zijn gelegen. Dit principe is nogmaals geschetst in (de ook in het hoofdrapport opgenomen) onderstaande figuur.



Figuur A.5.1 Effect herverdeling afgeslagen zand van gevolg NWO/bebouwing met extra afslag

Door het in meer detail uitwerken van de volumetrische zandbalans en het doen van een aantal continuïteits- en hellinggerelateerde aannames, kan de grootte van de extra afslag worden uitgedrukt in de sturende parameter, zijnde het door de aanwezigheid van de NWO-constructie veroorzaakte onthoudingsvolume.

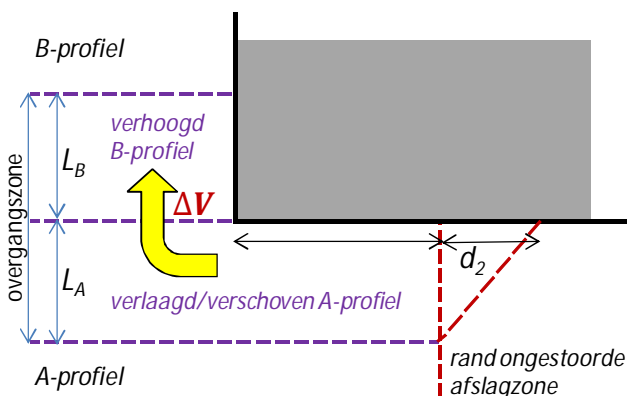
Feitelijk is deze benadering voor Spoor 2 in hoofdlijnen gelijk aan de methodiek die in VTV2006 is beschreven voor de bepaling van (extra) teruggang van de afslaglijn ter plaatse van aansluitingsconstructie (bijv. dijk – duin aansluitingen). De verschillen zitten onder andere in de bepaling van het zogenaamde onthoudingsvolume (A_{onth}); zie verderop.

De verdere uitwerking van Spoor 2 is stapsgewijze gepresenteerd in de volgende paragrafen.

A.2 Definitie balansbegrenzingsen

De zijdelingse uitwisseling van materiaal (evenwijdig aan de kust) maakt dat er per individueel dwarsprofiel geen sluitende zandbalans meer in dwarsrichting aanwezig is. Deze volumebalans geldt natuurlijk wel binnen de volledige overgangszone, zeker op het moment dat de beide buitenbegrenzingsen ervan zo gekozen zijn dat daarbuiten juist wel sprake is van een zandbalans in dwarsrichting. De totale hoeveelheid materiaal binnen deze volledige overgangszone blijft immers constant.

De bij de verdere beschouwing gehanteerde grenzen zijn schematisch weergegeven in de volgende figuur. Hierin is de omvang (of feitelijk lengte) van de volledige overgangszone expliciet aangegeven. Binnen deze overgangszone zijn twee lengtematen gedefinieerd, namelijk de lengte L_A en de lengte L_B . Deze verwijzen respectievelijk naar de overgangslengte voor het A- en B-vak. Het B-vak verwijst hierbij naar de voor de constructie gelegen sectie. Het A-vak juist naar de sectie die aansluit op de constructie. De overgangsraai (welke in het verlengde van de zijkant van de constructie loopt) vormt de scheiding tussen beide deelvakken.



Figuur A.5.2 Indeling balansvakken rond overgangszone ter plaats van hoek NWO.

De in de figuur aangegeven gele pijl verwijst naar de voor deze uitwerking dominante zandtransportvector. Het effect hiervan is dat er in het A-vak (naast de constructie) sprake is van een verlaagd dan wel landwaarts verschoven post-storm profiel in vergelijking tot de situatie buiten de overgangszone. Op vergelijkbare wijze ontstaat er voor de constructie (in het B-vak voor de constructie) juist een in relatieve zin enigszins verhoogd post-storm profiel.

Continuïteit in volume

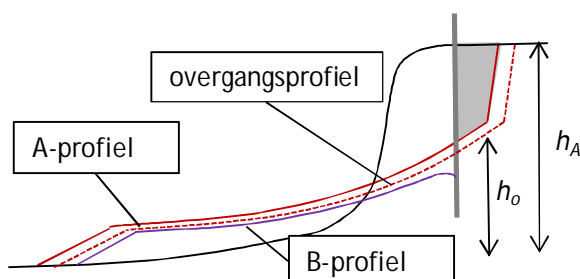
Uitgangspunt is dat er over de scheidingslijn – als gevolg van de zijdelingse uitwisseling – sprake is van een transport van materiaal ter grootte van het onbekende volume ΔV . Dit uitwisselingsvolume komt dus terecht in het deelvak B met lengte L_B en wordt onttrokken aan het deelvak A met lengte L_A . Dit uitwisselingsvolume wordt daarbij deels onttrokken aan het meer landwaarts verplaatste duinfront in het B-vak. Feitelijk leidt dit tot het volgende eenvoudige verband voor de continuïteit in volume:

$$\Delta V_{A-zone} = \Delta V_{B-zone} \quad (\text{A.1})$$

Deze relatie zegt feitelijk alleen iets over de omvang van het volume in het deelvak, maar nog niets over de verdeling van de volumes binnen elk deelvak, laat staan over de omvang van de extra teruggang. Daarvoor dienen aanvullende aannamen te worden gedaan.

A.3 Aansluiting in het overgangsprofiel

Uitgaande van de veronderstelling dat de zijdelingse uitwisseling (de gele pijl in de eerdere figuur) leidt tot een situatie waarbij er geen sprake is van een discontinuïteit op in de overgangsraai is het goed om deze in juist dit profiel aanwezige oppervlakken nader te beschouwen. De hierbij van belang zijnde dwarsprofielen en maten zijn schematisch weergegeven in de volgende figuur.



Figuur A.5.3 Dwarsprofielen in de overgangszone.

In deze figuur zijn drie dwarsprofielen geschetst, namelijk het afslagprofiel zoals dat zich in een kaal duin ontwikkeld (het rode A-profiel), het dwarsprofiel dat voor de constructie aanwezig is (het blauwe B-profiel) en het (tussengelegen) profiel dat aanwezig is in de zogenaamde overgangsraai (het gestippelde rode profiel in de figuur).

Onthoudingsvolume sturend

Sturend voor de ontwikkeling is het zogenaamde onthoudingsvolume dat zich landwaarts van de voorzijde van de constructie bevindt. De grootte van dit volume (of feitelijk volume per m^1) A_{onth} kan worden bepaald door de positie van de voorzijde van de constructie in te passen in het normale afslagprofiel (het bovenliggende rode profiel in de figuur). Deze onthouding maakt ook dat het profiel voor de constructie (het blauwe profiel in de figuur) relatief lager is gelegen en direct aansluitend op de constructie veelal een soort van ontgrondingskuil laat zien.

Voor de verdere uitwerking wordt niet zozeer de exacte vorm van het B-profiel van belang geacht (en dus ook niet de daadwerkelijke dimensies van de ontgrondingskuil), maar juist het oppervlakteverschil tussen de beide profielen. In dit geval geldt dat het verschil tussen het A-profiel en het B-profiel in het profieldeel zeewaarts van de constructie (de verticale grijze lijn in de figuur) per definitie gelijk is aan het eerder genoemde onthoudingsvolume A_{onth} .

Formulering α -fractie

Omdat het overgangsprofiel (de rode streeplijn in de figuur) gelegen is tussen de beide profielen geldt dat de volumetoename in dit profiel ten opzichte van het B-profiel per definitie een fractie is van het totale onthoudingsvolume. Indien voor deze fractie de parameter α wordt gehanteerd, dan leidt dit tot de volgende uitgangsrelatie:

$$\Delta A_{B\text{-profiel}} = \alpha A_{onth} \quad (\text{A.2})$$

Het oppervlak $\Delta A_{B\text{-profiel}}$ verwijst dus naar de toename van oppervlak in de B-raai ter plaatse van de rand van de constructie.

In de veronderstelling dat deze 'winst' beschikbaar komt door een landwaartse verschuiving van het A-profiel dan geldt voor de afname in het oppervlak in deze raai:

$$\Delta A_{A\text{-profiel}} = h_A d_2 \quad (\text{A.3})$$

Deze afname is dus gelijk aan het product van de totale werkende hoogte van het afslagprofiel (h_A) en de teruggang van het duinfront direct naast de constructie. Deze laatste waarde komt overeen met de uiteindelijk gezochte d_2 -waarde.

De grootte van de evenredigheidsfactor α volgt nu uit de continuïteit in het oppervlak voor de voorzijde van de constructie. De toename van het profieloppervlak voor de bebouwing moet immers gelijk zijn aan het oorspronkelijke verschil A_{onth} verminderd met de afname van het oppervlak in de zone direct naast het bouwwerk, ofwel:

$$\Delta A_{onth} = A_{onth} - h_o d_2 \quad (\text{A.4})$$

In deze uitdrukking verwijst de h_o naar de hoogte van het actieve profiel zeewaarts van de constructie (niveauverschil tussen het laagste niveau van de afzetting en het snijpunt van het ongestoorde afslagprofiel met de voorzijde van de constructie; zie eerdere figuur).

Afleiding α -factor

Combinatie van beide laatste vergelijkingen leidt tot:

$$\alpha A_{onth} = A_{onth} - h_o d_2 \quad (\text{A.5})$$

Ofwel:

$$\alpha = \frac{A_{onth} - h_o d_2}{A_{onth}} = 1 - \frac{h_o d_2}{A_{onth}} \quad (\text{A.6})$$

De grootte van deze factor is afhankelijk van de positie van de constructie in het afslagprofiel (via de h_o -waarde) en de grootte van de (onbekende) d_2 -waarde. Deze laatste formulering zal verderop in de uitwerking worden gebruikt.

A.4 Continuïteit in volume op vakniveau

Bij het vertalen van de situatie in de overgangsraai naar een volumemutatie in elk deelvak is de wijze waarop de profielen binnen het deelvak variëren van belang. Uitgangspunt daarbij is dat de profielvorm in de overgangsraai (qua oppervlakte) voldoet aan de eerder beschreven relatie.

In zeer algemene zin geldt voor de totale volumemutatie in een willekeurig deelvak ΔV dat deze gelijk is aan het product van de oppervlaktemutatie op de rand ΔA en de lengte van het deelvak L vermenigvuldigd met een volumefactor β .

Ofwel:

$$\Delta V = \beta \Delta A L \quad (\text{A.7})$$

In het geval van een lineaire afname van de oppervlaktetoename binnen het deelvak geldt voor deze volumefactor $\beta = 0,5$. Voor een niet lineair verloop komen iets andere waarden in aanmerking. Orde van grootte gaat het echter altijd om 'iets van een half'.

Definitie volumemutaties

Voor de toename in het zandvolume voor de constructie (B-vak) geldt dan:

$$\Delta V_{B-zone} = \beta_B \Delta A_{B-profiel} L_B \quad (\text{A.8})$$

Ofwel:

$$\Delta V_{B-zone} = \beta_B (\alpha A_{onth}) L_B \quad (\text{A.9})$$

Voor de afname in het zandvolume in het vak naast de constructie (A-vak) geldt:

$$\Delta V_{A-zone} = \beta_A \Delta A_{A-profiel} L_A \quad (\text{A.10})$$

Ofwel:

$$\Delta V_{A-zone} = \beta_A (h_A d_2) L_A \quad (\text{A.11})$$

Gelijkstelling volumes

De volgende stap is het gelijkstellen van deze volumina:

$$\beta_A h_A d_2 L_A = \beta_B \alpha A_{onth} L_B \quad (\text{A.12})$$

Omwerking leidt tot een uitdrukking voor de gezochte d_2 -waarde.

$$d_2 = \frac{\beta_B \alpha A_{onth} L_B}{\beta_A h_A L_A} \quad (\text{A.13})$$

Ofwel:

$$d_2 = \left(\frac{\beta_B}{\beta_A} \right) \left(\frac{L_B}{L_A} \right) \frac{\alpha A_{onth}}{h_A} \quad (\text{A.14})$$

In de veronderstelling dat de β -waarde voor beide trajecten gelijkwaardig is, doet de exacte waarde van deze volumefactor er niet toe. De vergelijking wordt dan:

$$d_2 = \left(\frac{L_B}{L_A} \right) \frac{\alpha A_{onth}}{h_A} \quad (\text{A.15})$$

In deze vergelijking blijft slechts de verhouding tussen de beide overgangslengten als parameter over. Ook hier geldt dus dat niet zozeer de omvang van de overgangszone van belang is maar veel meer de verhouding tussen beide afstanden. Omdat deze verhouding op voorhand niet bekend is, wordt voor deze verhouding in de resterende uitwerking een nieuwe parameter ξ geïntroduceerd:

$$\xi = \left(\frac{L_B}{L_A} \right) \quad (\text{A.16})$$

De formule voor de d_2 -waarde wordt dan:

$$d_2 = \xi \frac{\alpha A_{onth}}{h_A} \quad (\text{A.17})$$

A.5 Afleiding basisrelatie (na substitutie α -factor)

In de laatste relatie voor de d_2 -waarde staat nog de eerder afgeleide α -waarde in het rechterlid. Substitutie van de hiervoor eerder afgeleide relatie in deze vergelijking leidt initieel tot de volgende formulering:

$$d_2 = \xi \left(1 - \frac{h_0 d_2}{A_{onth}} \right) \frac{A_{onth}}{h_A} \quad (\text{A.18})$$

In deze vergelijking staat de d_2 -waarde zowel in het linker- als het rechterlid. Dit vereist enige omwerkingen met de volgende tussenstappen.

$$d_2 = \xi \left(\frac{A_{onth} - h_0 d_2}{A_{onth}} \right) \frac{A_{onth}}{h_A} \quad (\text{A.19})$$

$$d_2 = \xi \left(\frac{A_{onth} - h_0 d_2}{h_A} \right) \quad (\text{A.20})$$

$$d_2 = \xi \left(\frac{A_{onth}}{h_A} - \frac{h_0 d_2}{h_A} \right) \quad (\text{A.21})$$

ofwel:

$$d_2 \left(1 + \xi \frac{h_0}{h_A} \right) = \xi \left(\frac{A_{onth}}{h_A} \right) \quad (\text{A.22})$$

$$d_2 \left(\frac{h_A + \xi h_0}{h_A} \right) = \xi \left(\frac{A_{onth}}{h_A} \right) \quad (\text{A.23})$$

$$d_2 (h_A + \xi h_0) = \xi A_{onth} \quad (\text{A.24})$$

Dit resulteert dus in de gezochte uitdrukking voor de d_2 -waarde:

$$d_2 = \frac{\xi A_{onth}}{(h_A + \xi h_0)} = \left(\frac{A_{onth}}{h_A} \right) \left[\frac{\xi}{1 + \xi (h_0/h_A)} \right] \quad (\text{A.25})$$

met als resultaat:

$$d_2 = \left(\frac{A_{onth}}{h_A} \right) \left[\frac{1}{(1/\xi) + (h_0/h_A)} \right] \quad (\text{A.26})$$

Introductie van een relatieve laagdikte δ voor de verhouding tussen de h_0 - en h_A -waarde volgens

$$\delta = \frac{h_0}{h_A} \quad (\text{A.27})$$

leidt uiteindelijk tot:

$$d_2 = \left(\frac{A_{onth}}{h_A} \right) \left[\frac{1}{(1/\xi) + \delta} \right] \quad (\text{A.28})$$

De extra teruggang van het duinfront naast de constructie hangt daarmee af van de grootte van het onthoudingsvolume A_{onth} , de totale werkende hoogte A_{onth} , de relatieve hoogte van het profieldeel ter plaatse van de voorzijde van de constructie δ en de (nog onbekende) verhouding tussen de lengte van de beide overgangszones (de ξ -waarde).

Relatie met ontgravingsspoor

Opgemerkt kan worden dat de eerste term van het rechterlid in de d_2 -relatie betrekking heeft op de maximale teruggang van het duinfront bij het onttrekken van het onthoudingsvolume A_{onth} aan het afslagproces. Een dergelijke formulering is ook van toepassing bij de voor het zogenaamde ontgravingsspoor. De tweede (tussen vierkante haken) gegeven term kan gezien worden als een correctie op deze basiswaarde.

A.6 Uitwerking omvang overgangszones

Voor het nader kwantificeren van de d_2 -waarde moet er meer zicht komen op de grootte (lengte) van de eerder gedefinieerde overgangszones L_A en L_B . Het gaat daarbij met name om het verhouding tussen deze lengtematen: de eerdere geïntroduceerde (de ξ -waarde).

Lengte B-vak

Met betrekking tot het B-vak voor de bebouwing kan er een relatie worden gelegd tussen de lengte van de overgangszone L_B en de 'ophoging' van het profiel ter plaatse van het overgangsprofiel. Deze ophoging hangt samen met de zeewaartse verschuiving van dit laatste profiel. De extra uitbouw dwars op de kust is daarbij gelijk aan het quotiënt van de oppervlaktetoename $\Delta A_{B\text{-profiel}}$ en de lokale werkende hoogte h_0 . Dit leidt tot de volgende uitdrukking:

$$L_B = \gamma_B \frac{\Delta A_{B\text{-profiel}}}{h_0} \quad (\text{A.29})$$

Hierin is de γ_B -waarde gerelateerd aan de grootte van de langshelling in bovenaanzicht. Substitutie van de uitdrukking voor de oppervlaktetoename resulteert in:

$$L_B = \gamma_B \frac{\alpha A_{onth}}{h_0} \quad (\text{A.30})$$

Lengte A-vak

Voor de lengte van de invloedzone L_A geldt een soortgelijke relatie:

$$L_A = \gamma_A \frac{\Delta A_{A\text{-profiel}}}{h_A} \quad (\text{A.31})$$

Hier leidt substitutie van de oppervlaktetoename tot:

$$L_A = \gamma_A \frac{h_A d_2}{h_A} = \gamma_A d_2 \quad (\text{A.32})$$

Onderlinge verhouding

Dit maakt dat er direct kan worden overgegaan naar de invulling van de oorspronkelijk gezochte ξ -waarde. Substitutie van de hier afgeleide verbanden resulteert dan ook in:

$$\xi = \frac{L_B}{L_A} = \frac{\gamma_B}{\gamma_A} \frac{\alpha A_{onth}}{d_2 h_0} \quad (\text{A.33})$$

Uitgaande van het ook in de profielvormen 'glad' verlopen van de overgang lijkt het zeer aannemelijk dat de beide γ -waarden aan elkaar gelijk zijn.

$$\xi = \frac{\alpha A_{onth}}{d_2 h_0} \quad (\text{A.34})$$

Substitutie van de relatie voor de α -waarde resulteert dan in:

$$\xi = \left(1 - \frac{h_0 d_2}{A_{onth}} \right) \frac{A_{onth}}{d_2 h_0} \quad (\text{A.35})$$

Waaruit blijkt dat ook de ξ -waarde weer een functie is van de gezochte d_2 -waarde.

A.7 Geavanceerde afleiding

De d_2 -waarde blijkt dus afhankelijk te zijn van de verhouding tussen de lengte van de beide overgangszones en daarmee ook weer van de (onbekende) d_2 -waarde zelf. Voor het 'oplossen' van dit probleem zal moeten worden teruggegrepen op de oorspronkelijke formuleringen voor de volumina.

Volumemutatie B-vak

Voor de toename van het volume in het B-vak geldt dan:

$$\Delta V_{B-zone} = \beta_B \Delta A_{B-profiel} L_B \quad (\text{A.36})$$

Ofwel:

$$\Delta V_{B-zone} = \beta_B (\alpha A_{onth}) \left(\gamma_B \frac{\alpha A_{onth}}{h_0} \right) \quad (\text{A.37})$$

$$\Delta V_{B-zone} = \beta_B \gamma_B \frac{(\alpha A_{onth})^2}{h_0} \quad (\text{A.38})$$

Volumemutatie A-vak

Voor het A-vak geldt:

$$\Delta V_{A-zone} = \beta_A \Delta A_{A-profiel} L_A \quad (\text{A.39})$$

Ofwel:

$$\Delta V_{A-zone} = \beta_A (h_A d_2) \gamma_A d_2 \quad (\text{A.40})$$

$$\Delta V_{A-zone} = \beta_A \gamma_A (h_A d_2^2) \quad (\text{A.41})$$

Gelijkstelling volumina

De gelijkstelling van deze volumina levert:

$$\beta_A \gamma_A (h_A d_2^2) = \beta_B \gamma_B \frac{(\alpha A_{onth})^2}{h_0} \quad (\text{A.42})$$

Bij gebruikmaking van de eerder geïntroduceerde relatieve laagdikte δ voor de verhouding tussen de h_0 - en h_A -waarde alsmede een additionele η -waarde conform:

$$\eta = \frac{\beta_B \gamma_B}{\beta_A \gamma_A} \quad (\text{A.43})$$

gaat bovenstaande relatie over in:

$$\delta(h_A d_2)^2 = \eta (\alpha A_{onth})^2 \quad (\text{A.44})$$

Substitutie van de formulering voor de α -waarde resulteert in:

$$\delta(h_A d_2)^2 = \eta \left(\left(1 - \frac{h_0 d_2}{A_{onth}} \right) A_{onth} \right)^2 \quad (\text{A.45})$$

Oplossing vergelijking

Uit deze uitdrukking moet vervolgens d_2 -waarde 'buiten haakjes' worden gehaald. Dit kan aan de hand van de volgende stappen.

$$\delta(h_A d_2)^2 = \eta (A_{onth} - h_0 d_2)^2 \quad (\text{A.46})$$

$$\delta(h_A d_2)^2 = \eta (A_{onth}^2 - 2h_0 d_2 + (h_0 d_2)^2) \quad (\text{A.47})$$

$$(\delta h_A^2 - \eta h_0^2) d_2^2 + (2\eta h_0 A_{onth}) d_2 + \eta A_{onth}^2 = 0 \quad (\text{A.48})$$

$$\left(\frac{\delta}{\eta} h_A^2 - h_0^2 \right) d_2^2 + (2h_0 A_{onth}) d_2 + A_{onth}^2 = 0 \quad (\text{A.49})$$

$$\left(\frac{1}{\eta \delta} h_0^2 - h_0^2 \right) d_2^2 + (2h_0 A_{onth}) d_2 + A_{onth}^2 = 0 \quad (\text{A.50})$$

$$\left(\frac{1}{\eta \delta} - 1 \right) h_0^2 d_2^2 + (2h_0 A_{onth}) d_2 + A_{onth}^2 = 0 \quad (\text{A.51})$$

Uiteindelijk resulteert dit in:

$$d_2 = \left(\frac{A_{onth}}{h_A} \right) \left[\frac{1}{\sqrt{\delta/\eta} + \delta} \right] \quad (\text{A.52})$$

A.8 Samenvatting resultaten

Formulering d_2 -waarde

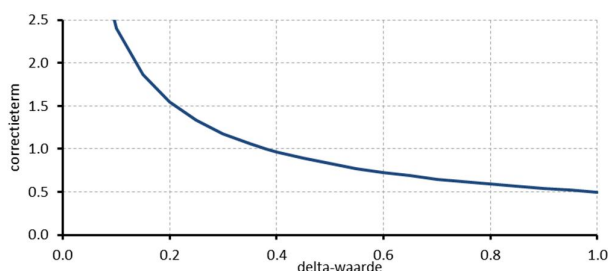
De grootte van de extra afslag volgt dus uit de laatste vergelijking. Voor $\eta = 1$ leidt deze tot:

$$d_2 = \left(\frac{A_{onth}}{h_A} \right) \left[\frac{1}{\sqrt{\delta} + \delta} \right] \quad (\text{A.53})$$

Ofwel:

$$d_2 = \left(\frac{A_{onth}}{\sqrt{h_A h_0} + h_0} \right) \quad (\text{A.54})$$

Voor het inzicht in deze formulering is de eerste formulering feitelijk het meest geschikt. De eerste term in deze vergelijking (A_{onth}/h_A) heeft immers een relatie met de extra teruggang zoals deze als maximum ook voor het ontgravingsspoor wordt gevonden. In dat geval moet het onthoudingsvolume worden vervangen door het ontgravingsvolume. Als deze term (A_{onth}/h_A) wordt gezien als de basiswaarde, dan levert de tweede term daar in feite een correctie op. Afhankelijk van de grootte van de δ -waarde wordt de basiswaarde al dan niet gereduceerd (zie figuur).



Figuur A.5.4 Afhankelijkheid correctieterm van deltawaarde

De rechter term resulteert in een factor 1 voor $\delta = 0,38$. Grotere waarden worden gevonden voor lagere δ -waarden en dus meer zeewaarts gelegen constructies (grotere d_1 -waarden). Grotere δ -waarden en dus meer landwaarts gelegen constructies (kleinere d_1 -waarden) resulteren in lagere correcties. Het theoretische minimum is gelijk aan 0,5 (en wordt gevonden voor $\delta = 1$).

Lengte overgangszones

Voor de grootte van de overgangszones is voor de bepaling van de d_2 -waarde met name de relatieve omvang van de beide zones van belang. De absolute waarde doet er feitelijk niet eens toe. De grootte van de ξ -waarde (als quotiënt van de L_B - en L_A -waarde blijkt gelijk aan:

$$\xi = \sqrt{\frac{\eta}{\delta}} \quad (\text{A.55})$$

Voor $\eta = 1$ leidt dit tot:

$$\xi = \sqrt{\frac{1}{\delta}} = \sqrt{\frac{h_A}{h_0}} \quad (\text{A.56})$$

Omdat h_A per definitie groter is dan h_0 , zal de ξ -waarde ook groter dan de eenheid zijn. Teruggrijpend op de oorspronkelijke formulering voor deze maat geldt dus:

$$L_B = \sqrt{\frac{h_A}{h_0}} L_A \quad (\text{A.57})$$

De lengte L_B is volgens deze uitwerking dus per definitie iets groter dan de afstand L_A . Voor bijvoorbeeld $\delta=0,5$ bedraagt deze verhouding 1,4. De daadwerkelijke lengte van de overgangszone is gekoppeld aan de grootte van de door de uitwisseling geïnduceerde aanpassing van het profielniveau. De hiermee verband houdende profielhellingen zullen in de evenwichtssituatie waarschijnlijk gekoppeld zijn aan de helling in dwarsrichting van het profiel. Het lijkt immers niet aannemelijk dat de langshellingen veel steiler zijn dan deze

waarde. Dit komt dus ook tot uitdrukking in de verhouding tussen de extra achteruitgang en de lengte van de overgangszone. Voor de A-zone geldt immers:

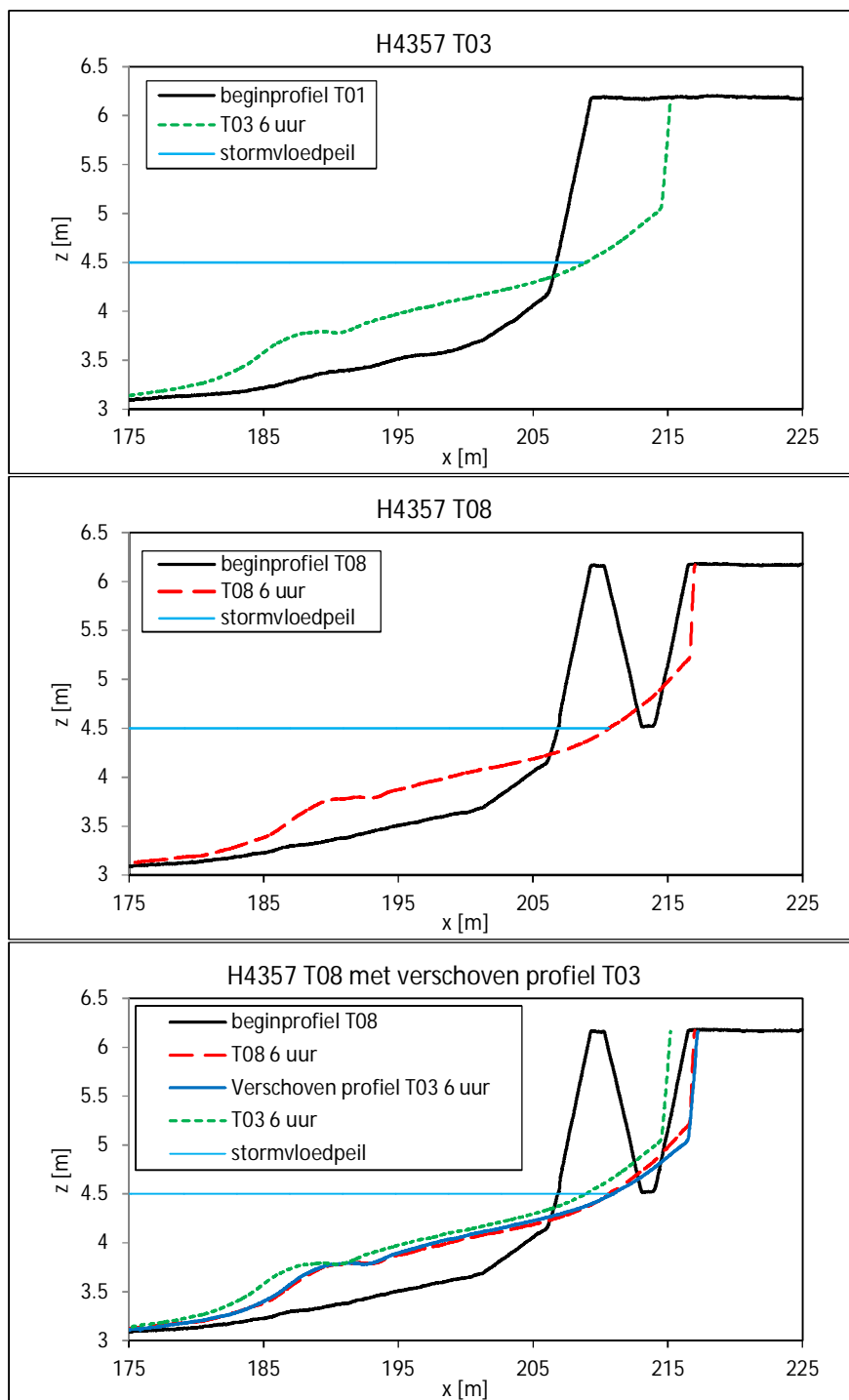
$$L_A = \gamma_A d_2 \quad (\text{A.58})$$

Ofwel:

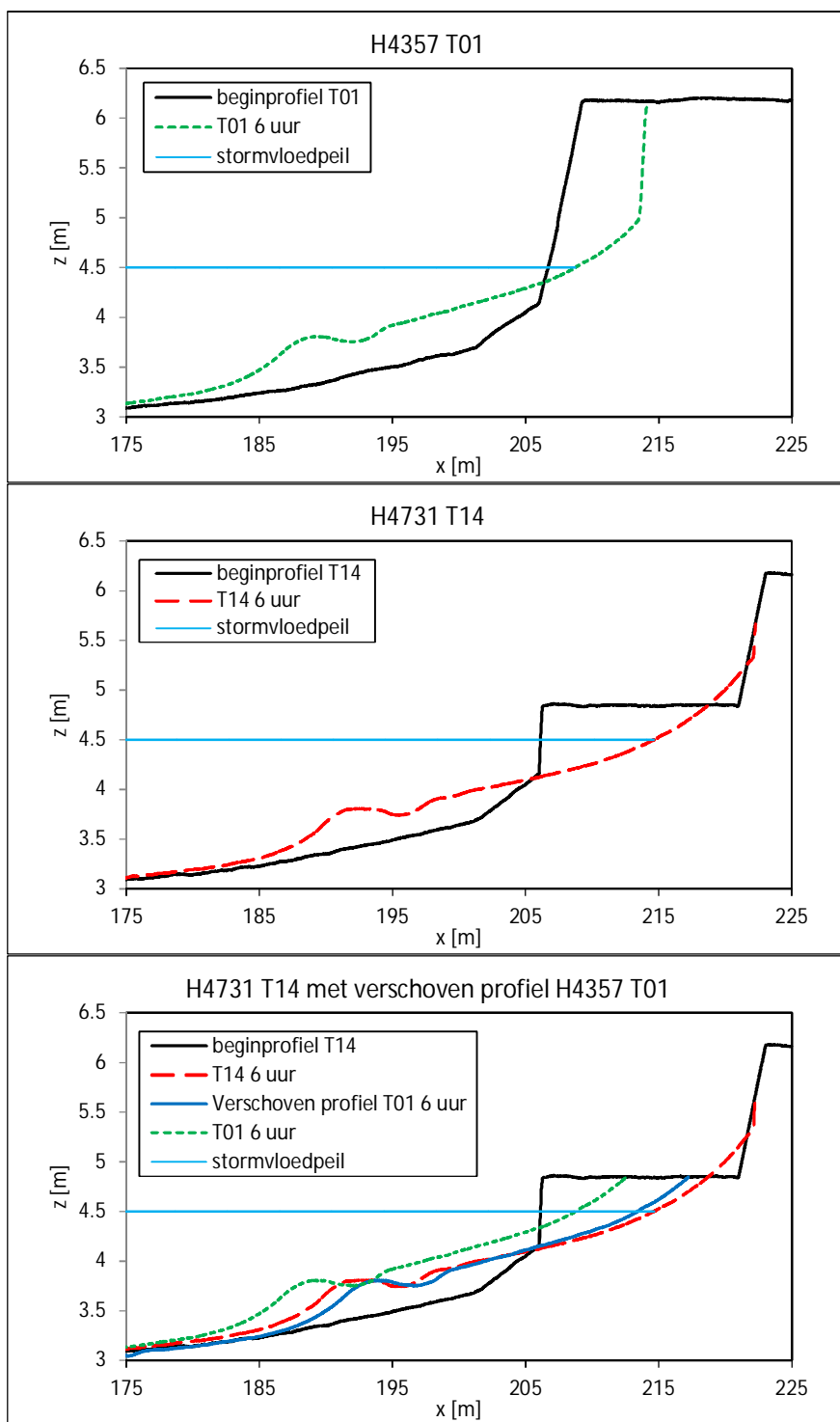
$$\frac{L_A}{d_2} = \gamma_A \quad (\text{A.59})$$

Als deze waarde gekoppeld is aan een karakteristieke helling dan zou kunnen worden gedacht aan iets van orde 30. Bij een extra achteruitgang van 5 m zou dit dus betekenen dat de lengte van de overgangszone naast de constructie 150 m bedraagt. De overgangszone voor de constructie zou iets langer zijn en uitkomen op 200 tot 250 m.

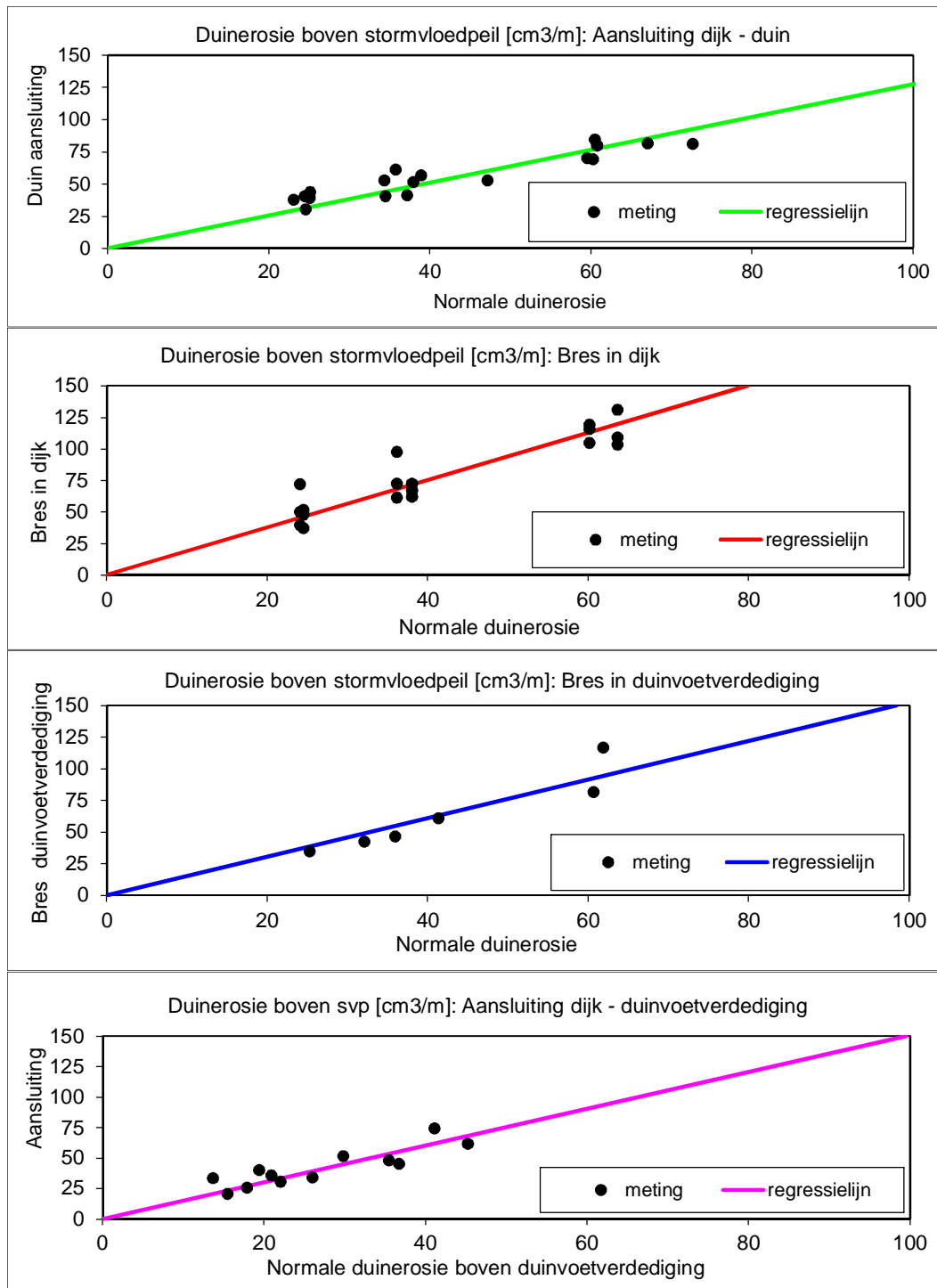
B Resultaten laboratoriumonderzoek



Figuur B.1 Validatie Spoor 1 met afslag landwaarts van NWO



Figuur B.2 Validatie Spoor 1 met afslag niet landwaarts van NWO



Figuur B.3 Regressie van metingen van duinafslag bij aansluitingen of in een bres ten opzichte van ongestoorde situatie

C Berekeningen DUROSTA en XBEACH1D

C.1 Inleiding

C.1.1 Algemeen

Deze bijlage geeft een uitgebreidere toelichting op de modelberekeningen die zijn uitgevoerd om het effect op de ligging van het afslagpunt van een Niet-Waterkerend Object (NWO) in een duinwaterkering te kwantificeren. Specifiek gaat het hierbij om (1D) situaties waarbij een (van een kelder voorziene) NWO wordt gerepresenteerd als een 'gat' in een duinprofiel (= volumeonthouding door ontgraving). Het doorrekenen van het (veiligheids-) effect van duinontgravingen met verschillende afmetingen en posities op het duin, zal moeten leiden tot een eenvoudige rekenregel waarmee, zonder gebruik van rekenmodellen, een eerste (conservatieve) inschatting kan worden gedaan van het effect van een NWO in een duinwaterkering.

C.1.2 Rekenmodellen

In deze studie zijn drie rekenmodellen beschouwd die in meer of mindere mate geschikt zijn voor het bepalen van de te verwachten hoeveelheid duinafslag tijdens maatgevende stormcondities.

DUROS+	Het volumebalansmodel DUROS+ is onderdeel van het wettelijk toetsingsinstrumentarium (<i>VTV2006</i>). Het model is alleen toepasbaar voor 'eenvoudige' (1D) dwarsprofielen.
DurosTA	DurosTA is een tijdsafhankelijk en proces-gebaseerd rekenmodel waarmee profielveranderingen kunnen worden gesimuleerd gedurende stormperiodes. In tegenstelling tot DUROS+, is DurosTA ook in staat om te rekenen met complexere dwarsprofielen en met niet-erodeerbare bodemlagen.
XBeach	Het meest recent ontwikkelde duinafslagmodel dat is beschouwd, is XBeach. Het model is, net als DurosTA, een proces-gebaseerd rekenmodel waarmee morfologische veranderingen tijdens stormcondities kunnen worden gesimuleerd. XBeach is in meerdere opzichten een geavanceerder model dan DurosTA, en is in staat om zowel (1D) profielberekeningen als ook 2DH berekeningen uit te voeren.

C.1.3 Aanpak

Om meer inzicht te krijgen in de effecten van duinontgravingen op de positie van de afslaglijn tijdens stormcondities, is een reeks modelberekeningen uitgevoerd met elk van de drie hierboven genoemde duinafslagmodellen. Deze uitwerkingen beperken zich tot 1D situaties met enkelvoudige ontgravingen in het duin. In totaal zijn er drie 'variabelen' beschouwd voor de definitie van de grootte en de positie van de duinontgraving:

- 1) minimale niveau van ontgraving,
- 2) positie zeezijde ontgraving, en
- 3) positie landzijde ontgraving.

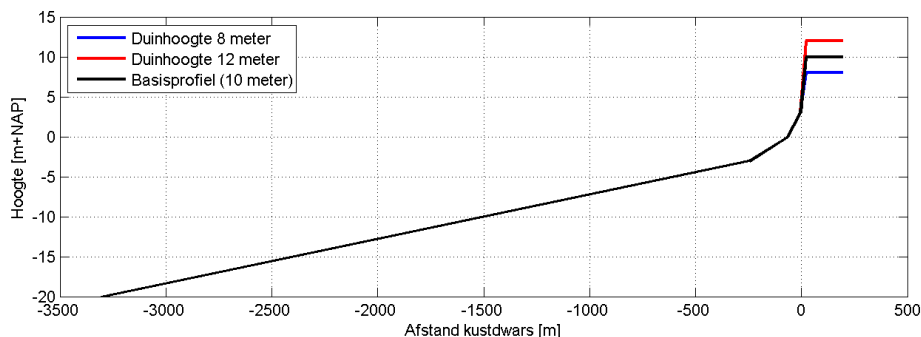
Door de instellingen voor elk van deze parameters te variëren worden alle (realistische) combinaties van grootte en positie beschouwd, waarvoor het effect op de positie van de afslaglijn wordt berekend.

C.2 Uitgangspunten modelberekeningen

Alvorens de modelopzet per rekenmodel te presenteren, zijn in deze sectie allereerst de algemene uitgangspunten voor de 1D duinafslagberekeningen toegelicht die voor elk van de drie modellen gelijk zijn. In onderstaande sub-secties is aandacht besteed aan de definitie van het referentie-dwarsprofiel en de variaties daarop (duinontgravingen), en zijn de gehanteerde hydraulische randvoorwaarden en sedimentkarakteristieken beschreven.

C.2.1 Definitie van dwarsprofielen

Voor de duinafslagberekeningen is uitgegaan van een standaard profielvorm die karakteristiek is voor de Hollandse Kust: het zogenaamde “referentieprofiel”. Het referentieprofiel voor deze studie heeft een constant duinniveau op NAP +10 m, en het nulpunt van de horizontale as valt samen met de profieldoorsnijding op het niveau NAP +5 m. Het meest zeewaartse punt van het referentieprofiel ligt op het niveau NAP -20 m. In figuur C.1 is het gehanteerde referentieprofiel weergegeven.



Figuur C.1 Referentieprofiel voor de Nederlandse Kust, met “x=0” ter plaatse van de NAP+5m doorsnijding.

Om het effect van duinontgravingen te kwantificeren is een grote hoeveelheid berekeningen uitgevoerd met (rechthoekige) ontgravingen van verschillende omvang en op verschillende posities op het duin. De drie parameters die zijn gevarieerd voor deze berekeningen, zijn: minimaal niveau, positie zeezijde, en positie landzijde. In Tabel C.1 is samengevat welke rekenwaarden zijn gehanteerd voor elk van deze variabelen.

In totaal zijn er $7 \times 23 \times 23 = 3703$ combinatie op basis van de gegeven waarden in Tabel C.1, maar als enkel ‘positieve’ ontgravingsbreedten worden beschouwd (ofwel: $X_{zee} > X_{land}$), dan blijven er $7 \times 23 \times 12 = 1932$ combinaties over. Met de gekozen instellingen van de drie parameters zijn ontgravingen gedefinieerd met afmetingen van 2×5 m tot 8×115 m (= *diepte* x *breedte*), en op verschillende afstanden vanaf het duinfront.

Minimaal niveau ontgraving		Positie zeezijde ontgraving		Positie landzijde ontgraving
NAP +2 m		x = -15 m		x = -20 m
NAP +3 m		x = -20 m		x = -25 m
NAP +4 m		x = -25 m		x = -30 m
NAP +5 m		x = -30 m		x = -35 m
NAP +6 m		x = -35 m		x = -40 m
NAP +7 m		x = -40 m		x = -45 m
NAP +8 m		x = -45 m		x = -50 m
		x = -50 m		x = -55 m
		x = -55 m		x = -60 m
		x = -60 m		x = -65 m
		x = -65 m		x = -70 m
		x = -70 m		x = -75 m
		x = -75 m		x = -80 m
		x = -80 m		x = -85 m
		x = -85 m		x = -90 m
		x = -90 m		x = -95 m
		x = -95 m		x = -100 m
		x = -100 m		x = -105 m
		x = -105 m		x = -110 m
		x = -110 m		x = -115 m
		x = -115 m		x = -120 m
		x = -120 m		x = -125 m
		x = -125 m		x = -130 m

Tabel C.1 Overzicht van toegepaste rekenwaarden voor de drie parameters die grootte en positie van de ontgraving in het referentieprofiel definiëren: minimaal niveau, positie zeezijde en positie landzijde van ontgraving.

C.2.2 Hydraulische randvoorwaarden

Voor elk van de drie afslagmodellen zijn dezelfde hydraulische randvoorwaarden gehanteerd, zoals weergegeven in Tabel C.2. Er is gekozen voor standaard maatgevende stormcondities die representatief zijn voor de Nederlandse Kust.

Parameter	Waarde
Stormvloedpeil	NAP +5 m
Significante golfhoogte	9 m
Piekperiode	16 s

Tabel C.2 Overzicht van maatgevende stormcondities die zijn gebruikt voor de duinafslagberekeningen.

C.2.3 Sedimentkarakteristieken

Alle duinafslagberekeningen zijn gebaseerd op eenzelfde rekenwaarde voor het sediment. Er is uitgegaan van een constante korrelgrootteverdeling langs de dwarsprofielen, met een mediane korreldiameter (D_{50}) van 225 μm .

C.3 Modelopzet

Ter aanvulling op de algemene uitgangspunten voor de berekeningen zijn in deze sectie alle model-specifieke onderdelen van de modelopzet gepresenteerd. Achtereenvolgens wordt de modelopzet van elk van de drie rekenmodellen toegelicht.

C.3.1 DUROS+

Voor de modelopzet van het volumebalansmodel DUROS+ zijn geen aanvullende gegevens nodig, anders dan de basisgegevens die zijn gepresenteerd in de vorige sectie. Input voor dit model bestaat uit een dwarsprofiel, hydraulische randvoorwaarden en een representatieve D_{50} . Op basis van deze gegevens wordt een parabolisch afslagprofiel bepaald die in horizontale zin dusdanig wordt ingepast dat erosievolume en sedimentatievolume overeenkomen.

C.3.2 DurosTA

Het proces-gebaseerde rekenmodel DurosTA heeft niet veel meer invoergegevens dan het eenvoudigere DUROS+ model. De belangrijkste verschillen tussen de modelopzet van beide modellen is dat DurosTA tijdsafhankelijke hydraulische randvoorwaarden als invoer verwacht, en dat een gefixeerd rekenrooster gedefinieerd dient te worden voor de simulaties.

In deze studie is gekozen voor een constante hydraulische forcering (Tabellen C.2) gedurende een simulatieduur van 5 uur. De belangrijkste aanname hierbij is dat een simulatie van 5 uur met maximale stormcondities resulteert in vergelijkbare duinafslagresultaten als een simulatie met een realistisch (op- en aflopend) stormverloop voor 30 á 35 uur.

Voor de opzet van de DurosTA modellen is een rekenrooster gedefinieerd met ruimtelijk variërende roosterafstanden. Nabij de zeewaartse modelrand (rond NAP -20 m) is een roosterbreedte van 100 m aangehouden, en de ruimtelijke resolutie neemt stapsgewijs toe richting het duin. De minimale roosterafstand nabij het duinfront en in het duin is vastgesteld op 2 m.

Alle overige (niet specifiek benoemde) modelparameters voor DurosTA zijn als 'default' ingesteld.

C.3.3 XBeach

Het rekenmodel met de grootste mate van vrijheid qua instellingen en invoeropties is XBeach. De input voor het model is min of meer gelijk aan de invoergegevens die ook voor DurosTA zijn gebruikt: basisgegevens (uit vorige sectie) + simulatieduur van 5 uur met voorgeschreven hydraulische randvoorwaarden. Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van een automatisch gegenereerd rekenrooster (m.b.v. *XBeach toolbox in OpenEarthTools*) met ruimtelijk variërende roosterafstanden tussen 2 m (bij en in het duin) en 45 m (bij de offshore-rand).

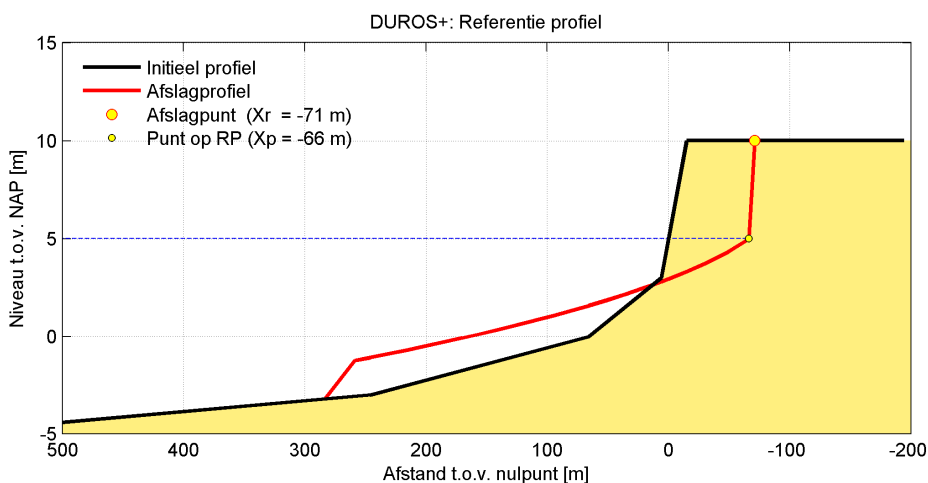
Waar mogelijk zijn de 'default' instellingen voor het XBeach model gebruikt (behorende bij *revisie 3041*), met enkele uitzonderingen en/of bijzonderheden die hieronder in meer detail zijn toegelicht.

MORFAC = 1	De morfologische acceleratorfactor is ingesteld op de waarde 1. Dit is de standaardinstelling voor deze parameter, maar bij het gebruik van XBeach wordt regelmatig een hogere factor gehanteerd om de rekentijd te verminderen. In deze studie is gekozen voor de standaardinstelling om ongewenste modeeffecten te voorkomen.
INSTAT = 41	Als golfforcering is gekozen voor een geschematiseerd JONSWAP golfspectrum dat is gebaseerd op de (dominante) golfcondities uit Tabel . Een dergelijke golfforcering wordt ingesteld met de modelinstelling <i>INSTAT = 41</i> , met bijbehorende invoergegevens.
DIRSPR = OFF	Voor de initialisatie van de golfforcering is gekozen voor een JONSWAP golfspectrum <i>zonder</i> richtingsspreiding; omdat dit voor 1D berekeningen (met beperkte duinhoogte) leidt tot betere resultaten.
NWAVEDIR = 1	Het aantal 'wave bins' waarmee XBeach rekent is voor de 1D sommen beperkt tot 1; omdat een groter aantal geen toegevoegde waarde heeft bij een 1D berekening.
DEPTHSCALE = 1	De parameter <i>depthscale</i> is ingesteld op de waarde 1 (= default).
EPSI = -1	De parameter <i>epsi</i> is ingesteld op 'automatisch' (= -1).
RANDOM = 0	De parameter <i>random</i> is ingesteld op de waarde 0.

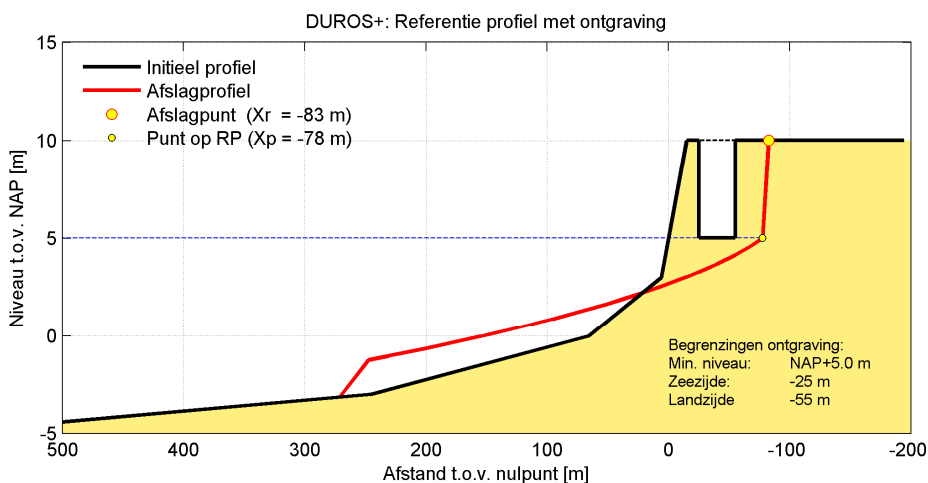
C.4 Resultaten van modelberekeningen

Op basis van de modelinstellingen die in bovenstaande secties zijn toegelicht, zijn duinafslag-berekeningen uitgevoerd voor een grote serie dwarsprofielen met ontgraving. In de hierop volgende sub-secties worden de modelresultaten voor alle afslagmodellen gepresenteerd.

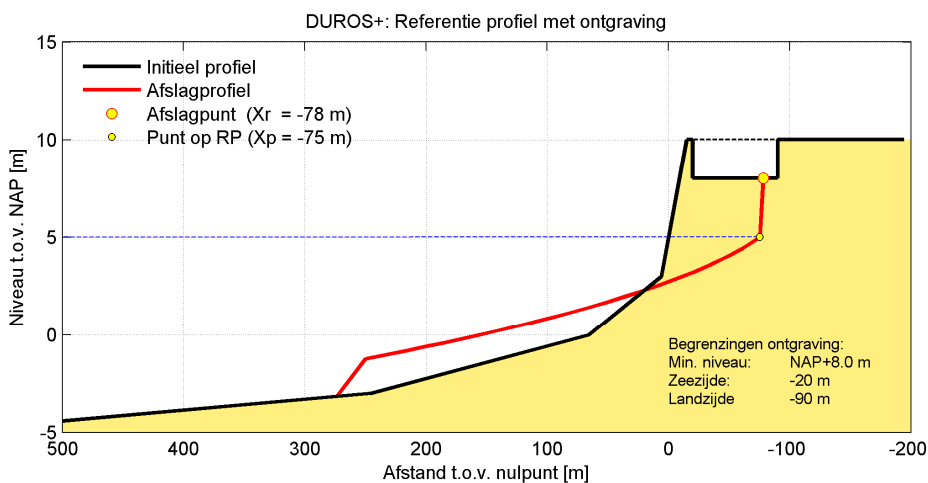
Voor elk van de modellen is eerst het resultaat van een referentieberekening *zonder* ontgraving weergegeven; gevolgd door twee voorbeeldresultaten van berekeningen *met* ontgravingen (smal/diep en breed/ondiep). Tot slot zijn, per model, de gecombineerde resultaten van alle rekenvarianten gepresenteerd. Voor een uitgebreidere toelichting bij de inhoud van de figuren wordt verwezen naar het hoofdrapport. Hieronder zijn enkel de resultaten gepresenteerd, zonder verdere toelichting.



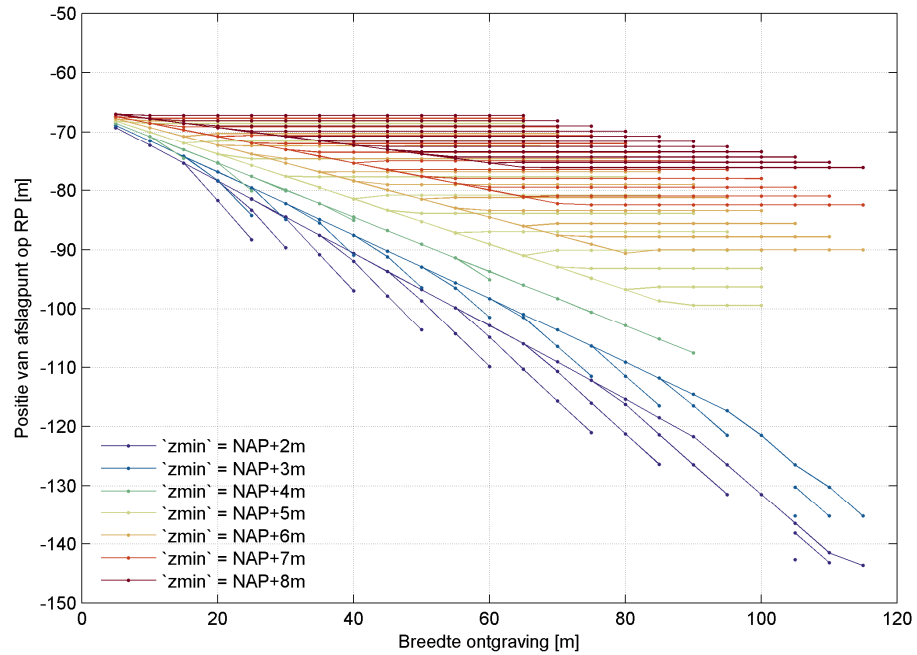
Figuur C.2 Resultaat duinafslagberekening met DUROS+, voor het referentieprofiel.



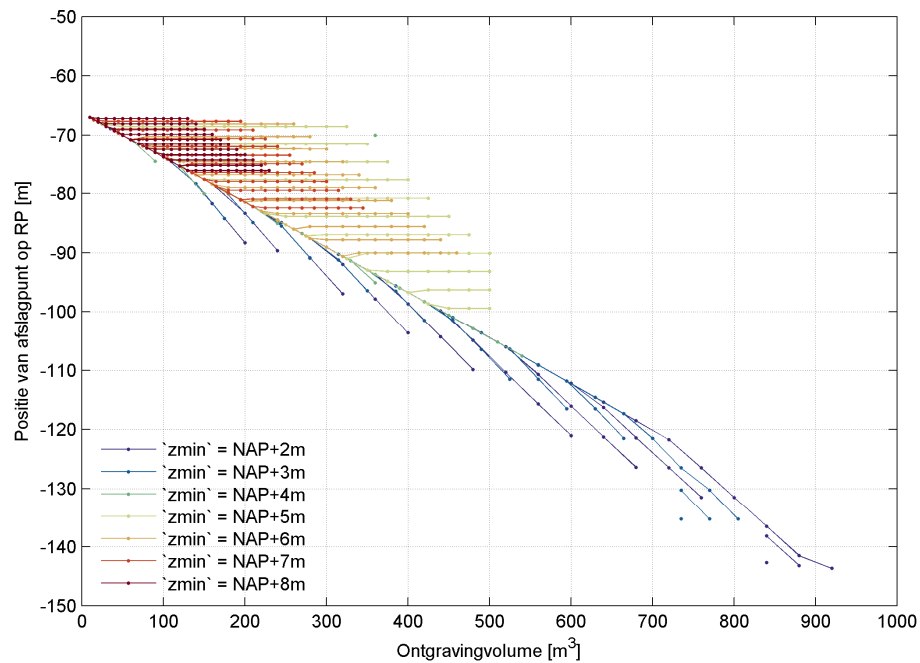
Figuur C.3 Resultaat duinafslagberekening met DUROS+, voor het referentieprofiel met ontgraving [1].



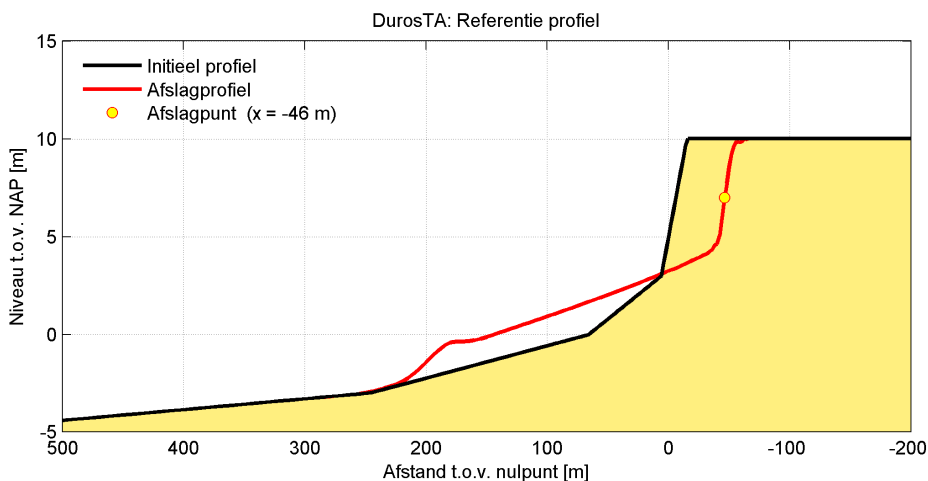
Figuur C.4 Resultaat duinafslagberekening met DUROS+, voor het referentieprofiel met ontgraving [2].



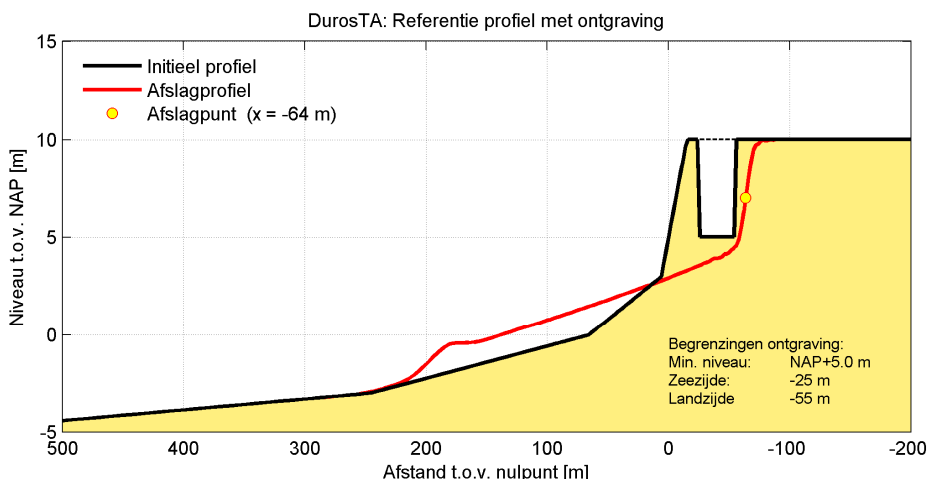
Figuur C.5 Gecombineerd resultaat van alle duinafslagberekningen met DUROS+: positie afslagpunt versus breedte van de ontgraving.



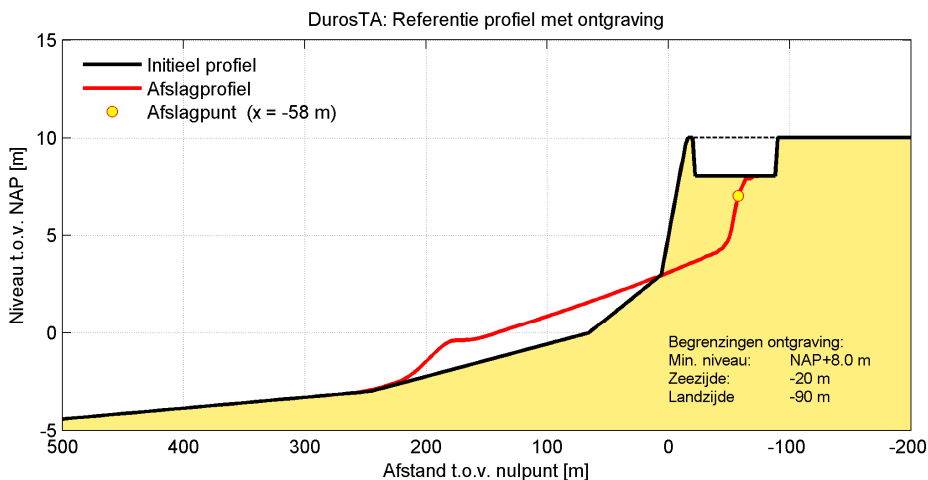
Figuur C.6 Gecombineerd resultaat van alle duinafslagberekningen met DUROS+: positie afslagpunt versus ontgravingsvolume.



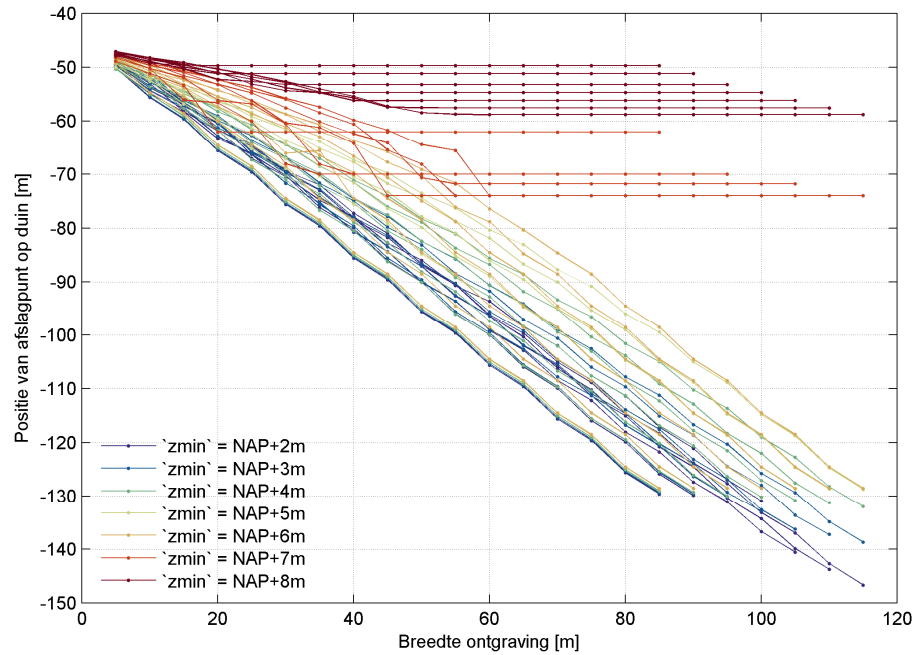
Figuur C.7 Resultaat duinafslagberekening met DurosTA, voor het referentieprofiel.



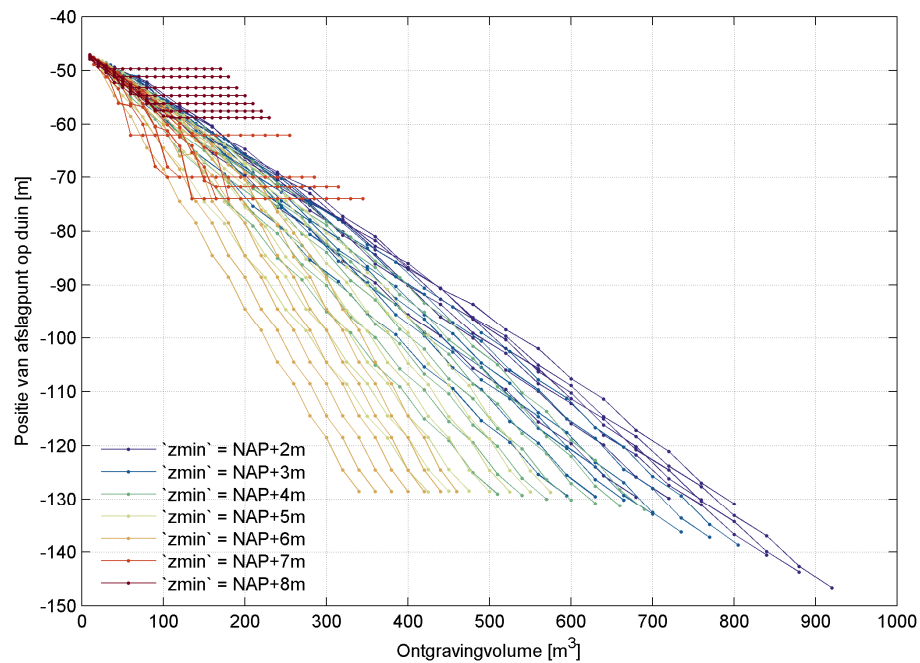
Figuur C.8 Resultaat duinafslagberekening met DurosTA, voor het referentieprofiel met ontgraving [1].



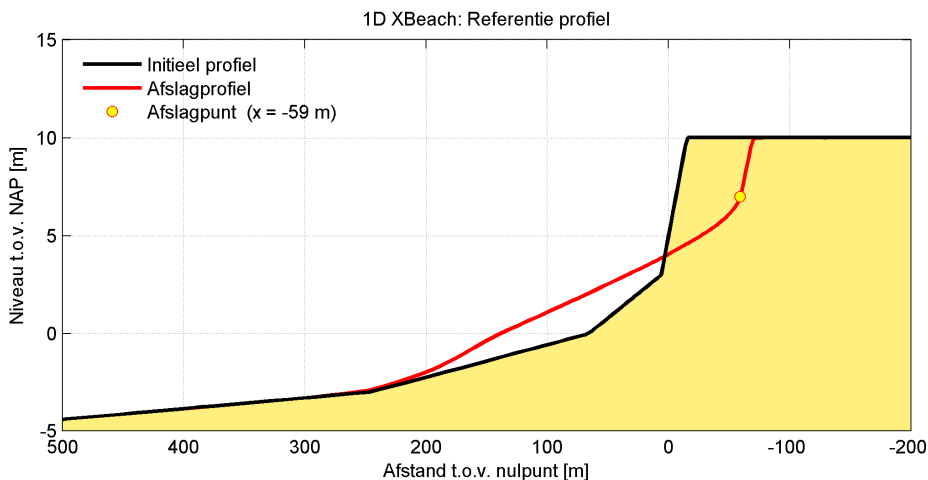
Figuur C.9 Resultaat duinafslagberekening met DurosTA, voor het referentieprofiel met ontgraving [2].



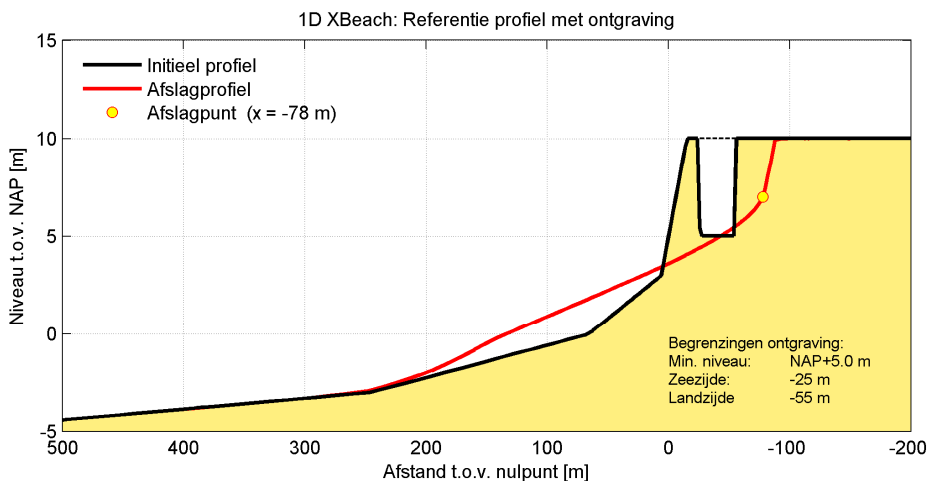
Figuur C.10 Gecombineerd resultaat van alle duinafslagberekeningen met DurosTA: positie afslagpunt versus breedte van de ontgraving.



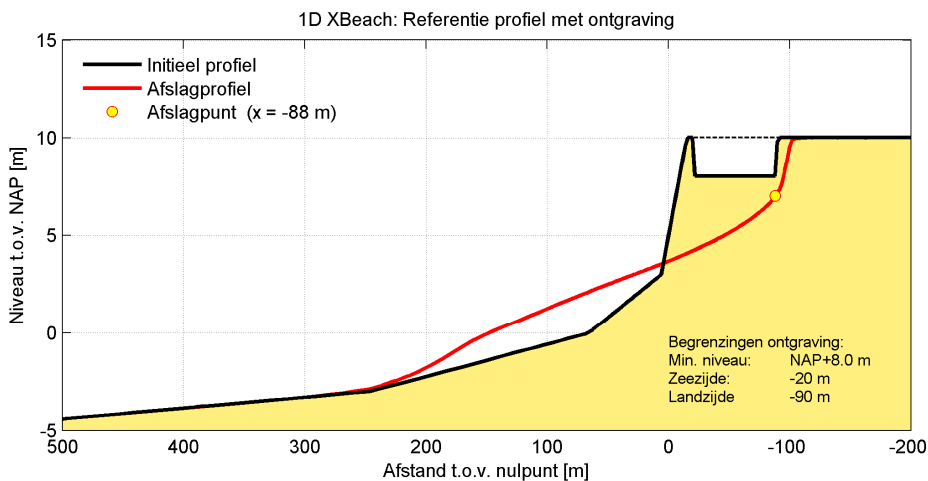
Figuur C.11 Gecombineerd resultaat van alle duinafslagberekeningen met DurosTA: positie afslagpunt versus ontgravingsvolume.



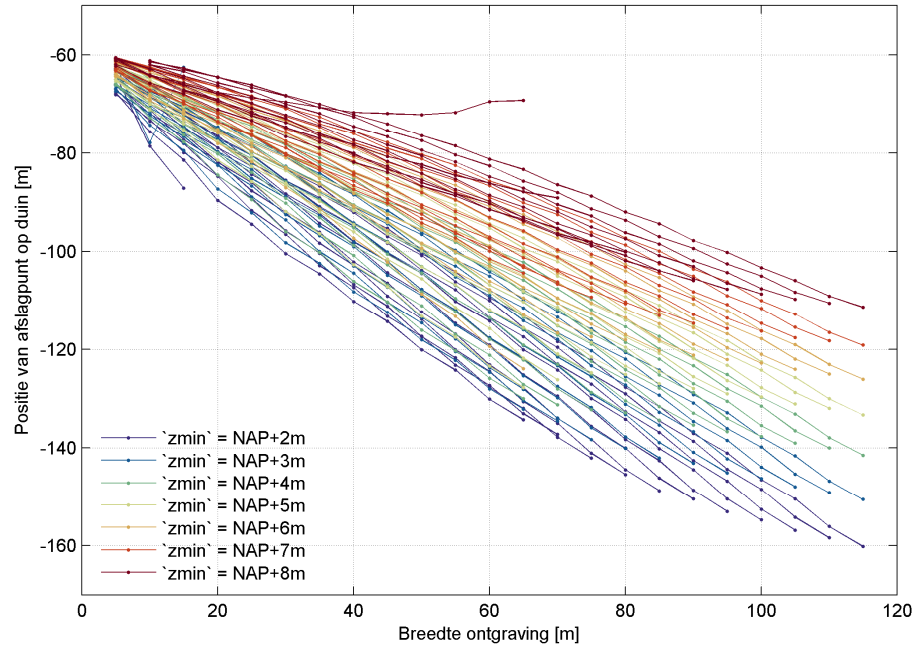
Figuur C.12 Resultaat duinafslagberekening met 1D XBeach, voor het referentieprofiel.



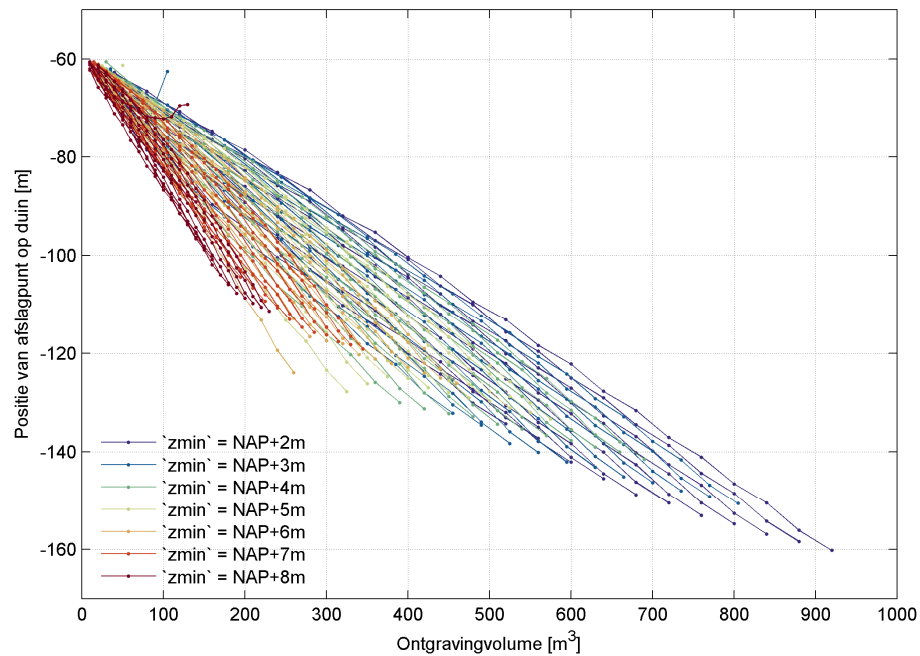
Figuur C.13 Resultaat duinafslagberekening met 1D XBeach, voor het referentieprofiel met ontgraving [1].



Figuur C.14 Resultaat duinafslagberekening met 1D XBeach, voor het referentieprofiel met ontgraving [2].



Figuur C.15 Gecombineerd resultaat van alle duinafslagberekeningen met 1D XBeach: positie afslagpunt versus breedte van de ontgraving.



Figuur C.16 Gecombineerd resultaat van alle duinafslagberekeningen met 1D XBeach: positie afslagpunt versus ontgravingsvolume.

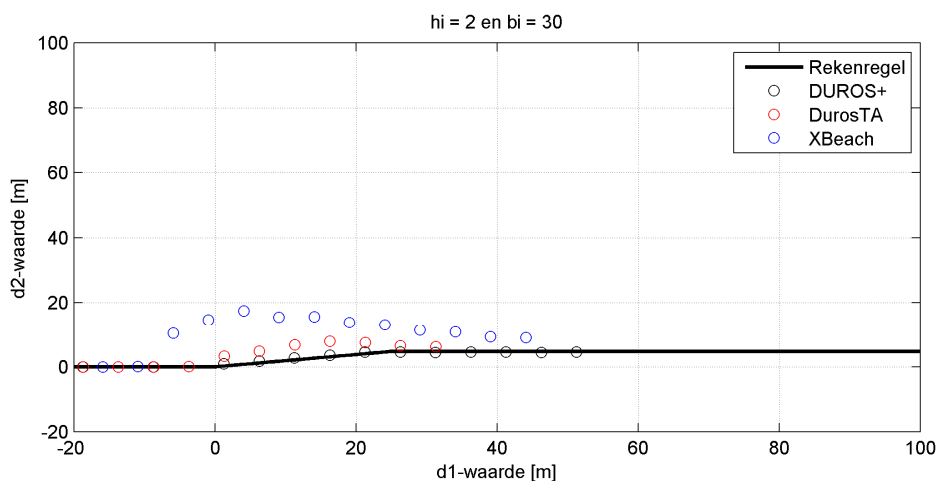
C.5 Analyse van modelresultaten

In de vorige sectie zijn de resultaten gepresenteerd van de modelberekeningen die zijn uitgevoerd om het effect van ontgravingen in een duin (op de positie van het afslagpunt) te kwantificeren. Er is daarbij gebruikt gemaakt van een drietal rekenmodellen: DUROS+, DurosTA en XBeach. Voor elk van deze modellen zijn de resultaten in eerste instantie apart geanalyseerd en beschreven. In deze sectie wordt in meer detail een vergelijking gemaakt tussen de resultaten van de drie rekenmodellen en de rekenregel is afgeleid op basis van een theoretische uitwerking; zie vergelijking (3.20).

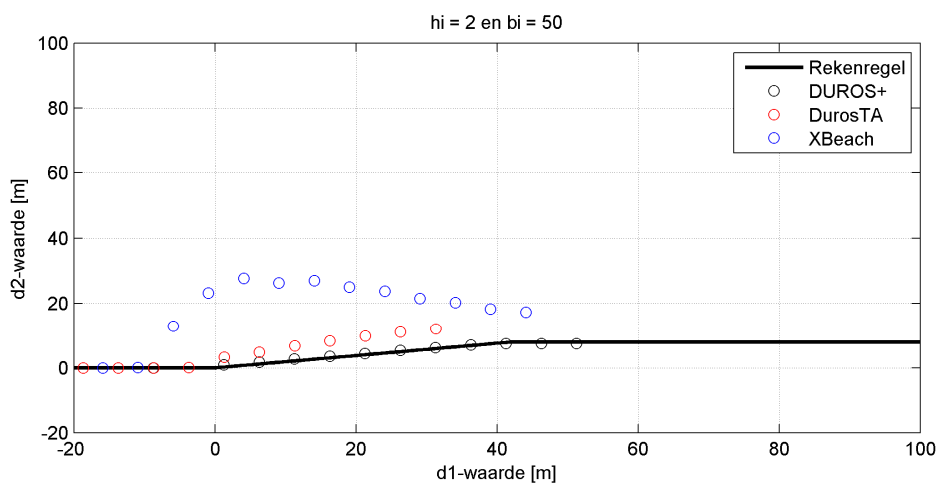
Om de modelresultaten te kunnen vergelijken met de rekenregel, zijn eerst de relevante parameters afgeleid voor alle situaties die zijn doorgerekend. Voor elk van de modelresultaten zijn de volgende parameters vastgesteld:

- d_1 >> afstand tussen voorzijde ontgraving en ongestoord afslagpunt
- d_2 >> afstand tussen afslagpunt en ongestoord afslagpunt (= extra teruggang)

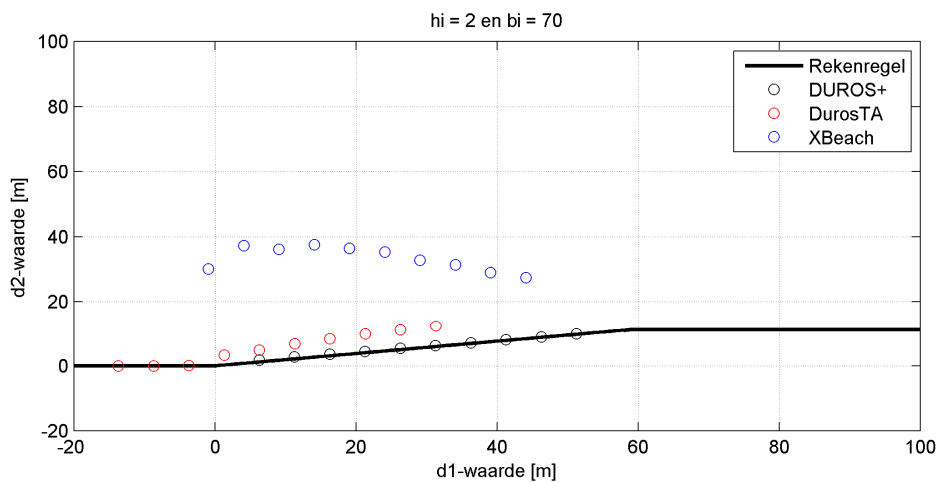
De resultaten van de modelberekeningen zijn vervolgens vergeleken met de rekenregel, waarbij de overige parameters die nodig zijn voor het invullen van de rekenregel (h_i , b_i , h_{rest} , h_A) direct volgen uit de karakteristieken van de beschouwde ontgraving. Voor verschillende combinaties van ontgravingsbreedte en ontgravingsdiepte zijn figuren gemaakt waarin de relatie tussen d_2 en d_1 is weergegeven, op basis van de rekenregel enerzijds en de drie modelresultaten anderzijds.



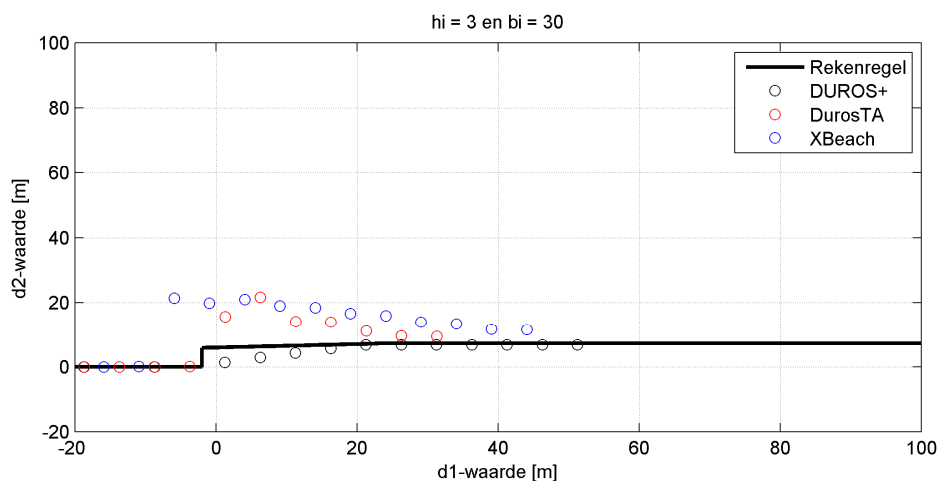
Figuur C.17 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 2$ m en $b_i = 30$ m



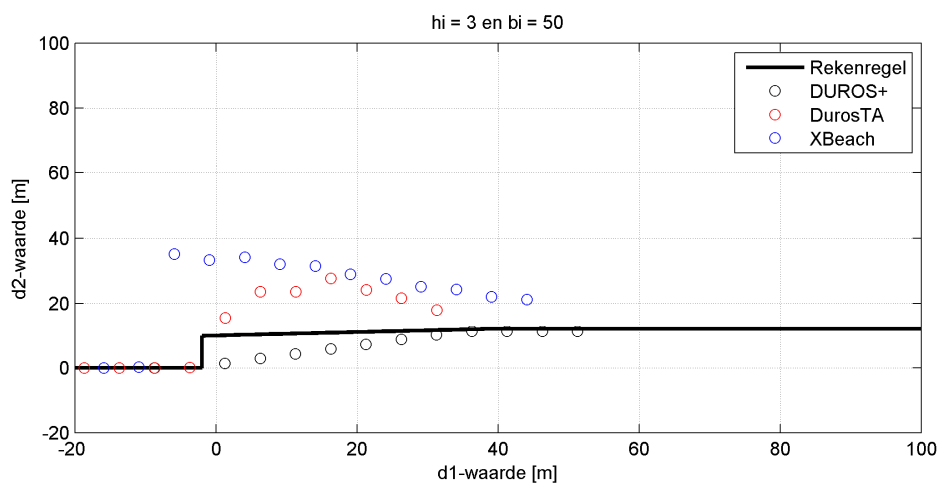
Figuur C.18 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 2$ m en $b_i = 50$ m



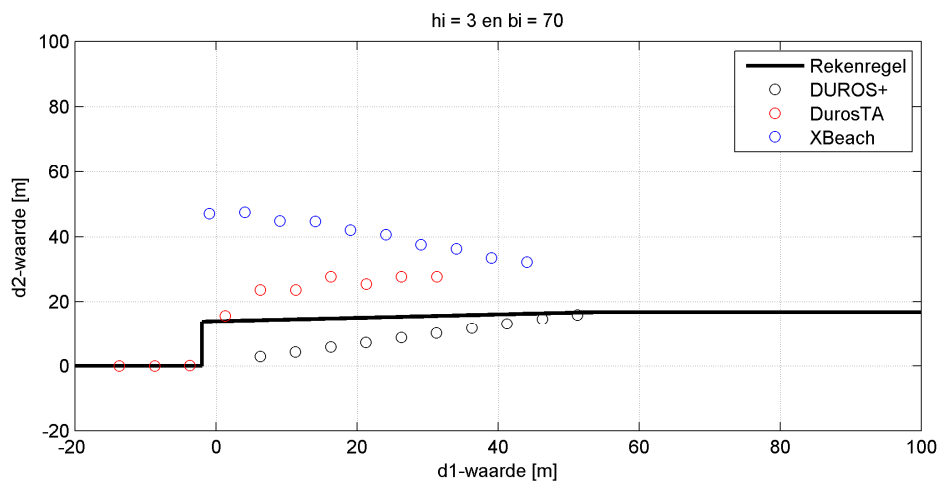
Figuur C.19 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 2$ m en $b_i = 70$ m



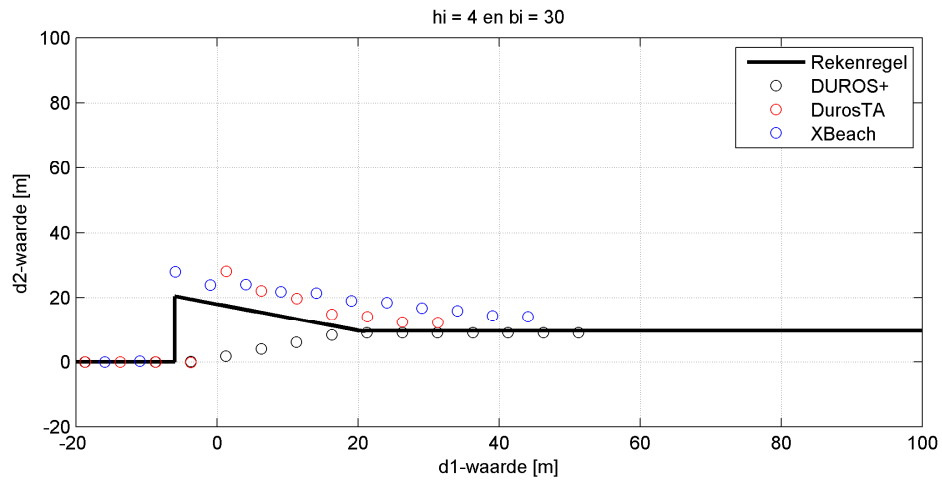
Figuur C.20 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 3$ m en $b_i = 30$ m



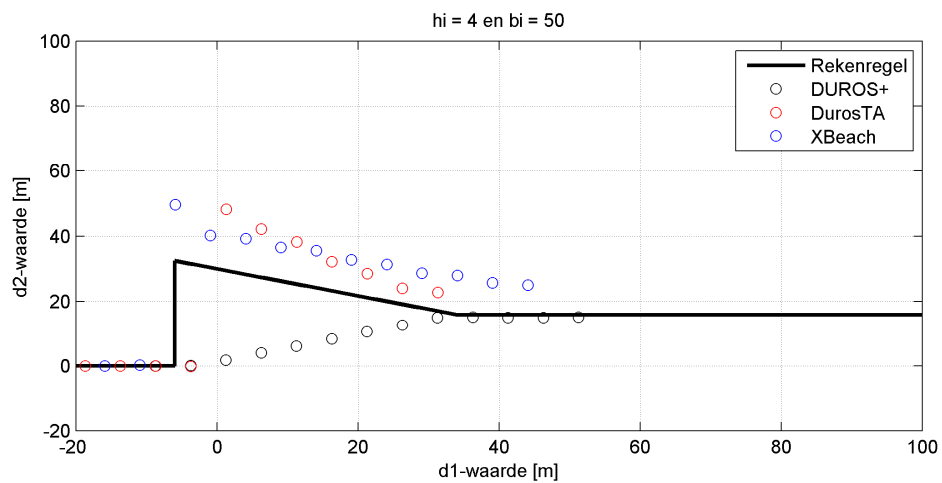
Figuur C.21 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 3$ m en $b_i = 50$ m



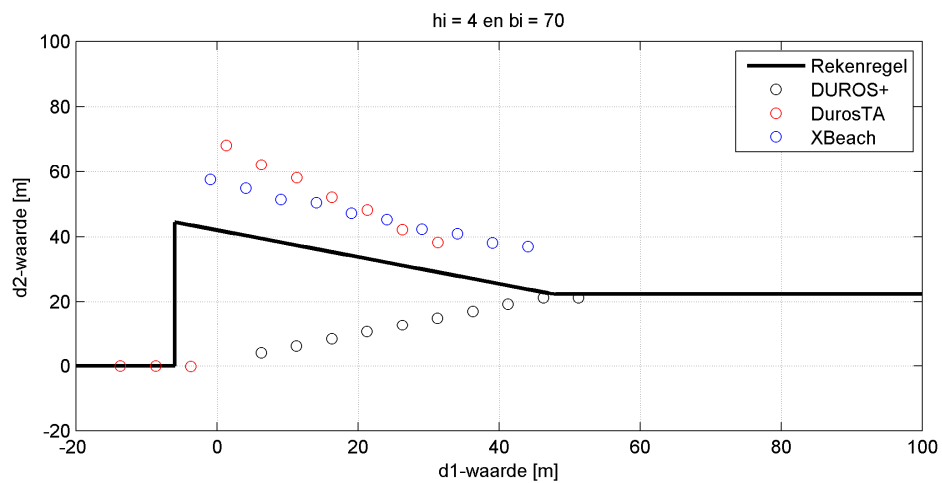
Figuur C.22 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 3$ m en $b_i = 70$ m



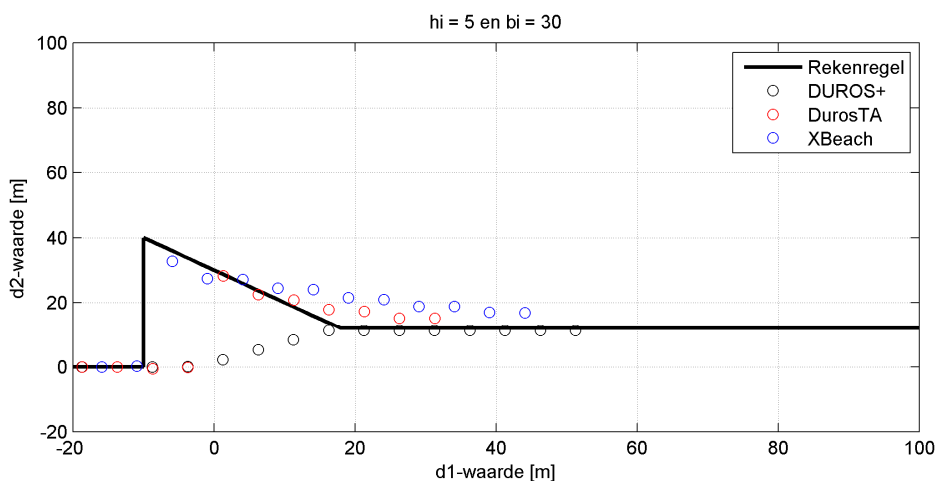
Figuur C.23 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 4$ m en $b_i = 30$ m



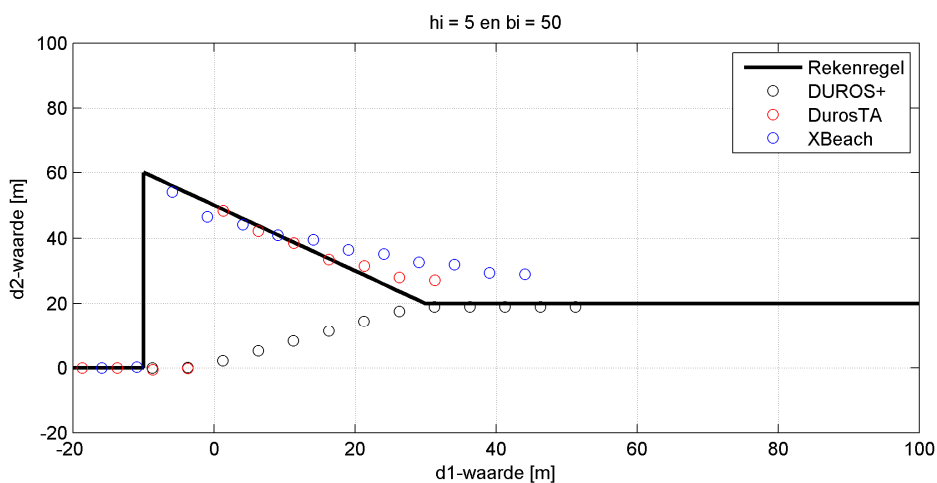
Figuur C.24 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 4$ m en $b_i = 50$ m



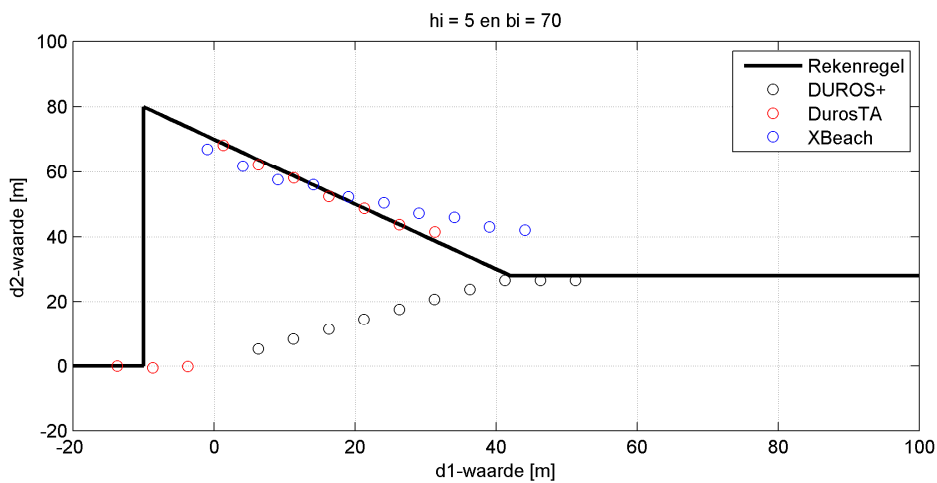
Figuur C.25 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 4$ m en $b_i = 70$ m



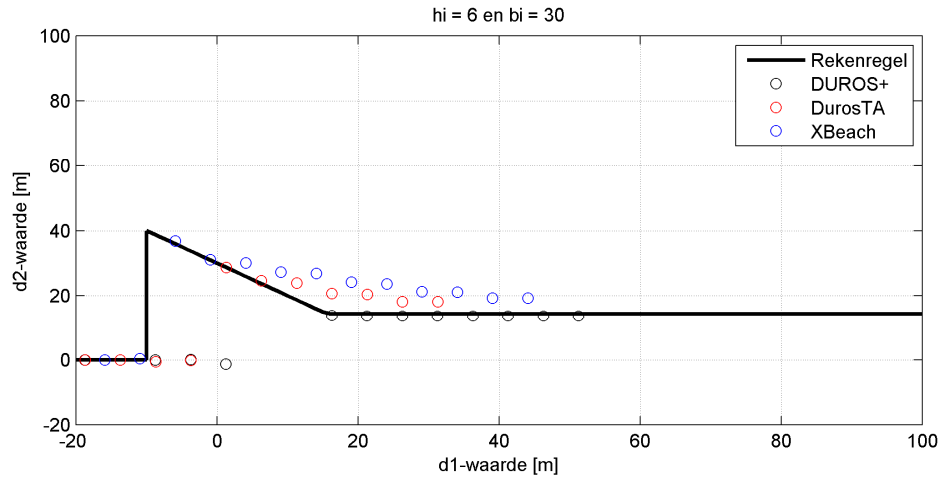
Figuur C.26 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 5$ m en $b_i = 30$ m



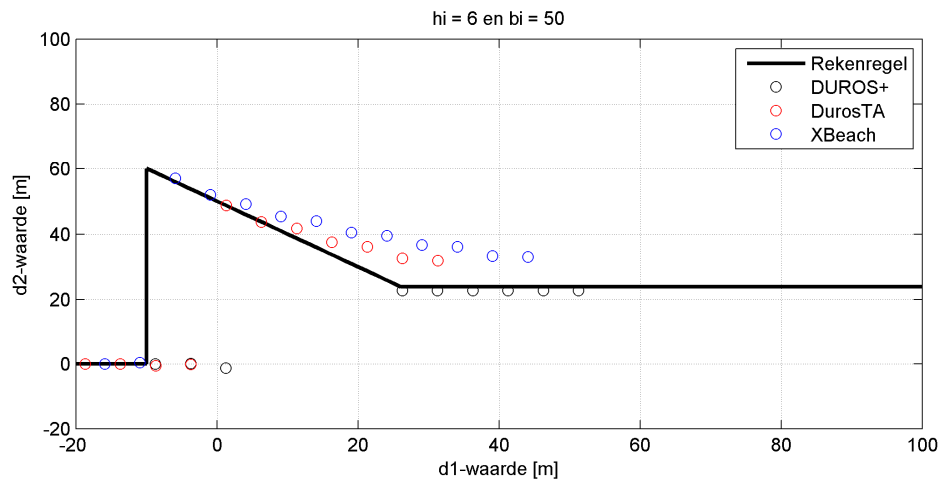
Figuur C.27 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 5$ m en $b_i = 50$ m



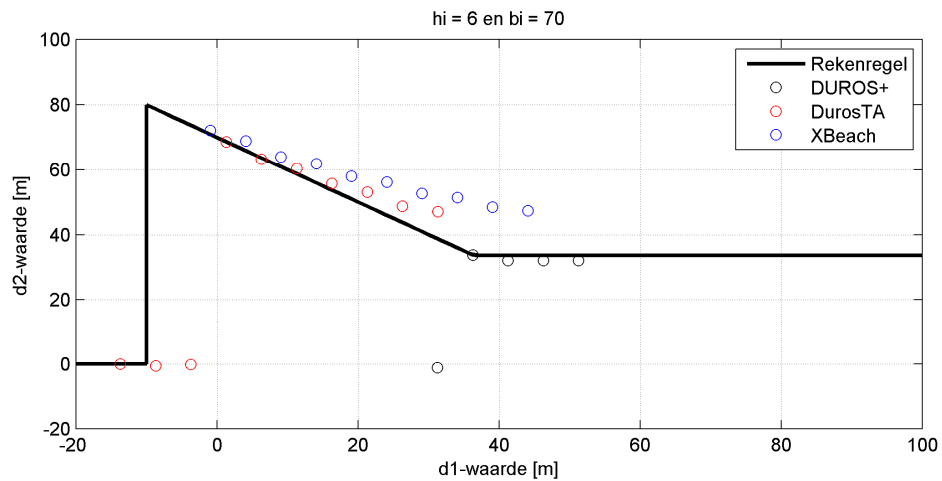
Figuur C.28 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 5$ m en $b_i = 70$ m



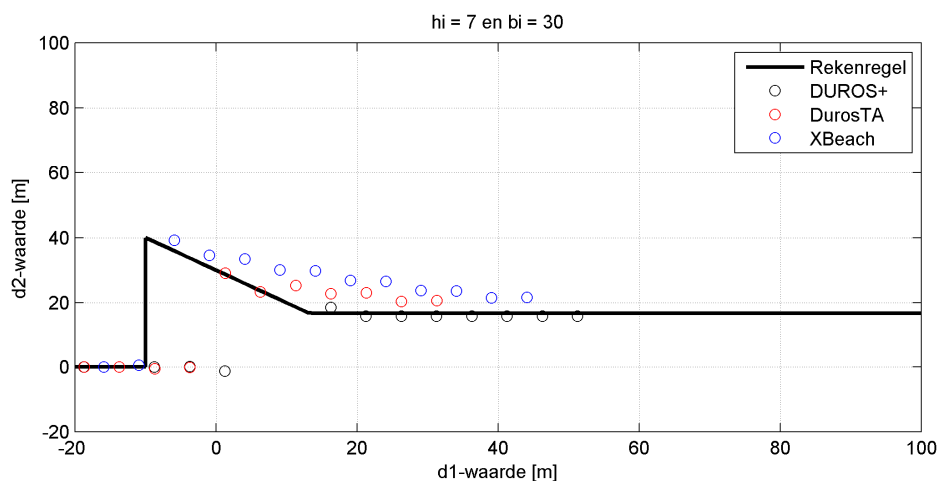
Figuur C.29 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 6$ m en $b_i = 30$ m



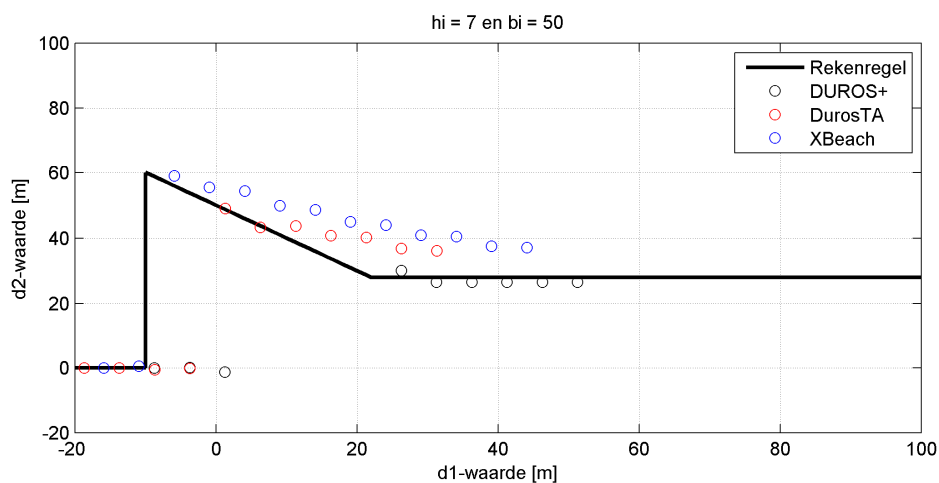
Figuur C.30 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 6$ m en $b_i = 50$ m



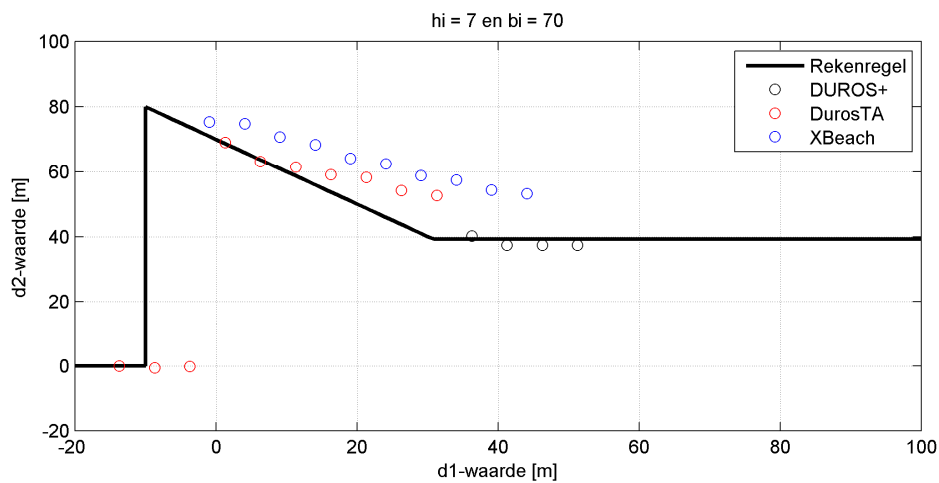
Figuur C.31 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 6$ m en $b_i = 70$ m



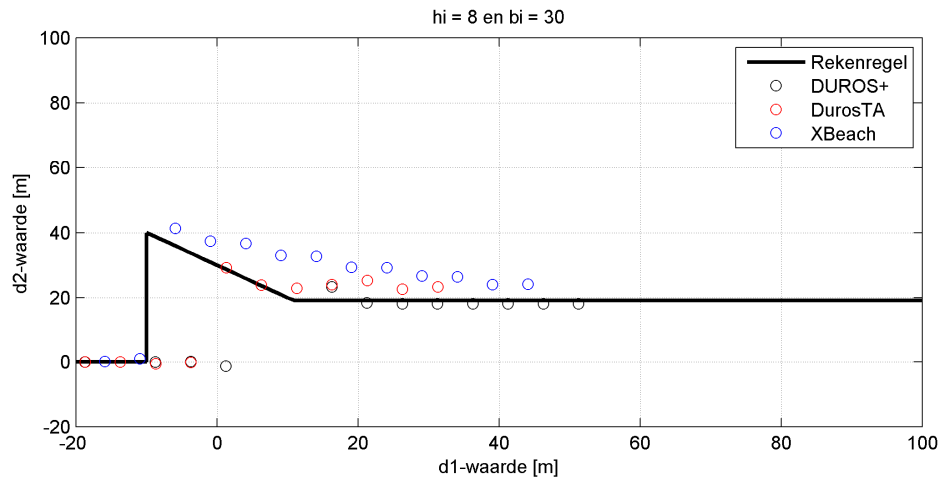
Figuur C.32 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 7$ m en $b_i = 30$ m



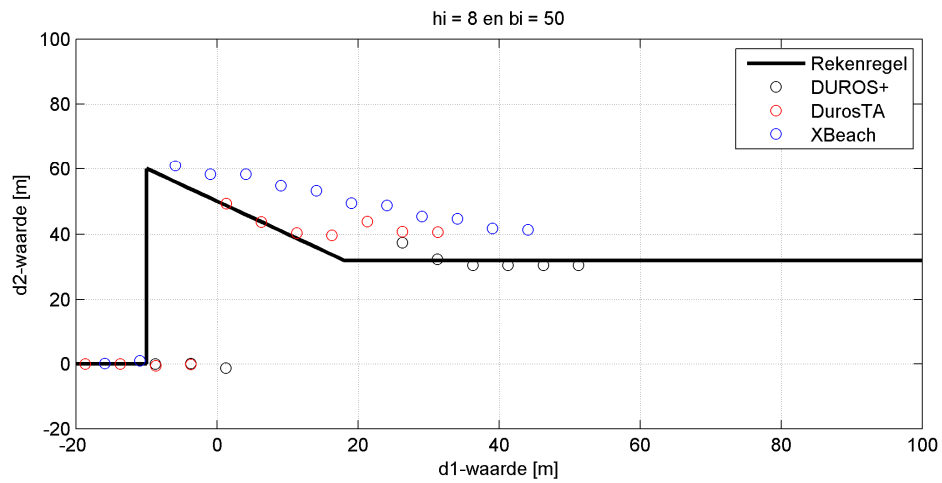
Figuur C.33 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 7$ m en $b_i = 50$ m



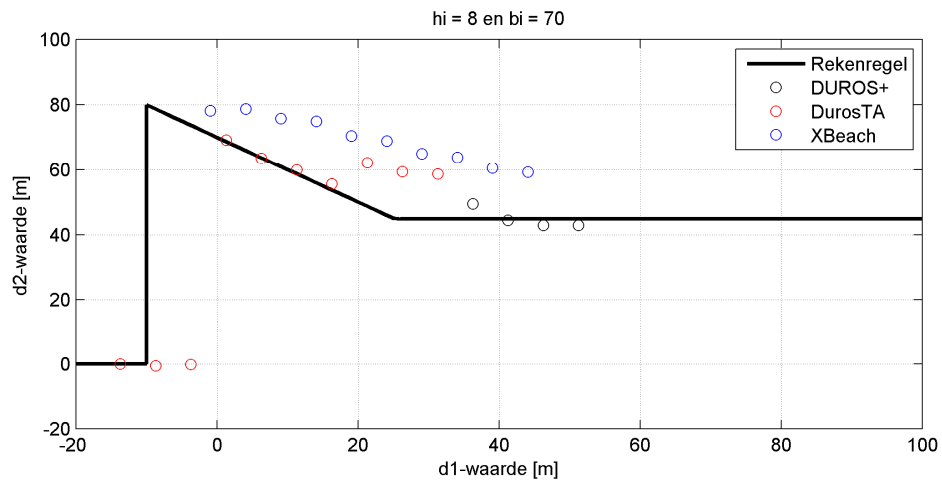
Figuur C.34 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 7$ m en $b_i = 70$ m



Figuur C.35 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 8$ m en $b_i = 30$ m



Figuur C.36 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 8$ m en $b_i = 50$ m



Figuur C.37 Vergelijking tussen rekenregel en modelresultaten, voor een ontgraving waarbij $h_i = 8$ m en $b_i = 70$ m

D Berekeningen XBEACH2D

D.1 Inleiding

D.1.1 Algemeen

Deze bijlage geeft een toelichting op de berekeningen in bovenaanzicht die zijn uitgevoerd ter ondersteuning (in kwalitatieve zin) van de voorgestelde handreiking voor het omgaan met het effect van NWO's op de veiligheid van een duin tijdens storm omstandigheden. Hiertoe zijn verschillende 2DH berekeningen (bovenaanzicht) uitgevoerd. Daarbij is variatie aangebracht in de positie en grootte van het NWO. Vervolgens kan een relatie worden gelegd tussen parameters waarmee het NWO kan worden beschreven en parameters waarmee het effect van dat NWO kan worden weergegeven. Deze relaties worden gebruikt ter verificatie van de voorgestelde handreiking.

D.1.2 Rekenmodel

Voor het berekenen van het effect van een NWO in bovenaanzicht is op dit moment alleen het XBeach model beschikbaar. De berekeningen die in deze bijlage worden gepresenteerd zijn uitgevoerd met de XBeach versie die het revisienummer 3105 draagt. In deze versie is nog niet het resultaat opgenomen van de recente ontwikkelingen in het kader van het WTI programma ter verbetering van de toetsregels voor de veiligheid van duinwaterkeringen. Onderdeel van deze ontwikkelingen is het verbeteren van de voorspelling van ontgrondingskuilen voor een constructie door XBeach.

D.1.3 Aanpak

Om inzicht te krijgen in het effect van NWO's op duinafslag tijdens storm zijn verschillende 2D berekeningen gedaan. Deze berekeningen dienen ter verificatie van de voorgestelde handreiking voor het omgaan met de invloed van NWO's op duinafslag. Hiertoe zijn verschillende berekeningen gedaan, waarbij variatie is aangebracht in de positie en grootte van het NWO. Voor verificatie van de handreiking is het nodig om karakteristieken voor de grootte en positie van het NWO, maar ook voor het effect van het NWO uit de berekeningen af te leiden. Het gaat om de volgende karakteristieken:

- **A_{onth}** – Dit is een volume maat die aangeeft hoeveel zand er aan het afslagproces wordt onttrokken doordat een NWO blijft staan (Spoor 2). Een definitie van deze maat is gegeven in paragraaf XX.
- **A_{ontgr}** – Dit is een volume maat voor het kwantificeren van het zand volume dat aan het afslagproces wordt onttrokken als wordt aangenomen dat het NWO volledig verdwijnt tijdens een storm (Spoor 1, het zogenaamde ontgravingsvolume). Dit volume is gelijk aan de inhoud van het NWO (zie ook paragraaf XX).
- **d_1** - Dit is de afstand tussen de voorzijde van het NWO en de afslaglijn in een berekening waarin het effect van het NWO niet is meegenomen. In de hier gepresenteerde analyse zijn de afslaglijnen bepaald door middel van het vinden van de contour waar de hoogte van het duin gelijk is aan 20 cm onder de initiële hoogte van het duin (in de meeste gevallen 9.8 meter).
- **d_2** . Dit is het maximale verschil tussen de afslaglijn zonder NWO en de afslaglijn in de berekening met het NWO binnen de invloedzone van het NWO, die wordt gekenmerkt door de lengte L (Spoor 2). Hiermee wordt het effect van het NWO dwars op de kust aangegeven.

- **L** – Met deze maat wordt de invloedzone van het NWO langs de kust aangegeven. Het berekenen van **L** is gedaan door over een gebied van 100 meter in langsricting te kijken naar de “helling” (dx / dy) van een rechte lijn die door de afslagrand in dit gebied kan worden gefit. Door dit gebied steeds verder van de constructie te verschuiven kan het punt worden gevonden waar deze helling kleiner is dan 0.005. Als tegelijk ook de d_2 van het eerste punt in dit gebied niet groter is dan 0.5 meter, wordt dat punt gezien als het laatste punt waar het NWO nog invloed heeft. De lengte **L** is gelijk aan de afstand in langsricting tussen het NWO en dit punt.

Als laatste stap wordt in deze bijlage aandacht geschonken aan de relaties die er tussen de verschillende karakteristieken bestaan op basis van de variatie daarvan in de berekeningen. De gevonden relaties kunnen worden gebruikt ter verificatie van de voorgestelde handreiking.

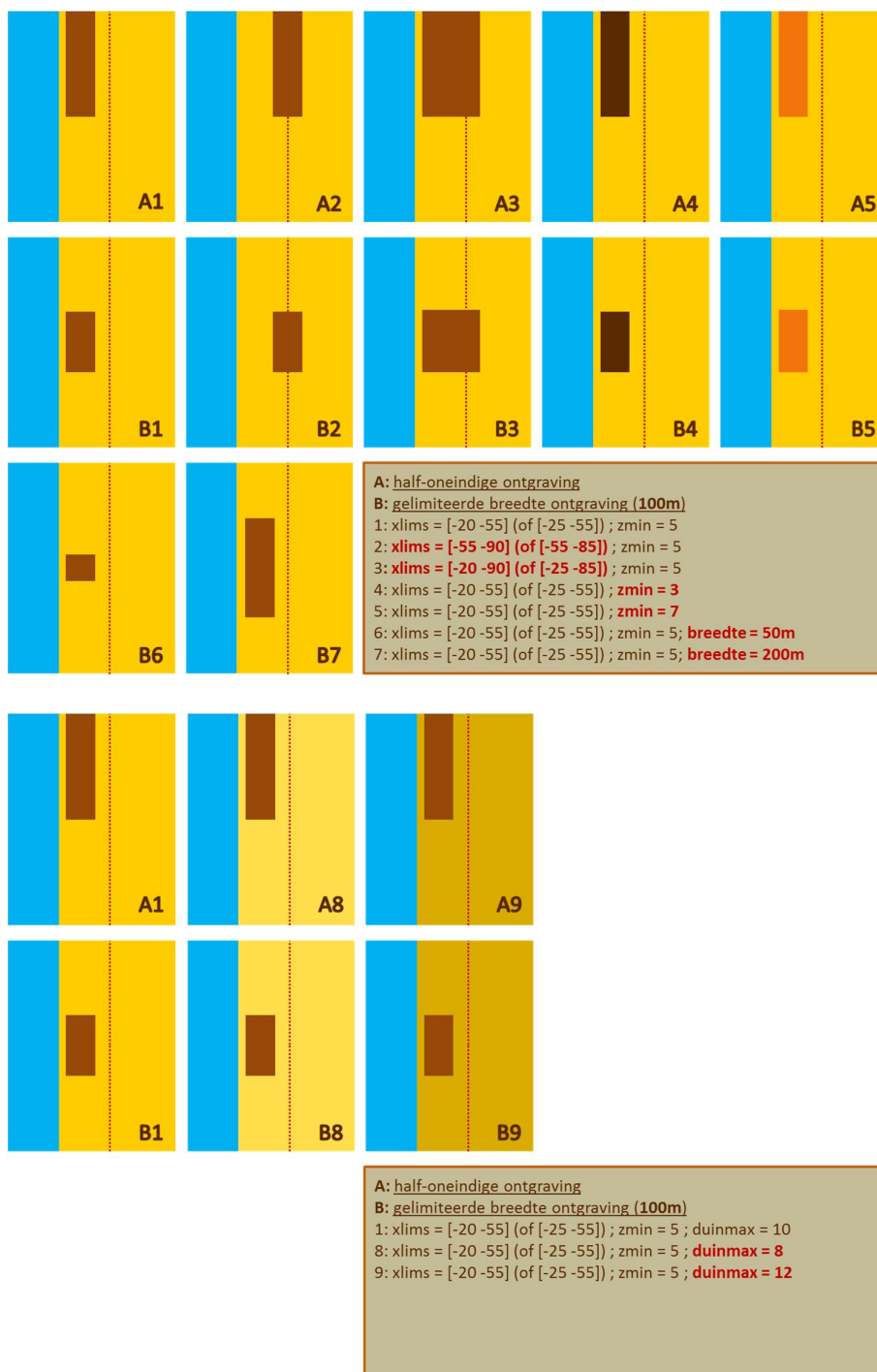
D.2 Uitgangspunten modelberekeningen

Net als bij de berekeningen in dwarsdoorsnede (Bijlage C) is in de berekeningen in bovenaanzicht uitgegaan van een dwarsprofielvorm gelijk aan het referentieprofiel, maar met een verlaagd duin (op 10 m + NAP). Ter referentie is een berekening uitgevoerd waarbij geen NWO is opgenomen en dit profiel in langsricting uniform is verondersteld. Voor zowel Spoor 1 als Spoor 2 zijn vervolgens berekeningen uitgevoerd met een half-oneindige constructie (aangeduid met een A) en met een eindige constructie in het midden van het rekendomein (B), waarbij de onderkant van het NWO op 5 m NAP wordt verondersteld. Een schematisch bovenaanzicht van deze berekeningen is gegeven in Figuur D.1 (A1 en B1).

Naam	Voorkant NWO	Achterkant NWO	Diepte NWO	Lengte NWO	Duinhoogte
A1	20	55	5	Half oneindig	10
A2	55	90	5	Half oneindig	10
A3	20	90	5	Half oneindig	10
A4	20	55	3	Half oneindig	10
A5	20	55	7	Half oneindig	10
A8	20	55	5	Half oneindig	8
A9	20	55	5	Half oneindig	12
B1	20	55	5	100	10
B2	55	90	5	100	10
B3	20	90	5	100	10
B4	20	55	3	100	10
B5	20	55	7	100	10
B6	20	55	5	50	10
B7	20	55	5	200	10
B8	20	55	5	100	8
B9	20	55	5	100	12
Basis 8	n.v.t	n.v.t	n.v.t	n.v.t	8
Basis 10	n.v.t	n.v.t	n.v.t	n.v.t	10
Basis 12	n.v.t	n.v.t	n.v.t	n.v.t	12

Tabel D.1 Overzicht van de rekenwaarden die grootte en positie van het NWO in het bovenaanzicht definiëren.

Bij alle berekeningen is gewerkt met een vaste waterstand van 5 [m + NAP] en golven met een H_s van 9 [m] en een T_p van 16 [s] gedurende een storm die 5 uur duurt.



Figuur D.1 Overzicht de bovenaanzichten van de uitgevoerde berekeningen met verschillende groottes en posities van het NWO.

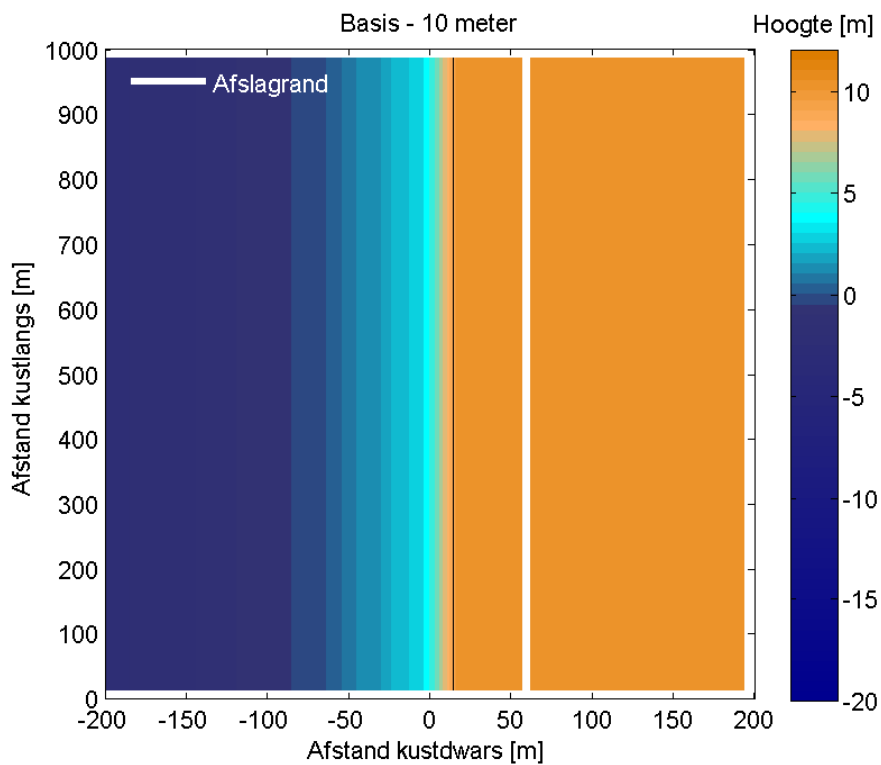
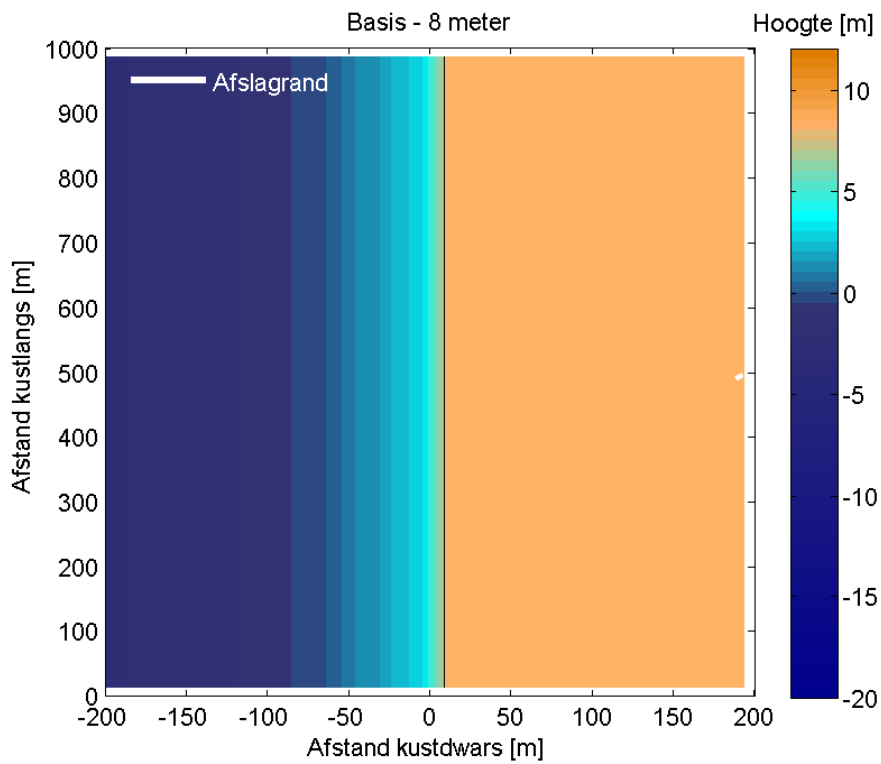
Naast deze referentie berekeningen met constructie zijn er ook berekeningen uitgevoerd waarbij de positie, breedte en diepte van de constructie en de hoogte van het duin zijn gevarieerd. Voor Spoor 1 is een gat in het beginprofiel aangebracht gelijk aan de afmetingen van het NWO. Voor Spoor 2 is het in XBeach uitsluitend mogelijk om een “niet erodeerbare laag” op te geven. Erosie onder een constructie kan niet worden berekend. Het is voor Spoor 2 dus niet mogelijk om berekeningen te doen met een variërende diepte van de constructie, de diepte kan immers niet worden meegenomen. Tabel D.1 vat de gedane berekeningen samen (zie ook Figuur D.1 voor een schematische weergave).

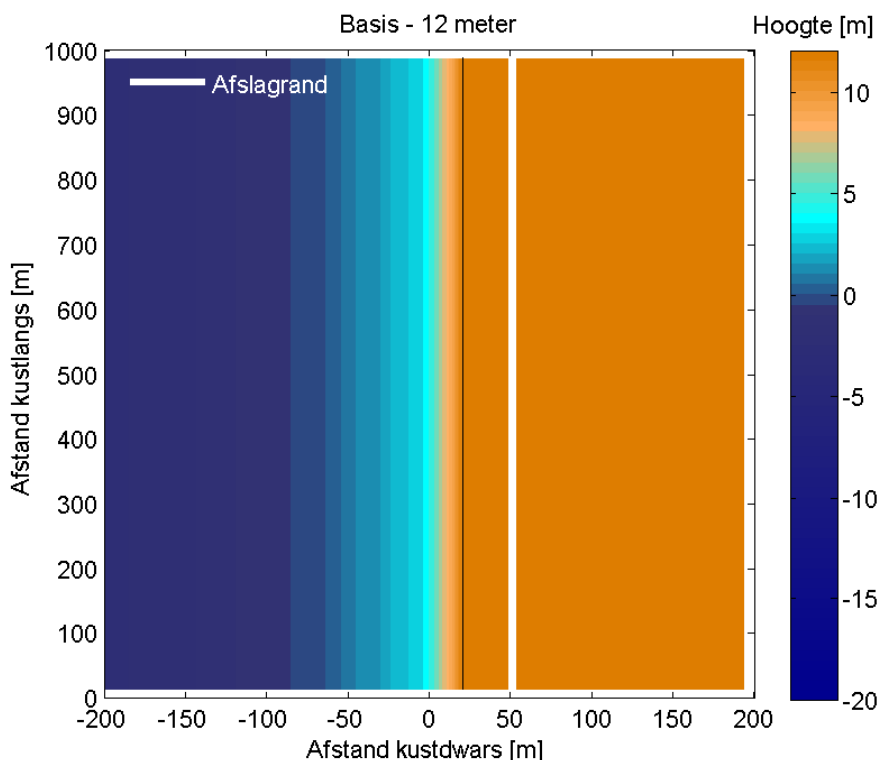
D.3 Resultaten berekeningen zonder NWO

Onderstaande figuren tonen de initiële bathymetrie van de berekeningen met duinhoogten van 8, 10 en 12 meter. Bovenop deze bathymetrie is de berekende afslaglijn aan het eind van de berekening weergegeven met behulp van een witte lijn. Bij de berekeningen met een duinhoogte van 10 en 12 meter wordt zoals verwacht een rechte afslaglijn berekend. De afslaglijn bij een duin van 12 meter hoog ligt zeewaarts van de afslaglijn bij een duinhoogte van 10 meter (Zie ook Tabel D.2). De berekening met een duinhoogte van 8 meter bevat geen afslaglijn. Dit wordt veroorzaakt doordat het duin volgens deze berekening de opgelegde storm niet goed kan weerstaan, het duin spoelt in zijn geheel weg. Omdat dit ook geldt voor de berekeningen met NWO (en een laag duin) zijn verdere resultaten voor berekeningen met een duinhoogte van 8 meter (A8 en B8) buiten dit rapport gelaten.

Dunhoogte [m]	Positie afslaglijn [m]
8	n.v.t.
10	58,77
12	50,84

Tabel D.2 Overzicht van de berekende posities van de afslaglijn bij verschillende duinhoogtes zonder het effect van een NWO

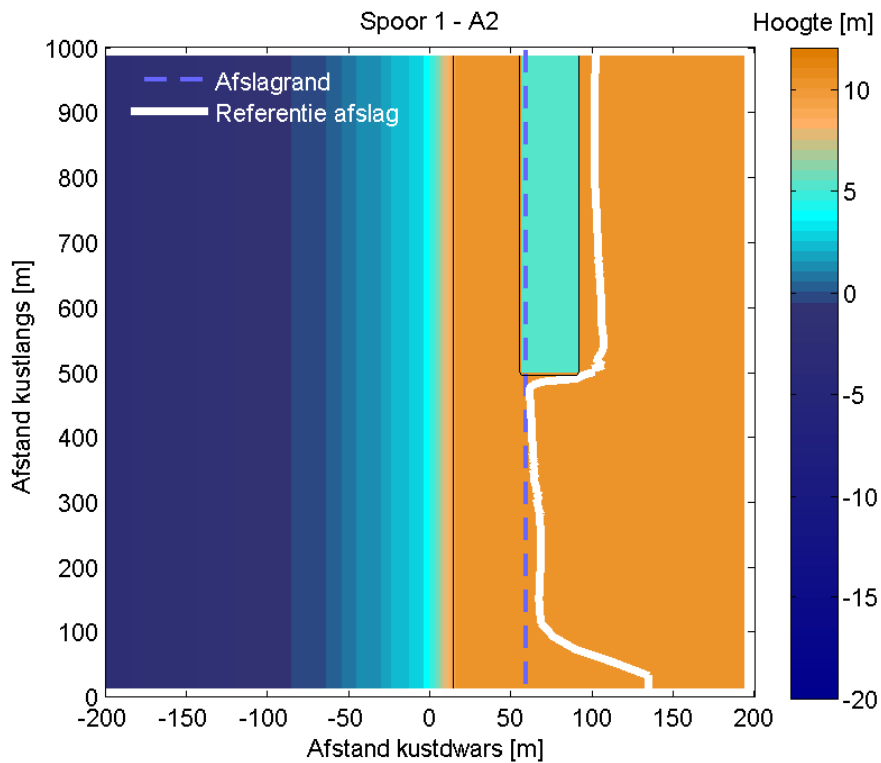
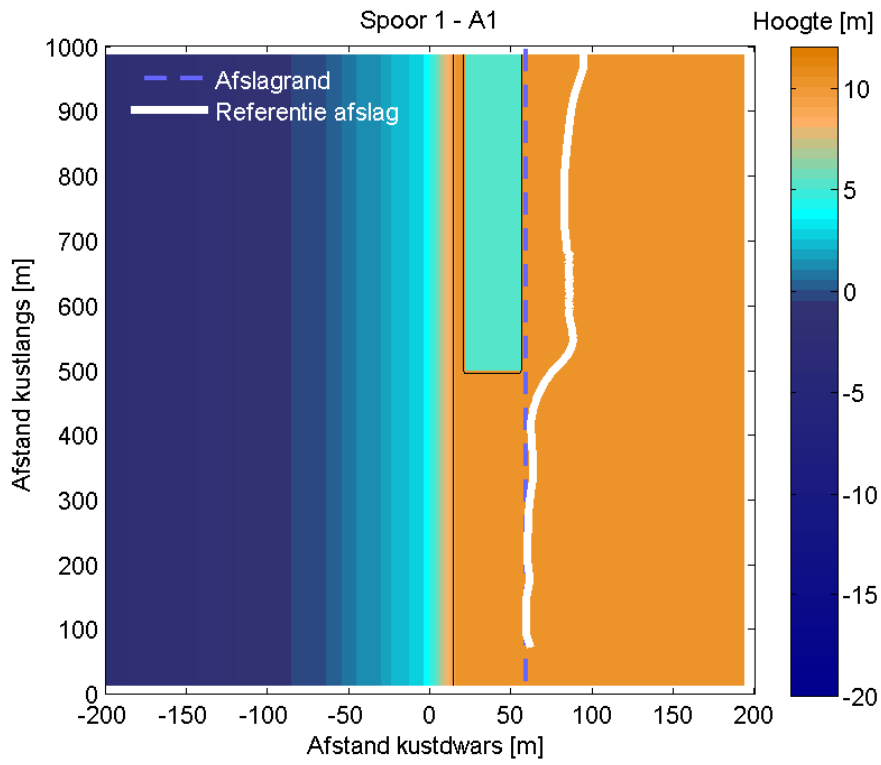


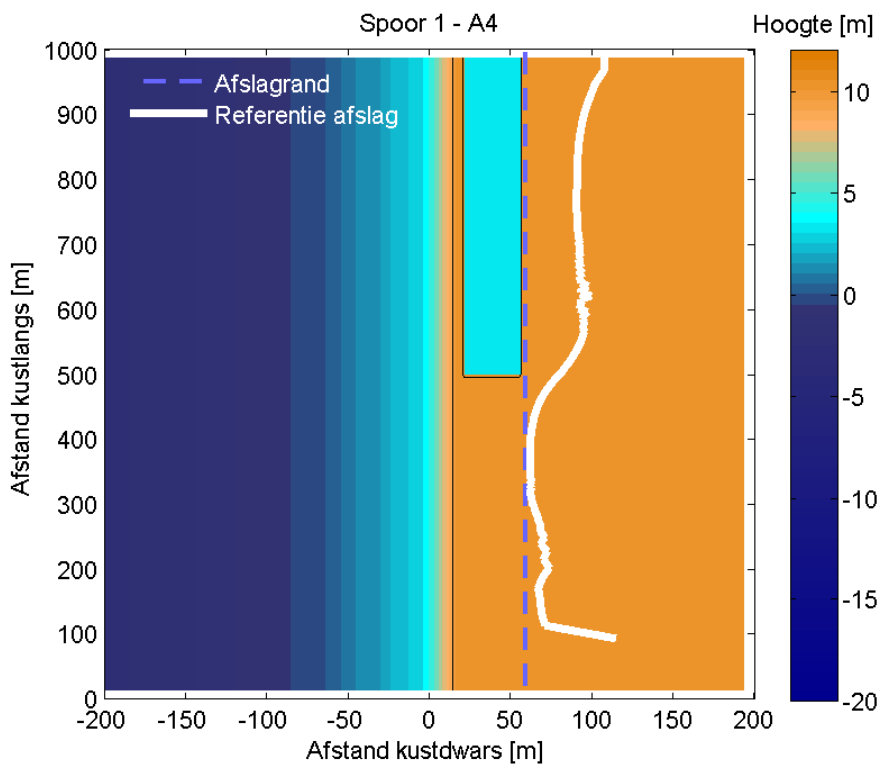
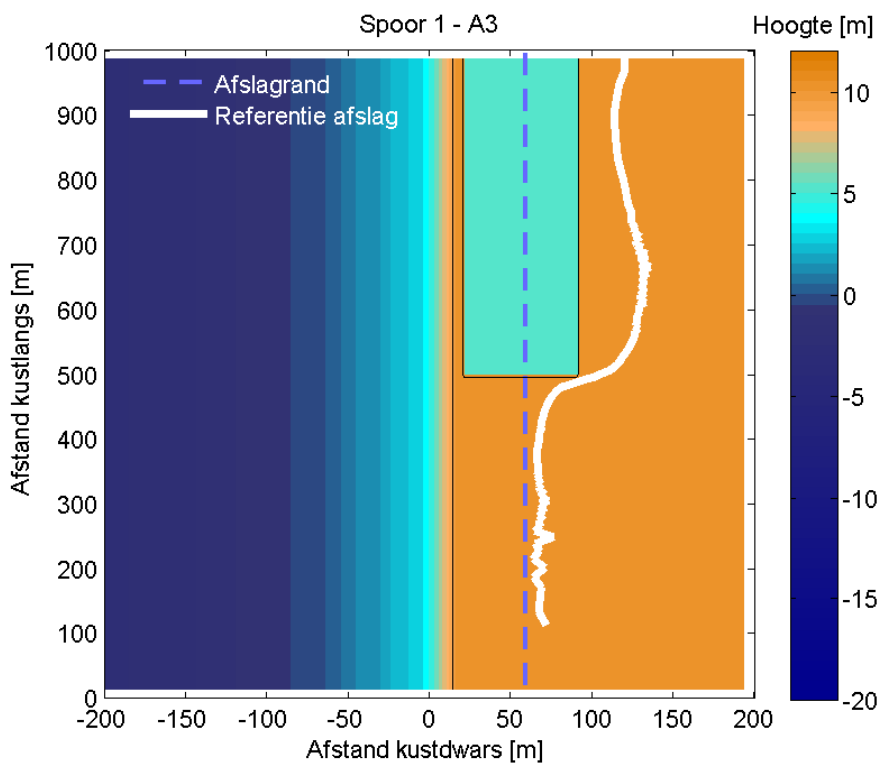


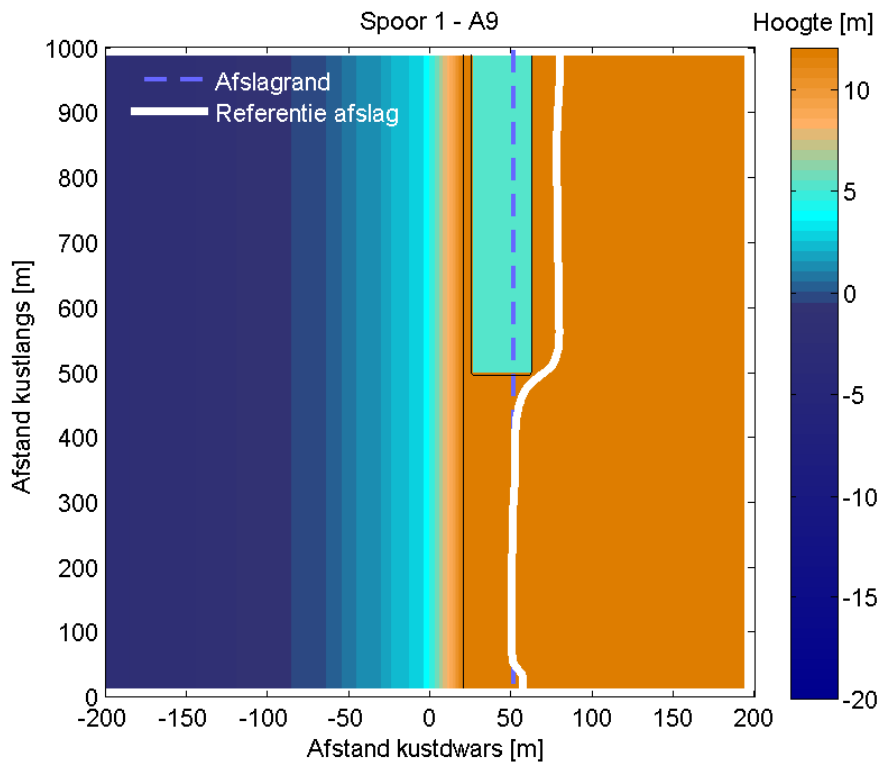
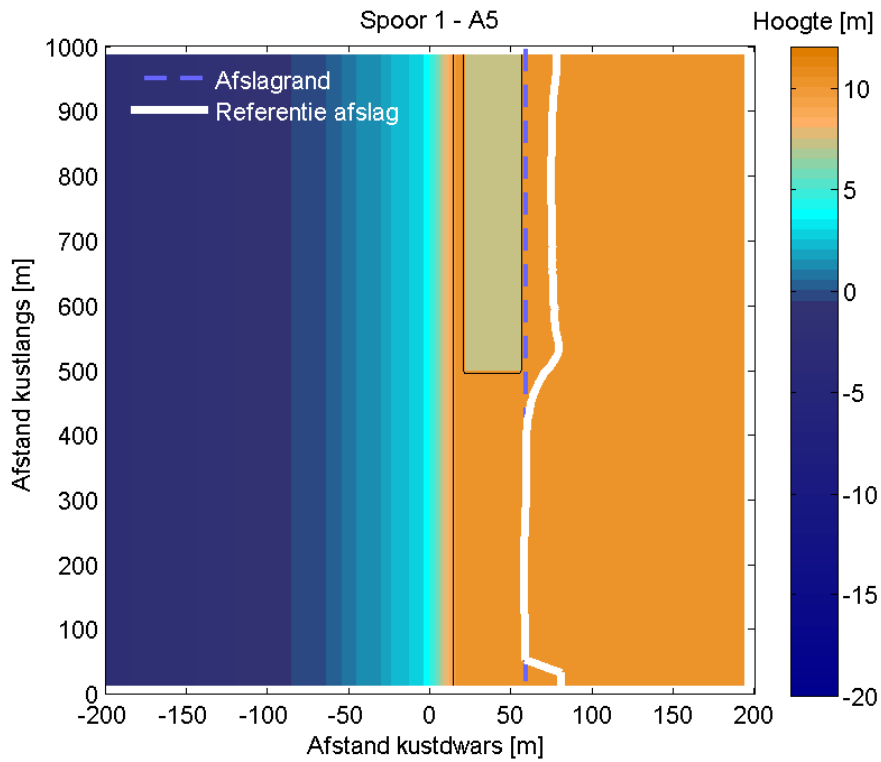
D.4 Resultaten Spoor 1

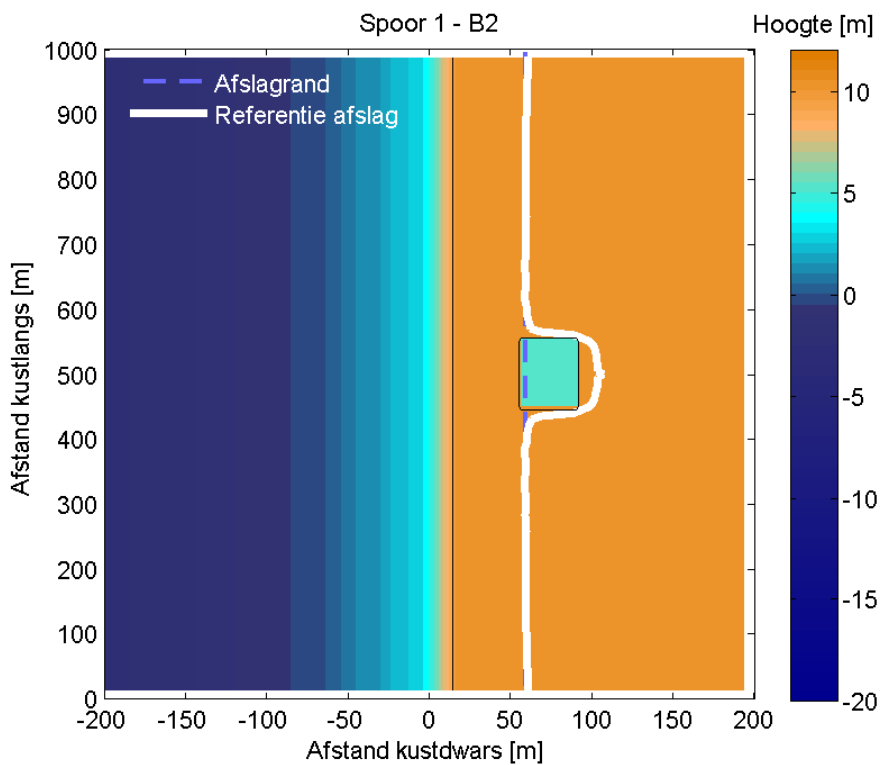
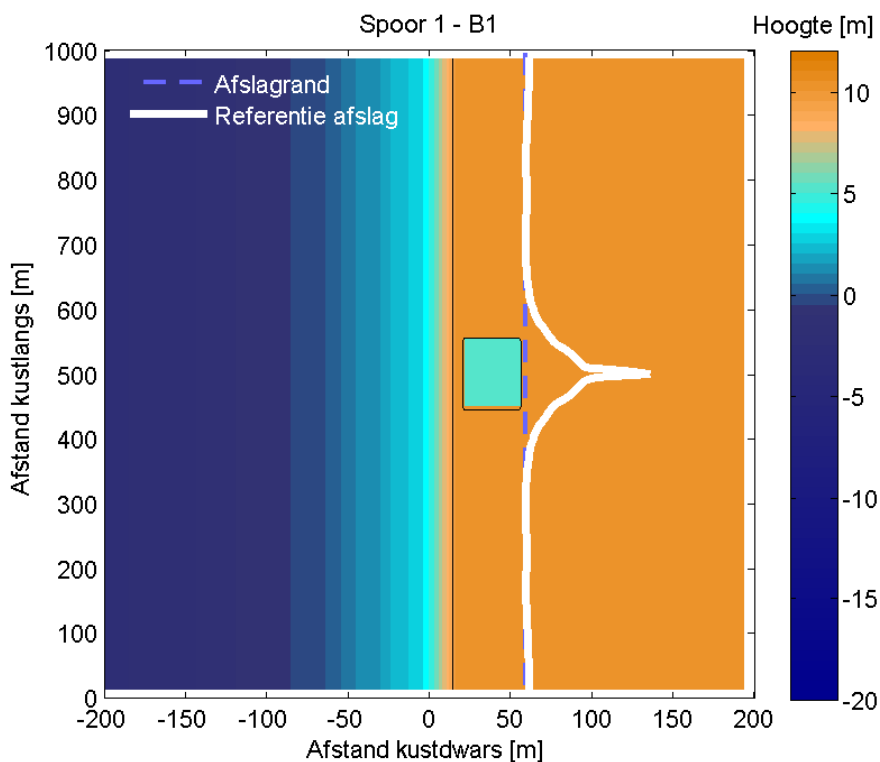
De Figuren in deze paragraaf tonen de berekende afslaglijn voor configuraties waarbij het NWO is meegenomen met behulp van een gat in de bathymetrie. In alle berekeningen vindt erosie achter het NWO plaats zodra de afslaglijn de voorkant van het NWO bereikt heeft. De bodem van het gat waarmee het NWO is gemodelleerd ligt immers niet ver boven het rekenpeil. De extra teruggang is in alle gevallen het grootst direct achter het NWO. Daarnaast is er ook een aanzienlijke hoeveelheid extra erosie te zien naast de constructie. De berekeningen in dwarsdoorsnede (Bijlage C) geven meer inzicht in de extra erosie achter een NWO, dat gemodelleerd wordt als in Spoor 1. Enkele punten in de resultaten voor Spoor 1 vragen de aandacht voor de vervolgfase van het onderzoek naar de invloed van een NWO op het duinafslagproces (en in het bijzonder het gebruik van XBeach als rekenmodel om dit te kwantificeren):

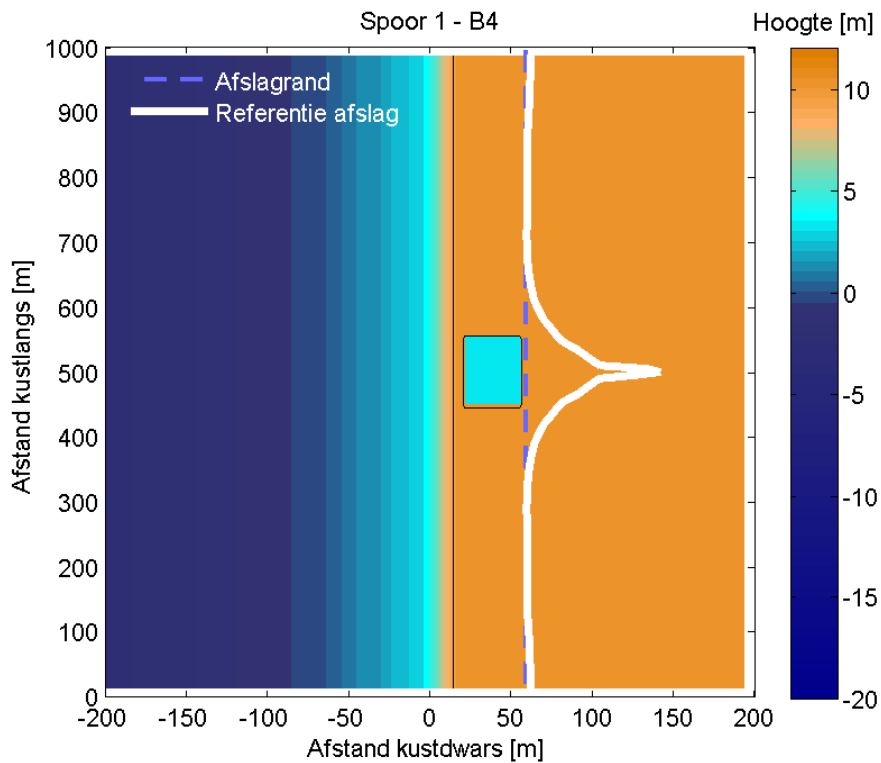
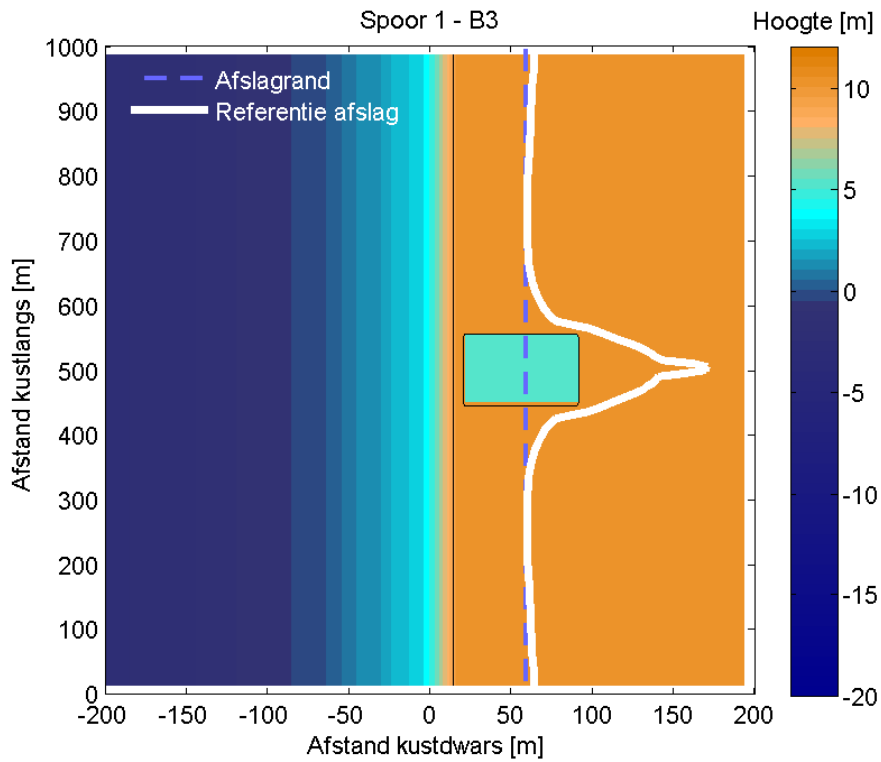
- Alle berekeningen met een half oneindige constructie laten veel erosie zien ter plaatse van de laterale modelrand ter plaatse van het duin. Dit zou het effect van een onvolkomenheid in de XBeach code kunnen en moet nog verder bekeken worden. Mogelijk is er ook sprake van een fysisch proces dat nog niet goed in beeld is. Het zou een verklaring kunnen zijn voor de berekende (extra) erosie buiten het invloedsgebied van het NWO. Een kwantitatieve conclusie op basis van deze resultaten is daarom niet op zijn plaats. Alle berekeningen laten echter wel zien dat ter plaatse van het gat in het duin (de plek van het NWO) de afslaglijn een extra teruggang laat zien.
- In de berekeningen met een NWO met eindige lengte is in alle gevallen een focus te zien van de extra teruggang precies in het midden van het NWO. Ook hier is onduidelijk of dit wordt veroorzaakt door een onvolkomenheid of door een werkelijk fysisch proces.

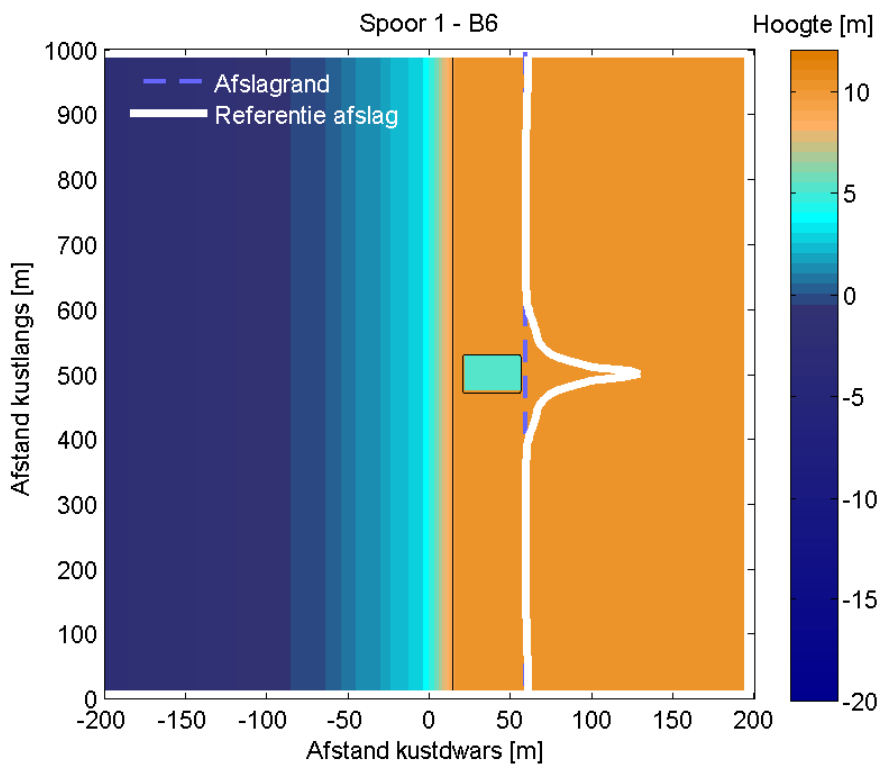
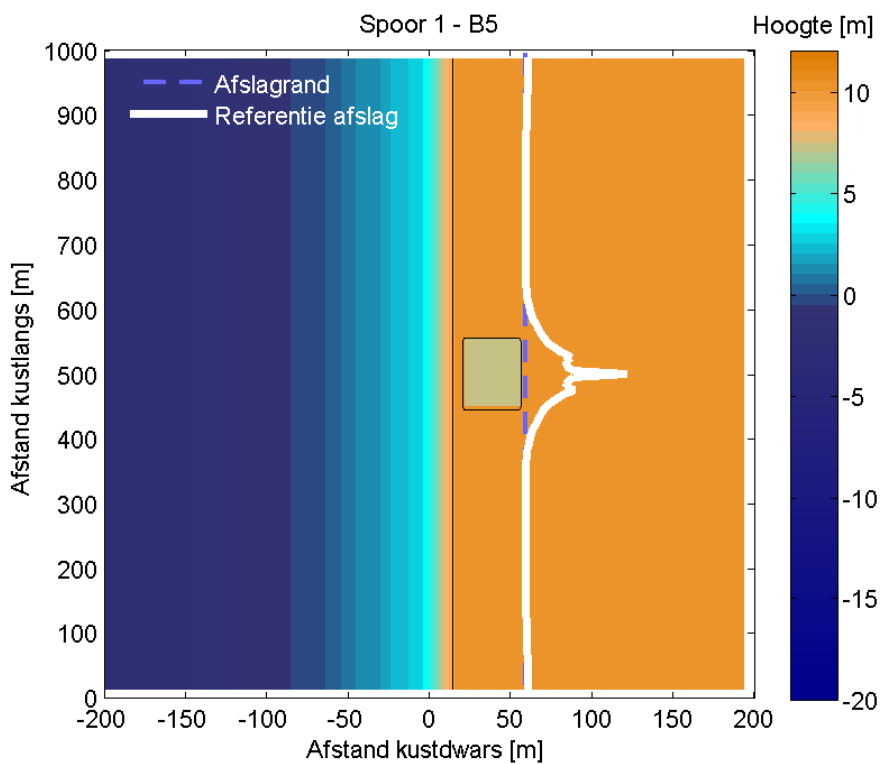


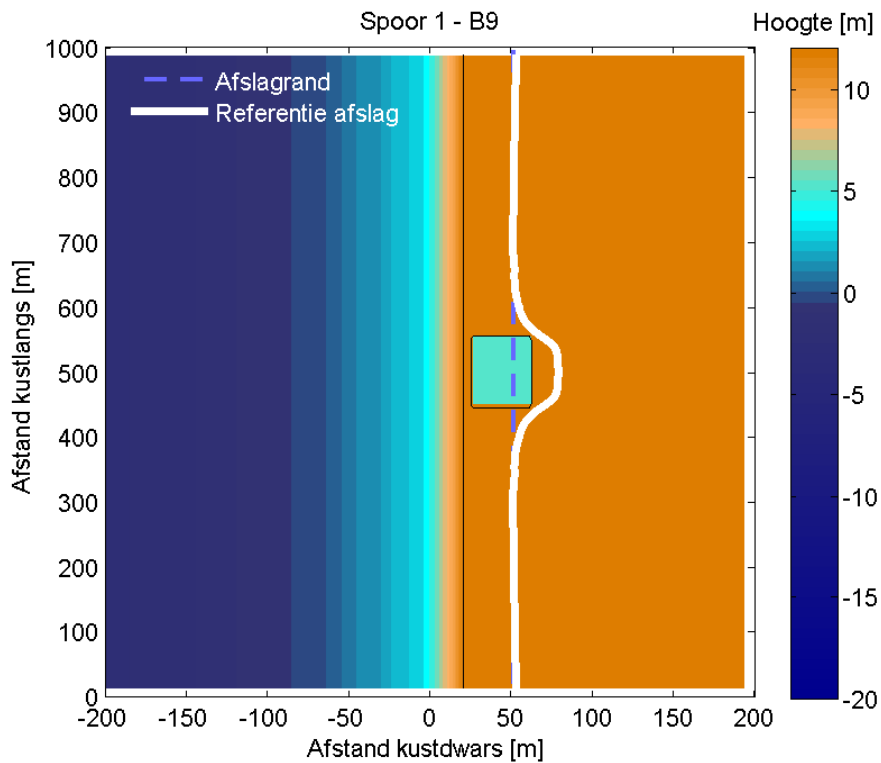
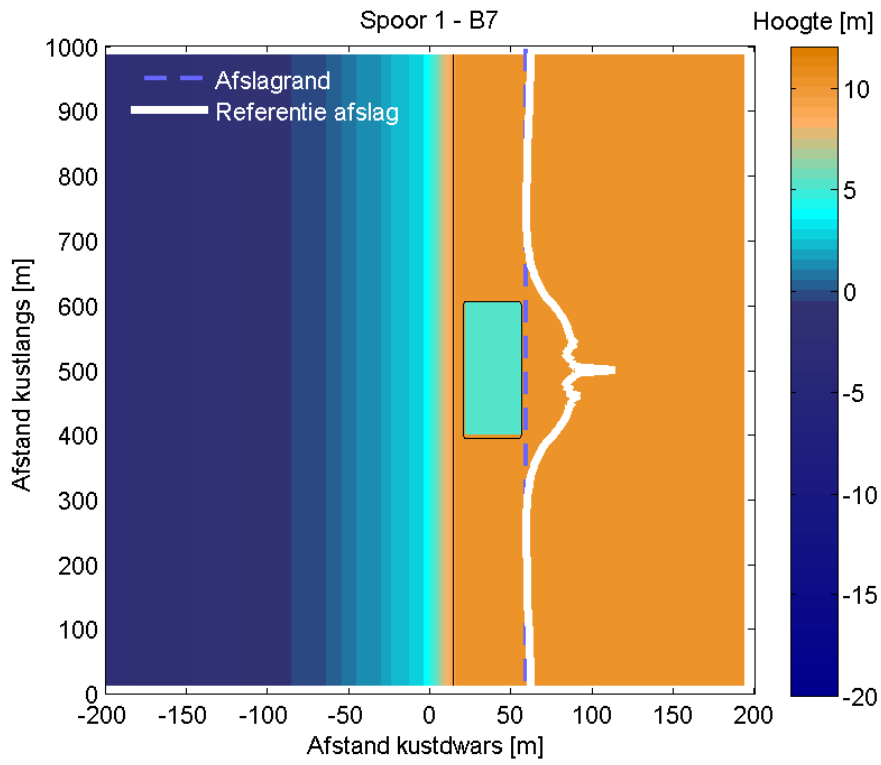












D.5 Resultaten Spoor 2

Onderstaande figuren tonen de afslagrand die XBeach voor de verschillende configuraties berekend heeft. Daarnaast bevatten de figuren per configuratie informatie over de afleiding van de parameters d_1 , d_2 , en L .

