



enw | expertisenetwerk  
waterveiligheid



## Duinafslag Technisch Rapport



# Technisch Rapport Duinafslag

Beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering  
ten behoeve van Voorschrift Toetsing op Veiligheid 2006

Mei, 2007



# Inhoudsopgave

## Deel A

### Achtergrond en aanleiding

|    |                                                                          |    |
|----|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | TAW Leidraad 1984 wordt vervangen door Technisch Rapport Duinafslag 2006 | 5  |
| 2  | TAW Leidraad Duinafslag                                                  | 5  |
| 3  | Achtergronden duinafslag                                                 | 6  |
| 4  | Eenvoudig balansmodel (1)                                                | 7  |
| 5  | Probabilistische aanpak (1)                                              | 7  |
| 6  | TAW Rekenmodel 1984, rekenrecept                                         | 8  |
| 7  | ‘Veilig’ duin en maatgevende afslagzone                                  | 9  |
| 8  | Effect langere golfperiode                                               | 9  |
| 9  | Eenvoudig balansmodel (2)                                                | 9  |
| 10 | Probabilistische aanpak (2)                                              | 9  |
| 11 | Technisch Rapport Duinafslag 2006, rekenrecept (2)                       | 10 |
| 12 | Gebruik van het TRDA2006                                                 | 10 |
| 13 | Vorm en inhoud van het TRDA2006                                          | 10 |
| 14 | Woordkeus                                                                | 11 |
| 15 | Overzicht TAW Leidraad 1984 en TRDA2006                                  | 11 |
| 16 | Opstellers TRDA2006                                                      | 12 |

## Deel B

### Rekenmodel voor de verwachting van duinafslag tijdens stormvloed

|    |                                                            |    |
|----|------------------------------------------------------------|----|
| 17 | Deterministisch rekenmodel DUROS-plus                      | 13 |
| 18 | Uitgangspunten                                             | 13 |
| 19 | Vorm van het afslagprofiel                                 | 15 |
| 20 | Gebruik van DUROS-plus bij een willekeurige stormvloed     | 17 |
| 21 | Nauwkeurigheid van een duinafslagberekening met DUROS-plus | 20 |
| 22 | Algemeen gebruik van het rekenmodel                        | 21 |

## Deel C

### ‘Veiligheidstoets’ van een dwarsdoorsnede van een duinenkust

|    |                                                                                                                    |    |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 23 | Toetsmethode voor de beoordeling van de ‘veiligheid’                                                               | 23 |
| 24 | Toepassingsgebied toetsmethode                                                                                     | 24 |
| 25 | Afslagbepalende parameters                                                                                         | 25 |
| 26 | Werkwijze voor de bepaling van de maatgevende afslag (zonder gradiënt in het langstransport) en ‘veiligheidstoets’ | 27 |
| 27 | Grensprofiel                                                                                                       | 31 |
| 28 | Pas op de plaats                                                                                                   | 33 |
| 29 | Gekromde kustgedeelten, effect gradiënt in het langstransport op positie punt R                                    | 33 |
| 30 | Harde elementen in het dwarsprofiel                                                                                | 35 |
| 31 | Aansluiting ‘hard’ – ‘zacht’                                                                                       | 36 |
| 32 | Diepe geul vlak voor de kust                                                                                       | 36 |
| 33 | Twee duinregels met een duinvallei                                                                                 | 38 |
| 34 | Van een raai naar een serie raaien                                                                                 | 38 |
| 35 | Handelwijze twijfelgevallen bij een ‘veiligheidstoets’                                                             | 39 |
| 36 | Zeespiegelstijging en eventuele klimaatwijzigingen                                                                 | 40 |
| 37 | Diversen                                                                                                           | 41 |

**Deel D**

## Kenmerkende duinafslag bij grotere overschrijdingskansen

|    |                                          |    |
|----|------------------------------------------|----|
| 38 | Afslag bij grotere overschrijdingskansen | 43 |
|----|------------------------------------------|----|

**Deel E**

## Literatuur

|    |                                          |    |
|----|------------------------------------------|----|
| 39 | Referenties uit tekst                    | 45 |
| 40 | Overige aanbevolen achtergrondinformatie | 46 |

**Deel F**

## Bijlagen

|    |           |                                                                           |    |
|----|-----------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 41 | Bijlage 1 | Korrelgrootte van het zand in de zeereep                                  | 47 |
| 42 | Bijlage 2 | Omgaan met toeslag                                                        | 50 |
| 43 | Bijlage 3 | Huidige stand van zaken en mogelijke aandachtspunten voor nader onderzoek | 52 |
| 44 | Bijlage 4 | Begrippen en afkortingen                                                  | 55 |
| 45 | Bijlage 5 | Symbolen                                                                  | 59 |

**Tabellen**

|         |                                                                                                |    |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 1 | Overzicht kenmerken TAW Leidraad 1984 en TRDA2006                                              | 11 |
| Tabel 2 | Referentiewaarden $G_0$ voor het transportverschil voor verschillende klassen van kustkromming | 35 |
| Tabel 3 | Kustsecties met kromming > 24 graden per 1000 m; nader onderzoek noodzakelijk.                 | 35 |
| Tabel 4 | Gemiddelde, standaardafwijking en rekenwaarde voor de korrelgrootte van zand in de zeereep     | 50 |

**Figuren**

|           |                                                                           |    |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Figuur 1  | DUROS-plus model                                                          | 14 |
| Figuur 2  | Afslagprofielen als functie van $T_p$                                     | 17 |
| Figuur 3  | Afslagprofielen als functie van $D_{50}$                                  | 17 |
| Figuur 4  | Duinafslag; voorbeelden van zandverplaatsing                              | 19 |
| Figuur 5  | DUROS-plus model met Toeslag                                              | 27 |
| Figuur 6  | $R$ - $t$ figuur met $BKL$ , $MKL$ , $R$ en landwaartse grens waterkering | 28 |
| Figuur 7  | Grensprofiel met inpassing achterkant duin                                | 31 |
| Figuur 8  | Grensprofiel met alternatief grensprofiel                                 | 32 |
| Figuur 9  | Extra teruggang $g$ door gradiënt in het langstransport                   | 34 |
| Figuur 10 | Dwarsprofiel en diepe geul voor de kust                                   | 37 |
| Figuur 11 | Serie dwarsprofielen en herverdeling in langsrichting                     | 39 |
| Figuur 12 | Ruimtevolume en toeslag                                                   | 51 |

## Deel A

# Achtergrond en aanleiding

## 1 TAW Leidraad 1984 wordt vervangen door Technisch Rapport Duinafslag 2006

De TAW Leidraad Duinafslag van 1984 wordt vervangen door het Technisch Rapport Duinafslag 2006 (TRDA2006). De hoofdreden daarvoor is dat er indertijd bij het opstellen van de Leidraad 1984 niet voldoende rekening is gehouden met het effect dat de golfperiode heeft op de mate van duinafslag. Metingen van golfkarakteristieken hebben inmiddels laten zien dat er tijdens zware stormvloedomstandigheden langere golfperioden kunnen voorkomen ( $T_p \approx 16 - 20$  s) dan waar indertijd rekening mee werd gehouden ( $T_p = 12$  s). Met de procedures die in het TRDA2006 worden beschreven, wordt wel met het effect van deze langere golfperioden rekening gehouden. Daarnaast zijn er enkele andere nieuwe inzichten in het TRDA2006 verwerkt.

Om het TRDA2006 te kunnen opstellen is er een weliswaar omvangrijk, maar toch nog niet volledig onderzoek uitgevoerd. Eén en ander heeft er in geresulteerd dat in hoge mate diende te worden voortgeborduurd op de TAW Leidraad Duinafslag van 1984. Dat betekent dat er niet kan worden verwacht dat het TRDA2006 een lange geldigheidsduur zal hebben. Naar verwachting zal er in 2011 een Technisch Rapport Duinafslag worden uitgegeven dat wel gedurende een langere tijd kan worden gebruikt als handreiking. Het TRDA2006 kan dus beschouwd worden als een interim rapport.

In Bijlage 3 zijn enkele aspecten genoemd die bij een vervolgonderzoek aan de orde zouden moeten komen.

## 2 TAW Leidraad Duinafslag

In 1984 werd door de toenmalige Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) de 'Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering' uitgegeven [TAW (1984)]. Deze leidraad, veelal 'TAW Leidraad Duinafslag' genoemd (ook andere aanduidingen voor de 'oude' Leidraad van 1984 worden gebruikt), is indertijd door de Minister van Verkeer en Waterstaat aanvaard en heeft vervolgens vele jaren als handreiking gefungeerd voor beheerders van de kustgedeelten (duinen) die ook als waterkering dienen. Met de TAW Leidraad in de hand konden beheerders nagaan of de aan hen toevertrouwde duinen nog aan de (wettelijke) eisen als waterkering voldeden. Indien een duinregel niet aan de eisen voldeed, diende een versterkingsmaatregel te worden ontworpen; met de TAW Leidraad kon dan vervolgens worden nagegaan of de beoogde versterking (verhoging en/of verbreding van de duinen) voldoende was.

Bij een deel van Katern 6 'Duinen' van het Voorschrift Toetsen op Veiligheid voor de tweede toetsronde 2001 - 2006 [VTV2001 (2004)] heeft de TAW Leidraad Duinafslag als basis gediend. Met de uitgave van de TAW Leidraad Duinafslag 1984 kwam indertijd een document beschikbaar dat diverse doelen diende (meer dan alleen toetsen op 'veiligheid'). Inmiddels is de gang van zaken enigszins anders. Een VTV (dus ook VTV2006) richt zich voornamelijk op de toetsing van de 'veiligheid'. De technische achtergronden van de procedures en de rekenmodellen die in een VTV worden 'voorgescreven', zijn in de meest recente Technische Rapporten verwoord. Het TRDA2006 is ook als zodanig te beschouwen, en levert dus toe aan het VTV2006.

### 3 Achtergronden duinafslag

Bij 'duinen als waterkering' gaat het er om dat duinen, net als een 'gewone' dijk, ook als (primaire) waterkering fungeren.

Tijdens dagelijkse omstandigheden lijkt het er vaak op dat de duinen (landwaarts van de duinvoet) niet deelnemen aan de dan optredende (hydraulische) kustprocessen. Het zeewater en de golven bereiken de duinen niet. Er wordt slechts door aanlandige wind wellicht wat zand van het strand de duinen in geblazen.

De duinvoet markeert de overgang tussen het vaak flauwe droge strand (helling droge strand ongeveer 1:20) en het veel steilere duinbeloop (helling ongeveer 1:3). De bedoelde overgang is vaak geleidelijk; daardoor is de precieze plaats en hoogte van de duinvoet soms niet zo duidelijk aan te geven. De hoogteligging van de duinvoet wordt echter gewoonlijk langs de Nederlandse kust op het niveau van NAP +3 m gedacht aanwezig te zijn.

Tijdens zware stormen op zee worden veel hogere golven dan 'normaal' opgewekt, en ook wordt dan door de wind het zeewater tegen onze kust opgestuwd. Vooral tijdens stormen uit noordelijke richtingen kan de zogenaamde stormopzet grote waarden bereiken (enkele meters verhoging van het gemiddelde zeeniveau). Deze stormopzet, samen met het astronomisch getij, kan er toe leiden dat de waterstand op zee (ruim) boven het niveau van de duinvoet uitkomt. Deze (tijdelijke) hoge waterstanden en de dan voorkomende zeer hoge golven tasten de duinen aan. Zand wordt van de duinen naar dieper water afgevoerd; het duinfront schrijdt in landwaartse richting terug. Als de waterstand weer daalt, stopt het duinafslagproces. Een zeer steil afgeslagen duinfront resteert (vaak zelfs steiler dan 1:1), met een in dit geval zeer scherpe overgang naar het strand. De hoogte van deze overgang hangt nauw samen met de maximaal bereikte waterstand tijdens de stormvloed. De mate van duinafslag (de uiteindelijke terugschrijving van het duinfront) hangt uiteraard af van de zwaarte van de stormomstandigheden. Bij een juist 'veilig' duin treedt er nog net geen doorbraak op onder de gestelde ontwerpomstandigheden.

In dit TRDA2006 wordt steeds de term '*veilig*' duin gebruikt om een situatie aan te geven waarbij een duin (eventueel net precies) aan de gestelde voorwaarden voldoet. Er zal dan dus geen doorbraak bij ontwerpomstandigheden plaatsvinden. Ook een 'veilig' duin kan dan dus nog doorbreken bij omstandigheden die zwaarder zijn dan de ontwerpomstandigheden. Absolute veiligheid bestaat in dit verband dus niet.

In het voorgaande is, en ook verder in dit rapport wordt, de term *ontwerpomstandigheden* gebruikt; uit de tekst moet duidelijk zijn wat er mee wordt bedoeld. In het VTV2001 (Centrale Gedeelte; hoofdstuk 3) wordt een duidelijk onderscheid gemaakt tussen 'toetsen' en 'ontwerpen'. In dit TRDA2006 wordt dat onderscheid niet gemaakt. Bij een duin dat precies aan de 'veiligheidseisen' voldoet, is er dus een punt in het veld aan te geven tot hoever de duinafslag 'mag' voortschrijden opdat er nog net geen doorbraak zal optreden. De bedoelde mate van duinafslag kan echter op veel verschillende manieren worden bereikt. Er is dus niet één enkele combinatie van parameters aan te geven die 'verantwoordelijk' is voor het bereiken van de maatgevende duinafslag. In dit TRDA2006 wordt dit min of meer ondervangen door de term 'ontwerpomstandigheden' te gebruiken.

## 4 Eenvoudig balansmodel (1)

In de jaren zeventig en tachtig van de vorige eeuw is er uitgebreid onderzoek uitgevoerd naar het verschijnsel duinafslag tijdens zware stormvloed. De onderzoeken hebben er toe geleid dat, hoewel het duinafslagproces zeer complex van aard is, het uiteindelijke resultaat met goede benadering kon worden beschreven met een tamelijk eenvoudig balansmodel. (Dat model wordt gewoonlijk het DUROS model genoemd.) Gegeven enkele karakteristieken van de stormvloed (maximum waterstand tijdens de stormvloed  $h_{max}$  en de significante golfhoogte op diep water  $H_{0s}$  tijdens die stormvloed) en de korrel diameter van het duinzand, kunnen de hoogteligging en de vorm van het bovenste gedeelte van het dwarsprofiel worden bepaald zoals dat na afloop van de stormvloed kan worden verwacht aanwezig te zijn. Het bovenste gedeelte van het dwarsprofiel zoals dat na afloop van de stormvloed aanwezig is, wordt gewoonlijk met afslagprofiel aangeduid. Gegeven de ligging van het dwarsprofiel juist vóór de stormvloed, kan vervolgens de mate van duinafslag worden bepaald door uit te gaan van een sluitende zandbalans in de richting dwars op de kust (zie punt 19). Deze sluitende zandbalans procedure bepaalt dus de positie van het afslagprofiel in horizontale zin.

## 5 Probabilistische aanpak (1)

Het onderzoek in de jaren zeventig en tachtig van de vorige eeuw heeft onder meer opgeleverd dat de mate van duinafslag van een relatief groot aantal parameters afhangt. Het gaat daarbij om een veel groter aantal parameters dan alleen de maximale waterstand. De Wet op de waterkering 1996 (Wow; na aanvaarding van de wet hebben er tekstaanpassingen plaatsgevonden; thans tekst d.d. 09-07-2006) noemt slechts expliciet de overschrijdingsfrequentie van de waterstand als ontwerpparameter waaraan een 'veilige' waterkering dient te voldoen (art. 3.1). Van de overige afslagbepalende parameters stelt de Wow dat die bij ministeriële regeling steeds voor een periode van vijf jaar worden vastgesteld (art. 4; vergelijk ook de zogenaamde randvoorwaardenboeken).

Bij de in de Wow bedoelde overschrijdingsfrequentie behoort een maximale waterstand. Deze waterstand wordt ook wel het ontwerppeil genoemd. Voor enkele dijkkringgebieden in Nederland is het ontwerppeil gelijk aan het basispeil; het basispeil in een gegeven locatie heeft per definitie een overschrijdingskans van  $10^{-4}$  per jaar.

Van de 13 dijkkringgebieden die aan zee grenzen en waarbij duinen als waterkering voorkomen, is het ontwerppeil slechts in dijkkringgebied 13 (groot deel van Noord-Holland) en 14 (groot deel van Zuid-Holland) gelijk aan het basispeil. Van de 11 andere dijkkringgebieden is het ontwerppeil dus iets lager dan het basispeil. Opgemerkt wordt dat het inwonertal van de dijkkringgebieden 13 en 14 wel veel groter is dan dat van de andere 11 dijkkringgebieden.

Bij een groot aantal proces-bepalende parameters verdient het aanbeveling voor een probabilistische aanpak van de beoordeling van het mogelijke 'veiligheidsprobleem' van duinen te kiezen. Daarvoor is indertijd bij het opstellen van de TAW Leidraad Duinafslag 1984 dan ook gekozen.

Bij een probabilistische aanpak behoort er (vooraf) expliciet te worden vastgesteld welke bezwijkkans er behoort bij een nog juist 'veilige' duinwaterkering. De Delta-commissie heeft indertijd de overschrijdingsfrequenties van de ontwerppeilen vastgesteld; die overschrijdingsfrequenties zijn in principe overgenomen in de Wow.



De Deltacommissie heeft indertijd echter nadrukkelijk gesteld dat bij waterstanden waarbij het ontwerppeil wordt bereikt ‘nog volledige veiligheid’ tegen het bezwijken van de waterkering aanwezig dient te zijn. Mede daardoor is het duidelijk dat de voor een probabilistische aanpak benodigde bezwijkkans van duinen niet gelijk kan zijn aan de in de Wow vastgelegde overschrijdingsfrequentie van de waterstand (*het ontwerppeil was en is geen ramppeil*).

Bij het opstellen van de TAW Leidraad 1984 is indertijd uitgegaan van een bezwijkkans die een factor 10 kleiner is dan de overschrijdingsfrequentie van het ontwerppeil.

Hoe de genoemde factor 10 is bepaald, is beschreven in de TAW Leidraad Duinafslag 1984 en in onder meer de TAW Leidraad Zandige Kust (2002).

Voor de dijkkringgebieden 13 en 14 ( $\approx$  Noord-Holland en  $\approx$  Zuid-Holland) betekent dit uitgangspunt dat een duinwaterkering die nog juist aan de eisen voldoet (een juist ‘veilig’ duin) een kans van  $10^{-5}$  per jaar heeft om toch nog door te breken en aanleiding zal geven tot het onderlopen van (een deel van) het dijkkringgebied. Voor andere aan de zee grenzende dijkkringgebieden dan de gebieden 13 en 14 gelden dus enigszins andere (grotere) bezwijkkansen per jaar voor de duinwaterkeringen.

Het verdient aanbeveling om als er over ‘veilige’ duinen (dus over duinen die voldoen aan de in de Wow gestelde eisen) wordt gesproken en geschreven, uitsluitend de bijbehorende bezwijkkansen te noemen en te vermelden.

## 6 TAW Rekenmodel 1984, rekenrecept (1)

Met probabilistische rekentechnieken is het, gegeven de kansverdelingen van de afslagbepalende parameters (sterkte- en belastingparameters en de geschatte nauwkeurigheid van het rekenmodel), goed mogelijk om bijvoorbeeld in een zeer breed duin aan te geven wat de kansen per jaar zijn dat diverse punten in het veld tijdens willekeurige stormvloed worden bereikt of worden overschreden. Het gaat dan dus om overschrijdingskansen. Het punt in het duin dat (voor de dijkkringgebieden 13 en 14) een overschrijdingskans heeft van  $10^{-5}$  per jaar, geeft de *maatgevende afslag* aan. Punten in het duin die minder ver landwaarts zijn gelegen dan het maatgevende afslagpunt, hebben dus een grotere overschrijdingskans per jaar.

Probabilistische rekentechnieken zijn veelal ingewikkeld en weinig doorzichtig en kunnen als een soort van ‘black box’ worden gezien. Daarnaast vergen dergelijke rekentechnieken voor willekeurige gevallen veelal relatief veel rekentijd. Indertijd, bij het opstellen van de Leidraad 1984, was er daarom behoefte aan een relatief eenvoudig rekenrecept. Met dat rekenrecept, en een serie goed gekozen invoergrootheden, kon dan op een snelle wijze worden berekend hoe groot de maatgevende afslag is. De beschrijving en toelichtingen van dat rekenrecept vormen in feite de kern van de TAW Leidraad 1984.

## 7 ‘Veilig’ duin en maatgevende afslagzone

Op sommige plaatsen langs onze kust zijn de duinen zo hoog en breed dat er in het huidige tijdsgewricht geen doorbraak kan en zal optreden. Een dergelijk duin is dan zonder meer ‘veilig’ [voldoet aan de (wettelijk) gestelde eisen]. Voor het kustbeheer is het in zulke gevallen eigenlijk niet van belang om de kans op doorbraak te kennen. Wel is het belangrijk voor het kustbeheer om te weten welk deel van de duinen zal afslaan tijdens ontwerpomstandigheden (de maatgevende afslagzone). Voor bijvoorbeeld de dijkkringgebieden 13 en 14 is het dan van belang om vast te stellen waar de afslaglijn in het veld ligt die met een kans van  $10^{-5}$  per jaar zal worden overschreden. Om bijvoorbeeld te kunnen aangeven welk deel van de duinen tot de eigenlijke waterkering behoort, en dus in beheer is bij de waterkering-beheerder, is dergelijke informatie nodig.

In het TRDA2006 wordt primair aangegeven op welke wijze de breedte van de maatgevende afslagzone kan worden bepaald. Een waterkeringbeheerder kan vervolgens nagaan of het duin als ‘veilig’ kan worden gekenschetst.

## 8 Effect langere golfperiode

Uit daadwerkelijke metingen van de golfkarakteristieken tijdens stormen, onder meer de significante golfhoogte  $H_s$  en de golfperiode  $T_p$  (de periode behorende bij de piek van het energiedichtheidspectrum), is gebleken dat in het bijzonder de golfperiode tijdens zware stormvloed langer kan zijn dan de golfperiode waarvan indertijd bij het opstellen van de Leidraad 1984 werd uitgegaan.

Omdat een kwantitatief inzicht ontbrak van het effect van de golfperiode op de mate van duinafslag is een (beperkte) reeks proeven in de Deltagoot van het Waterloopkundig Laboratorium uitgevoerd [WL I Delft Hydraulics (2006)]. Analyses van de proefresultaten hebben vooralsnog voldoende informatie opgeleverd om op een verantwoorde manier met het effect van de golfperiode op de mate van duinafslag rekening te kunnen houden. In dit TRDA2006 wordt dat uitgewerkt.

## 9 Eenvoudig balansmodel (2)

Na 1984 zijn nieuwe en andere inzichten omtrent de duinafslagprocessen ontwikkeld [zie onder meer Steetzel (1993)]. Deze nieuwe inzichten zijn slechts gedeeltelijk gebruikt om het TRDA2006 samen te stellen. Er is voor gekozen het TRDA2006 zodanig in te richten dat het feitelijk een aanpassing op hoofdlijnen van de TAW Leidraad 1984 betreft. Dat betekent onder meer dat er ook nu weer een eenvoudig balansmodel is ontwikkeld, maar nu betreft het een model met een afslagprofiel waarmee het effect van de golfperiode op de vorm van het afslagprofiel, en dus op de mate van duinafslag, in rekening wordt gebracht. In WL I Delft Hydraulics (2006) is dat balansmodel beschreven en toegelicht. Dat model wordt in dit TRDA2006 verder met DUROS-plus aangeduid. Zie ook punt 17 en verder.

## 10 Probabilistische aanpak (2)

Voor het TRDA2006 is er, net als bij het opstellen van de TAW Leidraad 1984, niet voor gekozen de duinbeheerders uiteindelijk een probabilistisch rekenpakket aan te leveren waarmee de ‘veiligheid’ van de in beheer zijnde duinen kan worden afgewogen. Er is voor gekozen om de duinbeheerders uiteindelijk een relatief

eenvoudig rekenrecept aan te bieden waarmee met een kleine reeks rekenstappen snel en eenvoudig de maatgevende afslag kan worden bepaald. Niettemin zijn er om dat eenvoudige rekenrecept te kunnen afleiden grote series probabilistische berekeningen gemaakt [WL I Delft Hydraulics (2007a)]. Er is er daarbij naar gestreefd dat de uitkomsten van dat eenvoudige rekenrecept vrijwel overeenkomen met de uitkomsten van de complexe probabilistische berekeningen. In de gevallen die zijn vergeleken, blijven de afwijkingen beperkt tot enkele procenten.

## 11 Technisch Rapport Duinafslag 2006, rekenrecept (2)

Om de beoogde maatgevende afslag in een voorkomend geval te bepalen, is dus een eenvoudig rekenrecept ontwikkeld met het DUROS-plus model als kern. Door een serie goedgekozen parameters als invoerparameters voor het rekenrecept te nemen, kan op een relatief eenvoudige en snelle wijze inzicht worden verkregen in de mate van duinafslag die tijdens ontwerpomstandigheden kan worden verwacht. De in te voeren parameterwaarden wijken in sommige opzichten af van de waarden die bij de TAW Leidraad 1984 dienden te worden gekozen.

Het VTV2006 wordt samen met het Randvoorwaardenboek 2006 [HR2006; RWS (2007)] gebruikt voor de 5-jaarlijkse wettelijke toetsronde 2006 - 2011. Het TRDA2006 levert toe aan de inhoud van Katern 6 van het VTV2006.

Het rekenrecept dat in dit TRDA2006 wordt beschreven zal worden gebruikt om de 'veiligheid' van bestaande duinwaterkeringen te toetsen. Voor eventueel 'onveilige' duingedeelten kunnen met uitkomsten van de berekeningen zoals die in dit TRDA2006 zijn aangegeven als basis, aanpassingswerken worden ontworpen.

## 12 Gebruik van het TRDA2006

De TAW Leidraad 1984 heeft ruim 20 jaar als zodanig als handreiking gediend bij het beoordelen van de 'veiligheid' van duinen. In deze 20 jaar zijn bij het gebruik van de Leidraad soms onvolkomenheden en onduidelijkheden aan het licht gekomen die om een directe oplossing vroegen. Veelal is dat voortvarend en creatief, en soms zelfs gebiedsspecifiek, opgepakt door de competente gebruikers van de Leidraad zonder dat daarbij altijd een formele weg is bewandeld. Er zijn bijvoorbeeld geen officiële herzieningen van de Leidraad 1984 aan de orde geweest. Deze gang van zaken heeft goed gewerkt. Competente gebruikers dienen met een Leidraad of een Technisch Rapport de nodige en voldoende handreikingen te krijgen om verantwoord met de materie om te kunnen gaan. Het TRDA2006 beoogt die nodige en voldoende handreikingen te geven. Niet minder, maar ook niet meer. In het TRDA2006 zullen lang niet alle mogelijke kleine praktijkproblemen worden benoemd en worden afgehandeld.

## 13 Vorm en inhoud van het TRDA2006

Vooral omdat het TRDA2006 voornamelijk een aanpassing van de TAW Leidraad 1984 op hoofdlijnen behelst, is er voor gekozen de vorm en inhoud van de Leidraad 1984 op sommige punten te volgen. Uiteraard worden verschillen toegelicht en benadrukt. Het TRDA2006 kan vanzelfsprekend 'op zich zelf staand' worden gebruikt. Het wordt de gebruiker echter sterk aanbevolen de (uitgebreide) achtergrondinformatie te raadplegen. (Zie punten 39 en 40.)

## 14 Woordkeus

In dit TRDA2006 wordt veelal een tamelijk stellige woordkeus gebezigd. Bijvoorbeeld: 'is' in plaats van: 'naar wordt aangenomen', of: 'de helling van het afgeslagen talud bedraagt 1:1' in plaats van: 'in de berekeningen wordt er van uitgegaan dat de helling van het afgeslagen talud 1:1 bedraagt'. Het gaat in de 'stellige' rapporttekst echter veelal om aannamen en benaderingen (die uiteindelijk wel op onderbouwing berusten), maar waar in werkelijkheid soms nog wel wat op is af te dingen. Voor de stellige woordkeus is mede gekozen om de leesbaarheid te vergroten; veelal gaat het in de stijl van een receptenboek.

## 15 Overzicht TAW Leidraad 1984 en TRDA2006

In tabel 1 zijn enkele kenmerken van de TAW Leidraad 1984 en het TRDA2006 naast elkaar gezet.

|                                             | <b>TAW Leidraad 1984</b>                                                                                                                                                                              | <b>TRDA2006</b>                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rekenmodel in kern                          | DUROS                                                                                                                                                                                                 | DUROS-plus (Deel B)                                                                                                                                                                                                                                                |
| Kenmerkend verschil                         | geen effect golfperiode                                                                                                                                                                               | wel effect golfperiode                                                                                                                                                                                                                                             |
| Effecten die de mate van duinafslag bepalen | waterstand $h$<br>golfhoogte $H_{0s}$<br>golfperiode $T_p = 12$ s<br>korreldiameter duinmateriaal<br>nauwkeurigheid DUROS<br>duur stormvloed<br>ligging beginprofiel<br>bui-stoten en bui-oscillaties | waterstand $h$<br>golfhoogte $H_{0s}$<br>golfperiode te variëren<br>korreldiameter duinmateriaal<br>nauwkeurigheid DUROS-plus<br>duur stormvloed<br>ligging beginprofiel<br>bui-stoten en bui-oscillaties<br>niet meer relevant tijdens<br>zeer zware stormvloeden |
| Variaties                                   | nauwkeurigheid DUROS:<br>$\sigma_{nauwk.} = 0,10 A + 20 \text{ m}^3/\text{m}$<br>variatie duur stormvloed:<br>$\sigma_{duur} = 0,10 A \text{ m}^3/\text{m}$                                           | nauwkeurigheid DUROS-plus:<br>$\sigma_{nauwk.} = 0,15 A \text{ m}^3/\text{m}$<br>variatie duur stormvloed:<br>$\sigma_{duur} = 0,10 A \text{ m}^3/\text{m}$                                                                                                        |
| Achtergrond berekeningen                    | probabilistische berekeningen                                                                                                                                                                         | probabilistische berekeningen                                                                                                                                                                                                                                      |
| Veiligheidsbeoordeling                      | methodiek met set van specifieke parameters                                                                                                                                                           | methodiek met set van specifieke parameters (Deel C)                                                                                                                                                                                                               |
| Primair gebruik                             | beoordeling veiligheid van duinen als waterkering                                                                                                                                                     | samen met HR2006                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Toeleverend aan                             | opgenomen in VTV 2001                                                                                                                                                                                 | opgenomen in VTV2006                                                                                                                                                                                                                                               |
| Secundair gebruik                           | grotere overschrijdingskansen                                                                                                                                                                         | grotere overschrijdingskansen (Deel D)                                                                                                                                                                                                                             |

Tabel 1 Overzicht kenmerken TAW Leidraad 1984 en TRDA2006

## 16 Opstellers TRDA2006

Om uiteindelijk het TRDA2006 te kunnen opstellen, is er voorwerk verricht. WL I Delft Hydraulics heeft als projectverantwoordelijke een zogenoemde “Kennisalliantie Duinafslag” in het leven geroepen, met als deelnemende instituten WL I Delft Hydraulics, Alkyon Hydraulic Consultancy & Research en de Technische Universiteit Delft. Direct verantwoordelijk voor het opstellen en de inhoud van het TRDA2006 zijn de volgende personen die bij de kennisalliantie zijn betrokken:

|                          |                                                                                                              |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dr. ir. J. van de Graaff | Technische Universiteit Delft; deelprojectleider van dit Technisch Rapport Duinafslag                        |
| Dr. ir. M.R.A. van Gent  | WL I Delft Hydraulics; projectleider namens ‘Kennisalliantie Duinafslag’                                     |
| Dr. ir. M. Boers         | WL I Delft Hydraulics (tot 1/2/2007 RIKZ en coördinator van de zijde van de opdrachtgever van het onderzoek) |
| Dr. ir. F.L.M. Diermanse | WL I Delft Hydraulics                                                                                        |
| Ir. D.J. Walstra         | WL I Delft Hydraulics                                                                                        |
| Dr. ir. H.J. Steetzel    | Alkyon Hydraulic Consultancy & Research                                                                      |

Van de zijde van Rijkswaterstaat heeft Drs. Q.J. Lodder aan de totstandkoming van dit TRDA2006 bijgedragen.

Een Reviewcommissie met vertegenwoordigers van Rijkswaterstaat, Technische Universiteit Delft, Universiteit van Utrecht, Universiteit Twente, Waterschappen en voormalige medewerkers van Rijkswaterstaat heeft dit TRDA2006 beoordeeld.

De opstelling van dit TRDA2006 is in het kader van het Rijkswaterstaat project ‘Sterkte en Belastingen van Waterkeringen’ (SBW) tot stand gekomen.

## Deel B

# Rekenmodel voor de verwachting van duinafslag tijdens stormvloed

*In Deel B staat de algemene toepassing van het rekenmodel DUROS-plus centraal. Er wordt aangegeven hoe de mate van duinafslag ten gevolge van een willekeurige, maar wel zware stormvloed kan worden bepaald. In Deel C wordt aangegeven hoe DUROS-plus dient te worden toegepast in de toetsmethode op 'veiligheid' van een duinwaterkering. Omdat wordt beoogd dat de Delen B en C ook afzonderlijk zijn te gebruiken, zijn enkele herhalingen niet te vermijden.*

## 17 Deterministisch rekenmodel DUROS-plus

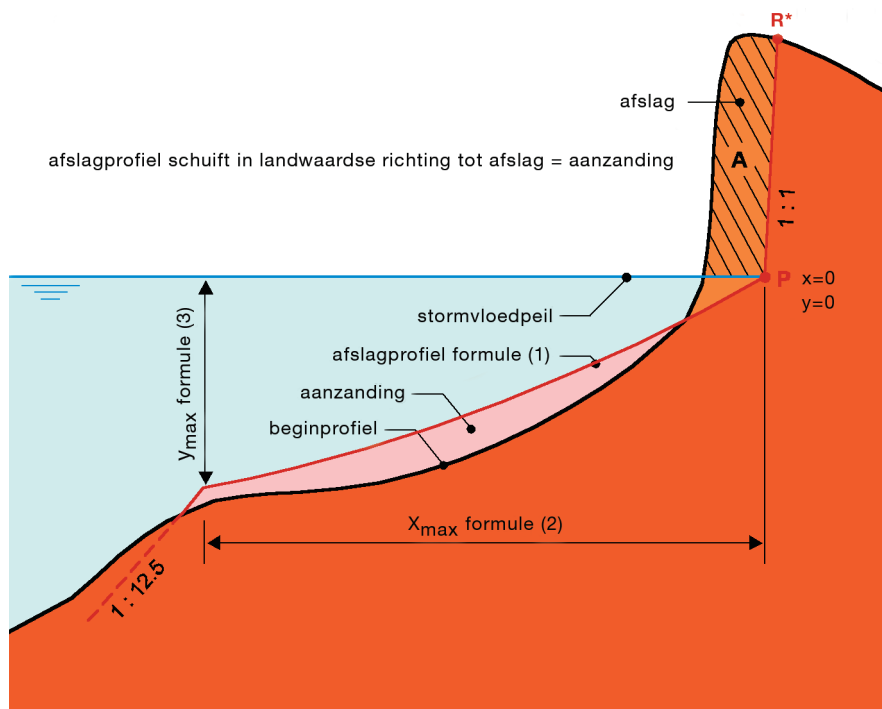
Met het (deterministische) rekenmodel DUROS-plus kunnen de verwachtingswaarde en de standaardafwijking worden bepaald van de mate van afslag als gevolg van een willekeurige, maar wel zware stormvloed. De ligging van het kustprofiel (vooroever, strand en duinen) vlak vóór de stormvloed, de korrelgrootte van het duinzand  $D_{50}$ , het stormvloedpeil  $h_{max}$  en de golfkarakteristieken op een waterdiepte van circa NAP -20 m (significante golfhoogte  $H_{0s}$  en golfperiode  $T_p$ ) zijn bepalend voor de mate van afslag. DUROS-plus kan worden gebruikt bij normale en meer extreme stormvloedcondities. Voor min of meer geleidelijk in zeewaartse richting aflopende kustprofielen kan het rekenmodel zonder meer worden gebruikt. Indien er zich vlak voor de kust een diepe geul bevindt, kan het rekenmodel niet zonder meer te worden toegepast (zie ook punt 32).

## 18 Uitgangspunten

De volgende uitgangspunten zijn van toepassing:

- Tijdens een stormvloed met duinafslag wordt het bovenste gedeelte van het kustprofiel zoals dat net vóór de stormvloed aanwezig is, omgevormd tot een zogenaamd *afslagprofiel*. Op wat dieper water worden de veranderingen in de ligging van het kustprofiel door de stormvloed gering geacht. Bovendien hebben mogelijke veranderingen in de kustligging die daar tijdens een stormvloed zouden kunnen plaatsvinden, geen effect op de uiteindelijke mate van duinafslag.
- De *vorm* van dit afslagprofiel is een functie van de significante golfhoogte, de piekperiode (beide op een waterdiepte van circa NAP -20 m) en de valsnelheid van het afgeslagen duinzand in stilstaand zeewater van 5° Celsius.
- De vorm van het afslagprofiel is onafhankelijk van het stormvloedpeil; het stormvloedpeil is de maximum waterstand die tijdens de stormvloed wordt bereikt. De ligging van het afslagprofiel in *verticale* zin hangt samen met het stormvloedpeil. (Dat de vorm van het afslagprofiel als onafhankelijk van de maximum waterstand wordt gesteld, betekent overigens wel dat er van wordt uitgegaan dat het afslagprofiel zich min of meer 'vrij' kan ontwikkelen.)
- De vorm van het afslagprofiel is onafhankelijk van de ligging van het kustprofiel vóór de storm. Zie voor uitzonderingen onder meer figuur 4.
- De vorm van het afslagprofiel is onafhankelijk van de richting van golfaanval op de kust.
- De vorm van het afslagprofiel is onafhankelijk van de aanwezigheid van eventuele brokstukken van bebouwing in de afslagzone die tijdens een stormvloed in zee terecht komen, of van brokstukken van een strandmuur en boulevard of van een duinvoetverdediging die tijdens een stormvloed kunnen worden vernield; zie ook punt 30. Als bij relatief minder zware stormvloed de strandmuur of de duinvoetverdediging stand houdt, geldt dat uiteraard niet. Er dient dan met ontgrondingskuilen vlak voor de constructies rekening te worden gehouden.
- Het afgeslagen zand van de duinen, het strand en van eventuele ondiepe gedeelten van het dwarsprofiel wordt uitsluitend in zeewaartse richting getransporteerd.

- Het duinafslagproces tijdens een zware stormvloed wordt als een twee-dimensionaal proces opgevat; zie ook punt 29.
- De mate van duinafslag hangt uiteraard ook af van bijvoorbeeld de tijd dat het werkelijke waterstandsverloop zich in de buurt van het maximum bevindt. Met een spits verloop van de waterstand nabij het maximum is er minder duinafslag dan bij een wat meer geleidelijk verloop bij gelijke maximum waterstanden (stormvloedpeilen). Met dergelijke verschillen wordt in het hier bedoelde afslagprofiel geen rekening gehouden; zie ook punt 21.
- De vorm van het afslagprofiel en de ligging van dat profiel in verticale zin hangen af van onder meer  $h_{max}$ ,  $H_{0s}$  en  $T_p$ . De maximale waarden van die parameters tijdens een stormvloed komen tegelijkertijd voor (op het moment van  $h_{max}$ ).



Figuur 1. DUROS-plus model

- Het afslagprofiel wordt in *horizontale* zin zodanig gesitueerd ten opzichte van het dwarsprofiel juist vóór de stormvloed dat het totale volume zand dat per strekkende meter kust wordt afgeslagen ( $m^3/m$ ), gelijk is aan het volume zand dat tussen het afslagprofiel en het beginprofiel wordt afgezet (zie figuur 1). Er wordt in het algemeen geen rekening gehouden met netto verliezen in zijdelingse richting. Zie voor uitzonderingen de punten 29 en 34. In principe komt dat er op neer dat het afslagprofiel (met de X-as op het stormvloedpeil) zover landinwaarts wordt geschoven, dat een sluitende zandbalans in dwars-richting ontstaat.
- In figuur 1 zijn de punten P en  $R^*$  aangegeven. (P in het oorspronkelijke duinmassief ter hoogte van het stormvloedpeil, en  $R^*$  aan de oppervlakte van het duin ter hoogte van het *maaveld*.) De ligging van punt  $R^*$  na een stormvloed is onder andere voor het kustbeheer het meest relevant. Tenzij anders is vermeld, wordt in het navolgende steeds punt  $R^*$  bedoeld als er bijvoorbeeld van de mate van duinafslag sprake is. Onder meer in de punten 21 en 26 wordt aangegeven dat punt  $R^*$  in sommige situaties vervangen wordt door punt R.



## 19 Vorm van het afslagprofiel

De vorm van het afslagprofiel van DUROS-plus wordt als volgt bepaald:

De duinvoet, dat is het punt waar het steile front van het afgeslagen duin overgaat in het veel flauwere profiel van het strand, ligt ná afslag op het stormvloedpeil. De helling van het afgeslagen duintalud is 1:1.

Vanaf de duinvoet ( $x = 0$ ;  $y = 0$ ) verloopt het afslagprofiel parabolisch (loodrecht op de kust) in zeewaartse richting volgens de formule:

$$\left(\frac{7,6}{H_{0s}}\right)^y = 0,4714 \left[ \left(\frac{7,6}{H_{0s}}\right)^{1,28} \left(\frac{12}{T_p}\right)^{0,45} \left(\frac{w}{0,0268}\right)^{0,56} x + 18 \right]^{0,5} - 2,0 \quad (1)$$

tot aan het punt waarvoor geldt:

$$x_{\max} = 250 \left(\frac{H_{0s}}{7,6}\right)^{1,28} \left(\frac{0,0268}{w}\right)^{0,56} \quad (2)$$

en dus:

$$y_{\max} = \left[ 0,4714 \left\{ 250 \left(\frac{12}{T_p}\right)^{0,45} + 18 \right\}^{0,5} - 2,0 \right] \left(\frac{H_{0s}}{7,6}\right) \quad (3)$$

Zeewaarts van het punt  $x_{\max}$ ,  $y_{\max}$  gaat het profiel over in een recht talud onder een helling van 1:12,5 tot het oorspronkelijke dwarsprofiel wordt gesneden.

In de formules (1), (2) en (3) is:

- $H_{0s}$  de significante golfhoogte op diep water [m].
- $T_p$  de golfperiode bij de piek van het energiedichtheidspectrum [s].
- $w$  de valsnelheid van het duinzand in zeewater van 5° Celsius [m/s].
- $x$  de afstand vanaf de nieuwe duinvoet [m].
- $y$  de diepte beneden stormvloedpeil [m].

De formules (1) en (3) zijn geldig voor stormvloed en waarbij de piekperioden in het traject  $12 \text{ s} < T_p < 20 \text{ s}$  liggen. Voor stormvloed en waarbij geldt  $T_p < 12 \text{ s}$ , wordt  $T_p = 12 \text{ s}$  aangehouden. Voor stormvloed en waarvoor geldt  $T_p > 20 \text{ s}$ , wordt  $T_p = 20 \text{ s}$  aangehouden.

In de formules (1) en (3) is de verhouding  $12/T_p$  opgenomen. Voor een duidelijk enkeltoppig spectrum is dat een aanvaardbare benadering. Voor golfspectra (energiedichtheidspectra) die duidelijk van de enkeltoppige vorm afwijken is de periode maat  $T_{m-1,0}$  een betere parameter om een dergelijk golfspectrum te karakteriseren. Als er tijdens de te beschouwen stormvloed sprake is van een spectrumvorm die duidelijk afwijkt van een enkeltoppig spectrum, dient in plaats van de verhouding  $12/T_p$  in de formules (1) en (3), de verhouding  $10,8/T_{m-1,0}$  te worden gebruikt.



De valsnelheid  $w$  wordt berekend met de formule:

$$^{10} \log \left( \frac{1}{w} \right) = 0,476 \left( ^{10} \log D_{50} \right)^2 + 2,180 ^{10} \log D_{50} + 3,226 \quad (4)$$

In formule (4) is:

$w$  de valsnelheid van het duinzand in zeewater [m/s].

$D_{50}$  maat voor de korreldiameter van het duinzand  
(50% van het gewicht van een monster is fijner).

Formule (4) is afgeleid voor zeewater met een temperatuur van 5° Celsius [Waterloopkundig Laboratorium (1983)]. De te berekenen valsnelheden worden gebruikt tijdens de gehele (winter)periode waarin zware stormvloeden kunnen worden verwacht.

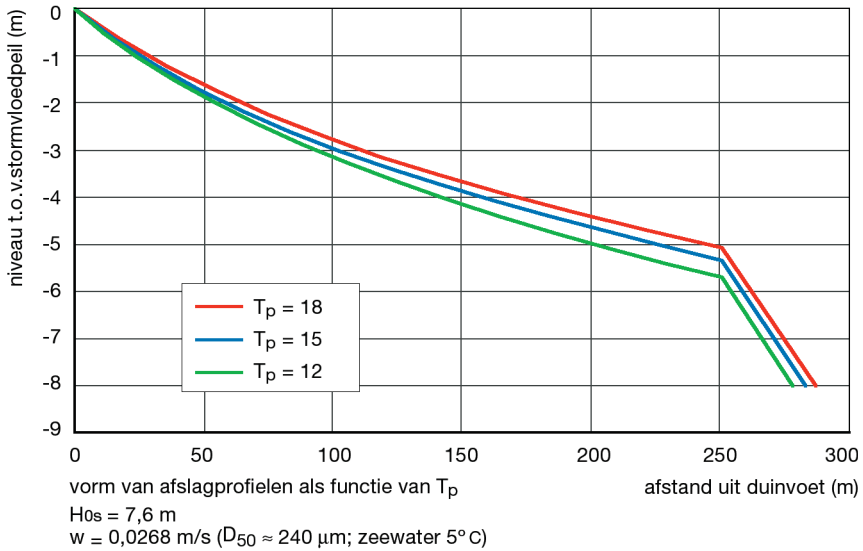
In de figuren 2 en 3 zijn enkele vormen van afslagprofielen gegeven als functie van golfperiode en korreldiameter (valsnelheid in de formules) van het duinzand.

In DUROS-plus ligt na afloop van de stormvloed de overgang tussen het steil afgeslagen duinfront (1:1) en het veel flauwere afslagprofiel precies ter hoogte van het maximum stormvloedpeil zoals dat tijdens de stormvloed is bereikt. Er wordt dus niet met enige golfoploop rekening gehouden in het rekenmodel. Voor zeer zware stormvloeden met hoge waterstanden, waarbij er relatief veel zand naar dieper water zal worden afgevoerd, is dat wellicht een aanvaardbare aanname. Eén en ander laat uiteraard onverlet dat bij veel minder zware stormvloeden, met veel lagere waterstanden, waarbij een begin van duinafslag gaat plaatsvinden, de aantasting van de duinen juist veroorzaakt zal worden door de uitlopende golven. In dergelijke gevallen wordt na afloop van de stormvloed de bedoelde overgang tussen het steil afgeslagen duinfront en het strand op een hoger niveau aangetroffen dan de maximum waterstand die tijdens de stormvloed wordt bereikt.

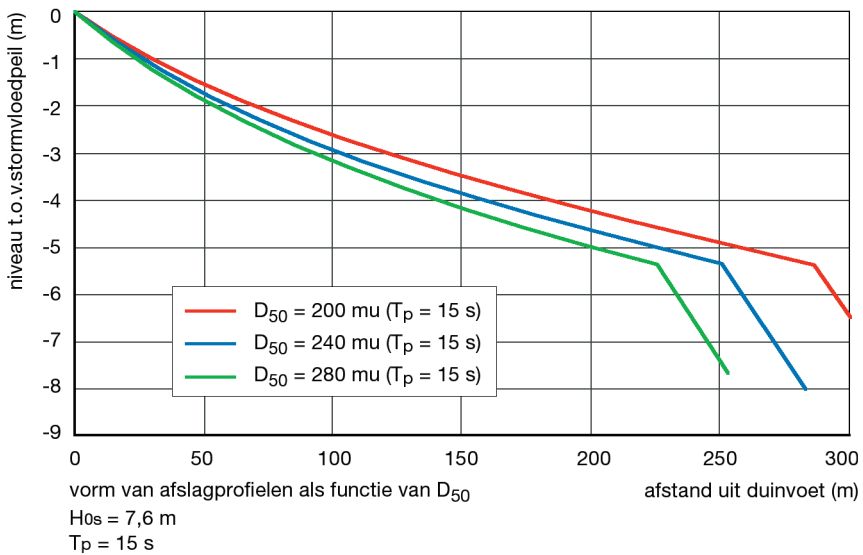
In vergelijking met de formules voor het afslagprofiel zoals die zijn beschreven in de TAW Leidraad 1984 zijn de volgende opmerkingen te maken:

- In de TAW Leidraad 1984 (DUROS model) werd voor de piekperiode  $T_p$  steeds 12 s aangehouden.
- In de vergelijking voor het parabolische verloop van het afslagprofiel in DUROS-plus, formule (1), is de factor  $(12/T_p)^{0,45}$  opgenomen. Deze factor heeft tot gevolg dat voor langere golfperiodes  $T_p$  dan 12 s het afslagprofiel hoger komt te liggen dan voor  $T_p = 12$  s het geval is.
- De factor  $(12/T_p)^{0,45}$  komt ook voor in formule (3). De waarde van  $y_{max}$  wordt dan dus kleiner naarmate een langere golfperiode dan 12 s tijdens de stormvloed voorkomt.
- De lengte waarover het afslagprofiel zich ontwikkelt, is niet afhankelijk van de golfperiode.
- Voor  $T_p \leq 12$  s reduceren de gegeven formules tot de formules in de TAW Leidraad 1984.

- Uiteindelijk komt het erop neer dat in twee stormvloeden waarbij alleen de piekperiode verschilt, er meer duinafslag zal optreden tijdens de stormvloed met de langere golfperiode dan tijdens de stormvloed met de kortere golfperiode.



Figuur 2. Afslagprofielen als functie van  $T_p$



Figuur 3. Afslagprofielen als functie van  $D_{50}$

## 20 Gebruik van DUROS-plus bij een willekeurige stormvloed

Hoewel het TRDA2006 vooral bedoeld is om te kunnen toetsen of een duinwaterkering aan de 'veiligheidseisen' voldoet, kan het DUROS-plus model ook worden gebruikt om de mate van duinafslag als gevolg van een willekeurige stormvloed na te rekenen. Dit betreft dan een heel algemene toepassing. Het verdient bijvoorbeeld aanbeveling om als er een (tamelijk) zware stormvloed is voorgekomen waarbij enige duinafslag heeft plaatsgevonden, de werkelijk opgetreden mate van afslag te vergelijken met de met het rekenmodel berekende afslag.

In een voorkomend geval kan de mate van duinafslag als volgt worden bepaald (berekend):

- De vorm van het afslagprofiel wordt bepaald door de significante golfhoogte op dieper water, de bijbehorende golfperiode en de korreldiameter van het duinmateriaal [zie formule (1)].
- De positie van het afslagprofiel in verticale zin wordt bepaald door het maximum stormvloedpeil ( $X$ -as op stormvloedpeil).
- De positie van het afslagprofiel in horizontale zin wordt bepaald door het afslagprofiel (inclusief helling van 1:1 van het duinbeloop en helling van 1:12,5 als overgang) zodanig in het gegeven kustprofiel in te passen dat een sluitende zandbalans in de richting loodrecht op de kust ontstaat.
- Voor het maximum stormvloedpeil ter plaatse van het gegeven kustprofiel wordt de waterstand aangehouden die geldt buiten de brekerzone. Er wordt dus geen extra *wave set-up* (golfopzet) zoals die vlak voor de duinen voorkomt, in rekening gebracht. Voor het maximum stormvloedpeil kunnen over het algemeen waterstanden worden aangehouden die zijn afgeleid uit peilen van nabijgelegen meetstations.
- Voor de significante golfhoogte en de golfperiode worden waarden aangehouden zoals die gelden op een waterdiepte van circa NAP -20 m. In het algemeen kunnen, eventueel geïnterpoleerde, waarden van de golfmeetstations langs de Nederlandse kust hiervoor worden gebruikt.
- Wanneer vlak onder de kust een relatief ondiep platengebied voorkomt, kan met de reducerende werking daarvan op de golfhoogte rekening worden gehouden. Met adequate rekenmodellen (bijvoorbeeld SWAN) kunnen de golfhoogten juist landwaarts van het platengebied worden bepaald. Deze golfhoogten worden vervolgens in formule (1) ingevoerd om de vorm van het afslagprofiel te bepalen.
- De 'in-pas-operatie' van het afslagprofiel in het gegeven kustprofiel om een sluitende zandbalans in dwarsrichting te verkrijgen (zie het derde aandachtsbolletje), gaat niet in alle gevallen vlekkeloos. In figuur 4 is een aantal gevallen schetsmatig aangegeven.

Het basisidee achter de schetsen in figuur 4 is dat tijdens het (duin)afslagproces uitsluitend zeewaarts gerichte zandtransporten bijdragen aan het bereiken van een sluitende zandbalans in de richting dwars op de kust.

In figuur 4 wordt steeds aan de linkerkant een situatie geschetst vóór de stormvloed (het te vormen afslagprofiel 'hangt' als het ware aan het stormvloedpeil, met het 0,0-punt van het afslagprofiel juist tegen de duinen aan). Aan de rechterkant wordt de situatie ná de stormvloed aangegeven:

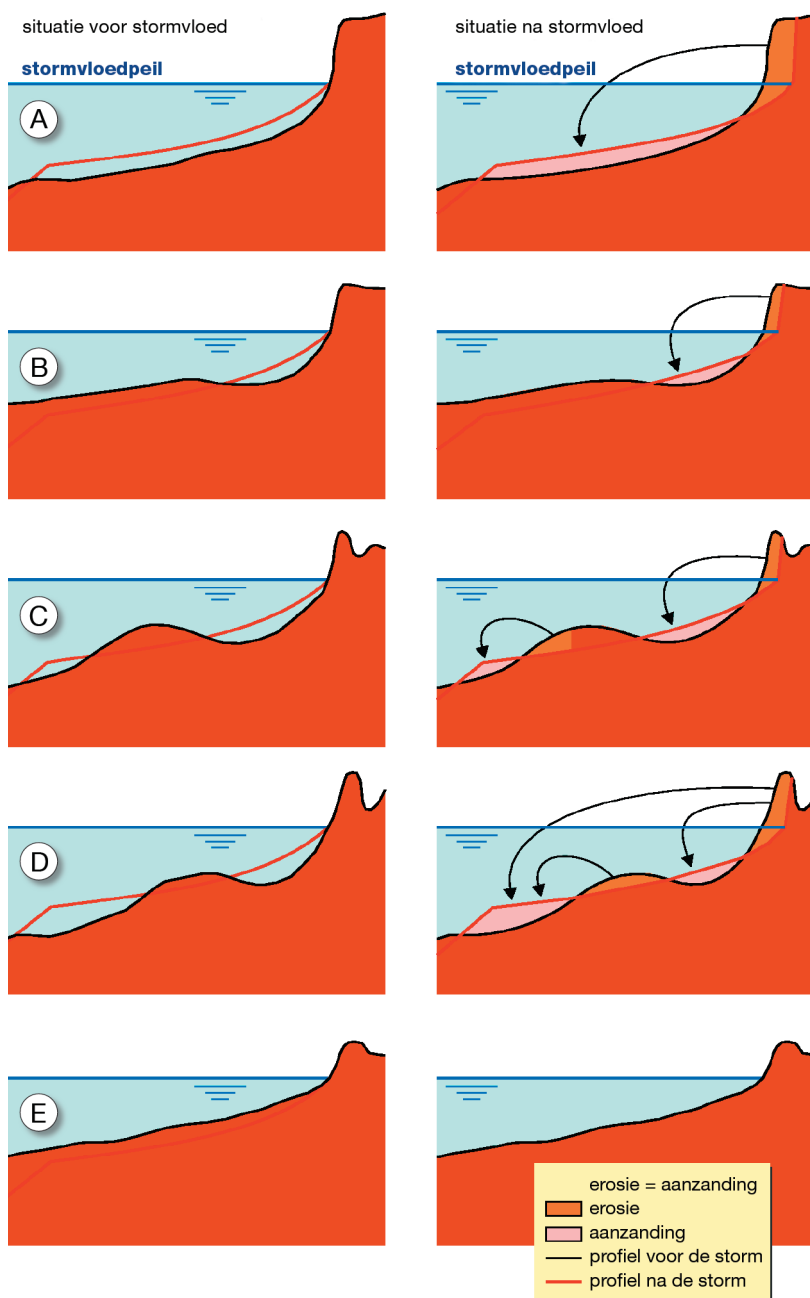
Geval A Deze situatie komt voor bij hoge stormvloeden; na afloop van de stormvloed is er sprake van een sluitende zandbalans in de richting loodrecht op de kust.

Geval B Deze situatie kan zich voordoen bij een kustprofiel met flauwe hellingen. Vóór de stormvloed ligt al een deel van het afslagprofiel beneden het dwarsprofiel zoals dat vlak voor de stormvloed aanwezig is. In de uiteindelijke (opgeschoven) toestand is dat nog meer het geval. Omdat er geen rekening wordt gehouden met een landwaartse verplaatsing van zand tijdens de stormvloed, wordt het oorspronkelijke profiel slechts opgevuld met zand dat van het duin is afgeslagen. Het afslagprofiel is niet volledig ontwikkeld.

Geval C Deze situatie is vergelijkbaar met B. De zandverplaatsingen aan de zeewaartse zijde van de bank zijn eigenlijk niet van belang voor het bereiken van een sluitende zandbalans.

Geval D De voor de kust liggende bank wordt in dit geval geheel geërodeerd tot aan het (opgeschoven) afslagprofiel. De verdere benodigde hoeveelheid zand voor de vorming van het afslagprofiel wordt aan het duin onttrokken.

Geval E In dit geval ligt het afslagprofiel geheel beneden het oorspronkelijke kustprofiel. Deze situatie doet zich vaak voor bij lage stormvloeden. Volgens het DUROS-plus model zal er geen duinafslag optreden. In de praktijk gebeurt dat vaak toch nog wel door enige golfoploop.



*Figuur 4. Duinafslag; voorbeelden van zandverplaatsing*

## 21 Nauwkeurigheid van een duinafslagberekening met DUROS-plus

Bij het ‘narekenen’ van de mate van duinafslag die door een in werkelijkheid opgetreden stormvloed is veroorzaakt, zal blijken dat de berekende hoeveelheid duinafslag in het algemeen niet overeenkomt met de in de natuur opgetreden mate van afslag. Daarvoor kan een aantal mogelijke oorzaken worden genoemd. Veelal zal het om een combinatie van oorzaken gaan:

### De nauwkeurigheid van het rekenmodel

Het ‘fysische’ proces dat aan DUROS-plus ten grondslag ligt (als de zandbalans sluitend is, stopt het afslagproces) is een zeer eenvoudige schematisatie van de uitermate complexe processen in werkelijkheid. Dat leidt onvermijdelijk tot onnauwkeurigheden. Met de bekend veronderstelde parameterwaarden als invoer in het DUROS-plus model, wordt de mate van duinafslag berekend. De nauwkeurigheid van het rekenmodel wordt vervolgens uitgedrukt als een afwijking ten opzichte van de aldus berekende hoeveelheid duinafslag *boven het stormvloedpeil* [zie volume  $A$  ( $\text{m}^3/\text{m}$ ) in figuur 1]. De afwijking heeft een normale verdeling met een gemiddelde  $\mu_A$  gelijk aan nul en een standaardafwijking  $\sigma_A$ .

$$\sigma_A = 0,15A \quad (5)$$

Een directe berekening van de mate van afslag met de bekend veronderstelde invoergegevens levert de positie van punt  $R^*$  op en daarbij is dan ook het volume zand  $A$   $\text{m}^3/\text{m}$  (afslag boven het stormvloedpeil) bekend. Wordt vervolgens rekening gehouden met bijvoorbeeld een mogelijke afwijking van 1 maal  $\sigma_A$  meer afslag dan levert dat een extra volume af te slaan duinzand op. Het eerder berekende punt  $R^*$  geldt dan niet meer en er wordt een ten opzichte van punt  $R^*$  verschoven punt  $R$  bepaald, zodanig dat met die verschuiving juist het extra volume zand is gemoeid. Zie vooral ook punt 22.

### De nauwkeurigheid van de invoerparameters

Men zal vrijwel nooit beschikken over een profielmeting vlak voor de stormvloed. Bovendien zijn de precieze waarden voor het stormvloedpeil, de golfhoogte en golfperiode en van de korreldiameter van het duinzand niet bekend.

### De effecten van buistoten, bui-oscillaties en stormduur

De mogelijke effecten van waterstandsfluctuaties ten gevolge van buistoten en bui-oscillaties zijn niet in het rekenmodel opgenomen. Het rekenmodel is afgeleid voor relatief zware stormvloeden, waarbij hoge waterstanden worden bereikt. Het rekenmodel is afgeleid voor typen stormvloeden waarbij het niveau van het maximum stormvloedpeil minus 1,0 m gedurende 4 à 6 uur wordt overschreden. Wezenlijk andere typen stormvloeden kunnen tot een andere mate van duinafslag leiden.

### Herverdeling van zand in de richting langs de kust

Het rekenmodel gaat uit van een zuiver 2-dimensionaal afslagproces. Zand wordt alleen in de richting loodrecht (in zeewaartse richting) op de kust

getransporteerd. Dit strikte uitgangspunt kan er toe leiden dat in nabijgelegen dwarsprofielen een verschillende mate van duinafslag wordt berekend. In een dwarsprofiel met bijvoorbeeld een relatief hoog duin resulteert een berekening van de ligging van punt  $R^*$  ná de stormvloed in een minder verre landinwaartse positie, dan de berekening van punt  $R^*$  in een belendende dwarsdoorsnede met een relatief laag duin. Eén en ander leidt er ook toe dat de berekeningen discontinuïteiten in de ligging van de afslagprofielen zullen opleveren. In de natuur zal er, zeker in dergelijke gevallen, sprake zijn van herverdeling van zand in de richting langs de kust. Na een stormvloed waarbij behoorlijk wat duinafslag heeft plaatsgevonden, is er veelal in de richting langs de kust over een grote afstand een tamelijk rechte steile afslagrand te zien, ondanks het feit dat de duinhoogte langs de kust soms grote variaties laat zien.

Bij kustvakken met een sterke kustlijnkromming en/of met een onderbreking van het strand- of duinprofiel is het uitgangspunt van een sluitende zandbalans in dwarsrichting ook niet correct. Bij dergelijke kustvakken kunnen vanzelfsprekend (grote) verschillen tussen berekening en meting worden gevonden. Zie ook punt 29 waar wordt aangegeven hoe een mogelijke gradiënt in het langstransport in rekening kan worden gebracht.

## 22 Algemeen gebruik van het rekenmodel

In dit Deel B staat het algemene gebruik van het rekenmodel centraal. Het verdient uiteraard aanbeveling de gemeten mate van duinafslag ten gevolge van in de toekomst optredende (tamelijk zware) stormvloeden te vergelijken met de uitkomsten van het DUROS-plus model. Bij dergelijke vergelijkende studies verdient het aanbeveling ook andere rekenmodellen voor duinafslag te betrekken (bijvoorbeeld DUROSTA; Delft3D). In het volgende Deel C wordt het rekenmodel DUROS-plus gebruikt als basis voor het toetsinstrument voor de ‘veiligheid’ die de duinen bieden.

De nauwkeurigheid van het DUROS-plus model (uitgedrukt in de standaardafwijking  $\sigma_A$ ) is hiervoor aangegeven als  $\sigma_A = 0,15A \text{ m}^3/\text{m}$  [formule (5)]. Dat wijkt af van de nauwkeurigheid die voor het DUROS model werd/wordt aangehouden  $\sigma_A = 0,10A + 20 \text{ m}^3/\text{m}$ . Voor grote waarden van  $A$  ( $\approx 400 \text{ m}^3/\text{m}$ ) zijn de verschillen tussen beide uitdrukkingen niet groot. Vooral ook omdat in de praktijk is gebleken dat de term  $20 \text{ m}^3/\text{m}$  soms aanleiding geeft tot lastige afwegingen en omdat het TRDA2006 primair is bedoeld voor het ‘veiligheidsvraagstuk’ van het achterland, is er voor gekozen  $\sigma_A = 0,15A \text{ m}^3/\text{m}$  als standaardafwijking aan te nemen. Dat neemt niet weg dat in gevallen waarbij er in werkelijkheid sprake is van net-wel enige duinafslag of net-geen duinafslag, waarbij dus de grootte  $A$  relatief klein is en waarbij een berekening met het DUROS-plus model zelfs respectievelijk net-geen en net-wel duinafslag kan laten zien,  $\sigma_A = 0,15A \text{ m}^3/\text{m}$  als standaardafwijking wellicht aan de lage kant is.

De nauwkeurigheid van het DUROS-plus model (maar ook van het DUROS model) is uitgedrukt in een volume-maat. Door bijvoorbeeld de ligging van punt  $R$  te bepalen die behoort bij een geval waarbij er 1 maal de standaardafwijking extra afslag in rekening wordt gebracht, verschuift de oorspronkelijk berekende ligging van punt  $R^*$  met een afstand  $\Delta R$  in landwaartse richting. Rekenkundig gaat dat in alle gevallen zonder problemen. Zolang het gaat om relatief geringe waarden van  $\Delta R$  is het fysisch ook nog wel aannemelijk te maken. Als er van wordt uitgegaan dat er best wat meer duinafslag zou kunnen optreden dan een recht-toe-recht-aan berekening laat zien, zal dat altijd gepaard gaan met een ook in dat geval vloeiend verlopend afslagprofiel en een sluitende zandbalans in dwarsrichting. Het afslag-

profiel ligt dan bijvoorbeeld over de gehele of gedeeltelijke linie wat hoger dan in het DUROS-plus model wordt aangenomen, en/of het strekt zich wat verder in zeewaartse richting uit.

Als de duinhoogte in het gebied tussen  $R^*$  en  $R^* + \Delta R = R$  ten opzichte van het stormvloedpeil echter 'toevallig' erg klein is, en er dus een relatief grote waarde voor  $\Delta R$  wordt berekend, kan dat er toe leiden dat het niet goed denkbaar meer is dat er nog een fysisch aannemelijk afslagprofiel bij 'behoort'. In punt 26 en Bijlage 2 wordt op deze kwestie nader ingegaan.

## Deel C

# ‘Veiligheidstoets’ van een dwarsdoorsnede van een duinenkust

*In Deel C wordt de toetsmethode voor de beoordeling van de ‘veiligheid’ van een duinwaterkering besproken. De toetsmethode dient voor elke afzonderlijke (JARKUS) doorsnede te worden uitgevoerd. Er wordt van ‘grof’ naar ‘fijn’ gewerkt. Blijkt de grove aanpak al tot een oordeel ‘veilig’ te leiden, dan kan de procedure voor de desbetreffende doorsnede worden beëindigd.*

## 23 Toetsmethode voor de beoordeling van de ‘veiligheid’

Voor de beoordeling van de ‘veiligheid’ van een dwarsdoorsnede van een duinenkust is een relatief eenvoudige toetsmethode ontwikkeld. In de toetsmethode worden uitkomsten van berekeningen met DUROS-plus gebruikt. De in de berekeningen in te voeren parameterwaarden voor de afslagbepalende factoren zijn daarbij zodanig bepaald, dat de aldus berekende mate van duinafslag een overschrijdingskans heeft die gelijk is aan de vereiste maximaal toelaatbare kans op doorbreken. Die mate van duinafslag wordt ook wel met *maatgevende* duinafslag aangeduid. In het geval van relatief smalle duinen, moet de maatgevende afslag nog binnen het duinprofiel passen wil er sprake zijn van een ‘veilige’ situatie. In het geval van zeer brede duinen is er over het algemeen geen ‘veiligheidsprobleem’; de maatgevende duinafslag is dan van belang om dat deel van de duinen aan te geven dat tijdens ontwerpomstandigheden zal afslaan en dus (een deel van) de waterkering vormt.

Bij een ‘veilige’ duinwaterkering - een waterkering die voldoet aan de wettelijke eisen - wordt vanzelfsprekend in eerste aanleg gedacht aan een waterkering die tijdens ontwerpomstandigheden niet doorbreekt en waarbij er dan dus geen overstroming van het achterland zal plaatsvinden. In juridische zin zijn de positie en afmetingen van een ‘waterkering’ in een Legger vastgelegd. Bij bijvoorbeeld brede duinen zou het kunnen voorkomen dat een ‘veilige’ waterkering als uitkomst van de toetsmethode niet past binnen de grenzen zoals die in de huidige Legger zijn aangegeven, maar dat er in fysische zin nog lang geen sprake is van een werkelijk ‘veiligheidsprobleem’. Formeel voldoet de waterkering (zoals aangegeven in de Legger) dan niet aan de eisen. Een afkeuring op grond van de hiervoor bedoelde situatie is dus aanzienlijk minder ernstig dan als er van een werkelijk ‘veiligheidsprobleem’ sprake is omdat de duinen kennelijk te smal zijn.

Bij een duinwaterkering met een tamelijk smalle eerste duinregel en landwaarts daarvan een tweede regel (beide duinregels vormen uiteindelijk samen de eigenlijke waterkering), kan het gebeuren dat de eerste duinregel al doorbreekt bij minder zware condities dan de ontwerpcondities. Voor het kustbeheer is het dan onder meer nodig te weten bij welke condities dat doorbreken van de eerste duinregel kan worden verwacht. De ontwikkelde (toets)methode kan ook, zij het met andere invoerparameters, worden gebruikt om de doorbreekkans van een dergelijke eerste duinregel te bepalen. Zie Deel D.

In het duingedeelte van een dwarsprofiel kunnen diverse punten  $R$  worden onderkend, ieder met een eigen overschrijdingskans. Een punt  $R$  met een overschrijdingskans van  $10^{-4}$  per jaar is het  $10^{-4}$  *afslagpunt* in die dwarsdoorsnede. In het navolgende wordt ook de term *afslaglijn* gebruikt. Met een afslaglijn wordt een lijn bedoeld die afslagpunten in diverse raaien met een gelijke overschrijdingskans per jaar met elkaar verbindt. Op een kaart kan dan bijvoorbeeld een  $10^{-5}$  afslaglijn worden ingetekend. Door de 2-dimensionale benadering van het afslagproces betreft het dus vooralsnog een afslaglijn die uit een aantal lijnstukken bestaat.



Wil er sprake zijn van een 'veilige' duinwaterkering dan moet in bijvoorbeeld de dijkkringgebieden 13 en 14, de  $10^{-5}$  afslaglijn nog zover zeewaarts van de landwaartse grens van het duingebied (achterkant duin) liggen, dat er ook nog een zogenaamd *grensprofiel* in past. Zie punten 26 en 27.

Ook voor het bepalen van de ligging van andere afslaglijnen (met een grotere overschrijdingskans dan die van de maatgevende afslaglijn) kan de ontwikkelde methode worden gebruikt; zie ook Deel D.

Voor een aantal kustvakken dient bij de toepassing van de toetsmethode nog rekening te worden gehouden met enige extra duinafslag als gevolg van een verwachte gradiënt in het langstransport tijdens het duinafslagproces. De wijze waarop dit in rekening wordt gebracht, is niet ontleend aan de uitkomsten van de probabilistische berekeningen die aan de toetsmethode ten grondslag lagen. In de probabilistische berekeningen is geen rekening gehouden met een eventuele gradiënt in het langstransport. Zie verder punt 29.

## 24 Toepassingsgebied toetsmethode

De toetsmethode is er primair op gericht om te kunnen beoordelen of een gegeven duinwaterkering 'veilig' is (wel of geen doorbraak onder ontwerpomstandigheden). Veelal zijn inmiddels (ook in zeer brede duinen) de diverse zones aangegeven die samen als 'waterkeringzone' worden aangemerkt. De waterkeringzone valt samen met het keurgebied (indien een Waterschap het beheer over de waterkering voert). Eén en ander is dan in de Legger juridisch verankerd.

In het navolgende speelt voornamelijk de maatgevende afslagzone een cruciale rol. De maatgevende afslagzone is dus de zone in het duingebied die strikt 'nodig' is om de maatgevende duinafslag te kunnen accommoderen; tot punt *R* op maai-veldniveau reikt de maatgevende afslag. Voor een 'veilige' waterkering die nog juist aan de eisen voldoet, resteert er dan nog slechts een grensprofiel (zie punt 27) dat nog juist in het nog overgebleven duin past. De landwaartse grens van de maatgevende afslagzone wordt verder (*maatgevend*) *afslagpunt* genoemd. Dat geldt dus primair voor de situatie in een gegeven dwarsprofiel. In bovenaanzicht is er vervolgens voor een reeks van dwarsprofielen een (*maatgevende*) *afslaglijn* of (*maatgevende*) *afslaggrens* te construeren.

In het kustbeheer wordt er veelal voor gekozen de ligging van de grenzen tussen de diverse zones, vast te stellen ten opzichte van een vast peil (bijvoorbeeld het Rekenpeil). In dit TRDA2006 wordt dat nadrukkelijk niet gedaan. Posities in het veld zijn het uitgangspunt; vergelijk de positie van punt *R*. Indien er behoefte bestaat om de positie ten opzichte van andere referentieniveaus vast te stellen, dient er een naberekenings-slag te worden uitgevoerd.

Indien de diverse zones van de waterkering inmiddels formeel zijn vastgesteld en in de Legger zijn opgenomen, kan met de toetsmethode worden nagegaan of de eerder gemaakte keuze voor de ligging van de afslaggrens nog juist is (eventueel dienen er aanpassingen van de Legger te volgen).

Indien de formele vastlegging van de waterkeringzone in Leggers nog niet heeft plaatsgevonden, kan dat mede met behulp van de uitkomsten van de toetsmethode alsnog geschieden.

## 25 Afslagbepalende parameters

Er zijn zeven parameters en één aanvullend effect die de mate van duinafslag bepalen die van belang is voor de 'veiligheidstoets'. (Met andere mogelijke invloeden wordt geen rekening gehouden.) De zeven parameters en het aanvullende effect zijn in vier groepen in te delen:

### A (Maximum) stormvloedpeil, significante golfhoogte op diep water (NAP -20 m), piekperiode en korreldiameter van het duinmateriaal

Het maximum stormvloedpeil  $h_{max}$ , de significante golfhoogte op diep water  $H_{0s}$ , de piekperiode  $T_p$  zoals die tijdens een zware stormvloed optreden, en de korreldiameter van het duinzand  $D_{50}$  bepalen gezamenlijk in hoge mate hoeveel duinafslag er zal optreden. De genoemde parameters bepalen de vorm en de hoogteligging van het afslagprofiel dat de kern vormt van het DUROS-plus model. De genoemde parameters bepalen daarmee dus (mede) de mate van duinafslag die kan worden verwacht.

In HR2006 (Randvoorwaardenboek 2006) zijn per km raai langs de kust de parameterwaarden van  $h_{max}$ ,  $H_{0s}$  en van  $T_p$  opgenomen die in de toetsmethode moeten worden ingevoerd.

In Bijlage 1 zijn de in te voeren rekenwaarden  $D_{reken}$  voor de korreldiameter vermeld. In Bijlage 1 worden in enkele gevallen andere waarden gegeven dan de waarden die zijn vermeld in de lijst van tabel 2 uit de TAW Leidraad 1984.

De in HR2006 genoemde waterstand betreft het zogenoemde *Rekenpeil*. Het voor een locatie geldende Rekenpeil is het (wettelijk vastgelegde) *ontwerppeil* vermeerderd met 2/3 decimeringshoogte.

De in HR2006 genoemde significante golfhoogte  $H_{0s}$  is de golfhoogte die behoort bij de verwachtingswaarde van de golfhoogte bij het Rekenpeil.

De in HR2006 genoemde golfperiode  $T_p$  is de verwachtingswaarde van  $T_p$  die behoort bij de hiervoor genoemde waarde van  $H_{0s}$ .

### B Tijdsduur hoogwaterpiek en onnauwkeurigheid van het DUROS-plus model

Aan de toetsmethode liggen uitgebreide probabilistische berekeningen ten grondslag. In die probabilistische berekeningen is rekening gehouden met mogelijke variaties in de *duur* van de hoogwaterpiek en met het effect van de *onnauwkeurigheid* van het DUROS-plus model. Zowel het effect van een mogelijk afwijkende duur van de stormvloed als het effect van de onnauwkeurigheid van het DUROS-plus model, zijn uitgedrukt als een fractie  $\Delta A$  van het afgeslagen volume zand boven stormvloedpeil  $A$ .

In de toetsmethode zijn de effecten van de duur van de hoogwaterpiek en de onnauwkeurigheid van het DUROS-plus model op de mate van duinafslag, samengenomen. Er dient uiteindelijk, naast het afslagvolume boven het Rekenpeil van  $A \text{ m}^3/\text{m}$ , met een extra volume  $\Delta A$  van  $0,25A$  te worden gerekend (zie ook punt 26).

### **C Invloed ligging kustprofiel juist vóór de stormvloed en invloed strandsuppleties; beide effecten worden in de verdere uitwerking samen genomen**

De ligging van het kustprofiel zoals dat juist vóór de stormvloed aanwezig is (eventueel inclusief 'resten' van recent uitgevoerde strandsuppleties) bepaalt mede de mate van duinafslag die zal optreden tijdens een zware stormvloed.

Sinds 1990 worden de structureel eroderende kustvakken gemiddeld gezien op hun plaats gehouden; de effecten van de structurele erosie worden met behulp van regelmatig terugkerende kunstmatige strand- en/of onderwatersuppleties teniet gedaan. (Dat is het landelijk ingevoerde beleid de kustlijnligging 'dynamisch' te handhaven.) Met structurele erosie behoeft dus over het algemeen niet meer rekening te worden gehouden. Hoe met de regelmatig terugkerende suppleties in de toetsmethode moet worden omgegaan, wordt in punt 26 aangegeven.

Berekeningen met behulp van het DUROS-plus model vóór en ná de uitvoering van een omvangrijke onderwatersuppletie laten zelden grote verschillen in de berekende ligging van het punt  $R^*$  zien. De onderwatersuppletie ligt gewoonlijk verder zeewaarts dan het meest zeewaartse punt van het afslagprofiel. Conform het DUROS-plus model wordt er dan geen effect op de mate van duinafslag berekend.

Voor een strandsuppletie geldt dat niet. Daar is heel goed te onderkennen wanneer er een suppletie heeft plaatsgevonden. Er ontstaat dan een zaagtandvormig-verloop in de ligging van punt  $R^*$  als functie van de tijd.

Tegenwoordig worden steeds vaker onderwatersuppleties toegepast (in plaats van strandsuppleties). Het directe effect van de uitvoering van regelmatig terugkerende onderwatersuppleties op de ligging van het punt  $R^*$  is dan dus vaak moeilijk te onderkennen.

Bij de toetsmethode wordt er van uitgegaan dat er een reeks van jaarlijkse profielmetingen (tenminste 15 jaar) beschikbaar is (JARKUS-metingen). Een dergelijke reeks metingen is nodig om de invloed van willekeurige fluctuaties in de profielligging en de invloed van eventueel regelmatig terugkerende kunstmatige suppleties op de 'veiligheid' in rekening te kunnen brengen. Met deze invloeden wordt rekening gehouden omdat niet bekend is welk profiel aanwezig is vlak voordat een stormvloed voorkomt waarbij de maatgevende duinafslag wordt bereikt.

### **D Effect gradiënt in het langstransport**

De mate van duinafslag in een gegeven dwarsprofiel hangt ook voor een deel af van of er sprake is van structurele erosie als gevolg van een gradiënt in het langstransport in de kustsectie waarvan het dwarsprofiel deel uitmaakt. In het algemeen komt dat voor bij gekromde kustvakken.

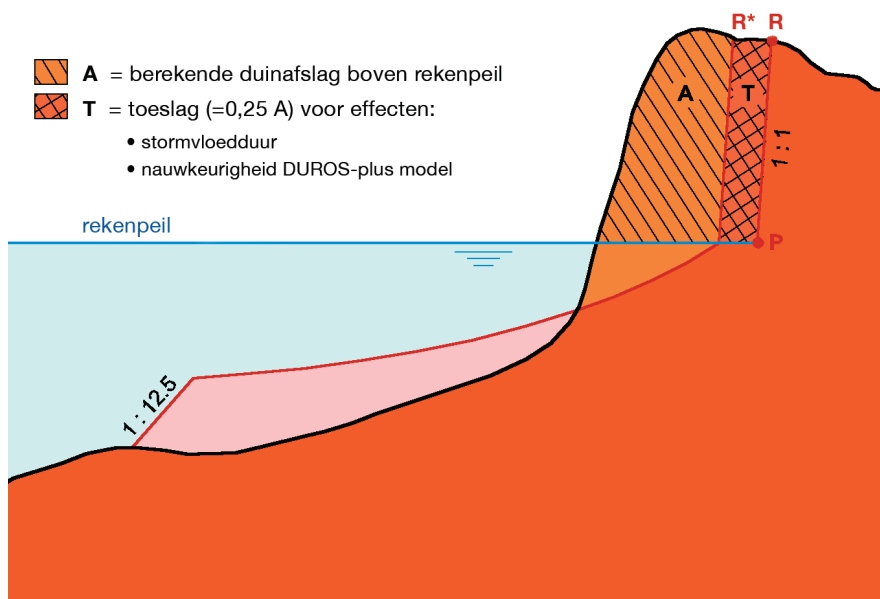
Veelal gaat het bij het effect van een gradiënt in het langstransport om verliezen van sediment uit een dwarsprofiel van hooguit enkele 10-tallen  $\text{m}^3/\text{m}$  per jaar. Niettemin wordt er van uitgegaan dat er tijdens een relatief kortdurende zware ontwerpstormvloed (duur: één of twee dagen) een wezenlijk effect op de zandhoeveelheid in het dwarsprofiel kan optreden als gevolg van een gradiënt in het langstransport. In punt 29 wordt dit verder uitgewerkt.

## 26 Werkwijze voor de bepaling van de maatgevende afslag (zonder gradiënt in het langstransport) en 'veiligheidstoets'

Het is hier in de eerste plaats van belang om te kunnen bepalen of de duinwaterkering voldoende 'veilig' is. De 'veiligheid' moet bijvoorbeeld voor de toetsdatum van 2011 worden onderzocht. Stel vervolgens dat het 'veiligheidsonderzoek' in de loop van 2009 wordt uitgevoerd. In de verdere beschrijving van de werkwijze wordt er eerst van uitgegaan dat de aanwezige duinwaterkering voldoende 'veilig' is. Blijkt in de loop van een serie berekeningen dat een doorbraak (bijvoorbeeld van een eerste duinregel) wordt verwacht, dan moet de procedure beëindigd worden en moet eerst een ander spoor worden gevolgd (zie punt 33).

De werkwijze van de toetsmethode is als volgt:

- Voor elk profiel uit de reeks jaarlijkse profielmetingen (JARKUS-metingen; aantal metingen  $N > 15$ ) wordt een afslagberekening gemaakt met behulp van het DUROS-plus model. Er dienen rekenwaarden conform HR2006 in het rekenmodel te worden ingevoerd. Het betreft voor de waterstand het zogenaamde Rekenpeil en voor de golfkarakteristieken (golfhoogte en golfperiode) de in HR2006 aangegeven waarden. De golfhoogte is daarbij gelijk aan de verwachtingswaarde van de golfhoogte bij het Rekenpeil. De golfperiode is zodanig aan de golfhoogte 'gekoppeld' dat de marginale overschrijdingskansen van beide parameters gelijk zijn. Voor de korreldiameter van het duinzand dient de waarde  $D_{reken}$  te worden ingevoerd die in Bijlage 1 is gegeven. De ligging van afslagpunt  $R^*$  wordt bepaald (bijvoorbeeld ten opzichte van de RSP-lijn) met behulp van het DUROS-plus model.
- Bij elke van de  $N$  afslagberekeningen wordt de berekende hoeveelheid duinafslag boven het stormvloedpeil (Rekenpeil) bepaald;  $A$  m<sup>3</sup>/m. Vervolgens wordt een verschuiving  $\Delta R$  van het punt  $R^*$  berekend zodanig dat, gegeven het verloop van het resterende duinprofiel landwaarts van  $R^*$ , er met de verschuiving  $\Delta R$  een volume duinzand is gemoeid van  $0,25A$ ; punt  $R$  wordt dan gevonden. (Deze verschuiving kan worden opgevat als een *Toeslag*  $T$  op de mate van duinafslag die op een geschematiseerde wijze de effecten van de onzekerheid van de duur van de hoogwaterpiek en de onnauwkeurigheid van het DUROS-plus model op het berekeningsresultaat weergeeft;  $T = 0,25A$ ; zie figuur 5.)



Figuur 5. DUROS-plus model met Toeslag

Onder ontwerpomstandigheden kan de verschuiving  $\varnothing R$  niet meer bedragen dan 15 m (zie ook punt 22 en Bijlage 2). Na deze verschuiving is de uiteindelijke ligging van het punt  $R$  bereikt zoals die voor het betreffende (JARKUS)-jaar geldt. Vervolgens worden de  $N$  jaarlijkse posities van de punten  $R$  als functie van de tijd, bij voorkeur ten opzichte van de RSP-lijn, in een figuur uitgezet. Dat levert een  $R$ - $t$  figuur op, waarbij de tijd-as horizontaal wordt gekozen en de verticale as in zeewaartse richting wijst. In de  $R$ - $t$  figuur wordt daarnaast een aantal andere punten/lijnen uitgezet; een overzicht:

## **$R$**

In de  $R$ - $t$  figuur worden de punten  $R$  uitgezet.

## **BKL**

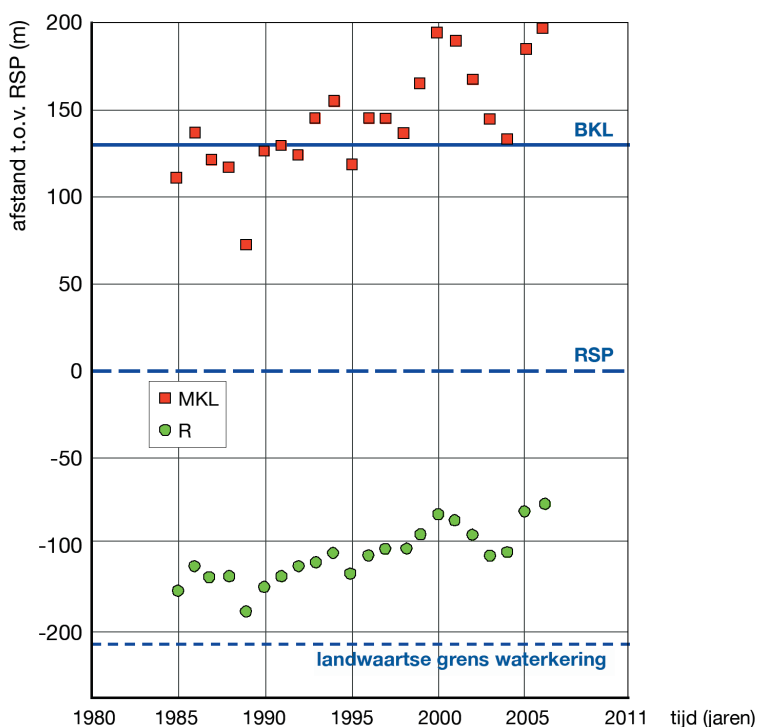
In de  $R$ - $t$  figuur wordt de (meestal in de tijd constante) positie van de  $BKL$  aangegeven zoals die voor de desbetreffende raai is vastgesteld.

## **MKL**

Tevens worden de (jaarlijkse) posities van de  $MKL$  in de  $R$ - $t$  figuur aangegeven.

## **Landwaartse grens waterkering**

Het verdient aanbeveling (van de JARKUS-raaien waarvan de diverse zones van de waterkering al in een Legger zijn vastgelegd), de in de Legger aangegeven positie van het (maatgevende) afslagpunt in de  $R$ - $t$  figuur aan te geven. Indien het een JARKUS-raai betreft waarbij de positie van het (maatgevende) afslagpunt nog niet in een Legger is vastgelegd, verdient het aanbeveling in de  $R$ - $t$  figuur het punt in het duin aan te geven tot hoever de duinen zouden kunnen afslaan zodat er nog juist een grensprofiel aan de landwaartse zijde resteert; het *uiterste afslagpunt*. Voor de benodigde afmetingen van het grensprofiel en de inpassing van een grensprofiel in een aanwezig duin, zie punt 27. In beide gevallen wordt hier de term *landwaartse grens waterkering* gebruikt, hoewel die term geen juridische basis heeft.



Figuur 6.  $R$ - $t$  figuur met BKL, MKL, R en landwaartse grens waterkering

- Met behulp van een dergelijke *R-t* figuur, waarin dus twee karakteristieke series punten (*MKL* en *R*) en twee rechte lijnen (*BKL* en *landwaartse grens waterkering*), zijn ingetekend, kan vaak in één oogopslag worden gezien of de waterkering (ook nog in 2011) aan de 'veiligheidseisen' voldoet; zie figuur 6 voor een voorbeeld van een *R-t* figuur.

De verticale schaal van het voorbeeld in figuur 6 beslaat het gehele gebied vanaf de werkelijke ligging van de *MKL/BKL* tot aan de landwaartse grens van de waterkering. De essentie van een figuur als figuur 6 kan ook worden bereikt door slechts het verschil in ligging tussen *MKL* en *BKL* in het bovenste deel van een dergelijke figuur aan te geven. Het gaat dan om de afstand *MKL - BKL*, met de ligging van de *BKL* als 0-punt maar verder met een gelijke verticale schaal als de rest van de figuur.

- Aan de hand van het 'beeld' van een figuur als figuur 6 zijn er vervolgens vier verschillende gevallen te onderscheiden:

#### 1 **Raaïen in kustvakken die over een langere tijd gezien stabiel zijn:**

De *MKL*-punten en de *R*-punten in de *R-t* figuur laten een 'springerig' verloop zien, maar gemiddeld gezien is het verloop horizontaal. Van duidelijke 'uitschieters' wordt nagegaan wat de oorzaak zou kunnen zijn. Eventueel wordt na nader onderzoek een ongeloofwaardig punt verwijderd uit de reeks. De jaren waarvoor eventueel blijkt dat de *MKL* landwaarts van de *BKL* ligt, vallen direct op in de *R-t* figuur. Veelal is er een duidelijke correlatie te zien tussen de ligging van de *MKL*-punten en de *R*-punten. Wanneer alle *R*-punten duidelijk zeewaarts van de aangegeven *landwaartse grens waterkering* blijken te liggen, wordt de waterkering zonder meer als 'veilig' gekenschetst.

Indien er incidenteel (één of twee maal uit een reeks van  $N > 15$ ) sprake blijkt te zijn van *R*-punten die landwaarts van de *landwaartse grens waterkering* liggen, behoeft er nog niet van een 'onveilige' situatie sprake te zijn, maar is extra waakzaamheid geboden. Nader onderzoek is dan nodig.

Indien de één of twee bedoelde overschrijdingen niet in de laatste vijf jaar zijn voorgekomen, voldoet de waterkering aan de 'veiligheidseisen'.

##### *Legger vastgesteld:*

Voorals zou blijken dat de bedoelde landwaartse overschrijdingen van punten *R* voorkomen in jaren dat de *MKL* nog zeewaarts ligt van de *BKL*, dan betekent dat dat de maatgevende afslagpuntenlijn (uit de Legger) niet 'ruim' genoeg is vastgesteld.

##### *Legger nog niet vastgesteld:*

Als in het andere geval (nog geen Legger vastgesteld) blijkt dat de *landwaartse grens waterkering* wordt overschreden, kan er sprake van zijn dat de waterkering 'onveilig' is. In dat geval is dringend nader onderzoek nodig.

#### 2 **Raaïen in kustvakken die in principe structureel eroderen, maar waarbij de gevolgen van de erosie met behulp van regelmatige kunstmatige suppleties worden tenietgedaan:**

De ligging van de punten *R* in de *R-t* figuur laten een 'springerig' verloop zien met wellicht een zaagtand 'ondergrond' (dat geldt veelal ook voor de ligging van de *MKL* punten). Gemiddeld gezien resulteert er wel een horizontaal verloop. De overige procedure is conform de procedure die is aangegeven bij 1) *Raaïen in kustvakken die over een langere tijd gezien stabiel zijn*.

### 3 Raaien in kustvakken die structureel aanzanden:

De ligging van de punten  $R$  in de  $R$ - $t$  figuur laten een 'springerig' verloop zien dat een zeewaarts gerichte trend vertoont. Als de situatie eenmaal 'veilig' is, wordt de toestand in de toekomst kennelijk alleen maar nog 'veiliger'.

### 4 Raaien in kustvakken waarbij de ligging van de kustlijn 'in orde is' (steeds ruim zeewaarts van de *BKL*), maar waarbij de duinen wel structureel achteruitgaan:

Deze situatie doet zich bijvoorbeeld voor bij enkele raaien langs de kust van Voorne. Op basis van het landelijke beleid de ligging van kustlijn dynamisch te handhaven, is 'er niets aan de hand'; de kustlijn ligt immers steeds zeewaarts van de *BKL*; suppleties zijn niet nodig. Niettemin zal een figuur als figuur 6 voor dergelijke gevallen een landwaartse trend van de ligging van de punten  $R$  laten zien. Indien bijvoorbeeld ook de positie van de duinvoet (NAP + 3 m) in de  $R$ - $t$  figuur wordt aangegeven, zal ook die reeks van punten een landwaartse trend vertonen.

- In alle gevallen is vervolgens (indien de diverse zones inderdaad al zijn vastgesteld) eenvoudig na te gaan of de duinwaterkering in 2011 (nog) aan de 'veiligheidseisen' voldoet. In het bijzonder als het een geval 4)-situatie betreft, is waakzaamheid geboden. Indien de ligging van de diverse zones nog niet is vastgesteld en in een Legger zijn opgenomen, kan dat mede met behulp van de uitkomsten van de aangegeven procedures, alsnog geschieden.

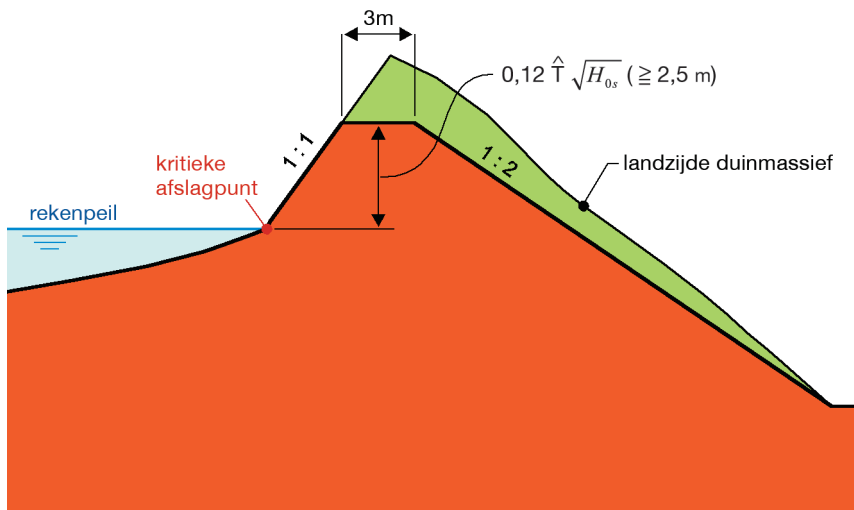
Met de hier beschreven werkwijze is dus op een tamelijk directe wijze na te gaan of de duinwaterkering aan de 'veiligheidseisen' voldoet. In sommige opzichten is er feitelijk sprake van een soort van bovengrensbetaling. De relatief eenvoudige toetsmethode is gebaseerd op probabilistische berekeningen waarbij er *geen* rekening is gehouden met de mogelijke profielfluctuaties. Door, zoals hiervoor is aangegeven, niet zonder meer te stellen dat bij één of twee landwaartse overschrijdingen van punten  $R$  van de *landwaartse grens waterkering*, er sprake is van een 'onveilige' situatie, wordt al enigszins rekening gehouden met het stochastische karakter van de ligging van het kustprofiel juist voor het optreden van de maatgevende stormvloedomstandigheden. Dat geldt in nog sterkere mate voor het geval er van regelmatig terugkerende (strand)suppleties sprake is. Zuiver probabilistisch geredeneerd zou er dan met een duidelijk smallere afslagzone kunnen worden volstaan.

Probabilistische berekeningen met een geschematiseerde strandsuppletie (strandsuppletie van 200 m<sup>3</sup>/m die in de loop van de jaren weer verdwijnt) lieten zien dat in feite met een circa 5 m smallere duinregel kon worden volstaan in vergelijking met een geval er niet van een strandsuppletie sprake was (WL | Delft Hydraulics 2007a). De genoemde circa 5 m dient in relatie te worden gezien tot de orde van grootte van 80 m waarvan bij het geval van de berekeningen sprake was. Weliswaar zijn er in een dergelijk geval strikt genomen enkele jaren aan te geven (aan het einde van de suppletieperiode) waarvan zou kunnen worden gesteld dat het 'onveilige' jaren zijn, maar in probabilistische zin is dat onjuist. Nog steeds blijft gelden dat in een 'willekeurig jaar' de kans dat de afslaggrens wordt bereikt of wordt overschreden, de maatgevende overschrijdingskans betreft.



## 27 Grensprofiel

In punt 26 is aangegeven hoe de posities van punten  $R$  behorend bij de maatgevende afslag kunnen worden bepaald. Indien dergelijke punten  $R$  nog ruim binnen het aanwezige duinprofiel (zeewaarts van de *landwaartse grens waterkering*) blijken te liggen, is het duinprofiel als 'veilig' te bestempelen. In een relatief smalle duinregel, waarbij het maaiveld landwaarts van die duinregel duidelijk lager ligt dan het Rekenpeil, is er het zogenaamde *kritieke afslagpunt* aan te geven. Als de optredende afslag het kritieke afslagpunt zou overschrijden, wordt aangenomen dat de duinregel doorbreekt. In het geval dat de maatgevende afslag verder landwaarts blijkt voort te schrijden dan het kritieke afslagpunt, is er dus van een 'onveilige' duinwaterkering sprake. Overigens dient er landwaarts van het kritieke afslagpunt nog een minimaal, maar stabiel profiel aanwezig te zijn; het zogenaamde grensprofiel. In de verdere beschouwing wordt er eerst van uitgegaan dat de maatgevende afslag precies samenvalt met het kritieke afslagpunt; de duinwaterkering is dan nog net 'veilig'. Er wordt aangenomen dat als de maatgevende afslag ook maar iets verder landwaarts van het kritieke afslagpunt blijkt te liggen, er onverwijld een doorbraak van het duin zal optreden.



Figuur 7. Grensprofiel met inpassing achterkant duin

De afmetingen van het benodigde grensprofiel worden als volgt bepaald:

### minimale kruinhoogte $h_0$

$$h_0 = RP + 0,12T_p \sqrt{H_{0s}} \quad [\text{in m boven NAP}] \quad (6)$$

De waarde van  $h_0$  moet echter minimaal  $RP + 2,5$  m bedragen.

In formule (6) is:

- $RP$  het Rekenpeil in m boven NAP [als aangegeven in HR2006].
- $T_p$  de piekperiode van het golfspectrum (s) [als aangegeven in HR2006].
- $H_{0s}$  de verwachtingswaarde van de significante golfhoogte (m) behorende bij het Rekenpeil [als aangegeven in HR2006].

### minimale kruinbreedte $b_{kruin}$

De breedte  $b_{kruin}$  op kruinhoogte van het grensprofiel is 3 m.



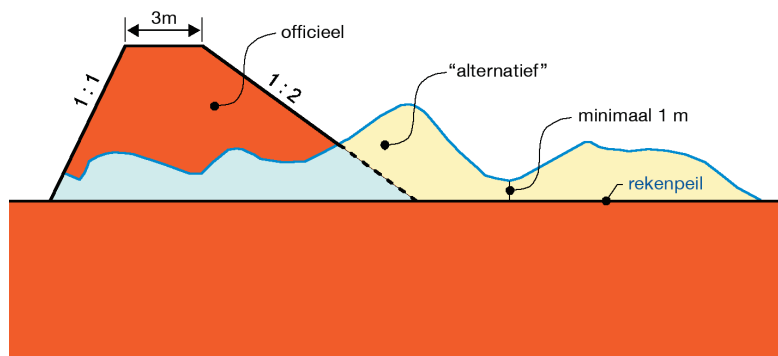
## helling binnentalud

De helling van het binnentalud (landzijde) van het grensprofiel moet flauwer zijn dan, of gelijk zijn aan, 1:2. (De helling van het talud aan de zeezijde van het grensprofiel is 1:1.)

In figuur 7 zijn de minimaal benodigde afmetingen van het grensprofiel en de inpassing van het grensprofiel in het resterende duinmassief aangegeven.

In de Leggers die betrekking hebben op duinwaterkeringen is ook de positie van het grensprofiel aangegeven. In de praktijk zal het overigens slechts zelden voorkomen dat het maatgevende afslagpunt precies samenvalt met het kritieke afslagpunt. Dat zou dus een situatie betreffen van een nog juist 'veilig' duin. Meestal is het duin (veel) breder dan strikt noodzakelijk is voor de 'veiligheid'. Het is in dergelijke gevallen niet nodig om het grensprofiel direct aansluitend aan het kritieke afslagpunt te positioneren. Er is dan de 'vrijheid' het grensprofiel op een goed gekozen plaats te positioneren (en vervolgens in de Legger op te nemen.) De positie van het dan zogenaamde *fungerende grensprofiel* wordt in dat geval uiteraard landwaarts van het maatgevende afslagpunt gekozen, waarbij er vervolgens op wordt gelet dat er in het veld sprake is van een doorgaande lijn in grensprofielen.

De vorm van de duinprofielen is soms zodanig dat een grensprofiel met de hiervoor aangegeven afmetingen eigenlijk niet inpasbaar is; in het bijzonder is dan soms de duinhoogte te laag. Vaak is er in dergelijke gevallen wel sprake van een overmaat aan duinbreedte. Indertijd is er, mede om te voorkomen dat er in het veld her en der kunstmatig 'grensprofielen' zouden moeten worden opgeworpen, een alternatief ontwikkeld. Uitgangspunt is dan dat een (te) geringe hoogte van het (alternatieve) grensprofiel wordt gecompenseerd door een grotere kruinbreedte. Het volume per m boven het Rekenpeil van het alternatieve grensprofiel dient daarbij gelijk te zijn aan dat volume per m van het 'officiële' grensprofiel. Een minimale hoogte van 1m boven Rekenpeil wordt in het alternatieve grensprofiel vereist. Bij een vereiste kruinhoogte van bijvoorbeeld 5 m resulteert een volume boven Rekenpeil van het officiële grensprofiel van  $52,5 \text{ m}^3/\text{m}$ . Stel dat de kruinhoogte boven Rekenpeil van het alternatieve grensprofiel gemiddeld 2 m bedraagt, dan resulteert er een kruinbreedte van ongeveer 23 m (dus in plaats van 3 m van het officiële grensprofiel). In figuur 8 zijn een officieel en een alternatief grensprofiel geschetst.



Figuur 8. Grensprofiel met alternatief grensprofiel

In het bijzonder door de veranderingen van  $H_{0s}$  en  $T_p$  in HR2006 ten opzichte van de gegeven waarden in HR2001, zullen de afmetingen van het vereiste grensprofiel veranderen. Dit kan betekenen dat de Legger wellicht moet worden aangepast.

## 28 Pas op de plaats

In punt 26 is de werkwijze besproken om tot een snelle en eenvoudige ‘veiligheidstoets’ te komen van een willekeurig dwarsprofiel (JARKUS-profiel). Er is daarbij in feite van uitgegaan dat het een situatie betreft zonder veel complicaties. Het betreft bijvoorbeeld:

- Er is geen sprake van een gradiënt in het langstransport (zie punt 29).
- In het dwarsprofiel komen geen harde elementen voor (zie punt 30).
- Er is geen sprake van een doorsnede in de overgang ‘hard’ - ‘zacht’ (zie punt 31).
- Er is sprake van een regelmatig aflopend dwarsprofiel in zeewaartse richting; er zijn geen diepe geulen vlak voor de kust aanwezig (zie punt 32).
- Er is sprake van een enkele duinregel die in principe breed genoeg is om een ‘veilige’ duinwaterkering te kunnen accommoderen. Het betrof dus geen duinwaterkering die bijvoorbeeld bestaat uit de verwachte ‘samenwerking’ van twee duinregels (zie punt 33).

In de aangegeven punten 29 tot en met 33 worden situaties beschreven waar er juist van het tegenovergestelde sprake is.

Daarnaast zijn er nog enkele aandachtspunten die bij een ‘veiligheidstoets’ aan de orde dienen te komen:

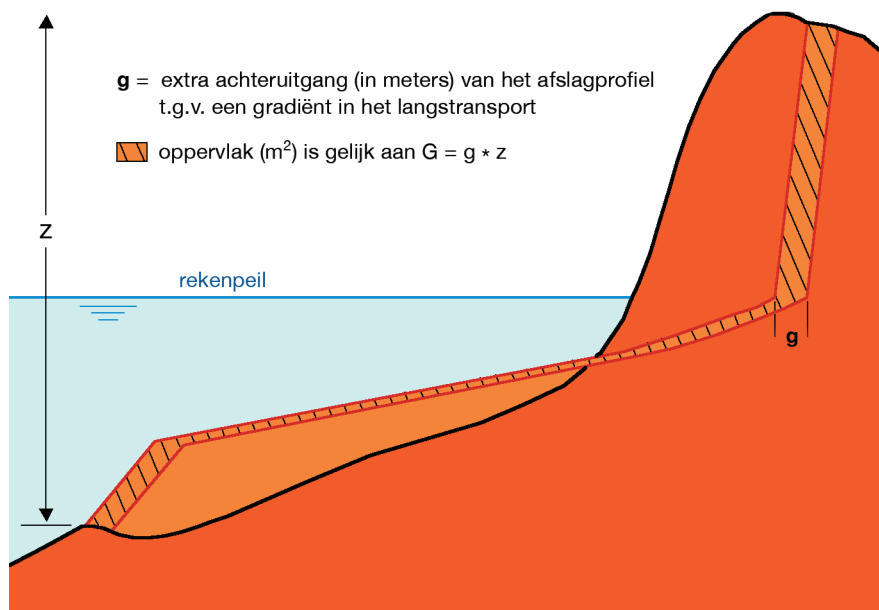
- Overgang van ‘veiligheidstoets’ per raai naar een situatie met een serie raaien (zie punt 34).
- Handelwijze in twijfelgevallen met betrekking tot het resultaat van een ‘veiligheidstoets’ (zie punt 35).
- Mogelijk effect van zeespiegelstijging en eventuele klimaatwijzigingen (zie punt 36).
- Diversen (zie punt 37).

De genoemde aspecten / aandachtspunten worden verder besproken in de aangegeven punten.

## 29 Gekromde kustgedeelten, effect gradiënt in het langstransport op positie punt R

In vergelijking met de TAW Leidraad 1984 treden er geen veranderingen op in de te volgen procedures als er in een kustgedeelte wellicht sprake is van een gradiënt in het langstransport. Uitsluitend de mate van kromming van de kust (uit te drukken in graden per 1000 m) is in de te volgen procedure leidend. Voor enkele achtergronden van de gevolgde methode, zie Centrum voor Onderzoek Waterkeringen (1984) en TAW Leidraad Duinafslag (1984). Het betreft ‘bolle’ kustgedeelten waar er dus sprake van kan zijn dat er door verschillen in langstransport een verlies van zand uit het dwarsprofiel ( $G \text{ m}^3/\text{m}$ ) kan optreden. Er wordt in kustgedeelten die van nature aanzanden geen rekening gehouden met een eventueel duinafslag-reducerend effect van dat aanzandingsproces tijdens een zware stormvloed.

In figuur 9 is schematisch aangegeven dat een verlies van zand van  $G \text{ m}^3/\text{m}$  uit een dwarsprofiel aanleiding geeft tot een extra teruggang  $g$  van het afslagprofiel van  $g = G/z$ . De betekenis van  $z$  is in figuur 9 aangegeven.



Figuur 9. Extra teruggang  $g$  door gradiënt in het langstransport

De grootte van  $G$  in een voorkomend geval kan worden bepaald met behulp van formule (7). In formule (7) komt een referentiewaarde  $G_0$  voor waar verderop nader op wordt ingegaan.

$$G = \frac{A^*}{300} \left( \frac{H_{0s}}{7,6} \right)^{0,72} \left( \frac{w}{0,0268} \right)^{0,56} G_0 \quad (\text{m}^3/\text{m}) \quad (7)$$

In formule (7) is:

- $A^*$  de berekende hoeveelheid duinafslag boven het Rekenpeil inclusief de toeslag; dus  $A^* = A + 0,25A$  ( $\text{m}^3/\text{m}$ ).
- $H_{0s}$  de rekenwaarde van de significante golfhoogte (m).
- $w$  de valsnelheid van het duinmateriaal (m/s); zie formule (4) punt 19.  
In formule (4) dient voor  $D_{50}$  de rekenwaarde  $D_{\text{reken}}$  (zie Bijlage 1) te worden ingevoerd.
- $G_0$  een referentiewaarde ( $\text{m}^3/\text{m}$ ); zie ook tabel 2.

In punt 26 is aangegeven hoe de 'veiligheidstoets' dient plaats te vinden (in het geval zonder gradiënt in het langstransport). Als een gradiënt in rekening dient te worden gebracht, leidt dat tot een extra teruggang van  $g$  m; de ligging van een punt  $R$  verschuift  $g$  m in landwaartse richting. Bij de 'veiligheidstoets' wordt steeds een serie ( $N > 15$ ) JARKUS-profielen betrokken. Als er sprake is van een gradiënt dient voor elk dwarsprofiel uit de serie de waarde van  $g$  te worden berekend en dient de uiteindelijke ligging van punt  $R$  te worden herberekend. Er is dan een  $R$ - $t$  figuur te maken waarin het effect van een gradiënt in het langstransport is verwerkt.

De mate van kromming van de kustlijn is onderverdeeld in vijf klassen die elk een interval van krommingen bestrijkt. Per klasse is er een referentiewaarde  $G_0$  (in  $\text{m}^3/\text{m}$ ) vastgesteld; zie tabel 2.

| <i>klasse</i> | <i>kromming interval<br/>graden / 1000 m</i> | <i>G<sub>0</sub> [m<sup>3</sup> / m]</i> |
|---------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|
| 1             | 0 – 6                                        | 0                                        |
| 2             | 6 – 12                                       | 50                                       |
| 3             | 12 – 18                                      | 75                                       |
| 4             | 18 – 24                                      | 100                                      |
| 5             | > 24                                         | nader onderzoek vereist                  |

*Tabel 2 Referentiewaarden voor het transportverschil voor verschillende klassen van kustkromming.*

Kustvakken die qua kromming vallen onder klasse 1 worden als rechte kust beschouwd. De gehele kust tussen Den Helder en Hoek van Holland wordt onder klasse 1 gerekend; de referentiewaarde  $G_0$  is daar dus 0 hetgeen betekent dat er niet met een extra effect door een gradiënt in het langstransport rekening behoeft te worden gehouden.

Bij kustvakken met een relatief grote kromming (> 24 graden / 1000 m) is nader onderzoek door de toetsende instantie vereist. Het betreft de in tabel 3 aangegeven kustsecties. De ook in de eerste kolom aangegeven getallen, betreffen de kustsecties waaronder de desbetreffende kustgedeelten bij Rijkswaterstaat bekend zijn.

| <i>kustsectie</i> | <i>RSP paal - RSP paal</i> | <i>lengte kustgedeelte [km]</i> |
|-------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 2 Schiermonnikoog | 1.00 - 5.50                | 4,5                             |
| 3 Ameland         | 48.00 - 5.00               | 6,5                             |
| 4 Terschelling    | 59.00 - 2.00               | 3,0                             |
|                   | 5.00 - 6.50                | 1,5                             |
| 5 Vlieland        | 51.00 - 54.00              | 3,0                             |
| 6 Texel           | 4.00 - 8.00                | 4,0                             |
|                   | 31.00 - 32.00              | 1,0                             |
| 11 Voorne         | 9.00 - 11.00               | 2,0                             |
| 12 Goeree         | 13.00 - 19.00              | 6,0                             |
| 13 Schouwen       | 8.00 - 12.00               | 4,0                             |
|                   | 2.00 - 5.00                | 3,0                             |
| 16 Walcheren      | 5.40 - 8.00                | 2,6                             |

*Tabel 3 Kustsecties met kromming > 24 graden per 1000 m; nader onderzoek noodzakelijk.*

## 30 Harde elementen in het dwarsprofiel

In sommige dwarsprofielen komen zogenaamde harde elementen voor. Bijvoorbeeld duinvoetverdedigingen of bijvoorbeeld de combinatie van een vrijwel verticale strandmuur en een aansluitende horizontale boulevard (Scheveningen). Tenzij de eventuele verdediging speciaal is ontworpen en geconstrueerd om niet te bezwijken tijdens ontwerpomstandigheden, wordt er van uitgegaan dat de verdediging zal bezwijken tijdens ontwerpomstandigheden.

Bestaande verdedigingen zijn indertijd vaak ontworpen en gebouwd zonder voldoende rekening te kunnen houden met de processen die tijdens zware stormvloedomstandig-

heden zullen optreden. In het bijzonder is vaak niet voldoende rekening gehouden met diepe ontgrondingskuilen die zich tijdens een zware stormvloed aan de teen van de keringen zullen ontwikkelen.

In afwachting van de uitkomsten van nader onderzoek dat naar verwachting in het SBW-kader zal worden uitgevoerd, dient bij de 'veiligheidstoets' het harde element als niet aanwezig te worden beschouwd. Het volume 'steen' dat in een dwarsprofiel met de kering/strandmuur/boulevard is gemoeid, kan als volume zand worden beschouwd.

In 2006 is een serie proeven in de Deltagoot van WL | Delft Hydraulics uitgevoerd waarbij het effect van gedesintegreerde duinverdedigingen op de mate van duinafslag experimenteel is onderzocht. (De verdedigingen waren zodanig geconstrueerd dat ze gedurende de proef kapot zouden gaan.) Bij de proeven was het hoofddoel om inzicht te krijgen in het effect van 'brokstukken' op de mate van duinafslag (in vergelijking met een situatie zonder verdediging). Een eventueel reducerend effect (de brokstukken 'beschermen' het zandige profiel gedeeltelijk), dan wel een versterkt duinafslageffect (de brokstukken veroorzaken bijvoorbeeld meer turbulentie en mede daardoor meer duinafslag), werd vooraf niet uitgesloten.

Een eerste analyse heeft opgeleverd dat er eigenlijk nauwelijks sprake is van een reducerend dan wel versterkend effect. De mate van afslag was feitelijk vergelijkbaar met een situatie waarbij er geen verdediging aanwezig is. In WL | Delft Hydraulics (2007b) zijn de resultaten van de eerste analyses samengevat.

Soms is er sprake is van een verdediging / strandmuur die zich over een tamelijk grote afstand langs de kust uitstrekt. Als een dergelijke verdediging tijdens een zware stormvloed eerst lokaal bezwijkt, is het niet uit te sluiten dat de aantasting van het achterland landwaarts van het gat dat is ontstaan, *groter* is dan het geval zou zijn als de gehele verdediging was bezweken. In voorkomende gevallen dient de beheerder hierop bedacht te zijn en eventueel in de oordeelsvorming omtrent de 'veiligheid' van waterkering te betrekken.

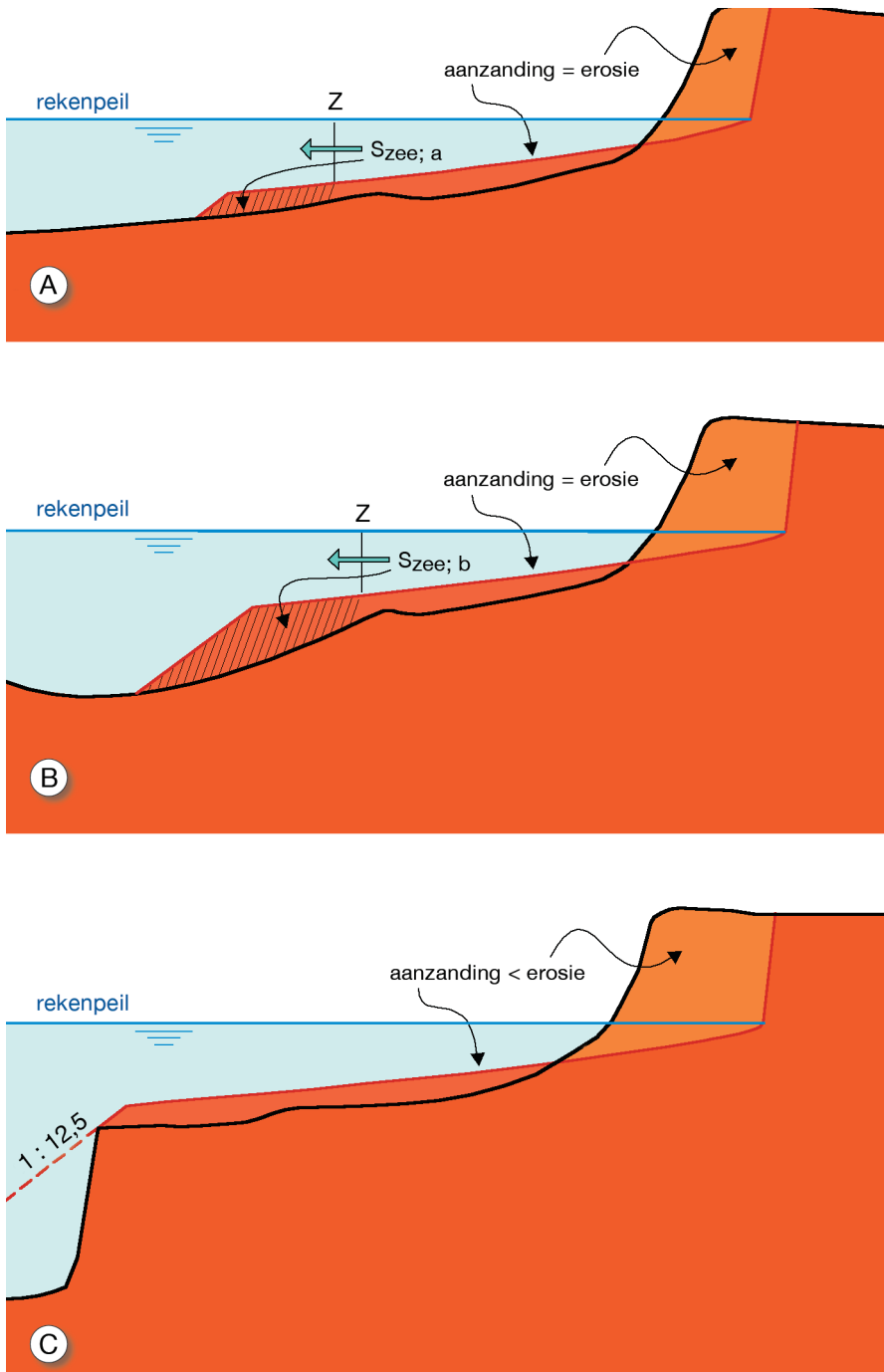
## 31 Aansluiting 'hard' – 'zacht'

Met betrekking tot de 'veiligheidstoets' van een duingedeelte juist aansluitend aan een overigens voldoende sterke 'harde' constructie, zijn er geen nieuwe ontwikkelingen te melden. Er dient hoe dan ook rekening te worden gehouden met meer duinafslag dan in het geval een zelfde doorsnede niet in het aansluitingsgebied zou hebben gelegen. Het blijft een heel lastig onderwerp dat van geval tot geval moet worden behandeld.

## 32 Diepe geul vlak voor de kust

In figuur 10 is een aantal gevallen geschetst waarbij de vorm van het begin-dwarsprofiel steeds verandert. Schets 10A betreft een situatie met een min of meer regelmatig in zeewaartse richting aflopend profiel. Een afslagprofiel behorend bij ontwerpomstandigheden is goed inpasbaar; de toeslag van 0,25A levert geen problemen op. Nabij de helling van 1:12,5 is nog enig zand van de duinen afgezet; verder zeewaarts niet meer. In verband met het navolgende is het goed te beseffen dat ook uit proeven in de Deltagoot is gebleken dat het bedoelde zand dat nabij

de helling van 1:12,5 is afgezet, pas in een tamelijk laat stadium van het afslagproces daar is afgezet. Bovendien kan uit schets 10A worden opgemaakt dat de kennelijk aanwezige zeewaarts gerichte sedimenttransporten in bijvoorbeeld doorsnede Z tamelijk gering zijn geweest. Het in de schets 10A aangegeven volume zand  $S_{zee;a}$  is kennelijk de doorsnede Z in de gehele loop van het afslagproces gepasseerd. In schets 10B bevindt zich een diepe geul vlak voor de kust. Strikt rekenkundig is het in dit geval nog best mogelijk een afslagprofiel in te passen zodanig dat er een sluitende zandbalans in de richting dwars op de kust wordt bereikt, maar dat zou in dit geval in doorsnede Z een sedimenttransport van  $S_{zee;b}$  vergen dat aanzienlijk groter is dan  $S_{zee;a}$ . Dat wordt in de praktijk onwaarschijnlijk geacht.



Figuur 10. Dwarsprofiel en diepe geul voor de kust

In de 'veiligheidstoets' wordt eerst de in punt 26 aangegeven procedure gevolgd. Is het oordeel vervolgens, gegeven de bestaande situatie, 'veilig' dan voldoet de duinwaterkering aan de eisen. Blijkt het oordeel 'onveilig' te zijn, dan verdient het aanbeveling nader onderzoek te doen, voordat omvangrijke versterkingsmaatregelen worden overwogen.

In figuur 10C is een situatie aangegeven waarbij de geul vlak voor de kust een steilere helling heeft dan de helling van het zeewaartse talud met een helling van 1:12,5 aansluitend aan het afslagprofiel. In een dergelijk geval kan vaak geen situatie met een sluitende zandbalans in dwarsrichting worden gevonden. In een dergelijk geval wordt de positie van het afslagprofiel in horizontale zin zodanig gekozen dat het talud met een helling van 1:12,5 juist raakt aan de rand van de geul. Er is dan feitelijk geen sprake van een sluitende zandbalans in dwarsrichting.

### 33 Twee duinregels met een duinvallei

In overigens brede duingebieden komt het soms voor dat de meest zeewaartse duinregel (zeereep) niet breed en hoog genoeg is om de ontwerpduinafslag te kunnen accommoderen. Al bij stormvloedomstandigheden die minder zwaar zijn dan de ontwerpcondities zal er doorbraak plaatsvinden. Met de procedures die in Deel D zijn beschreven kan de overschrijdingskans worden berekend die behoort bij het bezwijken van die eerste duinregel.

Onder ontwerpomstandigheden zal er dus van een doorbraak van de eerste duinregel sprake zijn. De achterliggende duinvallei loopt onder water en de 'veiligheid' van het achterland moet nu worden gewaarborgd door de tweede duinregel. In de tweede duinregel, of wellicht nog verder landinwaarts, moet ook een, in een dergelijk geval zeer waarschijnlijk 'alternatief', grensprofiel worden ingepast (zie punt 27).

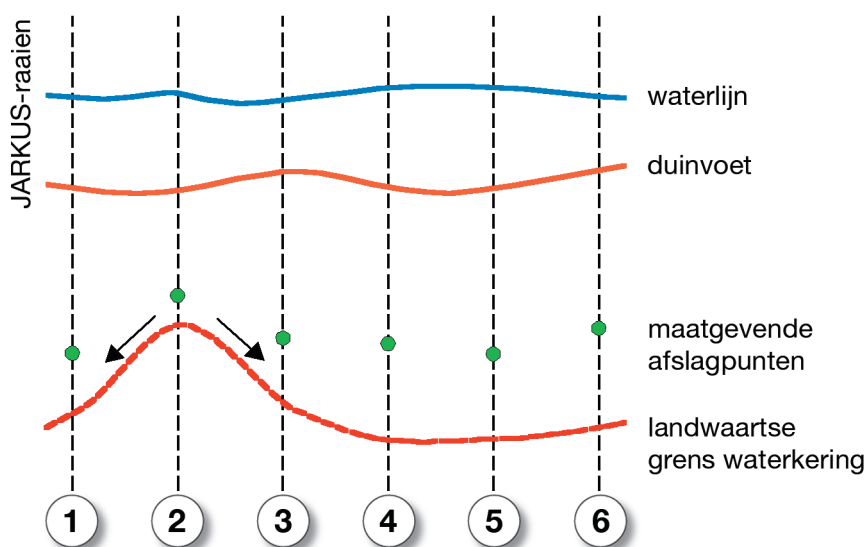
Afhankelijk van de plaatselijke situatie (bijvoorbeeld breedte en diepte van de duinvallei, maar vooral ook de omvang van de eerste en de tweede duinregel), dient te worden nagegaan of het nodig wordt geacht voor de tweede duinregel een aparte duinafslagberekening te maken, met in dat geval aangepaste golfbrandvoorwaarden. (Het gaat dan bij de golfbrandvoorwaarden veelal om een combinatie van directe golfdoordringing van de golven op zee door de bres in de eerste duinregel en lokaal opgewekte golven in de duinvallei.)

Wanneer er van wordt uitgegaan dat een duinvallei tijdens ontwerpomstandigheden onder water komt te staan, dient er zorgvuldig te worden nagegaan of het zeewater niet via 'de achterdeur' het achterland kan bereiken. Dat zou kunnen gebeuren als in de ene JARKUS-raai (raai 1) de ontwerpafslag bijvoorbeeld nog goed in de eerste duinregel past, en dus 'veilig' is, terwijl in een belendende JARKUS-raai (raai 2) de feitelijke 'veiligheid' door de tweede duinregel wordt verzekerd. Als er dan geen goede aansluiting is tussen de eerste en de tweede duinregel nabij raai 1, kan er water uit de vallei achterlangs raai 1 het binnenland bereiken. Zonodig dienen er gepaste maatregelen te worden genomen voordat de gehele duinwaterkering als 'veilig' kan worden aangemerkt.

### 34 Van een raai naar een serie raaien

Tot nu toe is er aangegeven hoe een 'veiligheidstoets' per dwarsprofiel dient te worden uitgevoerd. In figuur 11 is een situatie geschetst van een stuk kust in bovenaanzicht met een aantal dwarsprofielen (JARKUS-raaien). De 'veiligheids-

toets' per dwarsprofiel heeft een bevredigend resultaat opgeleverd; de maatgevende afslagpunten liggen alle voldoende ver van de achterkant van de duinen; er kan ook nog een grensprofiel worden ingepast. Niettemin baart in het bijzonder de situatie in dwarsprofiel 2 zorgen. Er kan immers worden verwacht dat er van enige herverdeling van zand in langsrichting sprake zal zijn. Dat leidt ertoe dat in dwarsprofiel 2 wat meer afslag zal optreden (en in de doorsneden 1 en 3 wat minder) dan de berekening aangeeft. In voorkomende gevallen dient de beheerder naar bevind van zaken maatregelen te treffen.



Figuur 11. Serie dwarsprofielen en herverdeling in langsrichting

De JARKUS-profielen vormen de basis van de 'veiligheidstoets'. De onderlinge afstand van de JARKUS-raaien bedraagt 200 - 250 m. De beheerder dient zich er in voorkomende gevallen van te vergewissen dat er zich tussen de JARKUS-raaien geen 'onveilige' situaties voordoen. Pas na een dergelijk onderzoek en een positief resultaat, kan de gehele duinwaterkering als 'veilig' worden aangemerkt.

## 35 Handelwijze twijfelgevallen bij een 'veiligheidstoets'

In veel gevallen zal de 'veiligheidstoets' een duidelijk resultaat opleveren:

- Duidelijk 'veilig': de toets is met goed gevolg doorstaan.
- Duidelijk 'onveilig': er dienen hoe dan ook maatregelen te worden genomen.

Is de uitkomst 'onveilig', dan kan er in sommige gevallen mee worden volstaan de Legger aan te passen. In de andere gevallen zijn er (kostbare) versterkingsmaatregelen nodig. In de praktijk zal er dan vaak naar worden gestreefd de benodigde versterkingsmaatregelen enigszins ruimhartig uit te voeren mede om te voorkomen dat in een volgende toetsronde, met wellicht iets zwaardere randvoorwaarden, opnieuw maatregelen zouden moeten worden genomen (robuust ontwerpen).

Als de in dit TRDA2006 beschreven 'veiligheidstoets' (vergelijk punten 26 en 27) als resultaat oplevert dat een beschouwde doorsnede net 'onveilig' is (er is sprake van enkele meters 'teveel' afslag om tot een positief besluit te kunnen komen), dan verdient het aanbeveling om een nader onderzoek uit te voeren. Wellicht kan



de beschouwde doorsnede na dat onderzoek alsnog als 'veilig' worden bestempeld, waardoor maatregelen voorlopig achterwege kunnen blijven.

Zonder vooruit te lopen op de resultaten van een dergelijk nader onderzoek, kan worden gesteld dat er enkele aspecten zijn die bij een zorgvuldige afweging tot enige 'winst' zouden kunnen leiden:

- Volledige probabilistische aanpak in plaats van berekeningen met de afgeleide methode.
- Effect van optredende profielfluctuaties volledig betrekken bij de analyse. In dat geval kan bijvoorbeeld gebruik worden gemaakt van de methode die in paragraaf 3.1.3 van de TAW Leidraad Duinafslag (1984) is beschreven. Ook in het geval dat de fluctuaties in de ligging van de punten  $R$  (gedeeltelijk) worden veroorzaakt door (strand)suppleties, kan de bedoelde methode worden toegepast.
- Toepassing van andere simulatiemodellen dan DUROS-plus (bijvoorbeeld DUROSTA of Delft3D); een gedegen motivering (met 'bewijzen' dat toepassing is gerechtvaardigd) is dan noodzakelijk.
- Effect van een alternatieve wijze van het in rekening brengen van de toeslag van  $T = 0,25A$ . Zie Bijlage 2. Een zorgvuldige onderbouwing is noodzakelijk, voordat deze weg kan worden bewandeld.
- Uitvoeren van fysisch modelonderzoek voor specifieke situaties.

## 36 Zeespiegelstijging en eventuele klimaatwijzigingen

Het TRDA2006 is voornamelijk bedoeld om via de VTV 2006 de wettelijk voorgescreven 'veiligheidstoets' van 2011 te kunnen uitvoeren met gepaste hulpmiddelen. De in de HR2006 aangegeven randvoorwaarden zijn daarbij leidend om tot een oordeel te kunnen komen. In HR2006 is met zeespiegelstijging (en eventuele klimaatwijzigingen) rekening gehouden. De in de HR2006 aangegeven randvoorwaarden 'gelden' voor het jaar 2011.

Niettemin kan uit de 'veiligheidstoets' volgen dat er van een 'onveilige' situatie sprake is, dan wel dat de in de Legger aangegeven grenzen niet (meer) passen bij de huidige inzichten. Versterkingsmaatregelen en/of aanpassingen van de Legger zijn dan noodzakelijk. In beide gevallen zal er waarschijnlijk naar worden gestreefd een situatie te verkrijgen die voor een wat langere tijd onveranderd blijft.

In principe kan de in dit TRDA2006 aangegeven berekeningsmethode ook worden gebruikt als basis voor het ontwerp van een versterkingsmaatregel (of bouwstenen aandragen voor een aanpassingsproces van de Legger). Als bijvoorbeeld een tijdshorizon van 50 jaar wordt beoogd, verdient het aanbeveling met eventuele zeespiegelstijging en effecten van eventuele klimaatwijzigingen rekening te houden.

In het bijzonder met betrekking tot de mogelijke zeespiegelstijging veranderen de inzichten vrijwel voortdurend. In de TAW Leidraad 'Zandige Kust' (2002) is op bladzijde 142 een tabel opgenomen die mogelijkerwijs enig houvast kan bieden bij het vaststellen van randvoorwaarden waarbij in het ontwerp rekening zal worden gehouden.

Zolang in het beheer van de zandige kust consequent het beleid wordt voortgezet dat in 1990 is ingezet om de ligging van de kust te handhaven op de positie van de kust in 1990, zijn de effecten van zeespiegelstijging voor de 'veiligheid' marginaal. Tenminste het strand en de ondiepe vooroever (zeg het actieve deel van het dwarsprofiel) worden dan uiteindelijk opgehoogd met een laagdikte die gelijk is aan de daadwerkelijk opge-

treten zeespiegelstijging. Als de duinhoogte niet zou ‘meegroeien’ met de zeespiegelstijging, komt het er op neer dat de duinen ná zeespiegelstijging als het ware iets lager zijn dan de duinen vóór zeespiegelstijging. Het effect op de uiteindelijke mate van duinafslag is dan gewoonlijk inderdaad maar heel klein.

## 37 Diversen

In dit punt worden nog enkele aandachtspunten aangestipt.

### **Strandhoofden en paalrijen**

In de ‘veiligheidstoets’ wordt geen rekening gehouden met een mogelijk effect (positief dan wel negatief) van de aanwezigheid van strandhoofden of paalrijen op de mate van duinafslag.

### **Suppleties gedurende een reeks van jaren en korreldiameter**

In kustvakken waar inmiddels gedurende een reeks van jaren kunstmatige suppleties (strandsuppleties en/of vooroeversuppleties) hebben plaatsgevonden, kunnen de karakteristieken (bijvoorbeeld onder meer de korreldiameter) van het zand in de duinen afwijken van de waarden die in Bijlage 1 zijn gegeven. (De waarden in Bijlage 1 hebben betrekking op de toestand begin tachtiger jaren van de vorige eeuw.) Indien er in voorkomende gevallen aanwijzingen zijn dat de korrelsamenstelling inmiddels wezenlijk is gewijzigd, dienen de mogelijke effecten daarvan op de uitkomsten van de ‘veiligheidstoets’ nader te worden onderzocht.

### **3D-effecten ten gevolge van een ‘onregelmatige’ ligging van de vooroever**

In de richting langs de kust komen er onder de ‘normale’ omstandigheden vaak verschillen in de (hoogte)ligging voor van het strand tussen de ene dwarsdoorsnede en belendende doorsneden die op korte afstand liggen. De bedoelde verschillen in hoogteligging van het strand hangen vervolgens vaak samen met de ligging van de zandbanken voor de kust. (In het bijzonder ook met de positie van de muilen in de banken.)

In het bijzonder bij relatief lage stormvloeden waarbij er een geringe mate van duinafslag optreedt, is er vaak een verband te zien tussen de lokale ligging van het strand en de mate van duinafslag. Het gaat er dan vaak om dat op de ene plaats net-wel en op een andere plaats net-geen duinafslag optreedt.

Onder ontwerpomstandigheden (met aanzienlijk hogere waterstanden dan bij de hiervoor genoemde lage stormvloeden) wordt er geen effect van een ‘onregelmatige’ ligging van de vooroever op de mate van duinafslag in rekening gebracht, anders dan via de reguliere JARKUS-metingen.

### **Eventuele geleidelijke kustachteruitgang**

Als gevolg van het beleid de ligging van de kust te handhaven, behoeft er in het algemeen geen rekening meer te worden gehouden met een geleidelijke (structurele) achteruitgang van de kust. (In punt 26 is de situatie bij een aantal doorsneden van de kust van Voorne genoemd waarbij de ligging van de kustlijn geen achteruitgang blijkt te vertonen, maar waarbij de duinen wel in landwaartse richting verplaatsen.)

### **Randvoorwaarden op de NAP -20 m dieptelijn**

Mede omdat TRDA2006 voornamelijk een aanpassing op hoofdlijnen van de TAW Leidraad van 1984 betreft, is er ook nu nog van uitgegaan dat de randvoorwaarden op de NAP -20 m dieptelijn 'sturend' zijn voor het duinafslagproces. Vergelijk de gang van zaken in HR2006 waarbij de golfstatistiek voor de golfmeetstations langs de kust leidend zijn geweest voor het bepalen van de randvoorwaarden voor duinen. De golfmeetstations bevinden zich inderdaad op een waterdiepte die niet veel afwijkt van NAP -20 m. Vooral bij relatief 'lange' vooroevers waarbij dus de afstand van de NAP -20 m dieptelijn tot aan de kust groot is, zou dit uitgangspunt er toe kunnen leiden dat de berekende mate van duinafslag in feite een overschatting van de werkelijkheid betreft. Er is thans, zonder nader onderzoek, niet aan te geven hoe hier mee kan worden omgegaan. Tevens is aangenomen dat de energiedichtheidsspectra op de NAP -20 m dieptelijn enkeltoppig zijn. Mocht dit niet daadwerkelijk het geval zijn dan kan dit leiden tot een overschatting of een onderschatting van de werkelijkheid.

## Deel D

# Kenmerkende duinafslag bij grotere overschrijdingskansen

## 38 Afslag bij grotere overschrijdingskansen

De in dit TRDA2006 beschreven aanpak voor de ‘veiligheidstoets’ is in de eerste plaats afgeleid voor ontwerpomstandigheden. Het gaat dan om maatgevende bezwijkansen die een factor 10 kleiner zijn dan de overschrijdingskans van de ontwerpwaterstand (zie punt 5). De methode is getest (en goed bevonden) aan de hand van de uitkomsten van probabilistische berekeningen die voor dwarsprofielen langs de kust van Den Helder tot Hoek van Holland en voor dwarsprofielen langs de kusten van de Waddeneilanden zijn gemaakt. Door deze keuze van testgevallen is er ‘vanzelf’ al sprake van enige spreiding in bezwijkansen (Hollandse kust:  $10^{-5}$  per jaar; Texel:  $2,5 \cdot 10^{-5}$  per jaar; overige Waddeneilanden:  $5 \cdot 10^{-5}$  per jaar).

Niettemin is het in het kustbeheer ook nodig om inzicht te hebben in de mate van duinafslag die behoort bij grotere overschrijdingskansen dan de overschrijdingskans die behoort bij de ontwerpomstandigheden. Dat geldt bijvoorbeeld om te kunnen inschatten wat de kans is dat een eerste duinregel doorbreekt (vergelijk punt 33), maar ook om te kunnen inschatten wat de kans is dat bijvoorbeeld een object dat relatief dicht bij de rand van de duinen is gepositioneerd, in zee zal storten tijdens een zware stormvloed. Vergelijk de discussie rond ‘De 13 Kustplaatsen’; Rapportage Commissie Poelmann (2005).

Het is gebleken dat de methode die gebruikt wordt voor ontwerpomstandigheden ook met voldoende nauwkeurigheid gebruikt kan worden bij grotere overschrijdingskansen. Dit geldt in ieder geval voor overschrijdingskansen in de range van  $10^{-3}$  per jaar tot  $10^{-5}$  per jaar; voor nog grotere overschrijdingskansen is de methode (nog) niet getest. Om de kenmerkende afslag te vinden die bij grotere overschrijdingskansen behoort, dienen er vanzelfsprekend speciaal toegesneden rekenwaarden te worden gebruikt.

### Stormvloedpeil:

Gegeven een gewenste overschrijdingskans van de mate van duinafslag, dient een waterstand te worden gekozen die een factor 2,15 maal grotere overschrijdingskans heeft. Dit komt er op neer dat vanuit de ‘gewenste’ overschrijdingskans voor de mate van duinafslag, er eerst een waterstand wordt bepaald met een bijbehorende overschrijdingskans die een factor 10 groter is, en dat bij die waterstand vervolgens 2/3 decimeringshoogte wordt opgeteld.

### Significante golfhoogte:

Voor de golfhoogte  $H_{0s}$  dient de verwachtingswaarde te worden gekozen die behoort bij de hierboven aangegeven waterstand.

### Golfperiode:

Voor de golfperiode  $T_p$  dient de verwachtingswaarde te worden gekozen die behoort bij de hierboven aangegeven significante golfhoogte.

De benodigde rekenwaarden voor ontwerpomstandigheden zijn in HR2006 vermeld; de hiervoor bedoelde rekenwaarden die bij grotere overschrijdingskansen behoren, zijn nog niet beschikbaar (gesteld)

Voor de rekenwaarde  $D_{reken}$  dienen ook in dergelijke gevallen de waarden uit Bijlage 1 te worden toegepast. De toeslag  $T = 0,25A$  geldt ook in dergelijke gevallen;

zij het dat de waarde van  $A$  automatisch verandert. Vervolgens kan de procedure die in punt 26 is aangegeven grotendeels worden toegepast. Hoe vervolgens met de variatie in de ligging van de punten  $R$  in een  $R-t$  diagram in dit geval wordt omgegaan, dient van geval voor geval te worden besloten. Eén en ander hangt ook af van het belang dat met een ‘nauwkeurige’ bepaling van het bijbehorende afslagpunt is gemoeid.

In voorkomende gevallen dient ook bij grotere overschrijdingskansen met een eventuele gradiënt in het langstransport rekening te worden gehouden. Formule (7) kan blijven worden toegepast; de waarde van  $A^*$  verandert automatisch. (Zie punt 29.)

## Deel E

### Literatuur

#### 39 Referenties uit tekst

*Centrum voor Onderzoek Waterkeringen (1984), Rekenmodel voor extra duinafslag ten gevolge van een gradiënt in het langstransport als gevolg van een kromming van de kustlijn, S-81.040.*

*Commissie Poelmann (2005), Advies van de Commissie Bescherming en Ontwikkeling van Buitendijks gebied in Kustplaatsen, Haarlem, oktober 2005.*

*Rijkswaterstaat (1984), De korrelgrootte karakteristiek van de zeereep (stuifdijk) langs de Nederlandse kust, RWS, District Kust en Zee, Nota WWKZ-84 G.007, april 1984.*

*Rijkswaterstaat (2001), Hydraulische Randvoorwaarden 2001 (HR2001), (Voor het toetsen van primaire waterkeringen), Randvoorwaardenboek 2001.*

*Rijkswaterstaat (2007), Hydraulische Randvoorwaarden 2006 (HR2006), (Voor het toetsen van primaire waterkeringen), Randvoorwaardenboek 2006.*

*Steezel (1993), Cross-shore transport during storm surges, Ph.D. Thesis Delft University of Technology.*

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

*Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (2002), Leidraad Zandige Kust.*

*Tweede Kamer der Staten-generaal (1996), Wet op de Waterkering, Tekst geldend op 09-07-2006, Staatsuitgeverij, Den Haag.*

*VTV2001 (2004), De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland (Voorschrift Toetsen op Veiligheid voor de tweede toetsronde 2001 - 2006), Rijkswaterstaat, januari 2004.*

*VTV2006 (2007), De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland (Voorschrift Toetsen op Veiligheid voor de derde toetsronde 2006 - 2011), Rijkswaterstaat.*

*Waterloopkundig Laboratorium (1983), De valsnelheid van zand in zeewater van 5° C, M1263IVb, september (1983).*

*WL | Delft Hydraulics (2006), Dune erosion, Product 2: Large-scale model tests and dune erosion prediction, methods, WL | Delft Hydraulics report H4357, May, 2006.*

*WL | Delft Hydraulics (2007a), Dune erosion, Product 3: Probabilistic dune erosion prediction method, WL | Delft Hydraulics report H4357, February, 2007.*

*WL | Delft Hydraulics (2007b), Influence of collapsed revetments on dune erosion, WL | Delft Hydraulics report H4731, February, 2007.*

## 40 Overige aanbevolen achtergrondinformatie

- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (1995), Basisrapport Zandige Kust, (Behorende bij de Leidraad Zandige Kust), juli 1995.*
- Van de Graaff, J. (1984), Probabilistische methoden bij het duinontwerp; achtergronden van de TAW-leidraad 'duinafslag', Delft, maart 1984.*
- Van Gent, M.R.A., Coeveld, E.M., Walstra, D.J.R, Van de Graaff, J., Steetzel, H.J. and Boers, M. (2006), Dune erosion tests to study the influence of wave periods, Proc. of 30<sup>th</sup> ICCE, San Diego, USA.*
- Van Gent, M.R.A., Coeveld, E.M., De Vroeg, H.J. and Van de Graaff, J. (2007), Dune erosion prediction methods incorporating effects of wave periods, Proc. Coastal Sediments, New Orleans, USA.*
- Vellinga, P. (1986), Beach and dune erosion during storm surges, Ph.D. thesis Delft University of Technology, December 1986.*
- WL | Delft Hydraulics (2006), Dune erosion, Product 1: Deterministic dune erosion prediction methods, WL | Delft Hydraulics report H4357, January 2006.*

# Deel F

## Bijlagen

### 41 Bijlage 1: Korrelgrootte van het zand in de zeereep

| Plaats          | Kustvak Raai | $\mu D_{50}$<br>( $\mu\text{m}$ ) | $\sigma D_{50}$<br>( $\mu\text{m}$ ) | $D_{reken}$<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|-----------------|--------------|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| Schiermonnikoog |              |                                   |                                      |                                  |
| 2               | 1.04         | 150                               | 8                                    | 148                              |
| 2               | 3.02         | 169                               | 8                                    | 167                              |
| 2               | 5.01         | 165                               | 8                                    | 163                              |
| 2               | 7            | 164                               | 8                                    | 162                              |
| 2               | 9.2          | 163                               | 8                                    | 161                              |
| 2               | 11           | 164                               | 8                                    | 162                              |
| 2               | 13           | 159                               | 8                                    | 157                              |
| 2               | 15           | 159                               | 8                                    | 157                              |
| Ameland         |              |                                   |                                      |                                  |
| 3               | 4.01         | 187                               | 10                                   | 184                              |
| 3               | 6            | 178                               | 9                                    | 176                              |
| 3               | 8            | 172                               | 9                                    | 170                              |
| 3               | 10           | 176                               | 18                                   | 167                              |
| 3               | 12           | 161                               | 8                                    | 159                              |
| 3               | 14           | 164                               | 15                                   | 157                              |
| 3               | 16           | 170                               | 9                                    | 168                              |
| 3               | 18           | 163                               | 8                                    | 161                              |
| 3               | 21.4         | 170                               | 9                                    | 168                              |
| 3               | 24           | 170                               | 9                                    | 168                              |
| Terschelling    |              |                                   |                                      |                                  |
| 4               | 1            | 210                               | 11                                   | 207                              |
| 4               | 3            | 202                               | 10                                   | 199                              |
| 4               | 5            | 206                               | 11                                   | 203                              |
| 4               | 7            | 189                               | 9                                    | 187                              |
| 4               | 9            | 187                               | 9                                    | 185                              |
| 4               | 11           | 178                               | 9                                    | 176                              |
| 4               | 13           | 183                               | 9                                    | 181                              |
| 4               | 15           | 181                               | 9                                    | 179                              |
| 4               | 17           | 188                               | 9                                    | 186                              |
| 4               | 19           | 187                               | 9                                    | 185                              |
| 4               | 21           | 188                               | 9                                    | 186                              |
| 4               | 23           | 190                               | 10                                   | 188                              |
| 4               | 25           | 191                               | 10                                   | 189                              |
| 4               | 27           | 189                               | 9                                    | 187                              |
| 4               | 29           | 192                               | 10                                   | 190                              |
| Vlieland        |              |                                   |                                      |                                  |
| 5               | 40           | 199                               | 10                                   | 197                              |
| 5               | 41.87        | 195                               | 10                                   | 193                              |
| 5               | 43.765       | 194                               | 10                                   | 192                              |
| 5               | 45.175       | 194                               | 10                                   | 191                              |
| 5               | 47           | 202                               | 10                                   | 199                              |
| 5               | 48.62        | 205                               | 20                                   | 195                              |
| 5               | 50.77        | 194                               | 10                                   | 192                              |
| 5               | 52.5         | 194                               | 11                                   | 191                              |
| 5               | 54           | 194                               | 10                                   | 192                              |



| Plaats        | Kustvak Raai | $\mu D_{50}$<br>( $\mu\text{m}$ ) | $\sigma D_{50}$<br>( $\mu\text{m}$ ) | $D_{\text{reken}}$<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|---------------|--------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|
| Texel         |              |                                   |                                      |                                         |
| 6             | 9.6          | 203                               | 10                                   | 200                                     |
| 6             | 12.1         | 207                               | 10                                   | 204                                     |
| 6             | 13.92        | 191                               | 10                                   | 189                                     |
| 6             | 15.86        | 186                               | 9                                    | 184                                     |
| 6             | 18.53        | 194                               | 10                                   | 192                                     |
| 6             | 19.52        | 202                               | 11                                   | 199                                     |
| 6             | 20.91        | 196                               | 10                                   | 194                                     |
| 6             | 22.51        | 203                               | 10                                   | 200                                     |
| 6             | 24.4         | 206                               | 10                                   | 203                                     |
| 6             | 26.4         | 213                               | 29                                   | 193                                     |
| 6             | 28.6         | 203                               | 10                                   | 200                                     |
| 6             | 30.41        | 193                               | 10                                   | 191                                     |
| Noord-Holland |              |                                   |                                      |                                         |
| 7             | 2.1          | 232                               | 12                                   | 229                                     |
| 7             | 4.09         | 233                               | 12                                   | 230                                     |
| 7             | 6.08         | 224                               | 25                                   | 210                                     |
| 7             | 7.89         | 247                               | 14                                   | 243                                     |
| 7             | 9.48         | 261                               | 16                                   | 256                                     |
| 7             | 12.65        | 219                               | 18                                   | 212                                     |
| 7             | 14.62        | 253                               | 17                                   | 247                                     |
| 7             | 16.47        | 277                               | 14                                   | 274                                     |
| 7             | 18.27        | 251                               | 13                                   | 248                                     |
| 7             | 20.15        | 237                               | 14                                   | 233                                     |
| 7             | 26.54        | 242                               | 14                                   | 238                                     |
| 7             | 28.32        | 235                               | 12                                   | 232                                     |
| 7             | 30           | 246                               | 12                                   | 243                                     |
| 7             | 32           | 251                               | 13                                   | 248                                     |
| 7             | 34           | 242                               | 15                                   | 237                                     |
| 7             | 36           | 259                               | 26                                   | 246                                     |
| 7             | 40           | 243                               | 12                                   | 240                                     |
| 7             | 42           | 231                               | 12                                   | 228                                     |
| 7             | 44           | 236                               | 12                                   | 233                                     |
| 7             | 46           | 224                               | 11                                   | 221                                     |
| 7             | 48           | 223                               | 11                                   | 220                                     |
| 7             | 50           | 218                               | 11                                   | 215                                     |
| 7             | 52           | 195                               | 35                                   | 164                                     |
| 7             | 54           | 188                               | 9                                    | 186                                     |
| 7             | 56.75        | 214                               | 11                                   | 211                                     |
| Rijnland      |              |                                   |                                      |                                         |
| 8             | 58.5         | 262                               | 20                                   | 254                                     |
| 8             | 62           | 218                               | 30                                   | 197                                     |
| 8             | 64           | 204                               | 37                                   | 170                                     |
| 8             | 66           | 180                               | 9                                    | 178                                     |
| 8             | 68           | 210                               | 24                                   | 196                                     |
| 8             | 70           | 214                               | 31                                   | 192                                     |
| 8             | 72           | 199                               | 14                                   | 194                                     |
| 8             | 74           | 222                               | 12                                   | 219                                     |
| 8             | 76           | 220                               | 11                                   | 217                                     |
| 8             | 78           | 217                               | 11                                   | 214                                     |
| 8             | 80           | 224                               | 15                                   | 219                                     |

| Plaats             | Kustvak Raai                                        | $\mu D_{50}$<br>( $\mu\text{m}$ ) | $\sigma D_{50}$<br>( $\mu\text{m}$ ) | $D_{\text{reken}}$<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|--------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|
| Rijnland (vervolg) |                                                     |                                   |                                      |                                         |
| 8                  | 82                                                  | 221                               | 11                                   | 218                                     |
| 8                  | 84                                                  | 224                               | 15                                   | 219                                     |
| 8                  | 85.94                                               | 237                               | 15                                   | 232                                     |
| 8                  | 88                                                  | 226                               | 26                                   | 211                                     |
| 8                  | 90                                                  | 227                               | 17                                   | 221                                     |
| 8                  | 92                                                  | 224                               | 12                                   | 221                                     |
| 8                  | 94                                                  | 219                               | 15                                   | 214                                     |
| 8                  | 96                                                  | 199                               | 10                                   | 197                                     |
| Delfland           |                                                     |                                   |                                      |                                         |
| 9                  | 97.95                                               | 201                               | 15                                   | 195                                     |
| 9                  | 102                                                 | 236                               | 21                                   | 227                                     |
| 9                  | 103.91                                              | 205                               | 20                                   | 195                                     |
| 9                  | 105.825                                             | 186                               | 9                                    | 184                                     |
| 9                  | 108.07                                              | 221                               | 33                                   | 196                                     |
| 9                  | 109.96                                              | 224                               | 11                                   | 221                                     |
| 9                  | 112                                                 | 214                               | 11                                   | 211                                     |
| 9                  | 114                                                 | 213                               | 19                                   | 205                                     |
| 9                  | 116.1                                               | 255                               | 15                                   | 251                                     |
| Maasvlakte         |                                                     |                                   |                                      |                                         |
| 10                 | Nadere invulling nodig (o.a. i.v.m. aanleg Slufter) |                                   |                                      |                                         |
| Voorne             |                                                     |                                   |                                      |                                         |
| 11                 | 6.6                                                 | 177                               | 9                                    | 175                                     |
| 11                 | 8                                                   | 161                               | 8                                    | 159                                     |
| 11                 | 12                                                  | 181                               | 38                                   | 141                                     |
| 11                 | 14                                                  | 207                               | 17                                   | 200                                     |
| Goeree             |                                                     |                                   |                                      |                                         |
| 12                 | 3                                                   | 176                               | 10                                   | 173                                     |
| 12                 | 7                                                   | 204                               | 10                                   | 201                                     |
| 12                 | 9                                                   | 217                               | 17                                   | 210                                     |
| 12                 | 11                                                  | 207                               | 10                                   | 204                                     |
| 12                 | 13                                                  | 211                               | 11                                   | 208                                     |
| 12                 | 15.01                                               | 267                               | 37                                   | 241                                     |
| 12                 | 17.01                                               | 242                               | 19                                   | 235                                     |
| 12                 | 19                                                  | 248                               | 23                                   | 237                                     |
| Schouwen           |                                                     |                                   |                                      |                                         |
| 13                 | 0.84                                                | 205                               | 12                                   | 201                                     |
| 13                 | 2.841                                               | 211                               | 11                                   | 208                                     |
| 13                 | 4.842                                               | 211                               | 11                                   | 208                                     |
| 13                 | 6.789                                               | 208                               | 10                                   | 205                                     |
| 13                 | 8.789                                               | 212                               | 15                                   | 207                                     |
| 13                 | 10.841                                              | 206                               | 12                                   | 203                                     |
| 13                 | 12.883                                              | 218                               | 11                                   | 215                                     |
| 13                 | 14.854                                              | 207                               | 11                                   | 204                                     |
| 13                 | 16.88                                               | 222                               | 11                                   | 219                                     |
| Noord-Beveland     |                                                     |                                   |                                      |                                         |
| 15                 | 2.4                                                 | 240                               | 19                                   | 232                                     |

| Plaats              | Kustvak Raai | $\mu D_{50}$<br>( $\mu\text{m}$ ) | $\sigma D_{50}$<br>( $\mu\text{m}$ ) | $D_{\text{reken}}$<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|---------------------|--------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|
| Walcheren           |              |                                   |                                      |                                         |
| 16                  | 6.4          | 284                               | 23                                   | 275                                     |
| 16                  | 8.4          | 276                               | 19                                   | 269                                     |
| 16                  | 10.45        | 286                               | 14                                   | 282                                     |
| 16                  | 12.45        | 322                               | 30                                   | 308                                     |
| 16                  | 14.89        | 315                               | 16                                   | 311                                     |
| 16                  | 16.53        | 318                               | 34                                   | 300                                     |
| 16                  | 22.15        | 260                               | 13                                   | 257                                     |
| 16                  | 23.975       | 252                               | 13                                   | 249                                     |
| 16                  | 25.83        | 244                               | 12                                   | 241                                     |
| 16                  | 27.7         | 249                               | 13                                   | 246                                     |
| 16                  | 29.7         | 256                               | 13                                   | 253                                     |
| 16                  | 31.77        | 260                               | 13                                   | 257                                     |
| Zeeuwsch-Vlaanderen |              |                                   |                                      |                                         |
| 17                  | 0.518        | 218                               | 31                                   | 196                                     |
| 17                  | 4.869        | 188                               | 9                                    | 186                                     |
| 17                  | 8.77         | 212                               | 24                                   | 198                                     |
| 17                  | 12.62        | 216                               | 13                                   | 212                                     |
| 17                  | 14.67        | 258                               | 13                                   | 255                                     |

Tabel 4 Gemiddelde, standaardafwijking en rekenwaarde voor de korrelgrootte van zand in de zeereep

De waarden voor  $\mu D_{50}$  en  $\sigma D_{50}$  zijn overgenomen uit Rijkswaterstaat (1984). Voor  $\sigma D_{50}$  is echter als minimum waarde 5% van  $\mu D_{50}$  aangehouden.

$D_{\text{reken}}$  is bepaald met de volgende formule:

$$D_{\text{reken}} = \mu D_{50} - 5 \frac{(\sigma D_{50})^2}{\mu D_{50}} \tag{8}$$

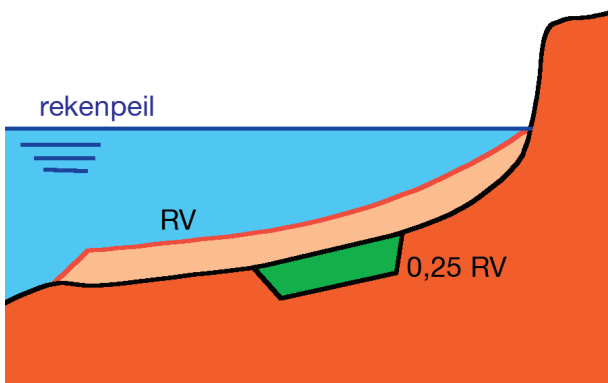
## 42 Bijlage 2: Omgaan met toeslag

De toeslag  $T$  ( $= 0,25A$ ) zoals die in het rekenrecept ten behoeve van de toetsmethode dient te worden opgenomen, leidt in het bijzonder wanneer er sprake is van relatief lage duinen ten opzichte van het Rekenpeil, soms tot een grote verschuiving  $\Delta R$  in meters van punt  $R^*$  tot punt  $R$ . In punt 22 is dat genoemd; in punt 26 is aangegeven dat  $\Delta R$  onder ontwerpomstandigheden niet groter dan 15 m kan zijn.

Er zijn diverse mogelijkheden om op een enigszins ‘andere’ manier met de toeslag om te gaan. Wanneer een dergelijke andere manier (in een bijzonder geval) wordt gekozen, is er de noodzaak om eerst afdoende aan te tonen dat het alternatief in dat geval gerechtvaardigd is.

### Toeslag niet relateren aan volume A maar aan het ‘ruimte-volume’.

In schets A van figuur 4 is in de linker schets de situatie aangegeven zoals die juist vóór de stormvloed gedacht kan worden aanwezig te zijn. Tussen het afslagprofiel en het aanwezige beginprofiel bevindt zich een zeker ruimte-volume  $RV$  ( $m^3/m$ ).  $RV$  is een maat voor de uiteindelijke mate van duinafslag. Hoe groter  $RV$ , hoe meer afslag er kan worden verwacht. Ook in figuur 12 is  $RV$  aangegeven.



Figuur 12. Ruimtevolume en toeslag

Er zijn enkele vingeroefeningen (ook met uitgebreide onderliggende probabilistische berekeningen) uitgevoerd waarbij de nauwkeurigheid van het rekenmodel  $\sigma_A$  ( $= \sigma_{nauwk.}$ ) en de effecten van de duur van de stormvloed  $\sigma_{duur}$  niet zijn gerelateerd aan het volume afslag A boven het Rekenpeil, maar aan  $RV$ . ( $\sigma_{nauwk.} = 0,15RV$  en  $\sigma_{duur} = 0,10RV$ .) In het rekenrecept wordt de toeslag  $T$  dan ook gerelateerd aan  $RV$  ( $T = 0,25RV$ ). In figuur 12 is met een locale verdieping van het aanwezige beginprofiel, dat extra ruimtevolume aangegeven. Vervolgens kan er dan een ‘normale’ afslagberekening worden gemaakt met de geldende randvoorwaarden. Er wordt dan een ligging van punt  $R^*$  berekend die in dit geval ook samenvalt met punt  $R$ . In dit geval behoeft er geen extra toeslag in rekening te worden gebracht; dat is min of meer automatisch gebeurd door het ruimte-volume  $RV$  te vergroten met  $0,25RV$ . De eerder in punt 26 genoemde bovengrens van 15 m voor de toeslag is mede op grond van deze aanpak gestoeld.

### Toeslag verwerken in een aangepast afslagprofiel

Om met de onzekerheid in de duur van de stormvloed en de nauwkeurigheid van het DUROS-plus rekenmodel rekening te houden, kan er ook aan worden gedacht om een enigszins aangepaste vorm van het afslagprofiel te kiezen. Met bijvoorbeeld een goed gekozen wat flauwer, maar ook eventueel wat langer, afslagprofiel kan worden bewerkstelligd dat er meer afslag wordt berekend dan met de gangbare (in dit TRDA2006 ‘voorgeschreven’) vorm van het afslagprofiel. Mede afhankelijk van de ligging van het beginprofiel, biedt deze aanpak soms perspectieven. Maar bijvoorbeeld in het geval de nabije vooroever tamelijk diep ligt (bijvoorbeeld een geul voor de kust), leidt met name een mogelijke zeewaartse verlenging van het afslagprofiel, echter tot een (te?) grote toename van de mate van duinafslag.

Zoals eerder is vermeld, is het noodzakelijk voordat de ‘toevlucht’ tot deze (of nog andere) mogelijkheden wordt genomen, een gedegen onderzoek uit te voeren.

## 43 Bijlage 3: Huidige stand van zaken en mogelijke aandachtspunten voor nader onderzoek

Om een ‘veiligheidstoets’ van een dwarsprofiel van een duinwaterkering te kunnen uitvoeren is in dit TRDA2006 een aantal stappen beschreven die gevolgd moeten worden. Centraal daarin staat het bepalen (uitrekenen) van de maatgevende duinafslag.

Uiteraard is één en ander afhankelijk van de plaatselijke situatie, maar uitsluitend voor de verdere discussie in deze Bijlage 3 wordt gesteld dat de maatgevende duinafslag voor een bepaalde JARKUS-raai tot 90 m vanaf de duinvoet reikt (in dit voorbeeld). Een zorgvuldige berekening met de ‘voorgeschreven’ randvoorwaarden en procedures heeft die 90 m opgeleverd.

Gegeven een dergelijk antwoord (90 m) kan vervolgens de vraag worden gesteld in hoeverre die 90 m ‘goed’ en ‘betrouwbaar’ is.

- Betreft het een soort van bovengrens, omdat er ondanks de in principe probabilistische aanpak, toch nog sprake van is dat er (wellicht onbewust) ‘veiligheid op veiligheid’ is gestapeld? Dat wil zeggen, er wordt weliswaar 90 m berekend, maar in werkelijkheid zou bijvoorbeeld ‘slechts’ 70 m optreden. Als de duinwaterkeringen aan de eisen (van dit TRDA2006) voldoen, is Nederland eigenlijk ‘veiliger’ dan de bedoeling was en is.

of,

- Is er mogelijk sprake van een onderschatting van de ernst van de situatie? Zijn er belangrijke effecten ‘vergeten’ die in werkelijkheid mede de mate van duinafslag bepalen, dan wel onvoldoende in rekening zijn gebracht? Dat wil zeggen, er wordt weliswaar 90 m berekend, maar in werkelijkheid zou bijvoorbeeld 115 m optreden. In dat geval zou het kunnen zijn dat Nederland ‘onveiliger’ is dan we denken, en dat er in feite sprake is van een ontoelaatbare (‘onwettige’) situatie.

Een concreet en afdoend antwoord op deze vraag kunnen de opstellers (zie punt 16) van dit TRDA2006 niet geven. Maar uit het feit dat de voor deze discussie aangenomen 90 m (als uitkomst van de bepaling van de maatgevende duinafslag) zonder verdere reserves wordt aanbevolen, kan worden opgemaakt dat de opstellers er in ieder geval in ‘geloven’. Er wordt in dit TRDA2006 dus absoluut niet gesteld of impliciet bedoeld dat: “De uitkomst is weliswaar 90 m, maar doe er voor de ‘zekerheid’ nog maar bijvoorbeeld 20 m bij.”

Eén en ander neemt vervolgens niet weg dat er alle aanleiding is om de inhoud van dit TRDA2006 niet als een ‘einde’ te beschouwen, maar veel meer als een tussenstap naar een meer gedegen toekomstig Technisch Rapport Duinafslag. Daarvoor is nog onderzoek nodig.

Op verzoek van de reviewcommissie voor dit rapport (zie punt 16) worden in deze Bijlage 3 verder enige punten genoemd die bij een dergelijk nader en voortgezet onderzoek aan de orde zouden moeten komen. Er wordt daarbij niet naar volledigheid gestreefd.

Enkele kernpunten en uitgangspunten die in dit TRDA2006 centraal hebben gestaan, kunnen goed worden gebruikt om het noodzakelijk geachte nadere onderzoek enigszins te structureren.

- In dit TRDA2006 zijn de golfkarakteristieken op een waterdiepte waar de bodem op NAP -20 m ligt, 'sturend' (dat wil ook zeggen dat als deze golfkarakteristieken in de toekomst veranderen er consequenties kunnen zijn voor zowel het huidige rekenmodel zelf als de uitkomsten van dit rekenmodel).
- In dit TRDA2006 is een eenvoudig rekenmodel gebruikt (DUROS-plus).
- In dit TRDA2006 wordt het duinafslagproces in eerste aanleg als zuiver 2D gezien (analyse per afzonderlijke doorsnede).
- In dit TRDA2006 gaat het voornamelijk om de 'veiligheid' van het achterliggende dijkkringgebied; het gaat daarbij om relatief kleine overschrijdingskansen. De duinafslag bij grotere overschrijdingskansen wordt in dit TRDA2006 slechts summier behandeld (die grotere overschrijdingskansen zijn bijvoorbeeld van belang voor het bepalen van het risico voor bebouwing in de afslagzone).
- In dit TRDA2006 worden duindoorsneden waarin 'harde' elementen voorkomen (strandmuren / duinvoetverdedigingen) heel 'eenvoudig' afgedaan (er is geen effect).

#### *'Sturende' waterdiepte:*

In de huidige aanpak wordt aangenomen dat de (golf)randvoorwaarden op relatief diep water (NAP -20 m) sturend zijn voor het duinafslagproces. Maar meer fysisch gezien wordt de mate van duinafslag echter uiteindelijk voornamelijk mede bepaald door de golfhoogten dicht bij de kust (zeg ter hoogte van de NAP -7 m dieptelijn; tijdens ontwerp-omstandigheden is de waterdiepte daar dan circa 12 m). De wijze waarop de golfkarakteristieken gaande van dieper water naar de kust toe veranderen, verschilt van dwarsprofiel tot dwarsprofiel. Bij bijvoorbeeld een relatief steil dwarsprofiel kan een hogere golf op bijvoorbeeld de NAP -7 m dieptelijn worden verwacht, dan bij een veel flauwer dwarsprofiel, terwijl de omstandigheden op dieper water worden verondersteld gelijk te zijn. Het verdient aanbeveling uiteindelijk een rekenmethode te ontwikkelen waarbij de invloeden van de dwarsprofielen in rekening wordt gebracht, bijvoorbeeld door gebruik te maken van golfrandvoorwaarden op een positie veel dichterbij de kust dan de thans gebruikte positie van NAP -20 m.

De wijze waarop de randvoorwaarden op een geringere diepte dan thans gebruikelijk is, kunnen worden bepaald, vergt de nodige aandacht. De onderlinge correlaties van de diverse parameters, compliceren één en ander in hoge mate.

Omdat golfenergiespectra vervormen op vooroevers met een relatief geringe waterdiepte, wordt ook de vaststelling van de te gebruiken kenmerkende golfperiode extra relevant.

#### *Rekenmodel als hart:*

Het verdient aanbeveling goed uit te zoeken of andere rekenmodellen als hart dan DUROS-plus in een rekenmethode voor de beoordeling van de 'veiligheid' van een duinwaterkering kunnen worden gebruikt. Volstaan bijvoorbeeld al bestaande modellen als DUROSTA, Delft3D, XBeach; dan wel moeten er geheel nieuwe modellen worden ontwikkeld omdat bestaande modellen toch minder goed blijken te voldoen. Zelfs als er (vooralsnog) voor wordt gekozen een balansmodel te kiezen als hart, zijn aanpassingen nodig in verband met hetgeen hiervoor is aangegeven.

#### *2D - 3D:*

De huidige aanpak gaat uit van een zuivere 2D benadering van het duinafslagvraagstuk. Zand wordt gedacht uitsluitend in de richting loodrecht op de kust te bewegen. Ontegengesteld is er in werkelijkheid sprake van 3D effecten. Hoe die effecten op een geloofwaardige en verantwoorde wijze in rekening kunnen worden gebracht, vergt nadere studie. Daarbij dient ook aan de orde te komen hoe eventuele gradiënten

in het langtransport op een andere (betere) manier in rekening kunnen worden gebracht, dan thans het geval is. Een goed inzicht in 3D effecten is ook van belang bij de dimensionering van overgangconstructies tussen 'hard' en 'zacht' en voor de vereiste dimensionering van duindoorsneden die (nog) tot het invloedsgebied van de 'harde' constructie kunnen worden gerekend.

*Grotere overschrijdingskansen:*

De toetsmethode zoals die in dit TRDA2006 is beschreven, is primair bedoeld voor de beoordeling van de 'veiligheid' van een duinwaterkering. Het gaat daarbij om relatief zeer kleine overschrijdingskansen. Voor de bepaling van de kans dat objecten die tamelijk dicht bij de rand van de duinen zijn gesitueerd tijdens een stormvloed in zee storten, is een berekeningsmethode nodig die toegesneden is op veel grotere kansen. Hoewel in Deel D een aanzet voor een dergelijke methode is gegeven, is afhankelijk van de benodigde 'kwaliteit' van de methode, nog enig nader onderzoek en af- en fijnregeling van een methode noodzakelijk.

*'Harde' elementen:*

Juist ook in samenhang met de hiervoor genoemde *grotere overschrijdingskansen*, is het van belang goed te kunnen inschatten onder welke condities bestaande harde keringen zullen bezwijken (vergelijk de vraag van de stabiliteit van bijvoorbeeld de strandmuur en boulevard van Scheveningen). Het is in dit verband ook van belang om te kunnen inschatten op welk 'moment' tijdens ontwerpomstandigheden het falen van de kering plaatsvindt. Afhankelijk van dat 'moment' tijdens de stormvloed, zou er nog van enige reductie van de uiteindelijk te bereiken mate van afslag sprake kunnen zijn of niet. Inzicht in dergelijke kwesties ontbreekt thans.

## 44 Bijlage 4: Begrippen en afkortingen

**afslaggrens**

punt in een dwarsprofiel op maaiveldhoogte tot hoever de duinafslag is voortgeschreden; ook afslagpunt.

**afslaglijn**

lijn op maaiveldhoogte in het duin tot hoever de afslag is voortgeschreden.

**afslagprofiel**

vorm van het bovenste gedeelte van het dwarsprofiel na afloop van een stormvloed.

**afslagpunt**

punt in een dwarsprofiel op maaiveldhoogte tot hoever de duinafslag is voortgeschreden; ook afslaggrens.

**astronomisch getij**

getijbeweging als gevolg van de veranderlijke resultante van de aantrekkingskracht van de maan en de zon op de watermassa's op aarde, niet gestoord door weerkundige omstandigheden.

**basispeil**

peil van NAP +5 m (anno 1960) aan de peilschaal van Hoek van Holland en de daarmee vergelijkbare peilen op overige locaties (peilen met een gelijke overschrijdingsfrequentie). De overschrijdingsfrequentie is per definitie gelijk aan  $10^{-4}$  per jaar (volgens de Deltacommissie).

**bezwijkkans**

kans op bezwijken.

**BKL**

basiskustlijn; kustlijn waarvan de ligging in het kader van het kusthandhavingsbeleid als referentie dient (in het algemeen de positie van de 'gemiddelde' kustlijn op 1 januari 1990; soms heeft naderhand een bijstelling plaatsgevonden).

**bui-oscillaties**

onregelmatige schommelingen van de waterspiegel met wisselende periode.

**buistoot**

tijdelijke, vrij kort durende, verheffing van de waterspiegel als gevolg van het passeren van een bui of een front.

**decimeringshoogte**

verschil van het (stormvloed)peil dat behoort bij een vergroting of verkleining van de overschrijdings-frequentie met een factor 10.

**Delft3D**

rekenmodel, ontwikkeld door WL | Delft Hydraulics, met diverse (ook morfologische) toepassingen.

**Deltacommissie**

Staatscommissie die na de watersnoodramp van 1953 is ingesteld.

**Deltagoot**

grote laboratorium-faciliteit van WL | Delft Hydraulics waarin onder meer hoge golven (ongeveer  $H_s = 1.6$  m) kunnen worden opgewekt.

**deterministisch**

aanpak (berekeningsmethode) waarbij met 'vaste' invoergegevens wordt gewerkt.

**dijkkringgebied**

gebied dat door een stelsel van waterkeringen of hoge gronden aaneengesloten beveiligd is tegen overstroming door het buitenwater.

**D<sub>reken</sub>**

korreldiameter van het duinzand waarmee in de toetsmethode gerekend dient te worden. Het betreft een rekengrootte waarbij het effect van de mogelijke variatie in korreldiameter van het duinzand op de mate van duinafslag is verdisconteerd (zie formule 9 in punt 41).



**D<sub>50</sub>**

maat voor de korreldiameter (van het duinzand) waarbij 50% van het gewicht van een monster fijner is.

**duinbeloop**

zeezijde van het duinprofiel; ook duinfront.

**duinfront**

zeezijde van het duinprofiel; ook duinbeloop.

**DUROS**

**DU**in **eROS**ie model op basis van een bekend veronderstelde vorm van het afslagprofiel; (geen effect van de piekperiode van het energiedichtheidspectrum).

**DUROS-plus**

Als DUROS, maar nu wel met effect van de piek-periode van het energiedichtheidspectrum.

**DUROSTA**

**DU**in **eROS**ie **TijdsAfhankelijk** model.

**energiedichtheidspectrum**

wijze van weergeven van onregelmatige golven waarbij de golfenergie is verdeeld over de verschillende component-golven.

**fungerend grensprofiel**

doorgaand grensprofiel zoals de ligging ervan in het veld is gedefinieerd (niet noodzakelijk direct aansluitend aan het maatgevende afslagpunt).

**golfopzet**

verhoging van de gemiddelde waterstand (voornamelijk in de brekerzone) door golfwerking (eng.: wave set-up).

**grensprofiel**

profiel dat na duinafslag nog minimaal als waterkering aanwezig dient te zijn opdat er geen doorbraak zal optreden.

**JARKUS**

landelijk data-bestand van jaarlijks opgenomen diepte- en hoogtemetingen van de zandige kust (**JAaR**lijkse **KUST**metingen).

**Kennisalliantie Duinafslag**

door WL I Delft Hydraulics opgezet samenwerkings-verband voor het duinafslag onderzoek.

**keurgebied**

gebied waar de keur geldt. De keur is een verordening met gebods- en verbodsbepalingen van een waterschap of een hoogheemraadschap.

**kritieke afslagpunt**

positie aan de landwaartse zijde van een duinregel tot hoever duinafslag kan voortschrijden opdat er nog juist geen doorbraak optreedt.

**Legger**

beheersdocument van de waterkering met de juridisch relevante gegevens.

**maatgevende afslagpunt**

punt in een dwarsprofiel op maaiveldhoogte tot hoever de duinafslag is voortgeschreden onder ontwerp-omstandigheden.

**maatgevende afslagzone**

zone in het duin die zal afslaan onder ontwerp-omstandigheden.

**maatgevende duinafslag**

mate van duinafslag die optreedt onder ontwerp-omstandigheden.

**MKL**

momentane ligging van de kustlijn die wordt berekend uit de zandinhoud van een speciaal gedefinieerde rekenschijf.

**NAP**

**Normaal Amsterdams Peil.**

**ontwerpomstandigheden**

algemene aanduiding van een mogelijke set van randvoorwaarden waarbij juist de maatgevende duinafslag wordt bereikt.

**ontwerppeil**

peil (maximum waterstand die, in geval van duinen als waterkering, tijdens een stormvloed wordt bereikt) dat, afgeleid van het basispeil, als uitgangspunt dient bij het dimensioneren van de waterkering.

**overschrijdingsfrequentie**

gemiddeld aantal keren dat in een zekere tijdsperiode (meestal een jaar) een verschijnsel (bijvoorbeeld een waterstand of een mate van duinafslag) een zekere waarde bereikt of overschrijdt.

**primaire waterkering**

waterkering die beveiliging biedt tegen overstroming.

**probabilistisch**

aanpak (berekenningsmethode) waarbij expliciet rekening wordt gehouden met onzekerheden in de waarden van de invoergegevens.

**randvoorwaardenboek**

door de rijksoverheid uitgegeven officieel document waarin is samengevat welke waarden voor diverse invoergegevens moeten worden gebruikt bij de toetsing van primaire waterkeringen.

**Rekenpeil**

rekenwaarde voor het stormvloedpeil dat moet worden ingevoerd ten behoeve van 'veiligheidstoets' van duinwaterkeringen.

**RSP**

Rijks Strand Palenlijn.

**ruimte-volume**

volume 'water' dat zich bevindt tussen het aan de maximum waterstand 'hangende' afslagprofiel (met als 0,0 punt juist tegen het duin aan en inclusief het talud van 1: 12,5) en het dwarsprofiel dat juist voor de stormvloed aanwezig is (zie ook figuur 12 in punt 42).

**SBW**

Sterkte en Belastingen van Waterkeringen. Een langlopend onderzoeksproject van Rijkswaterstaat met betrekking tot de 'veiligheid' van waterkeringen.

**standaardafwijking**

maat om bij een normale verdeling de mate van variatie aan te geven.

**stormopzet**

verhoging van de waterstand (op zee) ten gevolge van een storm.

**stormvloedpeil**

hoogste waterstand die tijdens een storm wordt bereikt.

**SWAN**

een door de Technische Universiteit Delft ontwikkeld rekenprogramma waarmee de golfvoortplanting in grote gebieden kan worden berekend.

**TAW**

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (inmiddels opgeheven).

**Toeslag**

extra hoeveelheid duinafslag waarmee de effecten van de variatie in de duur van de stormvloed en de nauwkeurigheid van het rekenmodel, in de toetsmethode in rekening worden gebracht.

**TRDA2006**

Technisch Rapport Duinafslag 2006 (d.w.z. dit rapport).

**verwachtingswaarde**

waarde van een parameter die, bij een zekere verdeling, de grootste kans heeft om voor te komen. (Bij een normale verdeling betreft het dus de gemiddelde waarde van de verdeling.)

**VTV**

**Voorschrift Toetsing op Veiligheid.** Officieel document waarin gedetailleerd wordt 'voorgeschreven' hoe een 'veiligheidstoets' dient te worden uitgevoerd.

**waterkeringbeheerder**

overheid waarbij de (primaire) waterkering in beheer is.

**waterkeringzone**

zone in het duingebied (en eventueel landwaarts daarvan) die als waterkering is aangemerkt en door de waterkeringbeheerder wordt beheerd (ook wel beheersgebied; keurzone).

**wave set-up (golfopzet)**

verhoging van de gemiddelde waterstand (voornamelijk in de brekerzone) door golfwerking.

**Wow**

**Wet op de waterkering.**

## 45 Bijlage 5: Symbolen

|                          |                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $A$                      | berekende hoeveelheid afslag boven stormvloedpeil [ $\text{m}^3/\text{m}$ ]                                                                                                                                                                       |
| $A^*$                    | berekende hoeveelheid afslag boven stormvloedpeil inclusief Toeslag [ $\text{m}^3/\text{m}$ ]                                                                                                                                                     |
| $b_{\text{kruin}}$       | minimale breedte van het grensprofiel op kruinhoogte [m]                                                                                                                                                                                          |
| $D_{\text{reken}}$       | korreldiameter van duinzand waarmee in de toetsmethode wordt gerekend [m]                                                                                                                                                                         |
| $D_{50}$                 | korreldiameter van duinzand (50% van het gewicht van een monster is fijner) [m]                                                                                                                                                                   |
| $g$                      | extra afslag ten gevolge van een gradiënt in het langtransport [m]                                                                                                                                                                                |
| $G$                      | verlies van zand uit dwarsprofiel door een gradiënt in het langtransport [ $\text{m}^3/\text{m}$ ]                                                                                                                                                |
| $G_0$                    | referentiewaarde voor $G$ [ $\text{m}^3/\text{m}$ ]                                                                                                                                                                                               |
| $h_{\text{max}}$         | maximum waterstand tijdens een stormvloed [m boven NAP]                                                                                                                                                                                           |
| $h_0$                    | minimale kruinhoogte van het grensprofiel [m boven NAP]                                                                                                                                                                                           |
| $H_{0s}$                 | significante golfhoogte op diep water [m]                                                                                                                                                                                                         |
| $H_s$                    | significante golfhoogte [m]                                                                                                                                                                                                                       |
| $N$                      | aantal JARKUS-metingen dat in de toetsmethode wordt gebruikt                                                                                                                                                                                      |
| $P$                      | positie van 0,0-punt van afslagprofiel na afloop van de stormvloed [m]                                                                                                                                                                            |
| $R$                      | positie van afslagpunt in duin (veelal na toepassing van Toeslag) [m]                                                                                                                                                                             |
| $RP$                     | Rekenpeil [m boven NAP]                                                                                                                                                                                                                           |
| $R^*$                    | positie van afslagpunt in duin (veelal zonder Toeslag) [m]                                                                                                                                                                                        |
| $RV$                     | ruimte-volume (zie figuur 12; punt 42) [ $\text{m}^3/\text{m}$ ]                                                                                                                                                                                  |
| $T_{m-1,0}$              | spectrale golfperiode op basis van de $m_{-1}$ en $m_0$ momenten van het golfspectrum [s]: $T_{m-1,0} = m_{-1} / m_0$ , het effect van het golfspectrum (energiedichtheidspectrum) komt met deze periodemaat beter tot zijn recht dan met $T_p$ . |
| $S_{\text{zee}}$         | zeewaarts gericht sediment transport nabij zeewaartse einde van het afslagprofiel (zie figuur 10; punt 32)                                                                                                                                        |
| $T$                      | Toeslag [ $\text{m}^3/\text{m}$ ]                                                                                                                                                                                                                 |
| $T_p$                    | de golfperiode bij de piek van het energiedichtheidspectrum [s]                                                                                                                                                                                   |
| $w$                      | de valsnelheid van het duinzand in zeewater van 5° Celsius [m/s]                                                                                                                                                                                  |
| $x$                      | de afstand vanaf de nieuwe duinvoet [m]                                                                                                                                                                                                           |
| $x_{\text{max}}$         | maximale lengte van (parabolisch) afslagprofiel [m]                                                                                                                                                                                               |
| $y$                      | de diepte beneden stormvloedpeil [m]                                                                                                                                                                                                              |
| $y_{\text{max}}$         | maximale diepte van (parabolisch) afslagprofiel [m]                                                                                                                                                                                               |
| $z$                      | afstand tussen duinhoogte en teen van afslagprofiel (zie figuur 9; punt 29) [m]                                                                                                                                                                   |
| $Z$                      | doorsnede nabij zeewaartse einde van het afslagprofiel (zie figuur 10; punt 32)                                                                                                                                                                   |
| $\sigma_A$               | standaardafwijking van de spreiding in de nauwkeurigheid van het rekenmodel                                                                                                                                                                       |
| $\sigma_{\text{duur}}$   | standaardafwijking van de spreiding in de duur van de stormvloed                                                                                                                                                                                  |
| $\sigma_{\text{nauwk.}}$ | standaardafwijking van de spreiding in de nauwkeurigheid van het rekenmodel                                                                                                                                                                       |
| $\Delta R$               | verschuiving van punt $R^*$ naar punt $R$                                                                                                                                                                                                         |

## Colofon

### **Tekst**

WL | Delft Hydraulics, Alkyon en TU Delft in opdracht van Rijkswaterstaat

### **Vormgeving**

Comma-S ontwerpers, 's-Hertogenbosch

### **Drukwerk**

Drukkerij Lecturis, Eindhoven

### **Voor vragen over ENW**

[www.enwinfo.nl](http://www.enwinfo.nl)

Het technisch rapport duinafslag is een ENW uitgave van het  
WL | Delft Hydraulics rapport H4357, Technisch Rapport Duinafslag, mei 2007.

