

De Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) is een onafhankelijke adviescommissie, die gevraagd en ongevraagd de minister van Verkeer en Waterstaat adviseert over alle technisch-wetenschappelijke aspecten van constructie en onderhoud van waterkeringen, met het oog op de veiligheidsfunctie van door deze waterkeringen beschermde gebieden. De TAW richt zich zowel op primaire- als secundaire waterkeringen en boezemkaden. Ook andere overheden kunnen de minister verzoeken de TAW te laten adviseren over complexe en specifieke waterkeringsproblemen.

Hiermee levert de TAW een bijdrage aan het realiseren van maatschappelijk vastgestelde veiligheidsnormen. In de leidraden, technische rapporten en adviezen, die door de TAW worden aangereikt, wordt nadrukkelijk rekening gehouden met andere functies van de waterkering, zoals milieu, recreatie, verkeer, landschap en cultuurhistorie.

De Dienst en Weg- en Waterbouwkunde (DWW) van Rijkswaterstaat (RWS) voert de werkzaamheden van TAW uit. Hierbij treedt zij op als opdrachtgever, bereidt zij de TAW-producten voor en levert zij de TAW-coördinator. Ook is de DWW, via de helpdesk Waterkeren, beschikbaar voor alle betrokkenen bij de waterschapszorg: waterschappen, provincies en rijk.

Met vragen omtrent het werk van de TAW kan men zich wenden tot de DWW.
Postbus 5044
2600 GA Delft

telefoon : 015 - 25 18 436
 015 - 25 18 450 (helpdesk Waterkeren)
fax : 015 - 25 18 568
Internet : <http://www.tawinfo.nl>
e-mail : tawsecr@dww.rws.minvenw.nl

Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij Dijken



**Technisch Rapport
Golfoploop en Golfoverslag
bij Dijken**

Colofon

Uitgave

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
Delft, mei 2002

Bron

Dit rapport is tot stand gekomen in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde onder auspiciën van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.

Dit rapport is geschreven door dr. ir. J.W. van der Meer.

Bijdragen aan de totstandkoming van dit rapport zijn geleverd door de volgende personen:

ing. A. van Apeldoorn (Provincie Zuid-Holland)

prof. dr. ir. J.A. Battjes (Technische Universiteit Delft)

dr. ir. M.R.A. van Gent (WL I Delft Hydraulics)

ir. R. 't Hart (RWS-DWW, projectbegeleiding)

mw. ir. S.R. Holterman (RWS-DWW)

ir. M. Klein Breteler (WL I Delft Hydraulics)

ir. A.P. de Looff (RWS-DWW)

ir. M. van de Pavard (RWS-DWW)

ing. R. Piek (Provincie Zuid-Holland)

ir. H.M.G.M. Steenbergen (TNO-Bouw)

ir. P. Tönjes-Gerrand (projectbegeleiding)

ing. J.E. Venema (RWS-DWW, projectbegeleiding)

ir. J.P. de Waal (RWS-RIZA)

Omslag, tekeningen en drukwerkbegeleiding:

R.P. van der Laag (RWS-DWW)

Druk

NIVO

Delft

Omslagfoto's

Dienst Weg- en Waterbouwkunde

Inhoudsopgave

	Ten geleide	VII
1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond bij het ontstaan van dit rapport	1
1.2	Definities	2
1.3	Bepaling van golfhoogte en golfperiode bij de teen van de dijk	5
1.4	Algemene rekenprocedure voor golfoploop en golfoverslag bij een eenvoudig talud	6
2	Golfoploop	7
2.1	Algemeen	7
2.2	Algemene formule voor de golfoploop	8
2.3	Gemiddeld talud	12
2.4	Invloed van een ondiep voorland	13
2.5	Invloed van hoek van golfaanval	14
2.6	Invloed van bermen	16
2.7	Invloed van ruwheid	19
2.8	Invloed van een (verticale) wand op een talud	21
2.9	Interpolaties tussen taluds, bermen, voorlanden en verschillende ruwheden	22
3	Golfoverslag	27
3.1	Gemiddeld golfoverslagdebiet	27
3.2	Invloed van (zeer) ondiepe voorlanden	32
3.3	Interpolaties tussen taluds, bermen en voorlanden	34
3.4	Overslagvolumes per golf	36
	Lijst van symbolen met toepassingsgebied	39
	Referenties	41
	Bijlage 1	
	Invloedsfactoren voor de ruwheid van toplagen bij golfoploop en golfoverslag	43

Dit onder auspiciën van TAW samengestelde *Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij Dijken* is gebaseerd op een in 1993 verschenen studie [WL, 1993-1] *Golfoploop en Golfoverslag bij Dijken*, aangevuld met aanvullend onderzoek naar en recent inzicht in onderbelichte aspecten.

Tot de eerste helft van de jaren negentig werd voor de bepaling van golfoploop en golfoverslag vooral de *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 2* [TAW, 1989] geraadpleegd. In appendix 11 van die Leidraad worden formules voor golfoploop en golfoverslag gegeven. De meeste van de daar vermelde formules waren reeds eerder gepubliceerd in het TAW-rapport *Golfoploop en Golfoverslag* [TAW, 1972].

Aangezien golfoploophoogten en golfoverslaghoeveelheden zwaar meetellen in de bepaling van de totale kruinhoogte van een dijk, is het niet meer dan vanzelfsprekend dat er in de afgelopen decennia veel onderzoek is verricht naar deze aspecten. Hierdoor is er in de loop van de tijd veel kennis opgedaan op het gebied van de invloed van taludruwheid, taludhellingen, bermen, hoek van inval en verticale constructies op golfoploop en golfoverslag. Recentelijk zijn daar de effecten van (zeer) ondiepe voorlanden bijgekomen.

Waren de golfoploop- en golfoverslagformules tot voor kort vooral bedoeld voor deterministische berekeningen, thans worden deze regelmatig toegepast in probabilistische berekeningen, waarbij spreiding in de invoergegevens en onzekerheden in de constanten worden meegenomen. Dit stelt tegenwoordig hoge eisen aan de formules aangaande de continuïteit en geldigheid van de functies.

Met de tussenresultaten van het onderzoek en conceptversies van dit rapport is door diverse gebruikers reeds veel ervaring opgedaan. Aanbevelingen van de gebruikers hebben geleid tot een verbetering van de bruikbaarheid van de nieuwe formules. Ook zijn de geldigheidsgebieden van de nieuwe formules bepaald. Dit betekent dat niet voor elk willekeurig dijkprofiel en alle golfrandvoorwaarden de formules zonder meer kunnen worden toegepast. Juist bij complexe situaties of situaties buiten het geldigheidsgebied zal maatwerk nodig blijven.

De nieuwe golfoploop- en golfoverslagformules vervangen de bestaande formules, zoals deze zijn opgenomen in de *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 2* [TAW, 1989]. Voor rivierdijken kunnen de nieuwe formules in de ontwerp- en toetsprocedures worden toegepast. De nieuwe formules zijn of worden ook opgenomen in de toetsprocedure voor de dijken langs het IJsselmeer.

Voor dijken langs de zee- of meerkust en estuaria geldt dat mogelijk (zeer) ondiepe voorlanden en daarmee samenhangende afwijkende spectra kunnen voorkomen, mogelijk in combinatie met lange golven. Alhoewel onderzoek hiernaar nog niet geheel is uitgekristalliseerd, is wel besloten recente informatie hierover mee te nemen en de formules zodanig aan te passen dat zij ook toepasbaar zijn voor dit soort situaties. Met name voor ondiepe voorlanden blijkt de golfoploop in het algemeen iets hoger uit te komen dan voorheen. Opgemerkt zij dat de nieuwe rekenregels gelden voor de vigerende hydraulische belastingen.

De kennis met betrekking tot het dimensioneren op bezwijkmechanismen die aan golfploop en -overslag gerelateerd zijn, is op een aantal punten nog onvoldoende ontwikkeld. Het betreft:

- vaststellen van maatgevende golfbelasting in zeer ondiep water;
- richtlijnen voor vereiste sterkte, met name onder scheve golfaanval en golfoverslag;
- bezwijkmechanismen met effect van belastingduur;
- golftransmissie bij scheve golfaanval en golfgroei onder extreme wind.

Onderzoek op deze punten zal in vervolg op dit Technisch Rapport verder ter hand worden genomen, omdat golfploop en golfoverslag aanmerkelijk mee tellen in de bepaling van de dijkhoogte.

Dit Technisch Rapport maakt deel uit van de serie Technische Rapporten en Leidraden zoals vermeld in de *Grondslagen voor waterkeren* [TAW, 1998-1]. Dit betekent dat alle eerdere door TAW gepubliceerde formuleringen betreffende golfploop en golfoverslag hierbij komen te vervallen.

Den Haag,

ir. W. van der Kleij

voorzitter Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen

1.1 Achtergrond bij het ontstaan van dit rapport

In 1993 is een rapport verschenen met dezelfde titel als dit rapport [WL, 1993-1], namelijk *"Golfploop en golfoverslag bij dijken"*. In 1997 is een herziene versie van het rapport uit 1993 verschenen [WL, 1997-1]. Conceptversies van het technisch rapport waren een omzetting naar TAW-kader met enkele laatste wijzigingen op basis van ervaringen met het bijbehorende programma PCOVERSLAG. In de laatste redactieronde is de invloed van (zeer) ondiepe voorlanden gekwantificeerd, wat heeft geleid tot aangepaste formules en andere golfparameters.

Het rapport uit 1993 is een samenvatting van toen beschikbare (nieuwe) onderzoeksresultaten met betrekking tot golfploop en golfoverslag bij dijken. Deze samenvatting had tot doel de onderzoeksresultaten gemakkelijker toegankelijk te maken bij ontwerpen en toetsen van dijken. Hoewel geprobeerd is alle formules zo breed mogelijk van toepassing te maken, blijkt na enkele jaren van intensief gebruik in de praktijk, dat praktijksituaties maar zelden helemaal aan de schematisaties voldoen waarbij het onderzoek is uitgevoerd. Zo komen bijvoorbeeld vaak situaties voor met meerdere taludhellingen in één dijprofiel, eventueel nog gecombineerd met meerdere bermen. Het toepassingsgebied van de nieuwe formules is daarom aangegeven, met daarbij mogelijkheden om in andere gevallen te interpoleren.

Voor achtergronden van het onderzoek, waarop het rapport uit 1993 is gebaseerd, wordt verwezen naar het uitgebreide onderzoeksverslag van Van der Meer en De Waal [WL, 1993-2]. De studie naar gewenste aanpassingen in het rapport uit 1993, is eveneens in een rapport weergegeven [WL, 1997-2].

In het kort worden de wijzigingen die zijn aangebracht ten opzichte van het eerste rapport uit 1993 nader toegelicht:

- De definities in het toepassingsgebied zijn nauwkeuriger geformuleerd. Dit heeft met name betrekking op taluds, bermen, voorlanden en de golfploop en golfoverslag zelf. De definities zijn samengebracht in paragraaf 1.2. Bij situaties die niet aan een definitie voldoen (te flauw talud, te steile of lange berm) kan via interpolatie een afschatting van de golfploop en overslag worden gemaakt.
- De golfhoogte die in berekeningen moet worden gebruikt is de significante golfhoogte ter plaatse van de teen van de dijk.
- De bepaling van een gemiddeld talud en de beschrijving van de berminvloed is vereenvoudigd en aangescherpt. Dit geldt ook voor de bepaling van een gemiddelde ruwheid.
- De formules zijn, waar nodig, continu gemaakt en eventueel vereenvoudigd. Dit geldt met name voor:
 - de invloedsfactor voor de bermligging
 - de golfoverslag bij het overgangsgebied tussen brekende en niet-brekende golven
 - de invloedsfactor voor de hoek van golfaanval bij strijkgolven
- De invloedsfactor voor een ondiep voorland is verdwenen.
- De invloed op de overslag van een (verticale) wand op een talud kan met een invloedsfactor worden beschreven.

Na publicatie van het aangepaste rapport [WL, 1997-1] is verder onderzoek uitgevoerd naar een aspect dat tot nu toe onderbelicht was gebleven: het effect van (zeer) ondiepe voorlanden en het breken van golven op golfploop en golfoverslag. De resultaten zijn in een onderzoeksrapport gepubliceerd [WL, 1999-2]. Alhoewel het onderzoek voor genoemd aspect nog geen afdoende wetenschappelijke verklaringen heeft weten te leveren, is wel besloten de resultaten zoveel mogelijk integraal in dit rapport op te nemen. Dit heeft geleid tot de volgende wijzigingen ten opzichte van de versie van 1997:

- Voor de significante golfhoogte bij de teen van de constructie wordt de spectrale maat H_{m0} aangehouden.
- Voor de maatgevende golfperiode wordt niet meer de piekperiode aangehouden, maar de spectrale periodemaat $T_{m-1,0}$. Bij "normale" spectra met een duidelijke piek ligt $T_{m-1,0}$ dicht in de buurt van de piekperiode T_p en wordt een omrekeningsfactor gegeven voor het geval alleen de piekperiode bekend is.
- Met het gebruik van bovenstaande spectrale periodemaat is het niet meer nodig een procedure te hebben voor dubbeltoppige spectra. Deze procedure is dus komen te vervallen.
- Formules voor golfoploop en golfoverslag zijn aangepast aan het gebruik van bovenstaande parameters. Meer specifiek:
 - het maximum voor de golfoploop ligt hoger dan in eerdere versies en heeft een vloeiender verloop van brekende naar niet-brekende golven.
 - de formules voor golfoverslag zijn alleen aangepast aan gebruik van de nieuwe parameters. Voor (zeer) ondiepe voorlanden worden aparte formules gegeven.

De laatste wijzigingen, zoals bovenstaand aangegeven, zijn verantwoord in een achtergrondverslag [DWW, 2001]

1.2 Definities

In de lijst van symbolen zijn korte definities van gebruikte parameters opgenomen. Enkele definities zijn echter zo belangrijk dat ze in deze paragraaf apart worden beschreven. De definities en geldigheids grenzen hebben specifiek betrekking op toepassing van de gegeven formules. In die zin is bijvoorbeeld een helling 1:12 geen talud en ook geen berm. In zo'n situatie kan golfoploop en golfoverslag alleen worden berekend via interpolatie. Bij een helling 1:12 bijvoorbeeld door interpolatie tussen een talud 1:8 (flauwste talud) en een 1:15 berm (steilste berm).

Voorland

Een voorland is het gedeelte vóór de dijk en aansluitend aan de dijk. Dit kan horizontaal zijn tot een maximaal talud van 1:10. Het voorland kan diep of (zeer) ondiep liggen. In het laatste geval zullen door dieptebeperking golven breken op dit voorland en wordt dus de golfhoogte gereduceerd. De golfhoogte die altijd in golfoploop- en golfoverslagberekeningen moet worden gebruikt is de inkomende golfhoogte die te verwachten is aan het einde van het voorland (en dus bij de teen van de dijk).

Soms ligt een voorland zeer ondiep en is het vrij kort. Om onder de definitie voorland te vallen moet een voorland een minimale lengte hebben van één golflengte L_0 . Na één golflengte is de golfhoogte redelijk aan het (zeer) ondiepe voorland aangepast en kan de golfhoogte aan het einde van dit voorland in de formules worden gebruikt. Als het (ondiepe) voorland korter is moet worden geïnterpoleerd tussen een berm met $B = 0,25.L_0$ en een voorland met een lengte van $1,0.L_0$. In de Leidraad [TAW, 1989] wordt een minimale lengte van 2 golflengten aangehouden en wordt voorgesteld bij een lengte kleiner dan een golflengte helemaal geen reductie door golfbreken toe te passen en het voorland te negeren. Met de huidige inzichten kan echter worden gesteld dat het meeste van het golfbreken bij een (zeer) ondiep voorland binnen een golflengte optreedt en dat deze lengte als ondergrens kan worden aangehouden.

Een precieze grens tussen een ondiep en een zeer ondiep voorland is niet te geven. Bij een ondiep voorland breken golven en wordt de golfhoogte lager, maar er blijft nog wel een spectrum bestaan dat op het oorspronkelijke inkomende spectrum lijkt. Bij een zeer ondiep voorland is nauwelijks nog een spectrum met een piek te bekennen ("platgeslagen" spec-

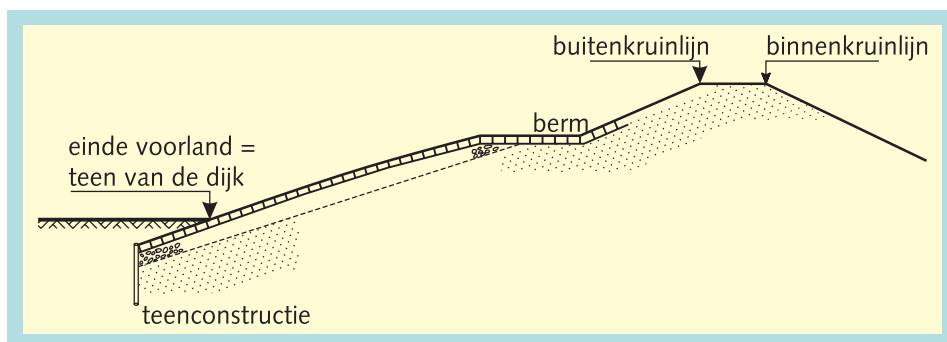
trum), omdat de golven door breken erg klein worden en er veel verschillende golfperiodes ontstaan. Heel globaal kan worden gezegd dat de overgang tussen ondiep en zeer ondiep ligt bij de situatie waarbij de oorspronkelijke golfhoogte op dieper water door het voorland met 50% of meer wordt gereduceerd.

Bij een zeer ondiep voorland wordt de golfhoogte bij de constructie dus veel kleiner dan die op dieper water. Dit houdt in dat de golfsteilheid, zoals in dit rapport gedefinieerd, ook veel kleiner wordt. Daarmee wordt de brekerparameter, die in golfploop en golfoverslagberekeningen wordt gebruikt, juist veel groter. Waarden voor de brekerparameter van 4-10 zijn dan mogelijk, terwijl voor een dijktaald van 1:3 of 1:4 deze waarden meestal beperkt zijn tot hooguit een waarde 2 of 3. Een andere mogelijkheid om na te gaan of een zeer ondiep voorland aanwezig is, is naar de waarde van de brekerparameter te kijken. Is deze waarde groter dan 5-7, dan is sprake van een zeer ondiep voorland (tenzij een zeer steil taald aanwezig is, veel steiler dan 1:3). Hierbij is het dus niet nodig kennis te hebben van de golfhoogte op dieper water.

Teen van dijk

In de meeste gevallen is het duidelijk waar de teen van de dijk ligt, namelijk daar waar het taald overgaat in het voorland. Het is echter mogelijk dat dit voorland een beweeglijke bodem kent, zoals bijvoorbeeld een stroomgeul voor de dijk. In zo'n geval is de plaats van de teen niet constant. Bij het ontwerpen van een dijk zal men een inschatting moeten maken waar het voorland onder de ontwerpomstandigheid ligt of komt te liggen. Dit bepaalt ook de ligging van de teen van de dijk. Hetzelfde geldt voor de toetsing van dijken. Bij eventuele golfploopmetingen zal men bij verificatie het op dat moment aanwezige voorlandprofiel moeten nemen, met de golfhoogte die hoort bij die ligging van de teen van de dijk.

figuur 1:
dwarsdoorsnede van een
dijk met betrekking tot het
buitentalud



Golfhoogte

De golfhoogte die in de golfploop- en golfoverslagformules in rekening wordt gebracht is de inkomende significante golfhoogte H_{m0} ter plaatse van de teen van de dijk. Dit is de spectrale golfhoogtemaat gedefinieerd als $H_{m0} = 4 \sqrt{m_0}$. (Numerieke) golfvoorspellingsmodellen geven deze golfhoogte. Een andere definitie van significante golfhoogte is het gemiddelde van het hoogste eenderde deel van de golven $H_{1/3}$. Deze golfhoogte wordt dus niet gebruikt. Op diep water geven beide definities vrijwel dezelfde waarde, in situaties met ondiep water kunnen verschillen optreden tot 10-15%.

In veel gevallen is er een voorland aanwezig waardoor golven kunnen breken en waarbij de significante golfhoogte kleiner wordt. In de Leidraad [TAW, 1989] wordt een eenvoudige methode gegeven om globaal de dieptebepaalde golfhoogte te berekenen. Er bestaan modellen die op redelijk eenvoudige wijze de afname in energie door golfbreken kunnen voorspellen en daarmee de bijbehorende golfhoogte bij de teen van de constructie. De golf-

hoogte moet worden berekend over het volledige spectrum, inclusief eventueel aanwezige energie in lange golven.

Gebaseerd op de spectrale significante golfhoogte is het vrij eenvoudig een golfhoogteverdeling en bijbehorende significante golfhoogte $H_{1/3}$ te berekenen via de methode in Battjes en Groenendijk [BG, 2000].

Golfperiode

De golfperiode die bij golfoploop en golfoverslag moet worden gebruikt is de spectrale periodemaat $T_{m-1,0}$ (m_{-1}/m_0). Deze periodemaat geeft meer gewicht aan de langere perioden in het spectrum dan een gemiddelde periode en geeft, ongeacht de vorm van het spectrum, overeenkomstige golfoploop of golfoverslag bij dezelfde waarden en dezelfde golfhoogten. Op deze manier kunnen eenvoudig voor dubbeltoppige en "platgeslagen" spectra de golfoploop en golfoverslag worden bepaald, zonder verdere lastige procedures.

Voor het geval van eenduidige spectra met een duidelijke piek is er een vaste relatie tussen de spectrale periodemaat $T_{m-1,0}$ en de piekperiode. In dit rapport wordt een omrekeningsfactor gegeven ($T_p = 1,1 \cdot T_{m-1,0}$) voor het geval wel de piekperiode bekend of bepaald is, maar niet de spectrale periodemaat.

Talud

Een stuk uit een dijkprofiel is een talud als de helling ligt tussen 1:1 en 1:8. Deze grenzen gelden ook voor het gemiddeld talud, dat is de taludhelling die ontstaat als een lijn tussen $-1,5 \cdot H_{m0}$ en $+z_2\%$ ten opzichte van de stilwaterlijn wordt getrokken en waarbij bermen niet worden meegerekend (zie figuur 7 en paragraaf 2.3). Een doorgaand talud met een helling tussen 1:8 en 1:10 kan in eerste instantie nog wel met de formules worden berekend, maar de betrouwbaarheid is minder groot dan voor steilere taluds.

Berm

Een berm is een stuk uit een dijkprofiel waarbij de helling mag variëren tussen horizontaal en 1:15. De bermligging ten opzichte van de stilwaterlijn wordt bepaald door de diepteligging d_h , de verticale afstand tussen het midden van de berm en de stilwaterlijn. De breedte van een berm, B , mag niet groter zijn dan een kwart van de golflengte, met andere woorden: $B < 0,25 \cdot L_0$. Als de breedte wel groter is dan zit de constructie tussen een berm en een voorland in en kan de golfoploop en golfoverslag via interpolatie worden berekend.

Kruinhoogte

De kruin van een dijk, zeker als er een wegdek op is aangebracht, is in veel gevallen niet geheel horizontaal, maar een beetje rond, en heeft een zekere breedte. In de Leidraden voor het ontwerpen van rivierdijken [TAW, 1985] en [TAW, 1989] wordt de kruinhoogte niet precies gedefinieerd. In de Leidraad Toetsen op Veiligheid [TAW, 1999-1] is dat wel het geval. De kruinhoogte wordt daar gedefinieerd als de hoogte van de buitenkruinlijn. Voor golfoploop en golfoverslag wordt daarom deze definitie voor de kruinhoogte aangehouden. In principe hebben in de berekeningen de breedte van de kruin en de hoogte van het midden van de kruin geen invloed op de golfoverslag. Wel kan natuurlijk de breedte van de kruin, als deze heel breed is, een invloed hebben op de toelaatbare golfoverslag.

De kruinhoogte die bij golfoverslag in rekening moet worden gebracht bij een boventalud met breuksteen, is niet de bovenkant van de breuksteen. De breuksteenlaag zelf is geheel waterdoorlatend, zodat eerder de onderkant aangehouden moet worden. Eigenlijk bepaalt de hoogte van een niet of nauwelijks waterdoorlatende laag in dit geval de kruinhoogte voor golfoverslagberekeningen.

Golfploophoogte

De golfploophoogte wordt gegeven door $z_{2\%}$. Dat is het golfploophoogteniveau, verticaal gemeten ten opzichte van de stilwaterlijn, waarbij het aantal oplopen dat dit niveau overschrijdt 2% is van het aantal inkomende golven. Het aantal overschrijdingen wordt hierbij gerelateerd aan het aantal inkomende golven en dus niet aan het aantal oplopen.

Een zeer dunne waterlaag in een oplopende tong kan niet meer goed worden gemeten. In modelonderzoek wordt de grens vaak bereikt bij een waterlaagdikte van 2 mm. In de praktijk betekent dit een laagdikte van ongeveer 2 cm, afhankelijk van de schaal ten opzichte van het modelonderzoek. Ook kunnen zeer dunne lagen op een glad talud door harde wind ver het talud op worden geblazen, wat ook niet in een kleinschalig model wordt gesimuleerd. Oplopende watertongen die nog geen 2 cm dik zijn bevatten maar heel weinig water en zijn ook niet zinvol in relatie tot de functie van de waterkering. Daarom wordt gesteld dat het golfploophoogteniveau wordt bepaald door het niveau waarbij de watertong minder dan 2 cm dik wordt. Dunne lagen die het talud op worden geblazen worden dus niet gezien als golfoploop.

Golfoverslag

Golfoverslag wordt gegeven als een gemiddeld debiet per strekkende meter breedte, q , bijvoorbeeld in m^3/m per s of in l/m per s . De golfoverslag wordt berekend ten opzichte van de hoogte van de buitenkruinlijn en er wordt van uitgegaan dat deze overslag ook de achterkant van de kruin en het binnentalud bereikt.

In werkelijkheid gaat er bij golfoverslag niet een constant debiet over de kruin van een waterkering. De hoogste golven zullen in korte tijd, korter dan een golfperiode, een grote hoeveelheid water over de kruin laten lopen. Lagere golven zullen helemaal geen overslag geven. In het rapport wordt een methode gegeven, waarbij de verdeling kan worden berekend van overslagvolumes per golf. Zo'n overslagvolume per golf, V , wordt gegeven in m^3 per m per golf.

1.3 Bepaling van golfhoogte en golfperiode bij de teen van de dijk

In de Leidraad [TAW, 1989] wordt in paragraaf 5 aangegeven hoe golfrandvoorwaarden kunnen worden bepaald. Daarnaast zijn natuurlijk meer geavanceerde computermodellen in staat golfrandvoorwaarden nabij de dijk te bepalen. Het is aan te bevelen, voor zover mogelijk, de meest nauwkeurige methode te kiezen. De meest gebruikte methode is momenteel het programma swan. Ook voor (zeer) ondiepe voorlanden levert dit programma golfhoogten op, die niet veel afwijken van gemeten waarden. Het programma levert in deze situatie echter geen betrouwbare golfperiode, zie de volgende alinea's.

Voor het toetsen van waterkeringen worden golfrandvoorwaarden gegeven in de Hydraulische Randvoorwaarden 2001, HR2001 [RWS, 2001]. Bij deze randvoorwaarden is nog geen onderscheid gemaakt naar H_{m0} of $H_{1/3}$ en zijn geen waarden gegeven voor de spectrale periodemaat $T_{m-1,0}$.

De randvoorwaarden in HR2001 worden gegeven op een bepaald uitvoerpunt. In veel gevallen is dit 50 m – 200 m uit de teen van de dijk. Voor de berekening van golfoploop of golfoverslag moet de golfhoogte bij de teen van de dijk bekend zijn. Als de diepte op het uitvoerpunt vrijwel gelijk is aan de diepte bij de teen van de constructie, dan kunnen de waarden voor het uitvoerpunt worden aangehouden. Als een oplopend voorland aanwezig is, dan kan het noodzakelijk zijn de golfhoogte bij de teen van de dijk te berekenen. Als er

een (zeer) ondiep voorland tussen het uitvoerpunt en de dijk ligt, verdient het aanbeveling een deskundige in te schakelen.

De spectrale periodemaat is een nieuwe parameter op het gebied van de golfrandvoorwaarden voor toetsing en ontwerp van waterkeringen. In de toekomst mag worden verwacht dat deze periode wel als golfrandvoorwaarde zal worden geleverd in nieuwe versies van de Hydraulische Randvoorwaarden. Zolang dat niet zo is, zal met omrekening van wel gegeven perioden moeten worden gewerkt en voor specifieke gevallen, als bijvoorbeeld zeer ondiepe voorlanden, zal de spectrale periodemaat apart moeten worden bepaald.

Het berekenen van de spectrale periode $T_{m-1,0}$ op basis van gemeten of berekende spectra, is een vrij eenvoudige zaak. Het is echter nog moeilijk voor zeer ondiepe voorlanden de juiste spectrale vorm en daarmee de juiste spectrale golfperiode te berekenen. Alleen Boussinesq-modellen lijken daartoe in staat en deze zijn voornamelijk in gebruik bij specialisten. Bij het bepalen van de juiste golfperiode bij (zeer) zwaar breken op een ondiep voorland zal voornog specialistische deskundigheid nodig blijven.

1.4 Algemene rekenprocedure voor golfoploop en golfoverslag bij een eenvoudig talud

In paragraaf 2 wordt een algemene formule voor golfoploop gegeven met allerlei invloedsfactoren voor bijvoorbeeld een berm, ruwheid op het talud en scheve golfaanval. Paragraaf 3 geeft de formules voor golfoverslag. Omdat een dijktalud heel ingewikkeld kan zijn (meerdere taludhellingen en/of bermen, taluddelen met verschillende ruwheden), is het programma PCOVERSLAG ontwikkeld.

Hier wordt een overzicht gegeven in welke volgorde bepaalde parameters moeten worden berekend en waar de formules te vinden zijn. De procedure geldt voor een eenvoudig talud met ruwheid, een berm en scheve golfaanval op relatief diep water (niet veel breken van golven).

Rekenprocedure	Paragraaf	Formule
1. Bepaal de golfrandvoorwaarden aan de teen van de dijk: H_{m0} , $T_{m-1,0}$	1.3	
2. Bereken de invloedsfactor voor de hoek van golfinval γ_β	2.5	8
3. Pas de golfrandvoorwaarden aan indien $\beta > 80^\circ$	2.5	
4. Bereken het gemiddelde talud, $\tan \alpha$	2.3	Fig. 7
5. Bereken $z_{2\%, \text{glad}}$ (glad: met $\gamma_b = 1$ en $\gamma_f = 1$)	2.2	3
6. Bereken de invloedsfactor voor de ruwheid op het talud γ_f	2.7	19, 20 en bijlage 1
7. Bereken $z_{2\%, \text{ruw}}$ (ruw: met $\gamma_b = 1$)	2.2	3
8. Bereken de invloedsfactor voor de bermen γ_b	2.6	13
9. Bereken de 2%-golfoploop	2.2	3
10. Bereken de γ_β voor golfoverslag	2.5	9
11. Bereken de golfoverslag met de hierboven gevonden γ_b en γ_f	3.1	22 en 23
12. Bereken de overslagvolumes per golf	3.4	28-32

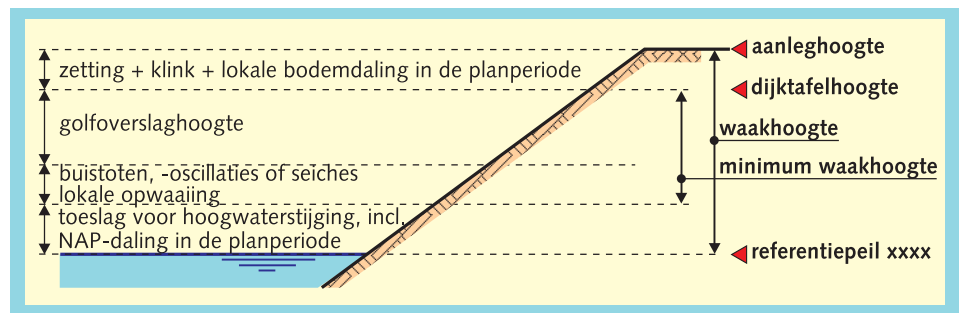
2. Golfploop

2.1 Algemeen

Dijken in Nederland hebben een tamelijk flauw buitentalud, meestal flauwer dan 1:2. Een dijk bestaat uit een teenconstructie, een buitentalud met vaak een berm, een kruin met een bepaalde breedte en een buiten- en binnenkruinlijn, en een binnentalud (zie figuur 1).

Bij het ontwerpen of toetsen van een dijk hangt de kruinhoogte niet alleen af van golfploop of golfoverslag. Er dient ook rekening gehouden te worden met een referentiepeil, lokale opwaaiing en buistoten/oscillaties of seiches (leidend tot de gecorrigeerde waterstand), zetting/klink en een verhoging van de waterstand door zeespiegelstijging (nu hoogwaterstijging genoemd).

figuur 2:
aspecten van belang bij
berekening of toetsing
van de dijkhoogte



De aanleghoogte van de kruin is samengesteld uit de volgende bijdragen, zie ook de Leidraad Zee- en Meerdijken [TAW, 1999-2]:

- het referentiepeil met een overschrijdingskans overeenkomstig de wettelijke norm: het MHW, ontwerppeil of toetspeil;
- de hoogwater- of meerpeilstijging over de ontwerpperiode;
- de lokaal verwachte bodemdaling over de ontwerpperiode;
- de toeslag voor bui-oscillaties, buistoten of seiches en lokale opwaaiing;
- de verwachte kruindaling door klink van het dijklichaam en zetting van de ondergrond over de ontwerpperiode;
- de golfploophoogte of een golfoverslaghoogte.

De bijdragen (a) tot en met (d) zijn niet beïnvloedbaar. Bijdrage (e) is wel beïnvloedbaar. Bijdrage (f) is mede afhankelijk van het buitentalud. Dit kan uit verschillende materialen bestaan, zoals een asfaltlaag, een cementbetonnen dijkbekleding (steenzetting) of gras op een kleilaag. Een combinatie is ook mogelijk. De taluds zijn niet altijd recht en het boven- en ondertalud hebben niet altijd dezelfde helling als er een berm is toegepast. Het ontwerp van de bekledingslaag wordt niet in dit rapport behandeld. Wel worden de aspecten met betrekking tot bermen, taluds en ruwheid van het talud besproken voor zover deze invloed hebben op golfploop en golfoverslag.

In dit rapport wordt zoveel mogelijk de notatie voor symbolen gebruikt die overeenkomt met de Leidraad Rivierdijken [TAW, 1989]. Alleen voor de golfhoogte en golfperiode wordt de aanbevolen internationale symbolenlijst aangehouden. Dit betekent dat de significante golfhoogte wordt geschreven als H_{m0} , de gemiddelde golfperiode als T_m , en de spectrale periodemaat als $T_{m-1,0}$. Verder wordt in de Leidraad voor de invloed van een berm en/ of scheve golfaanval de gecombineerde invloedsfactor γ_B gebruikt. In dit verslag worden de twee invloeden gescheiden in γ_b voor de berminvloed en γ_β voor de invloed van de hoek van golfaanval.

2. Golfoploop

De relatieve oploop wordt gegeven door $z_{2\%} / H_{m0}$. De golfhoogte H_{m0} geldt ter plaatse van de teen van de constructie, overigens net als de periode $T_{m-1,0}$. De bovengenoemde Leidraad geeft in paragraaf 5 hoe de golfrandvoorwaarden, waaronder de golfhoogte, kunnen worden bepaald. Voor toetsing worden de randvoorwaarden in de Hydraulische Randvoorwaarden [RWS, 2001] gegeven. Deze moeten mogelijk worden omgerekend naar de hier gebruikte parameters.

De relatieve oploop wordt meestal gegeven als een functie van de surf similarity parameter, of brekerparameter, die wordt gedefinieerd door:

$$\xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_0}} \quad (1)$$

met:

ξ_0	=	brekerparameter	[-]
α	=	hoek van het talud	[°]
s_0	=	golfsteilheid: $s_0 = 2 \cdot \pi \cdot H_{m0} / (g \cdot T_{m-1,0}^2)$	[-]
H_{m0}	=	golfhoogte: $H_{m0} = 4 \cdot \sqrt{m_0}$	[m]
$T_{m-1,0}$	=	spectrale golfperiode: $T_{m-1,0} = m_{-1} / m_0$	[s]
m_0	=	nulde moment van het spectrum	[m ²]
m_{-1}	=	eerste negatieve moment van het spectrum	[m ² s]
g	=	versnelling van de zwaartekracht	[m/s ²]

Bij een golfspectrum kunnen verschillende golfperiodes worden gedefinieerd. Dit zijn naast de genoemde spectrale periode $T_{m-1,0}$, onder andere de piekperiode T_p (de periode die de piek van het spectrum geeft), de gemiddelde periode T_m (berekend vanuit het spectrum of vanuit het tijdsignaal) en de significante periode $T_{1/3}$ (het gemiddelde van het hoogste 1/3 deel van de golfperiodes). Er geldt dat de verhouding T_p / T_m meestal ligt tussen 1,1 en 1,25 en dat T_p en $T_{1/3}$ vrijwel aan elkaar gelijk zijn. In de Leidraad Rivierdijken [TAW, 1989] wordt een verhouding aangehouden: $T_m = T_{1/3} / 1,15$.

Zoals in paragraaf 1 is beschreven is de spectrale periode $T_{m-1,0}$ een nieuwe parameter op het gebied van golfrandvoorwaarden. Voor een eventuele omrekening van een bekende piekperiode bij een enkeltoppig spectrum op niet al te ondiep water (geen "platgeslagen" spectrum), naar de spectrale periode kan gebruik worden gemaakt van de volgende relatie:

$$T_p = 1,1 \cdot T_{m-1,0} \quad (2)$$

Bij $\xi_0 < 2$ à $2,5$ breken de golven op het talud. Dit is meestal het geval bij taluds van 1:3 en flauwer. Voor grotere waarden van breken de golven niet meer op het talud. In dat geval zijn de taluds vaak steiler dan 1:3 en/of worden de golven gekarakteriseerd door een kleine golfsteilheid (bijvoorbeeld deining). Bij (zeer) zwaar breken op een ondiep voorland worden ook grote waarden van ξ_0 gevonden. Dit komt omdat de golfhoogte sterk reduceert, terwijl dit bij de golfperiode niet het geval is, waardoor in sommige gevallen een heel erg kleine golfsteilheid wordt gevonden.

2.2 Algemene formule voor de golfoploop

De algemene formule die kan worden toegepast voor golfoploop op dijken wordt gegeven door:

$$z_{2\%} / H_{m0} = 1,75 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_0 \quad (3a)$$

met een maximum voor grotere van:

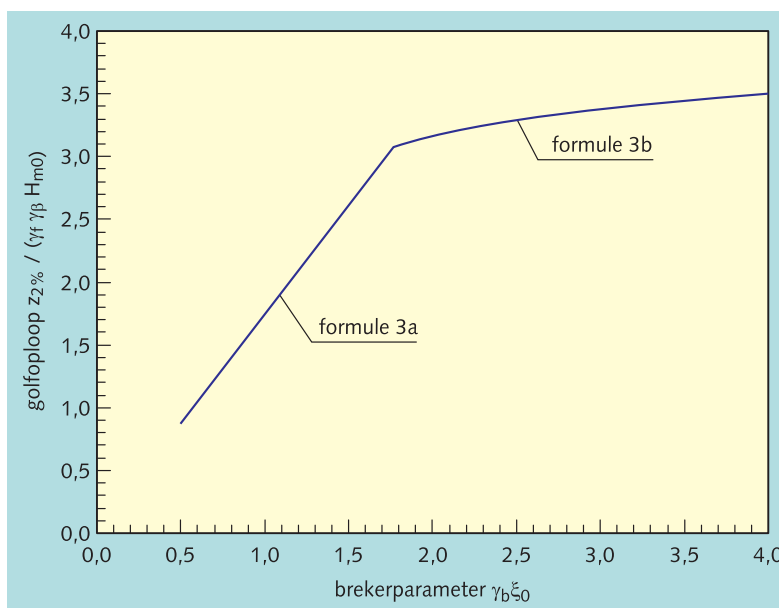
$$z_{2\%}/H_{m0} = \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot (4,3 - 1,6 / \sqrt{\xi_0}) \quad (3b)$$

waarin:

$z_{2\%}$	=	2%-golfoplooppniveau boven de stilwaterlijn	[m]
H_{m0}	=	significante golfhoogte bij de teen van de dijk	[m]
ξ_0	=	brekerparameter (formule 1)	[-]
γ_b	=	invloedsfactor voor een berm	[-]
γ_f	=	invloedsfactor voor ruwheid op het talud	[-]
γ_β	=	invloedsfactor voor scheve golfaanval	[-]

De formule is geldig in het gebied $0,5 < \gamma_b \xi_0 < 8$ à 10 . De relatieve golfoploop $z_{2\%}/H_{m0}$ is afhankelijk van de brekerparameter ξ_0 en een drietal invloedsfactoren voor respectievelijk een berm (toegepast op de brekerparameter), ruwheid op het talud en scheve golfaanval. Op de berekening van de invloedsfactoren wordt later teruggekomen.

figuur 3:
golfoploop als functie van
de brekerparameter



Formule 3 is in figuur 3 weergegeven waarbij de relatieve oploop $z_{2\%}/(\gamma_f \gamma_\beta H_{m0})$ is uitgezet tegen de brekerparameter $\gamma_b \xi_0$. Tot $\gamma_b \xi_0 \approx 1,8$ stijgt de relatieve oploop lineair met toenemende $\gamma_b \xi_0$, voor grotere waarden neemt de stijging af tot uiteindelijk een nog maar flauw stijgende lijn. Het theoretisch maximum in formule 3b (voor zeer grote waarden van $\gamma_b \xi_0$, ver buiten het toepassingsgebied) is $4,3 \cdot \gamma_f \gamma_\beta$.

Grote waarden van $\gamma_b \xi_0$ worden gevonden bij relatief steile taluds en/of lage golfsteilheden door bijvoorbeeld zwaar breken op een (zeer) ondiep voorland. Als van zeer steile taluds en relatief diep water sprake is, dan geeft formule 3b mogelijk een conservatieve waarde. In specifieke gevallen is nader onderzoek dan aan te bevelen. De theoretische limietwaarde voor een volledige verticale constructie ($\xi_0 = \infty$) is: $z_{2\%}/H_{m0} = 1,4$, maar dit is ver buiten het hier beschouwde toepassingsgebied.

In de Leidraad Rivierdijken [TAW, 1989] wordt een golfoploopformule voor flauwe (flauwer dan 1:2,5), gladde en rechte taluds gegeven. Deze ziet er (na omwerking) als volgt uit:

2. Golfoploop

$$z_{2\%}/H_{m0} = 1,77 \cdot \xi_0 \quad (4)$$

Deze formule is gelijk aan de lineaire tak, formule 3a, behalve wat betreft de invloedsfactoren en geeft geen afvlakking voor grotere waarden van de brekerparameter. Met andere woorden, de golfoploopformule uit bovengenoemde Leidraad wordt gehandhaafd en aangevuld op specifieke punten.

Voor een ontwerp- of toetsregel is het raadzaam om niet de gemiddelde trend te hanteren, maar een iets veiliger benadering. In veel Nederlandse en internationale normen wordt een veiligheidsmarge van één standaardafwijking aangehouden. Door Vrouwenfelder [TNO, 1992] is deze waarde ook onderbouwd. In formule 3 is deze veiligheid ook aangehouden.

Voor een probabilistische berekening kan de golfoploop worden berekend met:

$$z_{2\%}/H_{m0} = 1,65 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_0 \quad (5a)$$

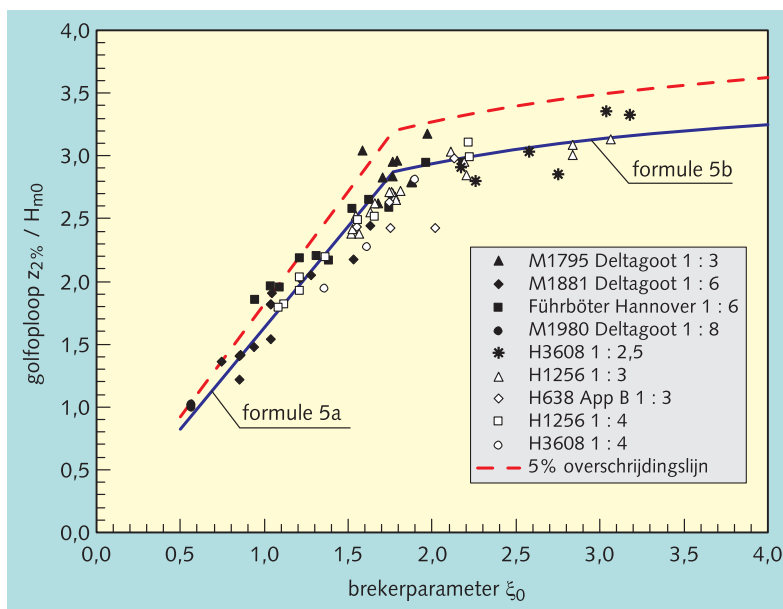
met een maximum voor grotere ξ_0 van:

$$z_{2\%}/H_{m0} = \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot (4,0 - 1,5 / \sqrt{\xi_0}) \quad (5b)$$

Alhoewel dit statistisch gezien geen perfecte verwachtingswaarde betreft, gebaseerd op de meetpunten, wordt dit verband verder wel aangeduid als "gemiddelde".

De spreiding voor extreme waarden kan worden beschreven met een variatiecoëfficiënt (standaardafwijking, gedeeld door gemiddelde) ten opzichte van het gemiddelde en bedraagt: $V = \sigma / \mu = 0,07$.

Figuren 4 - 6 geven beschikbare meetpunten met betrekking tot golfoploop. Iedere figuur geeft een specifiek deel weer wat betreft het toepassingsgebied.



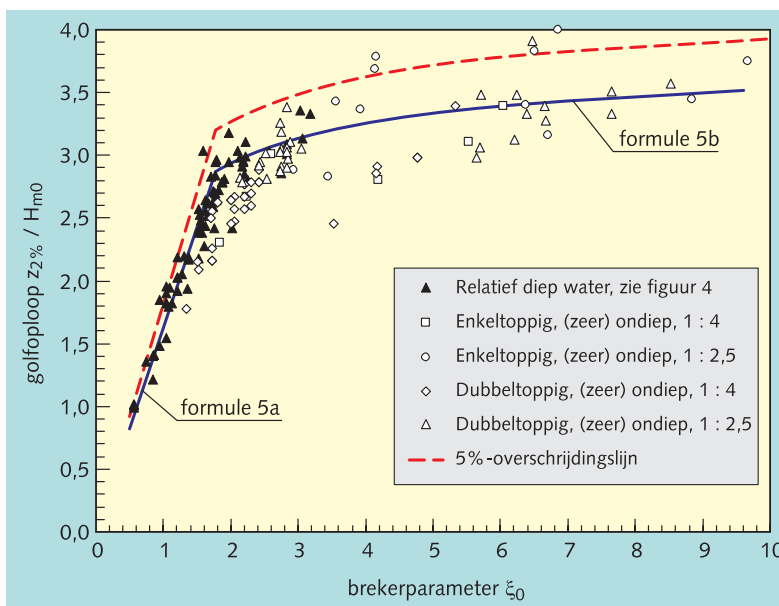
figuur 4:
golfoploop voor een glad
recht talud op relatief diep
water met meetpunten

De meetpunten in figuren 4 en 5 zijn beperkt tot de kleinschalige proeven van Van der Meer en De Waal [WL, 1993-2], op beschikbare grootschalige metingen, die als betrouwbaar mogen worden beschouwd, en tot slot de recente metingen met (zeer) ondiepe voorlanden van Van Gent [WL, 1999-2].

Figuur 4 beperkt zich tot gladde rechte taluds onder loodrechte golfaanval en bij relatief diep water (waar golven niet veel zijn gebroken). In deze gevallen is de brekerparameter beperkt tot een waarde kleiner dan 4. Alleen bij (veel) steilere taluds, bijvoorbeeld steiler dan 1:2,5, worden grotere waarden voor de brekerparameter gevonden.

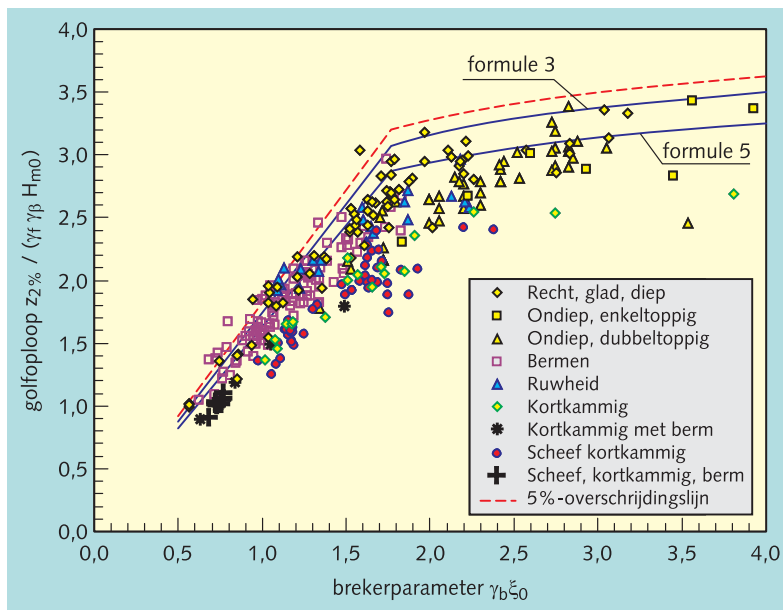
In figuur 5 worden nogmaals de gegevens van figuur 4 gegeven, maar ook de gegevens voor (zeer) ondiepe voorlanden, zowel met enkeltoppige als dubbeltoppige spectra op diep water, vóór het voorland. Bij een zeer ondiep voorland wordt de golfsteilheid door het afnemen van de golfhoogte erg klein en daardoor de brekerparameter, zelfs bij flauwe taluds van 1:4, erg groot. De brekerparameter in figuur 5 is daarom ook gegeven tot een bereik van $\xi_0 = 10$.

figuur 5:
golfploop bij rechte gladde taluds, inclusief (zeer) ondiepe voorlanden en dubbeltoppige spectra



Figuur 6 geeft alle beschikbare meetpunten, inclusief taluds met bermen of ruwheid en inclusief scheve- en kortkammige golfaanval. Als alle invloeden in één figuur worden bijeengebracht, wordt de band waarbinnen de meetpunten liggen groter dan voor gladde rechte taluds alleen. Deels komt dit omdat bij het in rekening brengen van invloedsfactoren mogelijk enige veiligheid in rekening is gebracht. De bredere bandbreedte komt vooral door meer punten beneden het gemiddelde. Daarboven is de spreiding vrijwel gelijk als eerder aangegeven en kan $V = 0,07$ worden aangehouden. Om deze reden is in figuren 5 en 6 alleen de 5%-overschrijdingslijn gegeven. In figuur 6 is zowel formule 3 als formule 5 gegeven.

Formule 5 is niet de formule die moet worden gebruikt voor de golfploop bij deterministisch ontwerpen van dijken. Dat is formule 3. Bij probabilistisch ontwerpen kan van formule 5 worden uitgegaan met de hierboven beschreven variatiecoëfficiënt.



figuur 6:
golfploopgegevens inclusief
mogelijke invloeden

De invloedsfactoren γ_b , γ_f en γ_β in formule 3 zijn elk afzonderlijk door middel van onderzoek vastgesteld. In de formule is een combinatie van invloedsfactoren mogelijk zodanig dat een erg hoge totaalreductie (een lage invloedsfactor) wordt verkregen. Bijvoorbeeld een breuksteen talud met een maximaal reducerende berm onder strijkgolven komt tot een totale invloedsfactor van ongeveer 0,24. Dat wil zeggen dat de golfploop dan een kwart is van die van een glad talud zonder berm en met loodrecht invallende golven. Omdat niet alle combinaties van golfploopreducerende omstandigheden zijn onderzocht, is nader onderzoek wenselijk als de totale invloedsfactor lager dan 0,4 wordt. Zonder nader onderzoek wordt de totale invloedsfactor daarom begrensd:

$$\gamma_b \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_f \geq 0,4 \quad (6)$$

Tot slot: de eenvoudigste formule die in Nederland heel lang is gebruikt, is:

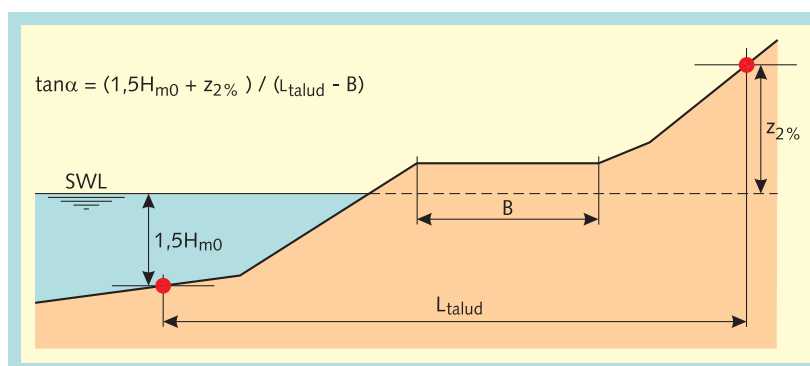
$$z_{2\%} = 8 \cdot H_s \cdot \tan \alpha \quad (7)$$

Deze formule komt alleen overeen met formule 3 voor een gemiddelde golfsteilheid van $s_0 = 0,048$ en een waarde 1,0 voor alle invloedsfactoren, en $\xi_0 < 1,8$.

2.3 Gemiddeld talud

Het zal vaak voorkomen dat een dijktalud niet uit een volkomen recht talud bestaat, maar uit taluddelen met verschillende hellingen, en ook eventueel met één of meerdere bermen. Aangezien de taludhelling in de berekening van de golfploop via de brekerparameter een rol speelt, moet een representatieve taludhelling worden gedefinieerd als het talud uit delen met verschillende hellingen bestaat. Eventuele bermen worden daarbij buiten beschouwing gelaten, omdat de berminvloed namelijk apart in rekening wordt gebracht, zie paragraaf 2.6.

figuur 7:
bepaling van de representatieve taludhelling bij een talud samengesteld uit verschillende taludhellingen, exclusief een eventuele berminvloed



Figuur 7 geeft de definitieschets van deze representatieve taludhelling $\tan\alpha$. De representatieve taludhelling $\tan\alpha$ is de gemiddelde helling in de zone tussen het niveau $SWL - 1,5 \cdot H_{m0}$ en $SWL + z_{2\%}$. De eventueel aanwezige berm dient niet meegerekend te worden bij het bepalen van het gemiddelde. Merk op dat de representatieve taludhelling afhankelijk is van de waterstand.

Aangezien $z_{2\%}$ niet op voorhand bekend is ontstaat er een iteratieve methode. De eerste schatting van $z_{2\%}$ wordt gesteld op $1,5 \cdot H_{m0}$. Het gemiddeld talud wordt dan berekend tussen de punten $1,5 \cdot H_{m0}$ onder en boven SWL , zonder de berminvloed. Dit is voldoende voor een handberekening. Het kan voorkomen dat er net rondom $z_{2\%}$ een sterke knik in het boven-talud aanwezig is ("holle" en "bolle" taluds). Alleen via iteratie kan dan op een consistente wijze de oploopwaarde worden berekend. Voor berekening via een computer is dit daarom de aangewezen weg. Mocht $1,5 \cdot H_{m0}$ of $z_{2\%}$ boven de kruin uitkomen, dan moet de kruinhoogte als kenmerkend punt worden aangehouden.

2.4 Invloed van een ondiep voorland

Als golven een ondiep voorland bereiken kunnen ze door de dieptebeperking gaan breken. In principe is dit gunstig, want de golfhoogte bij de teen van de constructie wordt daardoor lager, en dus ook de golfploop of golfoverslag.

Daarnaast gaat ook de golfhoogteverdeling veranderen. Bij een redelijk grote waterdiepte aan de teen van het talud ($h_m/H_{m0} > 3$ à 4) komt de kansverdeling van de golfhoogten overeen met een zogenaamde Rayleigh-verdeling. Hierbij is h_m de waterdiepte ter plaatse van de teen van de constructie. Bij een ondiep voorland ($h_m/H_{m0} < 3$ à 4) gaan de golven op het voorland breken en gaat de verdeling afwijken van die op diep water. Met name de hoogste golven zullen breken. Voor een Rayleigh-verdeling geldt dat de verhouding $H_{2\%}/H_{m0} = 1,40$, met $H_{2\%}$ de golfhoogte die door 2% van de golfhoogten wordt overschreden. Bij breken van golven op een voorland wordt deze verhouding kleiner en varieert ruwweg van $1,1$ tot $1,4$. Bij een eventuele extra invloedsfactor voor golfploop bij ondiep water op een voorland (naast die van de reductie van de golfhoogte zelf) ligt het voor de hand een relatie te zoeken met $H_{2\%}/H_{m0}$.

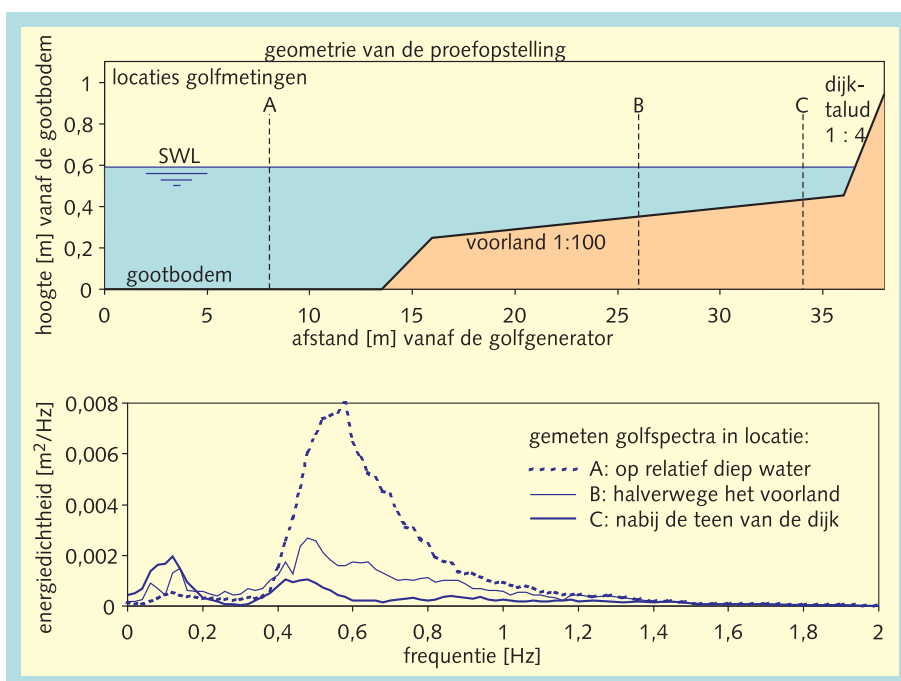
De werkelijkheid is echter gecompliceerder. De golfhoogte H_{m0} is op diep water vrijwel gelijk aan de $H_{1/3}$ (gemiddelde van hoogste 1/3 deel van de golven). Op ondiep water echter wijken deze twee golfhoogtes van elkaar af.

Voor zeer zwaar breken spreken we van een zeer ondiep voorland. Dit is een toepassingsgebied waar recentelijk onderzoek naar is uitgevoerd [WL, 1999-2], maar waarvan alle

2. Golfploop

resultaten nog niet zijn uitgekristalliseerd. Duidelijk is dat door het zware breken er nauwelijks meer een spectrum is met een goed gedefinieerde piekperiode (het spectrum is "platgeslagen", zie figuur 8) en dat de spectrale periodemaat $T_{m-1,0}$ hier de aangewezen parameter is.

Een ander aspect dat bij een zeer ondiep voorland speelt is dat door het breken lange golven kunnen ontstaan (surfbeat). Mogelijk is deze lange golfenergie de oorzaak van de hoge relatieve oploopwaarden bij grote waarden van de brekerparameter (het rechter deel van vooral figuur 5). Onderzoek hiernaar is nog niet afgerond. In figuren 4 - 6 en formules 3 en 5 is rekening gehouden met de resultaten van zeer ondiepe voorlanden en de formule is dus ook in dit gebied toepasbaar.



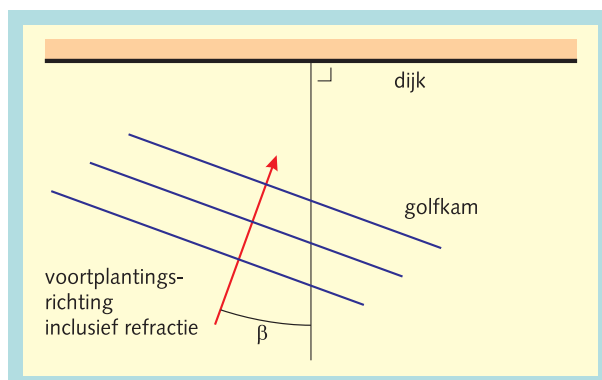
figuur 8:
effect van een ondiep voor-
land op de spectrumvorm

2.5 Invloed van hoek van golfaanval

De hoek van golfaanval β wordt gedefinieerd als de hoek die de voortplantingsrichting van de golven maakt met de normaal van de lengte-as van de dijk, zie figuur 9. Loodrechte golfaanval wordt dus gegeven door $\beta = 0^\circ$. De hoek van golfaanval is de hoek na eventuele bijdraaiing van de golven over het voorland door refractie.

De invloedsfactor voor de hoek van golfaanval wordt gegeven door γ_β . Tot voor kort was weinig onderzoek bekend dat was uitgevoerd met scheve golfaanval. En het onderzoek dat bekend was, had betrekking op langkammige golven. Langkammige golven hebben geen richtingsverspreiding. De golfkammen liggen daarom evenwijdig aan elkaar. Bij modelonderzoek met langkammige golven is de golfkam net zo lang als de golfmachine en zijn de golfkammen onderling evenwijdig. In de natuur zijn de golven kortkammig. Dat wil zeggen dat de golfkammen een bepaalde lengte hebben en de golven een bepaalde hoofdrichting. De individuele golven hebben een richting rondom deze hoofdrichting.

figuur 9:
definitie hoek van golfaanval



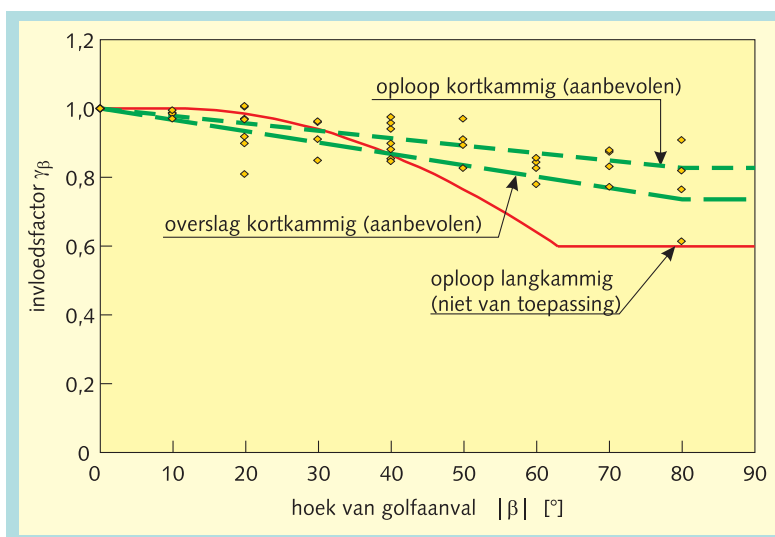
De mate van variatie rondom deze hoofdrichting (richtingspreiding) kan worden beschreven door een bepaalde spreidingsmaat. Alleen lange deining, bijvoorbeeld vanuit de oceaan, heeft zulke lange kammen dat inderdaad bijna van langkammige golven gesproken kan worden. Een golfveld met harde wind is kortkammig.

In Van der Meer en De Waal [WL, 1990] wordt een onderzoek beschreven naar golfploop en golfoverslag, waarbij de invloed van scheve inval en richtingspreiding is bekeken. Figuur 10 geeft de samenvatting van het onderzoek weer zoals dit is verwoord in Van der Meer en De Waal [WL, 1993-2]. De invloedsfactor γ_β is uitgezet tegen de hoek van golfaanval, $|\beta|$.

Langkammige golven veroorzaken tussen $0^\circ < |\beta| < 30^\circ$ vrijwel dezelfde golfploop als bij loodrechte golfaanval. Daarna daalt de invloedsfactor vrij snel tot ongeveer 0,6 bij 60° . Bij kortkammige golven heeft de hoek van golfaanval duidelijk minder invloed. Dit komt voornamelijk omdat binnen het golfveld de individuele golven afwijken van de hoofdrichting β . Voor zowel golfploop als golfoverslag (paragraaf 3) daalt bij kortkammige golven de invloedsfactor lineair naar een bepaalde waarde bij ongeveer 80° à 90° . Dit is $\gamma_\beta = 0,8$ voor de 2%-golfploop en 0,7 voor de golfoverslag. Voor strijkgolven is de invloedsfactor dus minimaal 0,7 à 0,8 en niet 0,6 zoals bij langkammige golven werd gevonden.

Aangezien een golfveld onder stormcondities als kortkammig kan worden beschouwd, wordt aanbevolen de lijnen in figuur 10 voor kortkammige golven aan te houden.

figuur 10:
invloedsfactor γ_β voor de
hoek van golfaanval met
meetpunten voor oploop bij
kortkammige golven



2. Golfoploop

Voor de 2%-golfoploop en voor de golfoverslag gelden verschillende invloedsfactoren bij scheve golfaanval. Dit komt omdat de golfenergie per strekkende meter constructie die bij scheve golfaanval inkomt kleiner is dan bij loodrechte golfaanval. De golfoverslag wordt gedefinieerd als een debiet per strekkende meter constructie terwijl de oploop niet van de constructielengte afhangt.

De lijnen in figuur 10 voor kortkammige golven worden voor gebruik aanbevolen en kunnen worden beschreven door de volgende formules:

Voor de 2%-golfoploop bij kortkammige golven geldt:

$$\begin{aligned}\gamma_{\beta} &= 1 - 0,0022 |\beta| & (0^{\circ} \leq |\beta| \leq 80^{\circ}) \\ \gamma_{\beta} &= 1 - 0,0022 \cdot 80 & (|\beta| > 80^{\circ})\end{aligned}\quad (8)$$

Voor golfoverslag bij kortkammige golven geldt:

$$\begin{aligned}\gamma_{\beta} &= 1 - 0,0033 |\beta| & (0^{\circ} \leq |\beta| \leq 80^{\circ}) \\ \gamma_{\beta} &= 1 - 0,0033 \cdot 80 & (|\beta| > 80^{\circ})\end{aligned}\quad (9)$$

In de praktijk kan het voorkomen dat golven onder hoeken groter dan 80° inkomen of dat zelfs de golfrichting aflagend is. Uiteindelijk moet dan de golfoploop en golfoverslag tot nul reduceren. Er is gekozen om de golfhoopte en periode aan te passen en niet de invloedsfactor. Indien $80^{\circ} < |\beta| \leq 110^{\circ}$ worden de golfhoopte H_{m0} en de golfperiode $T_{m-1,0}$ aangepast op de volgende manier:

- H_{m0} wordt vermenigvuldigd met $\frac{110 - |\beta|}{30}$
- $T_{m-1,0}$ wordt vermenigvuldigd met $\sqrt{\frac{110 - |\beta|}{30}}$

Indien $110^{\circ} < |\beta| \leq 180^{\circ}$ wordt $H_{m0} = 0$. Dit geeft als resultaat dat de golfoploop en de golfoverslag nihil worden.

2.6 Invloed van bermen

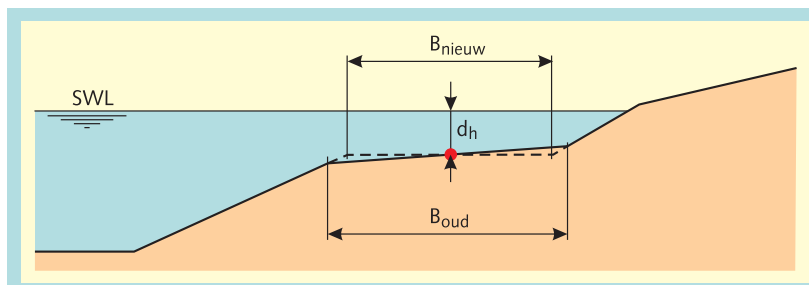
Figuur 11 geeft een schematisch voorbeeld van een dijk met een berm. Het midden van de berm ligt op een diepte d_h beneden de stilwaterlijn. De bermhelling in Nederland is vaak 1:15. De breedte van de berm wordt gegeven door B , dit is de horizontale afstand tussen de voor- en achterkant van de berm. In paragraaf 1.2 is de definitie van een berm gegeven.

De helling van de berm moet liggen tussen horizontaal en 1:15 en de breedte van de berm mag niet groter zijn dan een kwart van de golflengte. Als de berm niet aan deze voorwaarden voldoet moet via interpolatie tussen de steilste berm (1:15) en een flauw talud (1:8) in het ene geval, of via interpolatie tussen de langst mogelijke berm ($0,25 \cdot L_0$) en een voorland ($1,0 \cdot L_0$) in het andere geval, de golfoploop of golfoverslag worden bepaald. Voor de golfoploop- en golfoverslagberekening wordt een schuine berm eerst geschematiseerd tot een horizontale berm, zoals aangegeven in figuur 11. Hierbij worden onder- en boventalud doorgetrokken. De in rekening te brengen bermbreedte B wordt dus kleiner. De bermdiepte, d_h , ten opzichte van SWL blijft gelijk.

De invloedsfactor γ_b die voor een berm in rekening kan worden gebracht bestaat uit twee

factoren. Eén voor de invloed van de breedte van de berm, r_B , en één voor de ligging van het midden van de berm ten opzichte van de stilwaterlijn, r_{dh} .

figuur 11:
schematisatie, breedte en
diepteligging van een berm



Er geldt:

$$\gamma_b = 1 - r_B \cdot (1 - r_{dh}) \quad \text{waarbij} \quad 0,6 \leq \gamma_b \leq 1,0 \quad (10)$$

Als de berm op de waterlijn ligt, is $r_{dh} = 0$ en zorgt r_B ervoor dat γ_b kleiner wordt dan 1 (de invloed van de bermbreedte). Als de berm niet op de waterlijn ligt, wordt r_B vermenigvuldigd met een getal kleiner dan 1 en wordt de invloedsfactor γ_b dus weer groter dan in het geval dat de berm op de waterlijn ligt.

Invloed bermbreedte r_B

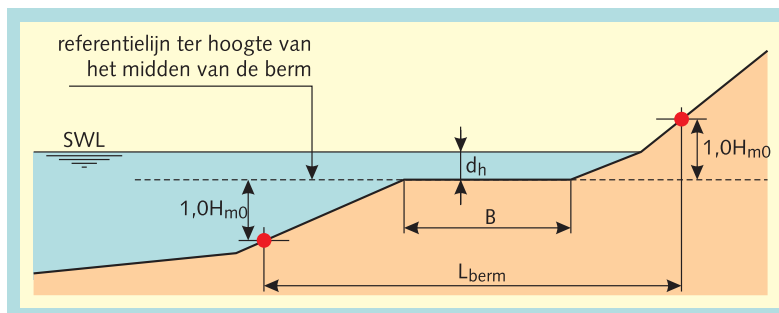
De invloed van de bermbreedte kan worden gegeven door de verandering in taludhelling te beschouwen, zie figuur 12:

$$r_B = 1 - \frac{2 \cdot H_{m0} / L_{berm}}{2 \cdot H_{m0} / (L_{berm} - B)} = \frac{B}{L_{berm}} \quad (11)$$

Invloed bermligging r_{dh}

De bermligging ten opzichte van de stilwaterlijn heeft natuurlijk invloed op de golfploop. Rondom de waterlijn is de berm het meest effectief. De invloed van de berm is verdwenen als de berm hoger ligt dan de oploop op het benedentalud; de oploop bereikt dan immers de berm niet meer en er is eigenlijk sprake van oploop op een talud zonder berm. Gesteld wordt dat de invloed van de berm ook is verdwenen als deze meer dan $2 \cdot H_{m0}$ onder de stilwaterlijn ligt.

figuur 12:
bepaling van de verandering
in taludhelling bij een berm



De invloed van de bermligging moet dus worden beschreven over het traject van $2 \cdot H_{m0}$ beneden de stilwaterlijn tot $z_{2\%}$ op het benedentalud. Deze invloed is gegeven in figuur 13, met als rekenvoorbeeld een talud 1:3. De bermligging d_h/H_{m0} is op de horizontale as uitgezet tegen de totale invloedsfactor voor een berm, γ_b , zie formule 10.

2. Golfploop

De invloed van de bermligging kan bepaald worden met een cosinusfunctie, waarbij de cosinus in radialen is gegeven:

$$r_{dh} = 0,5 - 0,5 \cdot \cos \left(\pi \frac{d_h}{x} \right) \quad (12)$$

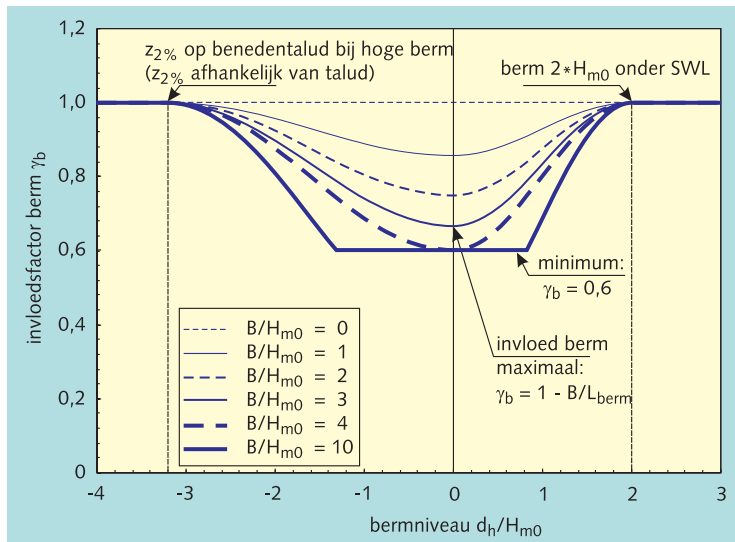
met :

$$\begin{aligned} x &= z_{2\%} \text{ als } z_{2\%} > -d_h > 0 && \text{(berm boven SWL)} \\ x &= 2 \cdot H_{m0} \text{ als } 2 \cdot H_{m0} > d_h \geq 0 && \text{(berm beneden SWL)} \\ r_{dh} &= 1 \text{ als } -d_h \geq z_{2\%} \text{ of } d_h \geq 2 \cdot H_{m0} && \text{(buiten invloedsgebied)} \end{aligned}$$

De invloed van een berm kan met formules 10-12 voluit worden geschreven als:

$$\gamma_b = 1 - \frac{B}{L_{berm}} \left(0,5 + 0,5 \cdot \cos \left(\pi \frac{d_h}{x} \right) \right) \text{ met } 0,6 \leq \gamma_b \leq 1,0 \quad (13)$$

Dit betekent dat de invloed van de berm maximaal is voor $d_h = 0$, waarbij dan geldt $\gamma_b = 1 - B/L_{berm}$. Zie ook figuur 13. Dit geldt overigens alleen bij gelijke boven- en ondertaluds. Als het onder- en boventalud een verschillende helling hebben, kan de bermligging met de maximale invloed volgens deze rekenmethodiek enigszins afwijken van de stilwaterlijn.



figuur 13:
de invloedsfactor voor de
berminvloed

In figuur 13 zijn lijnen gegeven voor verschillende bermbreedtes, B/H_{m0} . Bij gegeven golfperiode kan eventueel ook de bermbreedte B/L_0 worden gebruikt. Globaal komt het er op neer dat $B/H_{m0} = 10$ dezelfde grootte heeft als $B/L_0 = 0,25$, wat de grootste breedte is voor de hier aangehouden definitie van een berm. Hoe groter de breedte, des te groter de invloed van de berm. De maximale invloed is echter altijd beperkt tot $\gamma_b = 0,6$.

De berm is het meest effectief als deze op de waterlijn ligt ($r_{dh} = 0$) en de bermbreedte is optimaal als de invloedsfactor de waarde 0,6 bereikt. In principe is met behulp van de formules deze optimale bermbreedte voor elke geometrie (met één berm) te bepalen. Voor een berm op de waterlijn, en overal dezelfde taludhelling en ruwheid is toegepast, is de optimale bermbreedte, zie ook formule 13:

$$B = 0,4 \cdot L_{berm} \quad (14)$$

Bij de berekening van de golfploop, in het geval van een redelijk hoog liggende berm, moet altijd worden gecontroleerd of het berekende golfplooppniveau inderdaad wel de voorkant van de berm bereikt. Deze controle moet plaatsvinden met het in rekening brengen van een eventuele invloed van ruwheid, scheef invallende golven en de al in rekening gebrachte lager gelegen bermen.

Tot slot is het mogelijk dat er meerdere bermen in een dijkprofiel aanwezig zijn. De invloedsfactoren dienen dan gecombineerd, van laag naar hoog te worden bepaald, met een minimum van 0,6, tenzij de gezamenlijke berm breedte (veel) groter is dan $0,25 \cdot L_0$.

2.7 Invloed van ruwheid

De invloed van ruwheid op golfploop wordt gegeven door de invloedsfactor γ_f . In de Leidraad [TAW, 1989], bijlage 11, wordt een tabel gegeven met invloedsfactoren voor verschillende soorten talusbekledingen. De oorsprong van de meeste gegevens uit die tabel is terug te voeren tot Russisch onderzoek in de vijftiger jaren met regelmatige golven. Deze tabel is in het TAW-werk [TAW, 1972] ontwikkeld en is in verschillende internationale handboeken terechtgekomen.

Nieuw en vaak grootschalig onderzoek met onregelmatige golven heeft geleid tot een nieuwe tabel voor invloedsfactoren voor taluds met enige (of geen) ruwheid. Deze referentietypen (vastgesteld op basis van onderzoek) met bijbehorende invloedsfactoren voor de ruwheid zijn:

Referentietype	γ_f
Beton	1,0
Asfalt	1,0
Dichte betonblokken	1,0
Gras	1,0
Vilvoordse steen	0,85
Basalt	0,90
Haringman	0,90
Fixtone, open steenasfalt	0,90
Armorfex	0,90
Kleine blokjes over 1/25 van het oppervlak	0,85
Kleine blokjes over 1/9 van het oppervlak	0,80
1/4 van steenzetting 10 cm omhoog	0,90
Ribbels (optimale afmetingen)	0,75
Breuksteen, twee lagen dik	0,55
Breuksteen, een enkele laag	0,70

Kunstmatige ruwheid op het talud (blokjes en ribbels) en de ruwheid van breuksteen worden verderop in meer detail gegeven.

Daarnaast is op basis van bovenstaande tabel voor vrijwel alle in Nederland voorkomende taluds een invloedsfactor afgeschat. Dit werk is in [DWW, 2002] gegeven. Het eindresultaat is een tabel met het totaaloverzicht van invloedsfactoren. Deze tabel is als bijlage 1 in dit verslag opgenomen.

De gegeven waarden voor de invloedsfactor γ_f gelden in principe voor golfhoogtes groter dan ongeveer 0,75 m. Het is mogelijk dat voor kleinere golfhoogtes een naar verhouding grotere hydraulische ruwheid ontstaat en dus een lagere invloedsfactor. Als deze invloed

bekend is, zoals bijvoorbeeld bij gras, zie het “Technisch rapport erosiebestendigheid van grasland als dijkbekleding” [TAW, 1998-2], dan kan deze lagere waarde worden aangehouden.

De invloedsfactoren gelden voor $\gamma_b \xi_0 < 1,8$. Vanaf $\gamma_b \xi_0 = 1,8$ loopt de invloedsfactor lineair op tot 1 voor $\gamma_b \xi_0 = 10$. Voor grotere waarden blijft de invloedsfactor 1. De invloedsfactoren gelden als tenminste het gedeelte tussen $0,25 \cdot z_{2\%, \text{glad}}$ onder en $0,5 \cdot z_{2\%, \text{glad}}$ boven de stilwaterlijn met ruwheid is bedekt. Voor kleinere gebieden met ruwheid en samengestelde taluds wordt verderop een procedure beschreven. Hierbij is $z_{2\%, \text{glad}}$ de golfoploop op een glad talud.

Ruwheidselementen op talud

Redelijk veel onderzoek is uitgevoerd naar taluds waarop ruwheidselementen zijn aangebracht, zoals blokken en ribbels. De breedte van een blok of ribbel wordt gegeven door f_b , de hoogte door f_h en de ribbelafstand door f_L . De plaatsing van de blokken wordt bepaald door het gedeelte van het totale taludoppervlak dat door deze blokken wordt bedekt. De optimale ribbelafstand is $f_L/f_b = 7$. Voor toepassing van onderstaande invloedsfactoren moet f_h/f_b tussen 5 en 8 zitten. Als het totale oppervlak door blokken of ribbels is bedekt en als de hoogte minimaal $f_h/H_{m0} = 0,15$ bedraagt, dan worden de volgende (minimale) invloedsfactoren gevonden:

Blok, bedekt oppervlak 1/25 van totaal	$\gamma_{f, \min} = 0,85$
Blok, bedekt oppervlak 1/9 van totaal	$\gamma_{f, \min} = 0,80$
Ribbels, ribbelafstand $f_L/f_b = 7$ (optimaal)	$\gamma_{f, \min} = 0,75$

Een grotere blok- of ribbelhoogte dan $f_h/H_{m0} = 0,15$ heeft geen verdere reducerende werking. Als de hoogte kleiner is kan lineair naar $\gamma_f = 1$ worden geïnterpoleerd voor $f_h/H_{m0} = 0$:

$$\gamma_f = 1 - (1 - \gamma_{f, \min}) \cdot (f_h/H_{m0})/0,15 \quad \text{voor } f_h/H_{m0} < 0,15 \quad (15)$$

Net als voor de invloedsfactoren in bijlage 1 gelden met formule 15 bepaalde factoren voor $\gamma_b \xi_0 < 1,8$ en lopen deze lineair op tot 1 voor $\gamma_b \xi_0 = 10$.

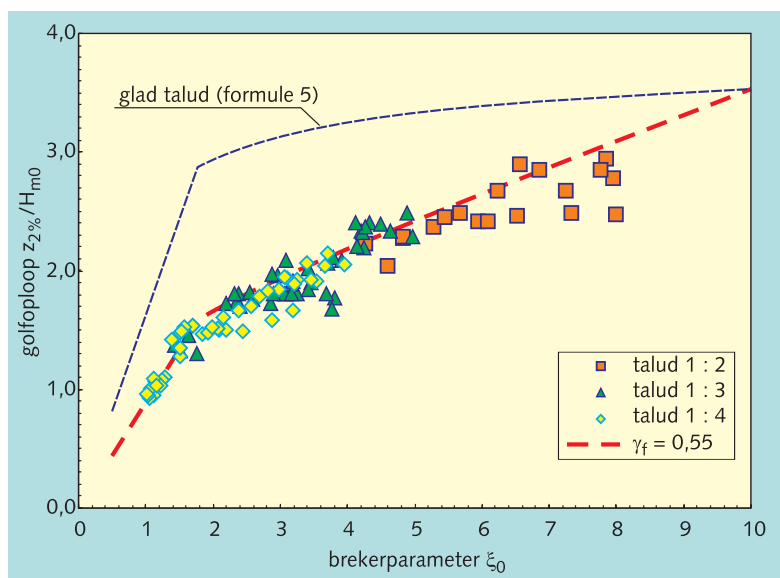
Breuksteen taluds

Voor breuksteentaluds met een twee diameters dikke laag op een ondoorlatende ondergrond is een groot aantal proeven uitgevoerd. Deze zijn in figuur 14 gegeven, samen met de gemiddelde trend voor gladde rechte taluds, formule 5. Met name voor een kleine waarde van de brekerparameter heeft breuksteen ten opzichte van een glad talud een grote golfoploopreducerende werking. Voor grote waarden van de brekerparameter (groter dan ongeveer 10) komen oploop op een breuksteen en glad talud dicht bij elkaar.

Als voor een breuksteen talud $\gamma_f = 0,55$ wordt aangehouden voor $\xi_0 < 1,8$ en daarna een lineaire toename van de invloedsfactor γ_f tussen $1,8 < \xi_0 < 10$ tot $\gamma_f = 1,0$, dan ontstaat de (licht gebogen) streeplijn in figuur 14. Deze lineaire toename tussen $1,8 < \xi_0 < 10$ wordt ook voor andere invloedsfactoren voor ruwheid aangehouden.

Niet altijd zal de ruwheid op een talud over het gehele talud dezelfde zijn. De invloedsfactor geldt dan wel voor het betreffende taluddeel, maar is niet de invloedsfactor die in de golfoploop- of golfoverslagformules mag worden toegepast. De procedure om verschillende ruwheden samen te stellen wordt in paragraaf 2.9 beschreven.

figuur 14:
golfploop op een breuksteen
talud (onderlaag ondoorla-
tend)



2.8 Invloed van een (verticale) wand op een talud

In sommige gevallen kan het voorkomen dat een verticale wand of een zeer steile wand boven op een talud is geplaatst om golfoverslag te reduceren. Het gaat hier met name om relatief kleine wanden en niet om grote verticale constructies als caissons en hoge muren op kades. De wanden moeten een wezenlijk onderdeel vormen van een talud, eventueel met een berm.

De invloedsfactoren voor een verticale of steile wand gelden voor het volgende (onderzochte) toepassingsgebied:

- het gemiddelde talud van $1,5.H_{m0}$ beneden de stilwaterlijn tot de voet van de wand (exclusief bermen) moet liggen tussen 1:2,5 tot 1:3,5.
- de breedte van alle bermen tezamen mag niet meer dan $3.H_{m0}$ zijn.
- de voet van de wand moet liggen tussen ongeveer $1,2.H_{m0}$ onder en boven de stilwaterlijn;
- de minimale hoogte van de wand (bij een hoge voet) is ongeveer $0,5.H_{m0}$. De maximale hoogte (bij een lage voet) is ongeveer $3.H_{m0}$.

Andere verticale wanden kunnen worden uitgerekend met behulp van het rapport "Golfoverslag en krachten op verticale waterkeringsconstructies" [WL, 1998].

In de toekomst zal mogelijk gewerkt worden aan een richtlijn voor golfploop en golfoverslag bij verticale constructies. Tot die tijd kunnen onderstaande invloedsfactoren worden gebruikt binnen het beschreven toepassingsgebied. Voor een volledig verticale wand worden in de nieuwe Leidraad Kunstwerken [TAW, 2002] golfoverslagformules gegeven. Hier geldt overigens dat formule 23 (paragraaf 3) kan worden gebruikt met een factor 3,0 in plaats van 2,3 en een factor 0,13 in plaats van 0,2.

De golfploopformules gelden voor een talud 1:1 en flauwer. Een steile wand wordt daarom gedefinieerd als een wand die steiler staat dan 1:1. In dit soort gevallen is de golfploop minder van belang, zeker bij een verticale wand, maar gaat het vooral om de golfoverslag. Deze paragraaf behandelt daarom de invloedsfactor die bij golfoverslag moet worden toegepast in geval van een zeer steile of verticale wand op een talud. De invloedsfactor wordt gegeven door γ_v .

Bij golfoverslag (paragraaf 3) is net als bij golfoploop een brekerparameter ξ_0 nodig. Een verticale wand leidt, met de bepaling van een gemiddeld talud als in paragraaf 2.3, figuur 7, al gauw tot een grote waarde voor de brekerparameter. Dit zou betekenen dat de golven niet breken. De wand staat echter boven op het talud, mogelijk zelfs boven de stilwaterlijn, en de golven breken op het talud voor de wand. Om een relatie te houden tussen de brekerparameter en het type breken op het talud moet bij de bepaling van het gemiddelde talud de steile of verticale wand geschematiseerd worden tot een talud 1:1. Dit talud begint dan bij de voet van de verticale wand. Het gemiddeld talud en de invloed van een eventuele berm moeten dus, volgens de in paragraaf 2.3 gegeven procedure, worden bepaald met een 1:1 talud in plaats van met het aanwezige steile talud of verticale wand.

Daarnaast is de overslag bij een verticale wand op een talud kleiner dan bij een 1:1 talud boven op een dijkprofiel. De invloedsfactor voor een verticale wand op een talud bedraagt $\gamma_v = 0,65$. Bij een talud 1:1 is deze invloedsfactor $\gamma_v = 1$. Voor een wand steiler dan 1:1, maar niet verticaal, kan worden geïnterpoleerd:

$$\gamma_v = 1,35 - 0,0078 \cdot \alpha_{wand} \quad (16)$$

waarbij α_{wand} de hoek van het steile talud is in graden (tussen 45° bij een 1:1 talud en 90° bij een verticale wand).

2.9 Interpolaties tussen taluds, bermen, voorlanden en verschillende ruwheden

In paragraaf 1.2 zijn definities gegeven van een talud, een berm en een voorland. Voor de gegeven definities zijn de golfoploop- en golfoverslagformules geldig. Voor een dijkprofiel dat niet volledig aan de definities beantwoordt, kan via interpolatie de oploop of overslag worden vastgesteld. Deze paragraaf geeft enkele van deze procedures. Verder kan een talud bestaan uit taluddelen met verschillende ruwheden. Ook hier worden procedures voor gegeven.

Talud tussen 1:8 en 1:15

Een talud is gedefinieerd tot een helling van 1:8. Een berm mag niet steiler zijn dan 1:15, waarbij dan de feitelijke helling van de berm geen invloed meer heeft. Doorgaande taluds tussen 1:8 en 1:15, dus zonder steilere taluddelen, kunnen in eerste instantie als een normaal talud worden behandeld, maar de betrouwbaarheid van de resultaten is minder dan bij steilere taluds.

Taluds of taluddelen met een helling tussen 1:8 en 1:15 en met een horizontale lengte die beperkt is tot hooguit $0,25 \cdot L_0$, zitten wat betreft de definitie precies tussen een talud en een berm in. Het bepalen van de oploop gaat dan als volgt, zie ook figuur 15:

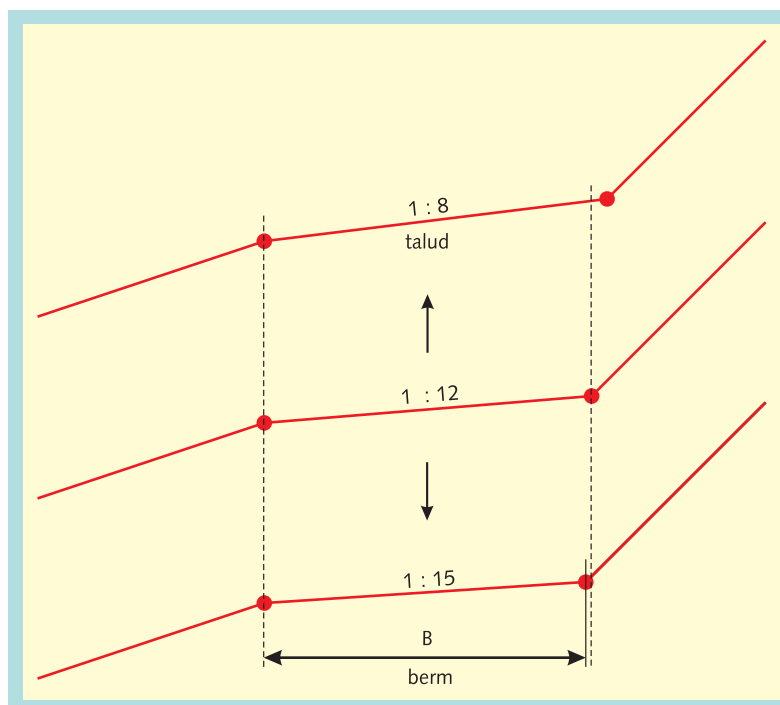
- Trek vanaf de voorkant van het flauwe taluddeel (de zeewaartse zijde) het profiel door met een helling 1:8, tot het oorspronkelijke boventalud wordt gesneden.
- Bepaal de oploop/overslag met het 1:8 talud als ware het een geknikt talud.
- De 1:15 berm wordt ook vanaf de voorkant van het flauwe taluddeel getrokken. Aangezien de berm flauwer is dan het flauwe talud, wordt altijd een snijpunt gevonden met het aanliggende taluddeel boven het flauwe talud als dit naar beneden wordt doorgetrokken. Maak daarna de berm horizontaal volgens figuur 11.
- Bepaal de oploop/overslag als ware het een talud met een berm. (Pas op: indien er een berm volgt, of er een berm voorafgaand aan het talud ligt, moeten de bermen worden samengetrokken en bekeken worden of de totale horizontale breedte niet groter is dan $0,25 \cdot L_0$. Is dit wel het geval, dan dient het desbetreffende geschematiseerde talud te worden berekend met de procedure "berm breder dan $0,25 \cdot L_0$ ").

- Interpoleer met de gemiddelde taludhelling ($\tan$) als parameter tussen de twee boven gevonden waarden:

$$z_{2\%} = z_{2\% \text{ 1:8}} + (z_{2\% \text{ berm}} - z_{2\% \text{ 1:8}}) * (1/8 - \tan \alpha) / (1/8 - 1/15) \quad (17)$$

waarin $z_{2\%}$ de waarde van de oploop is. De procedure voor golfoverslag is gegeven in paragraaf 3.3.

figuur 15:
bepaling talud en berm bij
een taluddeel met een helling
tussen 1:8 en 1:15

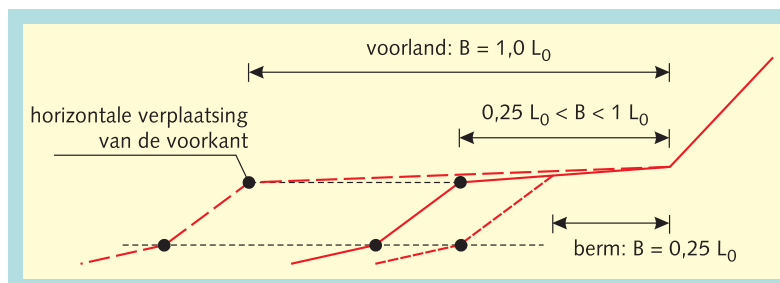


Berm breder dan $0,25 \cdot L_0$

Als een berm (veel) breder is dan een kwart van de golflengte zal de invloedsfactor uiteindelijk kleiner worden dan de in paragraaf 2.6 gestelde minimale waarde van $\gamma_b = 0,6$. Daarom is ook een eis gesteld aan de maximale breedte van de berm. Golven op een voorland moeten voldoende lengte hebben om zich aan de voorlanddiepte aan te passen. Daarom is aan een voorland de eis gesteld dat deze minimaal een golflengte lang is. Een berm die langer is dan $0,25 \cdot L_0$, maar korter dan $1 \cdot L_0$, zit dus precies tussen de definitie van een berm en een voorland in. De oploop en overslag kunnen dan via interpolatie worden bepaald.

Figuur 16 geeft een schematisch voorbeeld van hoe het werkelijke profiel wordt omgezet naar een berm met een breedte van een kwart golflengte en naar een voorland met een lengte van een hele golflengte.

figuur 16:
bepaling voorland en berm bij
een taluddeel met een lengte
groter dan $0,25 \cdot L_0$



2. Golfploop

De verdere procedure is dan:

- Bepaal de golfploop bij een berm met een lengte van $0,25 \cdot L_0$
- Bepaal de golfploop bij een voorland dat is doorgetrokken volgens figuur 16 tot een lengte van $1 \cdot L_0$. Dit betekent dat de significante golfhoogte ter plaatse van de nieuwe teen van de constructie moet worden bepaald. In dit geval is de nieuwe teen van de constructie het begin van het talud boven het voorland. Als eenvoudige vuistregel kan worden uitgegaan van: $H_{m0} \leq 0,5 \cdot h$. Als de oorspronkelijke H_{m0} kleiner is dan de halve waterdiepte, dan blijft H_{m0} ongewijzigd. In het andere geval wordt H_{m0} gelijk aan de halve waterdiepte. Met behulp van de berekende lagere golfhoogte moet de golfploop op het boventalud worden berekend. De golfperiode en de hoek van golfaanval blijven ongewijzigd.
- Interpoleer tussen de twee gevonden golfploophoogtes met B/L_0 als parameter:

$$z_{2\%} = z_{2\%, \text{berm}} - (z_{2\%, \text{berm}} - z_{2\%, \text{voorland}}) \cdot (B/L_0 - 0,25) / 0,75 \quad (18)$$

- Als de “te lange” berm erg hoog ligt, bijvoorbeeld boven de stilwaterlijn, dan kan $z_{2\%, \text{voorland}}$ gelijk worden verondersteld aan de achterkant van de berm (het begin van het boventalud).

Bovengenoemde procedure geldt alleen voor de golfploop. Bij golfoverslag moet een ingewikkelder procedure worden gevolgd en deze is in paragraaf 3.3 gegeven. Bij golfoverslag is het namelijk mogelijk dat bij de schematisatie tot een voorland er helemaal geen overslag plaatsvindt omdat de golfhoogte mogelijk in dat geval sterk reduceert. Interpolatie is dan niet meer mogelijk.

Taluds met samengestelde ruwheid

Het zal niet altijd voorkomen dat ruwheid op een talud over het gehele talud voorkomt. Vaak zal het maar over een deel zijn. De invloedsfactor geldt dan wel voor dat taluddeel, maar dit is dan niet de invloedsfactor die in de golfploop- of golfoverslagformules mag worden toegepast. Met name bij een geautomatiseerde berekening kan per taluddeel een invloedsfactor voor ruwheid worden meegegeven, maar voor de berekening van golfploop of overslag moet een gewogen invloedsfactor worden bepaald. Uit met name Pools onderzoek, in opdracht van de Rijkswaterstaat en in navolging van onderzoek in Nederland, kon een procedure worden vastgesteld om deze gewogen invloedsfactor voor ruwheid te bepalen [WL, 1997-2].

Het blijkt dat ruwheid die alleen onder de stilwaterlijn is aangebracht geen enkel effect heeft en dat in zo'n geval met een glad talud moet worden gerekend. Als ook boven de stilwaterlijn ongeveer een zelfde ruwheid bestaat dan kan het gewogen gemiddelde worden bepaald over het talud dat ligt tussen $0,25 \cdot z_{2\%, \text{glad}}$ onder en $0,5 \cdot z_{2\%, \text{glad}}$ boven de stilwaterlijn. Hierbij is $z_{2\%, \text{glad}}$ de golfploop op een glad talud, met overigens inachtneming van een eventuele invloed ten gevolge van scheve golfaanval en bermen. Ruwheid boven $SWL + 0,5 \cdot z_{2\%, \text{glad}}$ heeft dus niet of nauwelijks effect.

Bovenstaande procedure kan leiden tot een discontinuïteit in het geval de ruwheid vanaf SWL onder water ligt (dus geen invloed). Indien de ruwheid tot even boven SWL doorgetrokken wordt, dan vindt er volledige verrekening plaats (invloed over $0,25 \cdot z_{2\%, \text{glad}}$ over het gedeelte onder water). Daarom wordt de volgende extra voorwaarde gegeven bij ruwheid boven en onder de stilwaterlijn: de in rekening te brengen invloedsfactor onder de waterlijn mag nooit kleiner zijn dan de invloedsfactor boven de waterlijn.

Het wegen van de verschillende invloedsfactoren gebeurt door de lengtes van de betreffende taluddelen (tussen $SWL - 0,25 \cdot z_{2\%, \text{glad}}$ en $SWL + 0,5 \cdot z_{2\%, \text{glad}}$) erbij te betrekken. Stel dat binnen

boven gestelde grenzen drie taluddelen bestaan met lengtes L_1 , L_2 en L_3 en invloedsfactoren voor de ruwheid van respectievelijk $\gamma_{f,1}$, $\gamma_{f,2}$ en $\gamma_{f,3}$, dan wordt het gewogen gemiddelde:

$$\gamma_f = \frac{\gamma_{f,1} \cdot L_1 + \gamma_{f,2} \cdot L_2 + \gamma_{f,3} \cdot L_3}{L_1 + L_2 + L_3} \quad (19)$$

Doordat ruwheid maar in een beperkt gebied effectief is, kan de volledige invloed bereikt worden door alleen in dit gebied ruwheid aan te brengen. De eventuele kosten kunnen daarmee kleiner zijn dan wanneer over het hele talud deze ruwheid wordt aangebracht.

Bermen in elkaars verlengde met verschillende ruwheden

Als twee bermten vrijwel in elkaars verlengde liggen verdient het aanbeveling de bermten samen te voegen tot één lange berm. Indien de ruwheden van deze twee bermten verschillen, moet voor de nieuwe berm de gewogen ruwheid worden berekend:

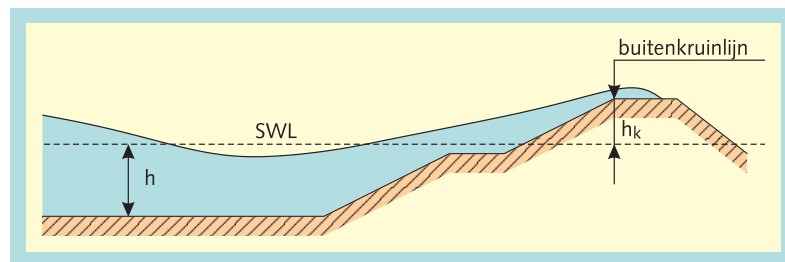
$$\gamma_{f, \text{lange berm}} = \frac{\gamma_{f, \text{berm1}} \cdot L_{\text{berm1}} + \gamma_{f, \text{berm2}} \cdot L_{\text{berm2}}}{L_{\text{berm1}} + L_{\text{berm2}}} \quad (20)$$

3. Golfoverslag

3.1 Gemiddeld golfoverslagdebiet

Bij golfoverslag is de kruinhoogte lager dan de golfplooppniveaus van de hoogste golven. De parameter die dan in beschouwing moet worden genomen is de vrije kruinhoogte h_k , zie figuur 17.

figuur 17:
de vrije kruinhoogte bij
golfoverslag



Dit is het hoogteverschil tussen de stilwaterlijn en de kruinhoogte. De kruinhoogte zelf kan gegeven zijn als de dijktafelhoogte h_d , bepaald ten opzichte van bijvoorbeeld NAP. De kruinhoogte wordt bepaald ter plaatse van de buitenkruinlijn (en dus niet in het midden van de kruin). De dijktafelhoogte verminderd met de gecorrigeerde waterstand (ook ten opzichte van NAP) geeft dan de vrije kruinhoogte, h_k , ook wel de golfoverslaghoogte genoemd. Zie verder ook de definities in paragraaf 1.2.

Golfoverslag wordt meestal gegeven als een gemiddeld debiet per strekkende meter breedte, q , bijvoorbeeld in m^3/m per s of in l/m per s . De Leidraad Rivierdijken [TAW, 1989], geeft aan dat voor relatief zware zeegang, met golven van enkele meters hoog, de gehanteerde 2%-golfoploop een golfoverslagdebiet oplevert in de orde van $1 l/m$ per s . Dit wordt ongeveer $0,1 l/m$ per s bij lage golven, zoals in het rivierengebied. Gaat men ook in het rivierengebied uit van $1 l/m$ per s , dan levert dat een reductie op van de waakhoogte, overigens met inachtneming van de minimale waakhoogte van $0,50$ m. De Leidraad zegt verder: "Welk criterium van toepassing is, hangt uiteraard ook af van de constructie van de dijk en de eventuele bebouwing. In bepaalde gevallen, zoals bij verdedigde kruin en binnenbelopen, kan soms $10 l/m$ per s worden aangehouden". In de Leidraad wordt uitgegaan dat de volgende gemiddelde debieten maatgevend zijn voor erosie van het binnentalud:

- $0,1 l/m$ per s voor zandige grond met een slechte grasmat.
- $1,0 l/m$ per s voor kleiige grond met een redelijk goede grasmat.
- $10 l/m$ per s bij een kleibekleding en een grasmat volgens de eisen voor het buitentalud of bij een bekledingsconstructie.

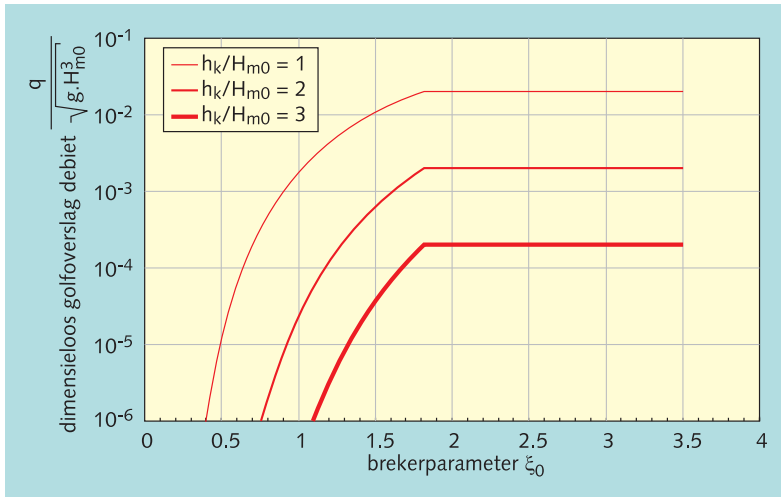
Onderzoek is gaande om de relatie tussen overslag en de hoedanigheid van het binnentalud beter te onderbouwen. In de Leidraad Toetsen op Veiligheid [TAW, 1999-1] wordt ook een methode gegeven.

De golfoverslag kan in twee formules worden beschreven die op elkaar aansluiten. Eén voor brekende golven ($\gamma_b \xi_0 < \approx 2$), waarbij de golfoverslag toeneemt bij toenemende brekerparameter ξ_0 , en één voor het maximum dat wordt bereikt bij niet-brekende golven ($\gamma_b \xi_0 > \approx 2$).

Figuur 18 geeft een voorbeeld van uitwerking van de golfoverslagformules. Net als bij golfoploop is op de horizontale as de brekerparameter ξ_0 uitgezet. In plaats van de relatieve golfoploop staat nu de dimensieloze golfoverslag op de verticale (logaritmische) as. Er zijn drie lijnen gegeven en wel voor drie verschillende relatieve kruinhoogtes h_k/H_{m0} (één-, twee-

3. Golfoverslag

en driemaal een golfhoogte boven SWL). In het voorbeeld van figuur 18 is uitgegaan van een 1:3 glad en recht talud, bij loodrechte golfaanval.



figuur 18:
golfoverslag als functie van
de brekerparameter
(talud 1:3)

De golfoverslagformules zijn exponentiële functies met de algemene vorm:

$$q = a \cdot \exp(b \cdot h_k) \quad (21)$$

De coëfficiënten a en b zijn daarbij nog functies van de golfhoogte, taludhelling, brekerparameter en de invloedsfactoren die in paragraaf 2 zijn gegeven. De volledige formules luiden:

$$\frac{q}{\sqrt{g H_{m0}^3}} = \frac{0,067}{\sqrt{\tan \alpha}} \gamma_b \cdot \xi_0 \cdot \exp \left(-4,3 \frac{h_k}{H_{m0}} \frac{1}{\xi_0 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v} \right) \quad (22)$$

$$\text{met als maximum: } \frac{q}{\sqrt{g H_{m0}^3}} = 0,2 \cdot \exp \left(-2,3 \frac{h_k}{H_{m0}} \frac{1}{\gamma_f \cdot \gamma_\beta} \right) \quad (23)$$

waarin:

q	= gemiddeld golfoverslagdebiet	[m ³ /m per s]
g	= versnelling van de zwaartekracht	[m/s ²]
H_{m0}	= significante golfhoogte bij de teen van de dijk	[m]
ξ_0	= brekerparameter = $\tan \alpha / \sqrt{s_0}$	[-]
s_0	= golfsteilheid = $2 \cdot \pi \cdot H_{m0} / (g \cdot T_{m-1,0}^2)$	[-]
$T_{m-1,0}$	= spectrale golfperiode bij de teen van de dijk	[s]
$\tan \alpha$	= taludhelling, zie figuur 7	[-]
h_k	= vrije kruinhoogte boven de stilwaterlijn	[m]
γ	= invloedsfactoren voor invloed van een berm, ruwheid, hoek van golfaanval, en een verticale wand op het talud, zie paragraaf 2.	[-]

Het dimensieloze golfoverslagdebiet $q/\sqrt{g H_{m0}^3}$ en de relatieve kruinhoogte h_k/H_{m0} zijn beide gerelateerd aan de brekerparameter en/of de taludhelling. Om de invloed van verschillende omstandigheden in rekening te brengen, wordt de dimensieloze kruinhoogte schijnbaar verhoogd door te delen door de invloedsfactoren $\gamma_b, \gamma_f, \gamma_\beta, \gamma_v$ die in paragraaf 2 zijn beschreven. Op een enkele uitzondering na, die in deze paragraaf wordt beschreven, gelden dus de formules van paragraaf 2 voor de invloedsfactoren.

Beide ontwerpformules 22 en 23 zijn in grafiekvorm weergegeven in figuren 19 en 20. Het dimensieloze golfoverslagdebiëet op de verticale as in figuur 19 wordt gegeven door:

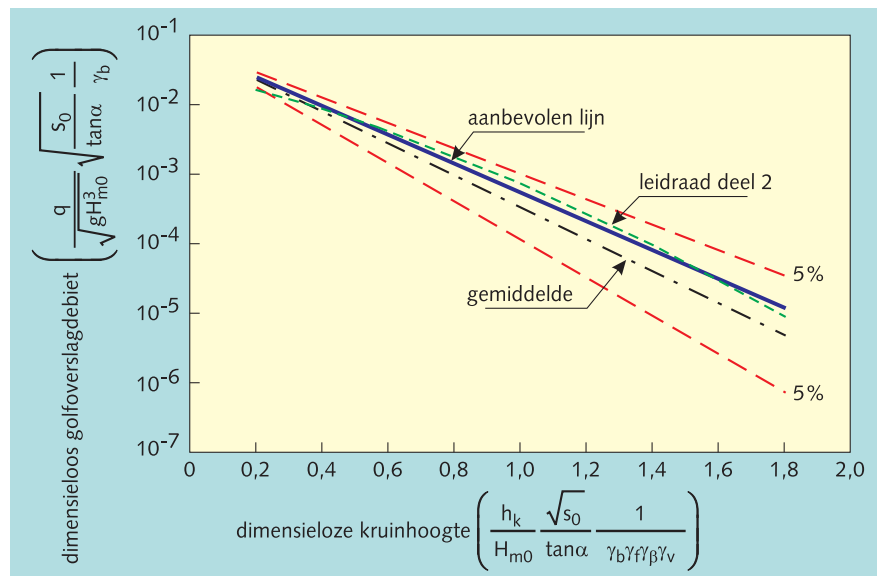
$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} \cdot \frac{\sqrt{\tan \alpha}}{\gamma_b \cdot \xi_0}$$

en de dimensieloze kruinhoogte door:

$$\frac{h_k}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\xi_0 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v}$$

In beide figuren zijn zowel de aanbevolen lijnen gegeven als een gemiddelde met 5% onder- en overschrijdingslijnen, gebaseerd op metingen (waarover later meer). In figuur 19 is ook de formule uit de Leidraad Rivierdijken [TAW, 1989] getekend. Deze komt vrijwel overeen met de nieuwe aanbevolen lijn.

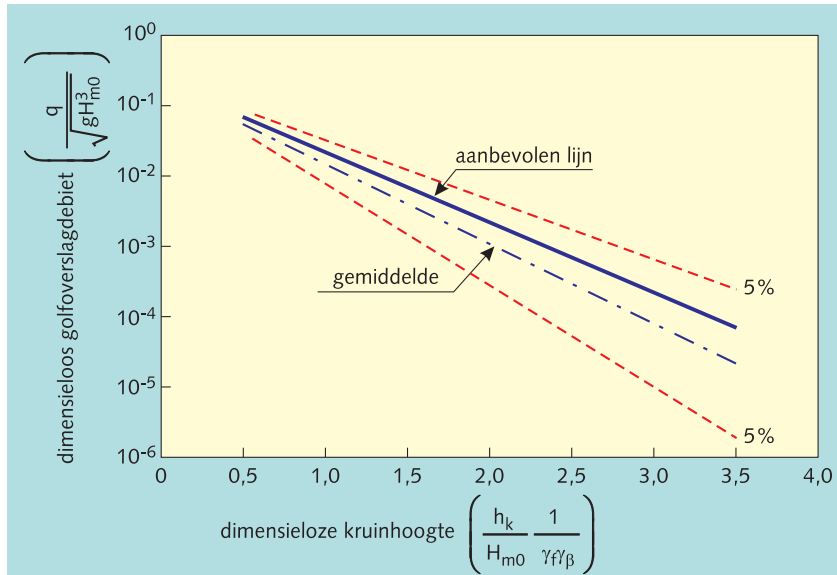
figuur 19:
golfoverslag bij brekende
golven



De golfoverslag is bij niet-brekende golven niet meer afhankelijk van de brekerparameter. De formule voor brekende golven (formule 22) is geldig totdat dit maximum wordt bereikt. Dit is in de buurt van $\gamma_b \xi_0 = 2$. Er moet dus steeds worden gecontroleerd of formule 22 het maximum van formule 23 overschrijdt of niet.

Algemeen kan worden geconcludeerd dat voor golfoploop en overslag op gladde rechte taluds de verschillen met de Leidraad erg klein zijn. Bij de nieuwe formules wordt rekening gehouden met het feit dat een maximum wordt bereikt bij niet-brekende golven. De verbetering zit vooral in het beschrijven van de betrouwbaarheid van de formules (verderop) en de betere beschrijving van de invloed van bermen, ruwheid, hoek van golfaanval en verticale wanden op een talud.

3. Golfoverslag



figuur 20:
maximum golfoverslag,
bereikt bij niet-brekende
golven

Figuur 21 geeft een overzicht van meetgegevens met betrekking tot brekende golven en figuur 22 met betrekking tot het maximum bij niet-brekende golven. In deze figuren zijn de belangrijke parameters gegeven langs de twee assen, zijn alle bestaande meetpunten gegeven met een gemiddelde en 5% onder- en overschrijdingslijnen en is langs de verticale as ook het toepassingsgebied in de figuren aangegeven.

Het *gemiddelde* van alle waarnemingen in figuren 21 en 22 kan worden beschreven door:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = \frac{0,067}{\sqrt{\tan \alpha}} \cdot \gamma_b \cdot \xi_0 \cdot \exp \left(-4,75 \frac{h_k}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\xi_0 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v} \right) \quad (24)$$

(figuur 21)

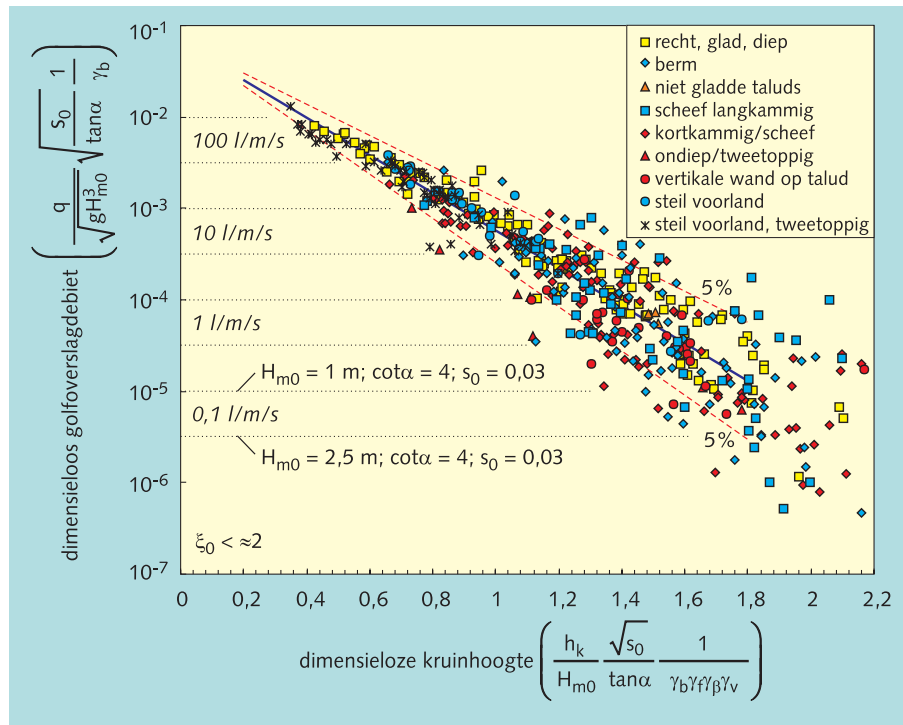
$$\text{met als maximum: } \frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0,2 \cdot \exp \left(-2,6 \frac{h_k}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\gamma_f \cdot \gamma_\beta} \right) \quad (25)$$

(figuur 22)

De betrouwbaarheid van formule 24 wordt gegeven door de coëfficiënt 4,75 als een normaal verdeelde stochast op te vatten met een gemiddelde 4,75 en een standaardafwijking $\sigma = 0,5$. Met behulp van deze standaardafwijking kunnen ook onder- en overschrijdingslijnen ($\mu \pm x\sigma$) worden getekend met voor x een aantal maal de standaardafwijking (1,64 voor de 5%-lijnen en 1,96 voor de 2,5% onder- of overschrijdingslijn).

Ook zijn in figuren 21 en 22 enkele golfoverslagdebieten gegeven, namelijk 0,1, 1, 10 en 100 l/m per s. Voor al deze debieten is een interval aangegeven. De debieten gelden voor een talud 1:4 en een golfsteilheid van $s_0 = 0,03$. De bovenste lijn van het interval geldt voor een significante golfhoogte van 1,0 m (bijvoorbeeld rivierdijken) en de onderste voor een golfhoogte van 2,5 m (bijvoorbeeld zeedijken).

figuur 21:
golfoverslaggegevens met een
gemiddelde en 5% onder- en
overschrijdingslijnen en met
een aanduiding van het toe-
passingsgebied; brekende
golven

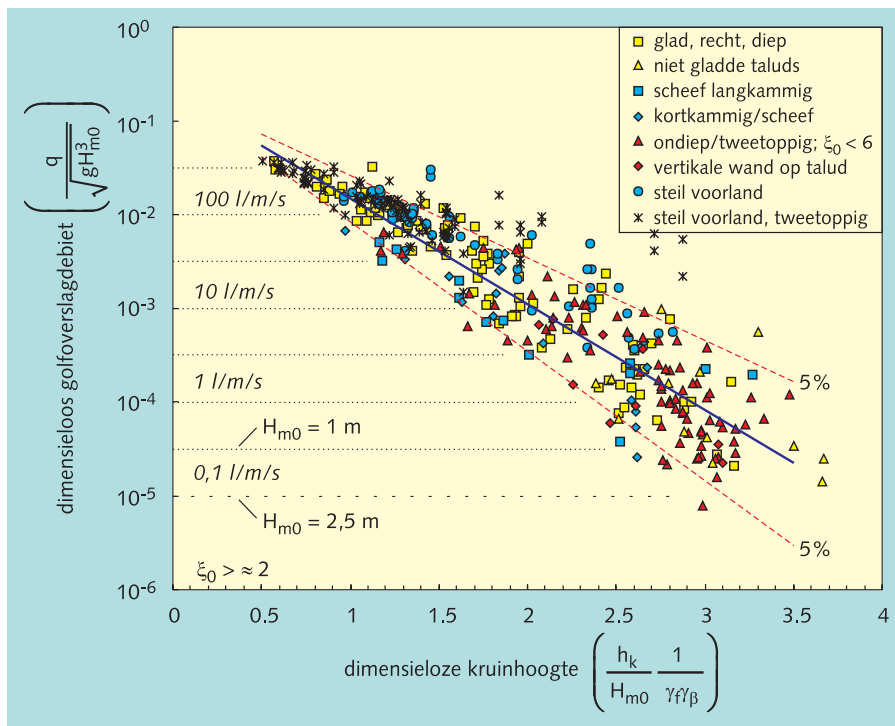


De beschikbare meetpunten voor het maximum bij niet-brekende golven zijn uitgezet in figuur 22. Het dimensioneloze golfoverslag-debiet wordt nu op de verticale as gegeven door:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}}$$

en de dimensioneloze kruinhoogte door:

$$\frac{h_k}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\gamma_f \cdot \gamma_\beta}$$



figuur 22:
golfoverslaggegevens met een
gemiddelde en 5% onder- en
overschrijdingslijnen en met
een aanduiding van het toe-
passingsgebied; niet-brekende
golven

De betrouwbaarheid van formule 25 kan worden gegeven door de coëfficiënt 2,6 als een normaal verdeelde stochast op te vatten met een standaardafwijking van $\sigma = 0,35$. Met deze standaardafwijking zijn in figuur 22 de 5% onder- en overschrijdingslijnen getekend. Ook zijn in figuur 22 weer intervallen langs de verticale as gegeven die golfoverslagdebieten geven van respectievelijk 0,1, 1, 10 en 100 l/m per s. Deze intervallen gelden voor een golfhoogte van $H_{m0} = 1$ m (bovenste lijn) en 2,5 m (onderste lijn) en zijn onafhankelijk van taludhelling en golfsteilheid.

Net als bij golfploop moet voor (deterministisch) *gebruik in de praktijk* een iets conservatievere formule worden aangehouden dan die voor het gemiddelde. De twee aanbevolen formules voor golfoverslag zijn dan ook formules 22 en 23, die ongeveer een standaardafwijking hoger liggen dan het gemiddelde van formules 24 en 25. Zie voor een vergelijking ook figuren 19 en 20. Bij probabilistische berekeningen kan men uitgaan van de gegeven schattingen van het gemiddelde (formules 24 en 25) en de gegeven standaardafwijking.

3.2 Invloed van (zeer) ondiepe voorlanden

Bij de golfploopformules in paragraaf 2 is de invloed van (zeer) ondiepe voorlanden direct meegenomen in de formulering, zie figuur 5. Het onderzoek op dit gebied leverde nog te weinig gegevens om ook voor golfoverslag de formulering integraal aan te passen. Voor het geval dat van zeer zwaar breken op een ondiep voorland sprake is en er daardoor een "platgeslagen" spectrum ontstaat met eventueel lange golven, is er een aparte formule beschikbaar om golfoverslag te berekenen. Deze formule moet dan worden gebruikt, omdat de in paragraaf 3.1 besproken formules een (zeer) grote onderschatting van de overslag op kunnen leveren.

Zeër zwaar breken op een ondiep voorland betekent dat de golfhoogte drastisch afneemt.

Er kan van zeer ondiepe voorlanden worden gesproken als de golfhoogte op dieper water, daar waar de golven nog niet breken, afneemt tot minder dan 50% à 60% van deze waarde. De precieze waarde is niet bekend. In specifieke gevallen is mogelijk zowel de golfhoogte op dieper water als voor de teen van de dijk bekend. De Hydraulische Randvoorwaarden [RWS, 2001], geven echter alleen de golfrandvoorwaarden (dicht) bij de teen van de dijk. Er wordt geen relatie gegeven tussen golven op dieper water en bij de constructie. Daardoor is de verhouding tussen deze twee golfhoogten niet een praktische maat om onderscheid te maken tussen "normale" voorlanden, waarbij de formules uit paragraaf 3.1 nog gelden en specifieke formules voor zeer ondiepe voorlanden.

Het effect van (zeer) ondiepe voorlanden is dat bij relatief flauwe taluds (flauwer dan 1:2,5) er grote waarden van de brekerparameter ξ_0 worden gevonden. Het ligt dan ook voor de hand bij grotere waarden van ξ_0 een overgang te zoeken naar een andere golfverslagformule. Hierbij moet wel worden bedacht dat het ook mogelijk is een grote waarde van de brekerparameter te vinden als er een heel steil talud (1:2 of steiler) aanwezig is, met een relatief diep voorland. In dat geval moet naar de verhouding van de golfhoogte op dieper water en bij de teen van de constructie worden gekeken of inderdaad sprake is van een zeer ondiep voorland. Als dat niet het geval is, kunnen de formules van paragraaf 3.1 worden genomen.

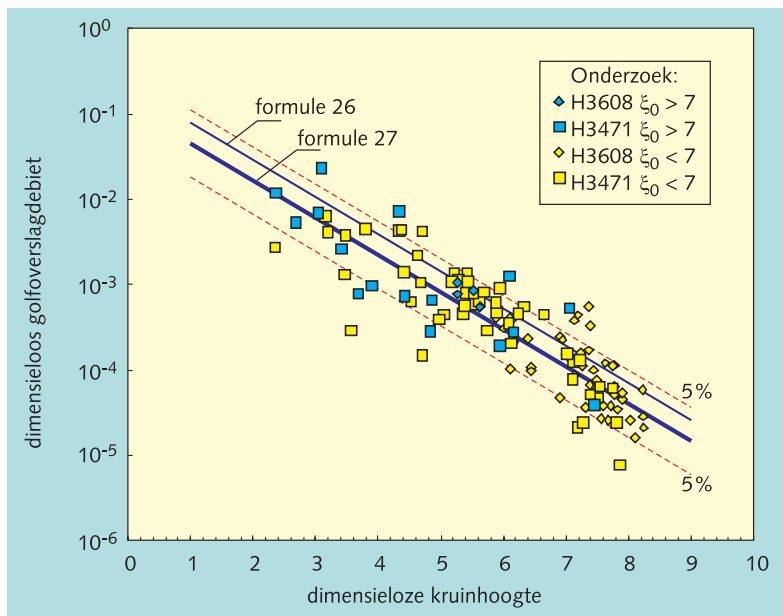
De overgang naar (zeer) ondiepe voorlanden, waarbij de golfverslag groter wordt dan met de formules in paragraaf 3.1, ligt ongeveer bij $\xi_0 = 6$. Om geen discontinuïteit te creëren, worden de formules in paragraaf 3.1 aangehouden voor $\xi_0 < 5$ en geldt de formule voor (zeer) ondiepe voorlanden voor $\xi_0 > 7$, met als minimum waarde de formules uit paragraaf 3.1. In het tussenliggende gebied wordt de *logaritme van q* lineair geïnterpoleerd tussen $5 < \xi_0 < 7$. De golfverslagformule voor (zeer) ondiepe voorlanden, dus bij $\xi_0 > 7$ is:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0,21 \cdot \exp \left(- \frac{h_k}{\gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot H_{m0} \cdot (0,33 + 0,022 \cdot \xi_0)} \right) \quad (26)$$

Formule 26 moet worden aangehouden voor deterministisch gebruik (er zit enige veiligheid in ten opzichte van de gemiddelde voorspelling). Voor probabilistisch gebruik moet het gemiddelde worden genomen met een verdeling rondom dit gemiddelde. De formule voor het gemiddelde is:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 10^c \cdot \exp \left(- \frac{h_k}{\gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot H_{m0} \cdot (0,33 + 0,022 \cdot \xi_0)} \right) \quad (27)$$

In formule 27 is c een normaal verdeelde stochast met een gemiddelde van $-0,92$ (met $10^{-0,92} = 0,12$) en een standaardafwijking van $0,24$.



figuur 23:
formules 26 en 27 voor (zeer)
ondiepe voorlanden met 5%
onder- en overschrijdingslijnen
en beschikbare meetpunten

Figuur 23 geeft formules 26 en 27 met 5% onder- en overschrijdingslijnen en met beschikbare meetpunten [WL, 1999-1; WL, 1999-2].

3.3 Interpolaties tussen taluds, bermen en voorlanden

In paragraaf 2.8 zijn procedures gegeven voor dijkprofielen die niet voldoen aan een juiste definitie van talud, berm of voorland, en waarbij door middel van interpolatie de golfoploop moet worden bepaald. Bij golfoverslag komen enkele procedures voor die iets afwijken van die bij golfoploop. Die procedures worden in deze paragraaf besproken.

Golfoverslag bij een berm breder dan $0,25 \cdot L_0$

De golfoverslag bij een dijkprofiel met een berm breder dan $0,25 \cdot L_0$, maar korter dan $1,0 \cdot L_0$, wordt hier besproken. Dit is een taluddeel dat qua definitie in zit tussen een berm en een voorland. Wat betreft de golfoverslag kunnen er twee vragen zijn:

- wat is de benodigde kruinhoogte bij een gegeven golfoverslagdebiet
- wat is de golfoverslag bij een gegeven kruinhoogte

Figuur 24 geeft de procedure schematisch weer:

ad a:

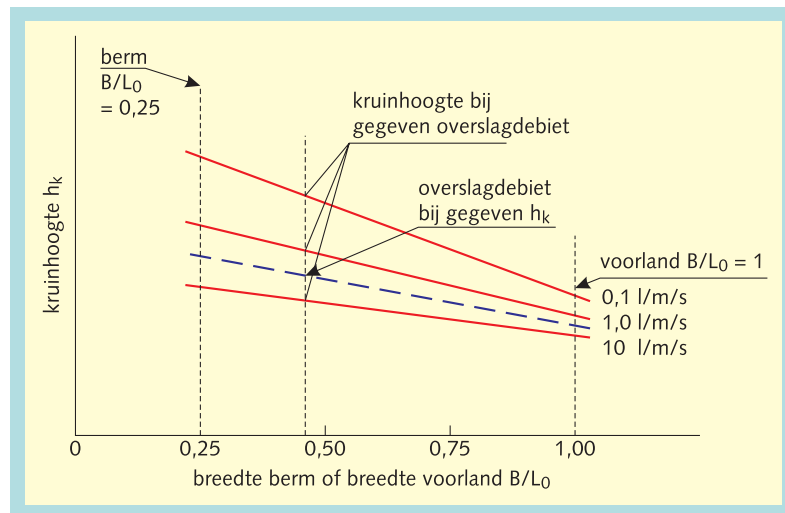
- Bepaal de benodigde kruinhoogte bij het gegeven golfoverslagdebiet voor een berm met een breedte van $0,25 \cdot L_0$ (zie ook figuur 16).
- Bepaal de benodigde kruinhoogte bij het gegeven golfoverslagdebiet voor een voorland met een lengte van $1,0 \cdot L_0$.
- Interpoleer lineair tussen deze twee kruinhoogtes met B/L_0 als parameter.

ad b.

- Volg procedure a voor minimaal 2 geschatte waarden voor het golfverslagdebiet.
- Als de kruinhoogte van het werkelijke dijkprofiel nog niet tussen de bepaalde kruinhoogtes ligt, bepaal dan nog enkele kruinhoogtes bij andere golfverslagdebieten, zodanig dat het punt wel tussen lijnen ligt.
- Vindt door interpolatie het juiste golfverslagdebiet.

Het antwoord kan ook iteratief gevonden worden.

figuur 24:
bepaling golfverslag bij een
dijkprofiel met een flauw
taluddeel met een lengte
tussen een berm en een voor-
land in



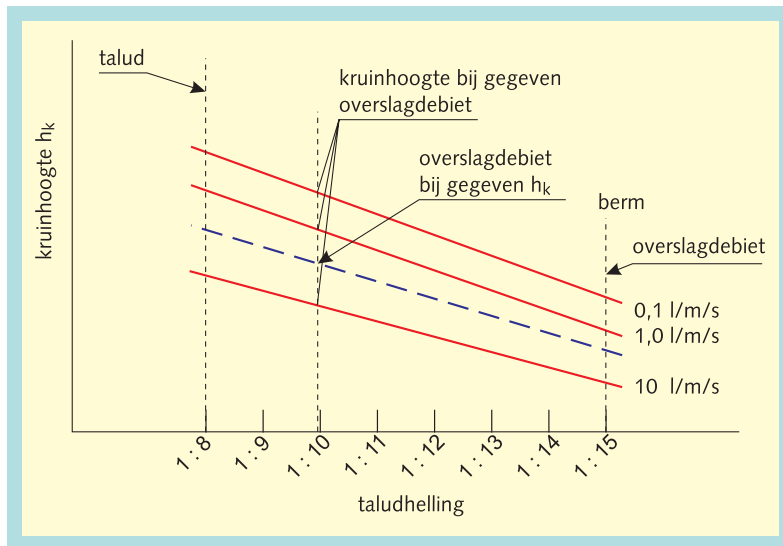
Golfverslag bij een talud tussen 1:8 en 1:15

De procedure voor een taluddeel dat in ligt tussen een flauw talud en een berm is als volgt, zie ook figuur 25:

- Wat is de benodigde kruinhoogte bij een gegeven golfverslagdebiet.
 - Bepaal de benodigde kruinhoogte bij het gegeven golfverslagdebiet voor een talud 1:8 (zie ook figuur 15).
 - Bepaal de benodigde kruinhoogte bij het gegeven golfverslagdebiet voor een berm 1:15.
 - Interpoleer lineair tussen deze twee kruinhoogtes met de werkelijke taludhelling ($\tan\alpha$) als parameter
- Wat is de golfverslag bij een gegeven kruinhoogte.
 - Volg procedure a voor minimaal 2 geschatte waarden voor het golfverslagdebiet.
 - Als de kruinhoogte van het werkelijke dijkprofiel nog niet tussen de bepaalde kruinhoogtes ligt, bepaal dan nog enkele kruinhoogtes bij andere golfverslagdebieten, zodanig dat het punt wel tussen lijnen ligt.
 - Vindt door interpolatie het juiste golfverslagdebiet.

Het antwoord kan ook hier iteratief gevonden worden.

3. Golfoverslag



figuur 25:
bepaling golfoverslag bij een
dijkprofiel met een taluddeel
met een helling tussen 1:8 en
1:15

3.4 Overslagvolumes per golf

De aanbevolen lijn voor het gemiddeld golfoverslagdebiet q is in paragraaf 3.1 beschreven. Het gemiddeld golfoverslagdebiet zegt nog niet zoveel over de hoeveelheid water die momentaan over de kruin gaat bij een bepaalde overslaande golf. De momentane overslagvolumes tijdens een overslaande golf wijken aanzienlijk af van het gemiddeld golfoverslagdebiet. Met behulp van het gemiddeld golfoverslagdebiet kan de kansverdelingsfunctie van de overslagvolumes per golf worden berekend. Deze kansverdelingsfunctie is een Weibull-verdeling met als vormfactor 0,75 en als schaalfactor a , welke afhankelijk is van het gemiddeld golfoverslagdebiet per golf en de kans op overslag. Of dit ook geldt voor (zeer) ondiepe voorlanden, is nog niet uitgezocht. De kansverdelingsfunctie wordt gegeven door:

$$P_V = P(V \leq V) = 1 - \exp \left(- \left(\frac{V}{a} \right)^{0,75} \right) \quad (28)$$

$$\text{met : } a = 0,84 \cdot T_m \cdot q / P_{ov} \quad (29)$$

waarin:

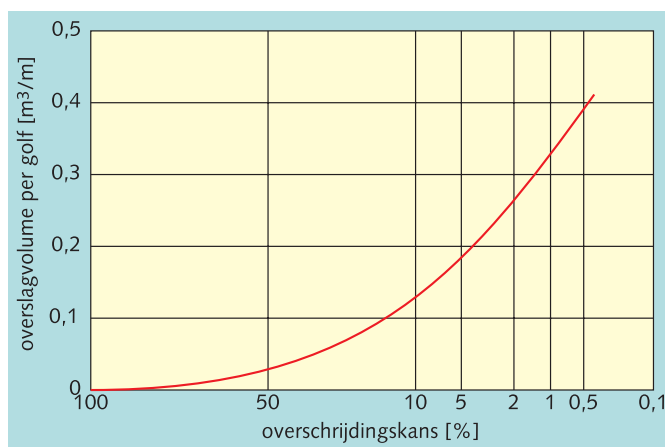
P_V	= de kans dat de realisatie van het overslagvolume per golf V groter dan of gelijk aan V is	[-]
V	= overslagvolume per golf	[m ³ / m]
T_m	= de gemiddelde golfperiode (NT_m is de stormduur of beschouwd tijdsinterval)	[s]
q	= gemiddeld golfoverslagdebiet	[m ³ /m per s]
P_{ov}	= N_{ov}/N = de kans op overslag per golf	[-]
N_{ov}	= het aantal overslaande golven	[-]
N	= het aantal inkomende golven tijdens de stormduur	[-]

De kans op overslag kan worden berekend met

$$P_{ov} = \exp \left(- \left[\sqrt{-\ln 0,02} \frac{h_k}{z_{2\%}} \right]^2 \right) \quad (30)$$

Formule 30 geldt voor de aanname dat de golfploopverdeling overeenkomt met de Rayleigh-verdeling. De 2%-golfploop kan worden berekend met formule 3. De invloedsfactoren γ_b , γ_f , γ_{β} , γ_v en de brekerparameter γ_0 zijn gedefinieerd in paragraaf 2. Ter illustratie is in figuur 26 een kansverdelingsfunctie gegeven, gebaseerd op formules 28-30. De gegeven lijn geldt voor een gemiddeld golfoverslagdebiet van $q = 1 \text{ l/m per s}$, een golfperiode van $T_m = 5 \text{ s}$ en een kans op overslag van $P_{ov} = 0,10$ (10% van de inkomende golven).

figuur 26:
kansverdelingsfunctie voor
overslagvolumes per golf;
 $q = 1 \text{ l/m per s}$,
 $T_m = 5 \text{ s}$ en $P_{ov} = 0,10$



Dit betekent dat $a = 0,042$ (formule 29) en dat de kansverdelingsfunctie wordt gegeven door:

$$P_v = P(\underline{V} \leq V) = 1 - \exp \left(- \left[\frac{V}{0,042} \right]^{0,75} \right)$$

Het volume voor een bepaalde overschrijdingskans P_v volgt uit:

$$V = a \cdot (-\ln [1 - P_v])^{(4/3)} \quad (31)$$

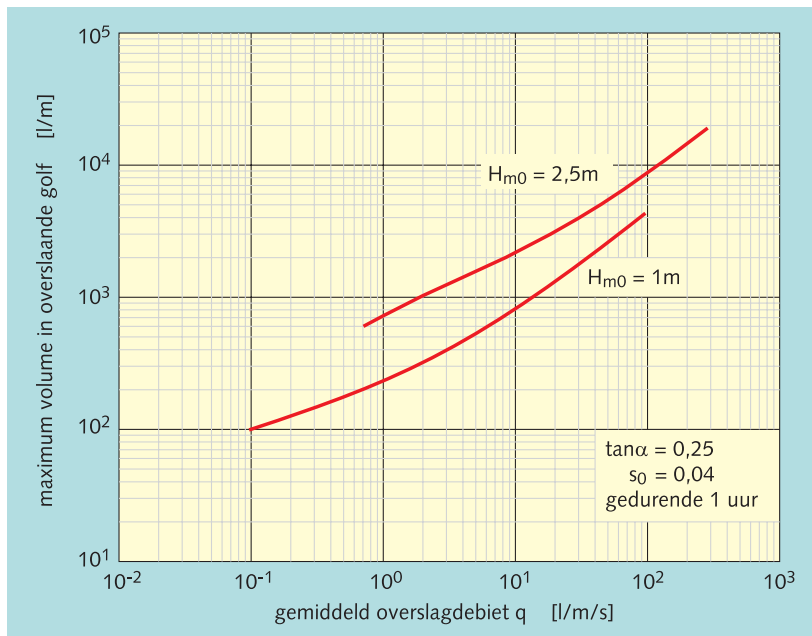
Een eerste schatting van de verwachtingswaarde van het maximum volume van één golf dat in een bepaalde periode kan worden verwacht, kan worden verkregen door het totaal aantal overslaande golven N_{ov} in te vullen:

$$V_{max} = a \cdot (\ln [N_{ov}])^{(4/3)} \quad (32)$$

Om een idee te geven van de relatie tussen het gemiddelde golfoverslagdebiet q en de verwachtingswaarde van het maximum volume in de grootste overslaande golf V_{max} , is voor

3. Golfverslag

twee situaties deze relatie in figuur 27 gegeven. Uitgangspunten zijn een stormduur van 1 uur, een taludhelling 1:4 en een golfsteilheid $s_0 = 0,04$ met een $T_{m-1,0}/T_m$ - verhouding van 1,15. Relaties zijn getekend voor een golfhoogte van $H_{m0} = 1\text{ m}$ en $2,5\text{ m}$. Voor kleine gemiddelde golfverslagdebieten is V_{max}/q orde 1000 en voor grote gemiddelde golfverslagdebieten orde 100.



figuur 27:
Relatie tussen
gemiddeld overslag-
debiet en maximum
volume van de hoog-
ste overslaande golf

Lijst van symbolen met toepassingsgebied

In onderstaande tabel staan de parameters en symbolen die in dit rapport worden genoemd. Tevens is het globale toepassingsgebied aangegeven. Voor een gebruiker van de formules geeft het een handvat of de te berekenen situatie in het toe te passen gebied zit.

Symbol	Naam	Dimensie	Toepassings- gebied
B	bermbreedte, horizontaal gemeten	m	0 -100
D	gemiddelde diameter van breuksteen	m	0,01-1
d_h	bermdiepte ten opzichte van SWL (negatief is berm boven SWL)	m	$-h_k - h_m$
f_b	breedte van een ruwheidselement (loodrecht op dijk-as)	m	0,01-1
f_h	hoogte van een ruwheidselement	m	0,01-1
f_L	hart op hart afstand tussen ruwheidselementen, optimaal: $f_L/f_b = 5-8$	m	0,01-10
g	zwaartekrachtsversnelling	m/s ²	9,81
H	golfhoogte	m	0-10
H_{m0}	significante golfhoogte, gebaseerd op het spectrum $4\sqrt{m_0}$	m	0-10
$H_{1/3}$	significante golfhoogte, gemiddelde van hoogste 1/3 deel	m	0-10
$H_{m0, diep}$	significante golfhoogte op diep water	m	0-10
$H_{m0, teen}$	significante golfhoogte bij de teen van de constructie	m	0-10
h	waterdiepte	m	> 0
h_d	dijktafelhoogte	m	> 0
h_k	kruinhoogte ten opzichte van SWL, t.p.v. de buitenkruinlijn	m	> 0
h_m	waterdiepte ter plaatse van de teen van de constructie	m	> 0
L_{berm}	horizontale lengte tussen twee punten op het talud op $1,0 \cdot H_{m0}$ boven en $1,0 \cdot H_{m0}$ onder het midden van de berm	m	0-100
L_0	golf lengte op diep water gebaseerd op $T_{m-1,0}$: $L_0 = g \cdot T_{m-1,0}^2 / 2 \pi$	m	0-1000
L_{talud}	horizontale lengte tussen twee punten op het talud op $z_2\%$ boven en $1,5 \cdot H_{m0}$ onder de stilwaterlijn	m	0-100
m_0	oppervlak energiedichtheidsspectrum	m ²	0-6
m_{-1}	eerste negatieve moment van het energiedichtheidsspectrum		
N	aantal inkomende golven	m ² s	0-6
N_{ov}	aantal overslaande golven	-	50-50.000
P_V	$P(\underline{V} \geq V)$ kans dat het overslagvolume $\underline{V}$ groter dan of gelijk aan V is	-	0-20.000
P_{ov}	kans op overslag per golf ($P_{ov} = N_{ov}/N$)	-	0-1

Symbool	Naam	Dimensie	Toepassings- gebied
q	gemiddeld golfoverslag debiet per strekkende meter kruin	$\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$	10^{-6} - 10^{-1}
r_B	invloedsfactor voor de berm breedte	-	0-1
r_{dh}	invloedsfactor voor de berm ligging	-	0-1
s_0	golfsteilheid met L_0 gebaseerd op $T_{m-1,0}$ ($s_0 = H_{m0}/L_0$)	-	0,001-0,07
T	golfperiode	s	0-25
T_m	gemiddelde periode	s	0-20
$T_{m-1,0}$	spectrale golfperiode = m_{-1}/m_0	s	0-25
T_p	piekperiode	s	0-25
T_s	significante periode	s	0-25
V	volume van overslaande golven per strekkende meter kruin	m^3/m	0-50
V	variatiecoëfficiënt	-	
z	golfoploophoogte, verticaal gemeten ten opzichte van de stilwaterlijn	m	0-30
$z_{2\%}$	golfoploophoogte die door 2% van de inkomende golven wordt overschreden	m	0-30
$z_{2\%, \text{berm}}$	golfoploop op een talud met berm	m	0-30
$z_{2\%, \text{glad}}$	golfoploop op een glad talud	m	0-30
$z_{2\%, \text{voorland}}$	golfoploop op een talud met een voorland	m	0-30
α	hoek van het (gemiddeld) talud	°	0-45
α_{wand}	de hoek die een steile wand maakt met de horizontaal	°	45-90
β	hoek van golfaanval	°	0-180
γ_b	invloedsfactor voor een berm	-	0,6-1,0
γ_f	invloedsfactor voor de ruwheid	-	0,5-1,0
$\gamma_{f,i}$	taluddeel i met een bepaalde invloedsfactor voor de ruwheid	-	0,5-1,0
γ_v	invloedsfactor voor een (verticale) wand op een talud	-	0,65-1,0
γ_β	invloedsfactor voor de hoek van golfaanval	-	0,7-1,0
ξ_0	brekerparameter gebaseerd op $T_{m-1,0}$: $\xi_0 = \tan \alpha / \sqrt{s_0}$	-	0,4-20
σ	standaardafwijking bij normale verdeling		
μ	gemiddelde bij normale verdeling		

[BG, 2000]

J.A. Battjes and H.W. Groenendijk. Wave height distributions on shallow foreshores. Journal of Coastal Engineering, Vol. 40, NO. 3, 161-182.

[DWW, 2001]

Golfoploop en golfoverslag bij dijken. Verzamelde notities bij het tot stand komen van de definitieve versie van het Technisch Rapport, december 2001.

[DWW, 2002]

Ruwheidsfactoren met betrekking tot golfoploop en golfoverslag bij dijken, mei 2002.

[RWS, 2001]

Hydraulische Randvoorwaarden voor het toetsen van Primaire Waterkeringen, december 2001.

[TAW, 1972]

Golfoploop en golfoverslag. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, januari 1972.

[TAW, 1985]

Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken. Deel 1 – Bovenrivierengebied. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, september 1985.

[TAW, 1989]

Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken. Deel 2 – Benedenrivierengebied. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, september 1989.

[TAW, 1998-1]

Grondslagen voor waterkeren. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, januari 1998.

[TAW, 1998-2]

Technisch rapport erosiebestendigheid van grasland als dijkbekleding. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, augustus 1998.

[TAW, 1999-1]

Leidraad Toetsen op Veiligheid. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, augustus 1999.

[TAW, 1999-2]

Leidraad Zee- en meerdijken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, december 1999.

[TAW, 2002]

Leidraad Kunstwerken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. Concept 2002.

[TNO, 1992]

Vrouwenvelder. Probabilistic basis for reliability verification. Note con-92-053/vra/mnl of tno-Bouw.

[WL, 1990]

J.W. van der Meer en J.P. de Waal. Invloed van scheve golfinval en richtingspreiding op golfoploop en overslag. WL I Delft Hydraulics, verslag modelonderzoek, H 638, november 1990.

[WL, 1993-1]

J.W. van der Meer. Golfoploop en golfoverslag bij dijken. WL I Delft Hydraulics, samenvatting, H 638, april 1993.

[WL, 1993-2]

J.W. van der Meer en J.P. de Waal. Waterbeweging op taluds. Invloed van berm, ruwheid, ondiep voorland en scheve lang- en kortkammige golfaanval. WL I Delft Hydraulics, verslag modelonderzoek, H 1256, april 1993.

[WL, 1997-1]

J.W. van der Meer. Golfoploop en golfoverslag bij dijken. WL I Delft Hydraulics, verslag H 2458/H 3051, juni 1997.

[WL, 1997-2]

J.W. van der Meer. Golfoploop en golfoverslag bij dijken, Projectverslag: Achtergronden bij aanpassing van notitie "Golfoploop en golfoverslag bij dijken", H638, april 1993. WL I Delft Hydraulics, verslag H 2458/ H 3051, juni 1997.

[WL, 1998]

F. den Heijer. Golfoverslag en krachten op verticale waterkeringsconstructies, WL I Delft Hydraulics, verslag H 2014, augustus 1998.

[WL, 1999-1]

G.M. Smith. Oploop- en overslagmetingen op een ondiep voorland. WL I Delft Hydraulics, verslag H3271/H3471. September 1999

[WL, 1999-2]

M.R.A. van Gent. Physical model investigations on coastal structures with shallow foreshores. 2D model tests with single and double-peaked wave energy spectra. December 1999.

Invloedsfactoren voor de ruwheid van toplagen bij golfoploop en golfoverslag

Samenvattende tabel, gebaseerd op [DWW, 2002]. De waarden voor de invloedsfactoren zijn gebaseerd op referentietypen, waarvoor onderzoek is uitgevoerd, en vergelijking van foto's van de diverse taluds.

Code	Omschrijving	Invloedsfactor	Vergelijkingsmateriaal
1	Asfaltbeton	1,0	Referentietype
2	Mastiek	1,0	Asfalt
3	Dicht steenasfalt	1,0	Referentietype
4	Open geprefabriceerde steenasfaltmatten	0,9	Geen foto/Fixtone
5	Open steenasfalt	0,9	Referentietype/Fixtone
6	Zandasfalt (tijdelijk of in onderlaag)	1,0	Referentietype
7	Breksteen, gepenetreerd met asfalt (vol en zat)	0,8	Breksteen/asfalt/Vilvoordse steen
8	Baksteen/betonsteen, gepenetreerd met asfalt (vol en zat)	1,0	Ondoorlatend en vrijwel glad
9	Breksteen, gepenetreerd met asfalt (patroonpenetratie)	0,7	Breksteen/asfalt; enkele laag 0,8
10	Betonblokken met afgeschuinde hoeken of gaten erin	0,9	Armorflex
11	Betonblokken zonder openingen	1,0	Referentietype
11,1	Haringmanblokken	0,9	Referentietype
11,2	Diaboolblokken	0,8	1/4 blokken omhoog, maar hoger, dus ruwer
12	Open blokkenmatten, afgestrooid met granulair materiaal	0,9	Armorflex
13	Blokkenmatten zonder openingen in de blokken	0,95	Dichte betonblokken
14	Betonplaten van cementbeton of gesloten colloidaal beton, (in situ gestort)	1,0	Dichte betonblokken
15	Colloidaal beton, (open structuur)	1,0	Asfalt, weinig doorlatend
16	Betonplaten, (prefab)	1,0	Dichte betonblokken
17	Doorgroeisteen, beton	0,95	Steen zelf enige ruwheid, maar gras maakt het gladder
18	Breksteen, gepenetreerd met cementbeton of colloidaal beton, (vol en zat)	0,8	Breksteen/asfalt/Vilvoordse steen
19	Breksteen, met patroonpenetratie van cementbeton of colloidaal beton	0,7	Breksteen/asfalt; enkele laag 0,8
20	Gras, gezaaid	1,0	Referentietype
21	Gras, zoden of gezaaid, in kunststofmatten	1,0	Gras
22	Bestorting van grof grind en andere granulaire materialen	0,8	Kleiner dan breksteen, minder ruw. Voorwaarde: stabiel
23	Grove granulaire materialen c.q. breksteen verpakt in metaalgaas	0,7	Kleiner dan breksteen, wel doorlatend
24	Fijne granulaire materialen c.q. zand/grind verpakt in geotextiel, zandzakken	0,9	Enige doorlatendheid en ruwheid
25	Breksteen, (stortsteen)	0,55	Referentietype, Enkele laag 0,7
26	Basalt, gezet	0,9	Referentietype
26,01	Basalt, gezet, ingegoten met gietasfalt	0,95	Basalt, zonder doorlatendheid
26,02	Basalt, gezet, ingegoten met colloidaal beton of cementbeton	0,95	Basalt, zonder doorlatendheid
27	<i>Betonzuilen en andere niet rechthoekige blokken</i>		
27,1	Basalton	0,9	Basalt
27,2	PIT Polygoon zuilen	0,9	Basalt
27,3	Hydroblock	0,9	Basalt; Ecoblock 0,9
27,01	Betonzuilen of niet rechthoekige blokken, ingegoten met gietasfalt	1,0	Asfalt, vrijwel glad en ondoorlatend
27,11	Basalton, ingegoten met gietasfalt	1,0	Asfalt, vrijwel glad en ondoorlatend
27,21	PIT Polygoon zuilen, ingegoten met gietasfalt	1,0	Asfalt, vrijwel glad en ondoorlatend
27,31	Hydroblock, ingegoten met gietasfalt	1,0	Asfalt, vrijwel glad en ondoorlatend
27,02	Betonzuilen of niet rechthoekige blokken, ingegoten met beton	1,0	Asfalt, vrijwel glad en ondoorlatend
27,12	Basalton, ingegoten met beton	1,0	Asfalt, vrijwel glad en ondoorlatend
28	<i>Natuursteen, gezet</i>		
28,1	Vilvoordse	0,85	Referentietype
28,2	Lessinische	0,85	Vilvoordse
28,3	Doornikse	0,9	Basalt
28,4	Petit graniet	0,90	Basalt
28,5	Graniet	0,95	Basalt, iets minder open
28,6	Noordse of Drentse steen	0,75	Enkele laag breksteen, iets minder doorlatend
28,01	<i>Natuursteen, gezet, en ingegoten met gietasfalt</i>		
28,11	Vilvoordse, ingegoten met gietasfalt	0,95	Asfalt, vrijwel glad en ondoorlatend
28,21	Lessinische, ingegoten met gietasfalt	1,0	Asfalt
28,31	Doornikse, ingegoten met gietasfalt	1,0	Asfalt
28,41	Petit graniet, ingegoten met gietasfalt	1,0	Asfalt
28,51	Graniet, ingegoten met gietasfalt	1,0	Asfalt
28,61	Noordse of Drentse steen, ingegoten met gietasfalt	0,85	Enkele laag breksteen, veel minder doorlatend
28,02	<i>Natuursteen, gezet, en ingegoten met beton</i>		
28,12	Vilvoordse, ingegoten met beton	0,95	Asfalt, vrijwel glad en ondoorlatend
28,22	Lessinische, ingegoten met beton	1,0	Asfalt
28,32	Doornikse, ingegoten met beton	1,0	Asfalt
28,42	Petit graniet, ingegoten met beton	1,0	Asfalt
28,52	Graniet, ingegoten met beton	1,0	Asfalt
28,62	Noordse of Drentse steen, ingegoten met beton	0,85	Enkele laag breksteen, veel minder doorlatend
29	Koperslabblokken	1,0	Dichte betonblokken
30	Klei onder zand		niet van toepassing
31	Bestorting van natuursteenmassa	0,55	Dubbele laag breksteen; bijvoorbeeld kreukelberm
32	Klinkers, beton of gebakken.	1,0	Dichte betonblokken, voegen dicht met gras
33	zand		niet van toepassing
34	steenfundering, gebonden		niet van toepassing
56	kade, keermuur, kistdam		niet van toepassing