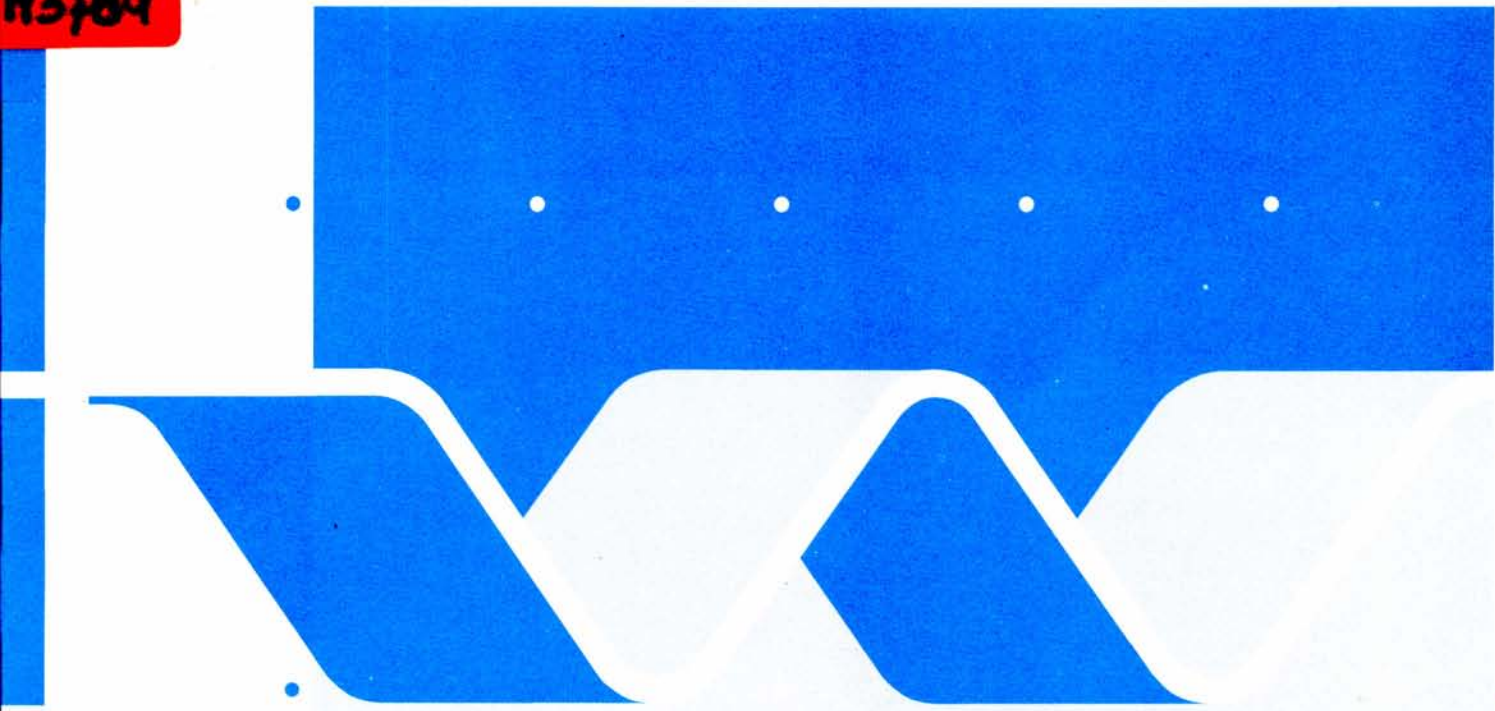




Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde

Achtergrondrapport
Golfoploop en golfoverslag bij dijken

December 2000

58645
H 3789
WL/Delft Hydraulics
c 140102 

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde

Achtergrondrapport Golfoploop en golfoverslag bij dijken

M.R.A. van Gent en F. den Heijer

December 2000



wl | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER: Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde

TITEL: Achtergrondrapport golfoploop en golfoverslag bij dijken

SAMENVATTING: Dit rapport beoogt inzicht te geven in de veranderingen in formuleringen met betrekking tot golfoploop en golfoverslag en de invloed van deze veranderingen voor verschillende in Nederland voorkomende watersystemen. De inventarisatie is voornamelijk gericht geweest op formuleringen en methodes uit de volgende documenten:

- TAW rapport 'Golfoploop en golfoverslag' (1972),
- Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 1 bovenrivierengebied (1985),
- Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 2 benedenrivierengebied (1989),
- Technisch rapport 'Golfoploop en golfoverslag bij dijken' (concept-rapport A-99-32, versie september 2000), hierna: "TR-2000".
- Onderzoeksrapporten sinds 1997 met nieuwe ontwikkelingen met betrekking tot golfoploopformuleringen.

In dit rapport zijn naast enkele aandachtspunten bij het gebruik van TR-2000 een aantal indicatieve voorbeeldberekeningen beschreven voor diverse watersystemen. De voorbeeldberekeningen betreffen situaties met bestaande dijkprofielen met *indicatieve* hydraulische randvoorwaarden. Deze berekeningen kunnen daardoor niet gebruikt worden voor de bepaling van de werkelijke benodigde kruinhoogtes voor de betreffende dijken en omdat er voor deze situaties geen meetgevens beschikbaar zijn ook niet voor het bepalen van de meest geschikte formulering. De berekeningen geven wel duidelijk aan dat de onderlinge verschillen tussen de met de diverse formuleringen berekende benodigde kruinhoogtes vrij groot kunnen zijn.

REFERENTIES: Offerteaanvraag (DWW, d.d. 28 augustus 2000),
Offerte (WL-MCI/H3789/MvG, d.d. 14 september 2000),
Opdrachtverlening (DWW-AK/004809, d.d. 3 oktober 2000).

VER.	AUTEURS	DATUM	OPMERKINGEN	REVIEW	GOEDGEKEURING
0	v.Gent / d.Heijer	Nov. 2000	Concept	G.M. Smith	W.M.K. Tilmans
I	M.R.A. van Gent F. den Heijer	Dec. 2000	Definitief	G.M. Smith	W.M.K. Tilmans
TREFWOORDEN					STATUS
Dijken Golfoploop Golfoverslag					☐ VOORLOPIG ☐ CONCEPT ☒ DEFINITIEF
PROJECTNUMMER: H3789					

Inhoudsopgave

Lijst van tabellen

Lijst van figuren

Lijst van symbolen

1	Inleiding.....	1-1
	1.1 Algemeen.....	1-1
	1.2 Doelstelling.....	1-1
	1.3 Opbouw van dit rapport.....	1-1
2	Golfoploop en golfoverslag formuleringen.....	2-1
	2.1 Ontwikkeling golfoploop formuleringen.....	2-1
	2.2 Ontwikkeling golfoverslag formuleringen.....	2-14
	2.3 Aandachtspunten.....	2-17
3	Voorbeeldberekeningen.....	3-1
4	Bevindingen en aanbevelingen	4-1

Referenties

Bijlage Tabellen

Bijlage Figuren

Lijst van tabellen

In de tekst:

1. Globaal overzicht golfoploopformuleringen.
2. Herschreven golfoploopformuleringen voor een constante golfsteilheid.
3. Reductiefactoren γ_f per type bekleding.
4. Verschillen tussen berekende golfoploophniveaus (in %).

In de bijlage Tabellen:

- T1. Voorbeeldberekeningen: gebruikte gegevens en berekende golfoploop.

Lijst van figuren

In de tekst:

1. Indicatief verloop van golfoploopformuleringen als functie van de brekerparameter op basis van de piekperiode (door middel van variatie in taludhellingen bij een constante golfsteilheid).
2. Indicatief verloop van golfoploopformuleringen als functie van de golfsteilheid op basis van de piekperiode (door middel van variatie in golfsteilheid bij een vaste taludhelling).
3. Indicatief verloop van de reductiefactor voor scheve golfaanval bij golfoploop.
4. Indicatief verloop van de reductiefactor voor bermen als gevolg van variaties in de breedte van de berm.
5. Indicatief verloop van de reductiefactor voor bermen als gevolg van variaties in de hoogteligging van de berm.
6. Indicatief verloop van golfoverslagformuleringen als functie van de brekerparameter op basis van de piekperiode (door middel van variatie in taludhellingen bij een constante golfsteilheid).
7. Indicatief verloop van golfoploopformuleringen als functie van de golfsteilheid op basis van de piekperiode (door middel van variatie in golfsteilheid bij een vaste taludhelling).
8. Indicatief verloop van de reductiefactor voor scheve golfaanval bij golfoverslag.
9. Vergelijking berekende golfoploop Noordzee.
10. Vergelijking berekende golfoploop Waddenzee.
11. Vergelijking berekende golfoploop IJsselmeer.
12. Vergelijking berekende golfoploop Westerschelde.
13. Vergelijking berekende golfoploop Oosterschelde.
14. Vergelijking berekende golfoploop Benedenrivierengebied.
15. Vergelijking tussen de Delftse formule en TR-2000.
16. Vergelijking tussen TAW-1972 en TR-2000.

In de bijlage Figuren:

- F1a Indicatief verloop van golfoploopformuleringen als functie van de brekerparameter op basis van de piekperiode (door middel van variatie in taludhellingen bij een constante golfsteilheid bij een “smal” spectrum).
- F1b Indicatief verloop van golfoploopformuleringen als functie van de brekerparameter op basis van de piekperiode (door middel van variatie in taludhellingen bij een constante golfsteilheid bij een “middel” spectrum).

- F1c Indicatief verloop van golfloopformuleringen als functie van de brekerparameter op basis van de piekperiode (door middel van variatie in taludhellingen bij een constante golfsteilheid bij een “breed” spectrum).
- F2a Indicatief verloop van golfloopformuleringen als functie van de golfsteilheid op basis van de piekperiode (door middel van variatie in golfsteilheid bij een vaste taludhelling; “middel” spectrum; talud 1:1.5).
- F2b Indicatief verloop van golfloopformuleringen als functie van de golfsteilheid op basis van de piekperiode (door middel van variatie in golfsteilheid bij een vaste taludhelling; “middel” spectrum; talud 1:3).
- F2c Indicatief verloop van golfloopformuleringen als functie van de golfsteilheid op basis van de piekperiode (door middel van variatie in golfsteilheid bij een vaste taludhelling; “middel” spectrum; talud 1:5).
- F3 Indicatief verloop van de berekende golfloop als functie van de bermbreedte (volgens TR-2000).
- F4 Indicatief verloop van de berekende golfloop als functie van de hoogteligging van de berm (volgens TR-2000).
- F5 Indicatief verloop van de berekende golfloop als functie van de helling van de berm (volgens TR-2000).
- F6 Schets van dijkprofiel voor Dijknummer 1-17.

Lijst van symbolen

Romeinse letters:

B	: bermbreedte (m)
c_i	: met $i=1..13$; $i=a,b$; coëfficiënten in golfploop/overslag formuleringen (-)
d_h	: bermdiepte ten opzichte van stilwaterlijn (m)
g	: versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)
$H_{1/3}$	: significante golfhoogte; gemiddelde van hoogste 1/3-deel van de golven (m)
H_s	: significante golfhoogte; $H_{1/3}$ (m)
h_k	: kruinhoogte boven de stilwaterlijn (m)
m_0	: oppervlak van het energiedichtheidsspectrum (m^2)
m_{-1}	: eerste negatieve moment van het energiedichtheidsspectrum (m^2s)
p_i	: met $i=1..4$, coëfficiënten in golfploopformuleringen (-)
Q	: (dimensieloos) overslagdebiet (-)
q	: overslagdebiet per strekkende meter ($m^3/s/m$)
R	: (dimensieloze) kruinhoogte (-)
s_{op}	: golfsteilheid gebaseerd op H_s aan de teen van de dijk en de piekperiode op diep water T_{p-diep} (-)
s_p	: golfsteilheid gebaseerd op H_s aan de teen van de dijk en de piekperiode aan de teen van de dijk T_{p-teen} (-)
$T_{m-1,0}$	: golfperiode gebaseerd op nulde (m_0) en eerste negatieve (m_{-1}) spectrale moment; $T_{m-1,0}=m_{-1}/m_0$ met $m_n=\int_0^\infty f^n S(f) df$ (s)
T_p	: piekperiode, gedefinieerd als de periode in een willekeurig golfspectrum waar de spectrale dichtheid een globaal maximum heeft (s)
T_{p-diep}	: piek periode op diep water (s)
T_{p-teen}	: piek periode aan de teen van de dijk (s)
T_s	: significante golfperiode (s)
$V_{2\%}$	: volume per golf dat door 2% van de golven wordt overschreden (m^3/m)
$z_{2\%}$	: golfploop niveau dat door 2% van de golven wordt overschreden (m)

Griekse letters:

α	: taludhelling ($^\circ$)
β	: hoek van golfinval ($^\circ$)
γ	: reductiefactor (-)
γ_B	: gecombineerde reductiefactor voor de invloed van scheve golfaanval en bermen (-)
γ_b	: reductiefactor voor de invloed van bermen (-)
γ_f	: reductiefactor voor de invloed van ruwheid/wrijving (-)

- γ_v : reductiefactor voor de invloed van een verticale wand op een talud (-)
 γ_β : reductiefactor voor de invloed van scheve golfaanval (-)
 ξ_m : brekerparameter, gebaseerd op de gemiddelde golfperiode,
 $\xi_m = \tan \alpha / \sqrt{(2\pi/g H_s / T_m^2)} (-)$
 ξ_{op} : fictieve brekerparameter gebaseerd op de golfhoogte aan de teen van de dijk en de piekperiode op diep water, $\xi_{op} = \tan \alpha / \sqrt{(2\pi/g H_s / T_{p-diep}^2)} (-)$
 ξ_p : brekerparameter, bij de teen van de dijk, gebaseerd op de piekperiode,
 $\xi_p = \tan \alpha / \sqrt{(2\pi/g H_s / T_{p-teen}^2)} (-)$
 $\xi_{s,-l}$: brekerparameter, bij de teen van de dijk, gebaseerd op de golfperiode $T_{m-1,0}$,
 $\xi_{s,-l} = \tan \alpha / \sqrt{(2\pi/g H_s / T_{m-1,0}^2)} (-)$

I Inleiding

I.1 Algemeen

Het Technisch Rapport 'Golfploop en golfoverslag bij dijken' en het computerprogramma PC-Overslag geven de mogelijkheid golfploop en golfoverslag voor dijken te berekenen. Er is hierbij gebruik gemaakt van formuleringen die voor een deel gebaseerd zijn op het TAW rapport 'Golfploop en golfoverslag' uit 1972, voor een deel aanvullingen op dit rapport zijn, en voor een deel wijzigingen betreffen. Ook omdat dit TAW rapport uit 1972 mede als basis heeft gediend voor bestaande leidraden is er behoefte aan een achtergrondrapport waarin de belangrijkste veranderingen in kaart worden gebracht en waarin de invloed van deze veranderingen beschouwd worden.

De Dienst Weg- en Waterbouwkunde heeft naar aanleiding van bovenstaande WL | Delft Hydraulics opdracht verleend (AK/004809, d.d. 3 oktober 2000) op basis van de bijbehorende offerte (MCI/H3789/MvG, d.d. 14 september 2000) om hier invulling aan te geven. Van de zijde van de opdrachtgever zijn ing. J.E. Venema, drs. D.F. Timmer en ir. A.P. de Looff projectbegeleiders geweest en van de zijde van de opdrachtnemer zijn met name dr. ir. M.R.A. van Gent, ir. F. den Heijer en ing. C. Kuiper betrokken geweest.

I.2 Doelstelling

Dit achtergrondrapport heeft als doel om inzicht te geven in veranderingen in formuleringen met betrekking tot golfploop en golfoverslag en de invloed van deze veranderingen voor de verschillende in Nederland voorkomende watersystemen. Het gaat hierbij vooral om praktische constatering van verschillen en aandachtspunten bij het gebruik van de formuleringen en niet zozeer om een diepgaande analyse.

I.3 Opbouw van dit rapport

In Hoofdstuk 2 worden historische ontwikkelingen in golfploop en golfoverslag formuleringen beschreven waarbij deze beschrijving met name gericht is op veranderingen beschreven in de volgende documenten, aangevuld met beschouwingen betreffende de trend van verdere ontwikkelingen op dit gebied:

- TAW-1972: TAW rapport 'Golfploop en golfoverslag',
- LR-1985: Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 1 bovenrivierengebied,
- LR-1989: Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 2 benedenrivierengebied.
- TR-2000: Technisch rapport Golfploop en golfoverslag bij dijken' (concept-rapport A-99-32, versie september 2000).
- WL-2000: Nieuwe ontwikkelingen uit de periode 1998-2000 met betrekking tot golfploopformuleringen (Van Gent, 1999-a,b,c, 2000-a,b).

Naast de beschrijving van de historische veranderingen in formuleringen uit bovengenoemde documenten, zijn in Hoofdstuk 2 beschouwingen gegeven met betrekking tot de consistentie in de ontwikkelingen tussen het verleden en nu (1972-2000, met als tussenstappen de bovengenoemde leidraden uit 1985 en 1989). Dit betreft zowel de formuleringen zelf als de invloedsfactoren voor ruwheid, scheve golfaanval en bermen. De beschouwingen betreffen tevens een selectie van aandachtspunten bij de formuleringen uit TR-2000.

In Hoofdstuk 3 worden een aantal voorbeeldberekeningen beschreven waarbij voor verschillende watersystemen een aantal indicatieve golfploopberekeningen beschreven worden.

- Noordzee
- Waddenzee
- IJsselmeer
- Estuaria: Oosterschelde en Westerschelde
- Benedenrivierengebied

In Hoofdstuk 4 worden belangrijke bevindingen en aanbevelingen samengevat.

2 Golfoploop en golfverslag formuleringen

2.1 Ontwikkeling golfoploop formuleringen

In dit hoofdstuk wordt een globaal overzicht van golfoploopformuleringen gegeven waarbij formuleringen uit een beperkt aantal documenten zijn beschouwd. In tegenstelling tot wat gebruikelijk is wordt daarmee niet noodzakelijkerwijs gerefereerd naar wetenschappelijke publicaties waar bepaalde formuleringen oorspronkelijk op gebaseerd zijn (zoals ondermeer Iribarren en Nogales, 1949; Hunt, 1959; Battjes, 1974; De Waal en Van der Meer, 1992). Bij dit overzicht worden naast de algemene formulering voor golfoploop ook een aantal aspecten beschouwd die een rol spelen bij de bepaling van golfoploop. Dit betreft de wijze waarop de invloeden van golfsteilheid, golfspectra, ruwheid, scheve golfaanval en bermen, in de verschillende formuleringen in rekening gebracht worden. Overige aspecten zoals bijvoorbeeld de invloed van wind en de invloed van verticale taludonderdelen zijn buiten beschouwing gelaten. Verder richt het overzicht zich met name op de golfoploop die door 2% van de golven wordt overschreden. Dit betekent dat hier verder geen aandacht gegeven wordt aan golfoploopverdelingen.

Globaal overzicht golfoploopformuleringen

Delftse formule: Deze oude formule, gebaseerd op resultaten uit in 1942 uitgevoerd modelonderzoek bij het Waterloopkundig Laboratorium Delft, is nader beschouwd in ondermeer Wassing (1957), Battjes (1970) en TAW-1972. Deze formule die de afhankelijkheid van golfoploop voor de taludhelling beschrijft is slechts geldig voor één bepaalde golfsteilheid ($s=0.05$), zonder dat overigens gedefinieerd is op welke maat voor de golfperiode deze golfsteilheid gebaseerd is. De formule is echter wel vaak onjuist toegepast voor situaties met andere golfsteilheden:

$$z_{2\%} / H_s = 8 \tan \alpha \quad (1)$$

TAW-1972: Dit document geeft een uitgebreid overzicht en een behandeling van op dat moment beschikbare literatuur op dit gebied. In het bijzonder wordt aandacht besteedt aan de formulering van Van Oorschoot en d'Angremond (1968). Hierbij wordt, als er gebruik gemaakt wordt van de piekperiode, een coëfficiënt gebruikt die de invloed van het golfspectrum op de golfoploop in rekening brengt. Deze formule wordt in TAW-1972 herschreven door gebruik te maken van de gemiddelde

periode. Samen met de brekerparameter (Battjes, 1974) is deze formule te herschrijven tot:

$$z_{2\%} / H_s = 1.85 \xi_m = 1.85 \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi}{g} \frac{H_s}{T_m^2}}} \quad (2a)$$

Bij een golfsteilheid van $s_m=0.0534$, waarbij gemiddelde golfperiode wordt gebruikt, wordt de zogenaamde “Delftse formule” (1) verkregen. Aangegeven wordt dat (2a) geldt voor brekende golven en dat niet genoeg gegevens beschikbaar waren voor het geven van een onderbouwde formulering voor golfoploop bij niet-brekende golven.

Voor de invloed van ruwheid wordt voorgesteld een reductiefactor (hier met γ_f aangeduid) in rekening te brengen die afhankelijk is van het type dijkbekleding. Voor de invloed van scheve golfaanval wordt, op basis van relatief beperkte gegevens, een reductiefactor voorgesteld ($\gamma_\beta = \cos \beta$ waarbij de hoek van inval ligt tussen loodrecht en $\beta = 45^\circ$). Met deze twee reductiefactoren kan (2a) geschreven worden als:

$$z_{2\%} / H_s = 1.85 \gamma_f \gamma_\beta \xi_m \quad (2b)$$

Voor de invloed van bermen wordt mede door gebrek aan gegevens niet echt de voorkeur gegeven aan een bepaalde formulering voor een reductiefactor als gevolg van een berm (hier met γ_b aangeduid). Wel wordt een mogelijke formule genoemd voor de reductie ten gevolge van een horizontale berm op de waterlijn: $\gamma_b = 1 - B/(2\pi/gT_m^2)$ met $\gamma_b \geq 0.7$.

LR-1985:

In dit document wordt de formulering (2) vanuit TAW-1972 weliswaar genoemd maar wordt het gebruik van formulering (1) tevens als verantwoord gezien, dit op basis van de veronderstelling dat windgolven meestal een steilheid zouden hebben tussen 0.05 en 0.06. Formulering (1) wordt voorgesteld met een steilste taludhelling van 1:2.5; voor steilere taluds wordt $\tan \alpha = 2.5$ gebruikt. Voor bermen wordt geen reductiefactor voorgesteld. Voor de reductiefactoren voor ruwheid en scheve golfaanval worden wel de formuleringen die in TAW-1972 zijn voorgesteld gebruikt, maar worden de waarden van de coëfficiënten uit (1) en (2) gezien als behorende bij een “reductiefactor” $\gamma_f = 1.1$ voor gladde ondoorlatende taluds. Dit betekent dat als voor gladde ondoorlatende taluds de gebruikelijke ruwheidsfactor van $\gamma_f = 1.0$ toegepast wordt, dat dan de coëfficiënten uit (3) 10% hoger worden.

$$\begin{aligned} z_{2\%} / H_s &= 8 \gamma_f \gamma_\beta \tan \alpha & \text{voor } \tan \alpha \leq 1:2.5 \\ z_{2\%} / H_s &= 3.2 \gamma_f \gamma_\beta & \text{voor } \tan \alpha \geq 1:2.5 \end{aligned} \quad (3)$$

LR-1989:

In dit document wordt de formulering (1) weliswaar genoemd maar wordt deze formulering, net als in TAW-1972, gezien als een uitzonderingsgeval van (2). Conform LR-1985 wordt voor taluds steiler dan 1:2.5 voorgesteld om $\tan \alpha = 1:2.5$ te gebruiken:

$$\begin{aligned} z_{2\%} / H_s &= 1.85 \gamma_f \gamma_\beta \xi_m & \text{voor } \tan \alpha \leq 1:2.5 \\ z_{2\%} / H_s &= 0.74 \gamma_f \gamma_\beta \sqrt{\frac{2\pi}{g} \frac{H_s}{T_m^2}} & \text{voor } \tan \alpha \geq 1:2.5 \end{aligned} \quad (4)$$

Voor de invloed van ruwheid wordt wederom een reductiefactor γ_f voorgesteld en wordt voor gladde ondoorlatende bekledingen de reductiefactor $\gamma_f = 1.1$ gebruikt (feitelijk een verhoging). De invloeden van scheve golfaanval en bermen op de waterlijn worden samengevoegd tot één reductiefactor: $\gamma_\beta = \cos(\beta - 10^\circ) - B/(2\pi/gT_m^2)$ voor $10^\circ \leq \beta \leq 55^\circ$ met $\gamma_\beta \geq 0.6 \cos(\beta - 10^\circ)$. Voor bermen die niet op de waterlijn liggen wordt een correctie voor de hoogteligging van de berm (met de vertikale afstand van berm tot waterlijn d_h) voorgesteld ten opzichte van de golfploop wanneer de berm wel op de waterlijn had gelegen (z_B). Voor een berm onder water is de formulering te schrijven als:

$$z_{2\%} = z_B \{1 - (d_h/H_s)^3\} + z_{\tan \alpha \text{-boven}} (d_h/H_s)^3 \quad \text{voor } 0 \leq d_h \leq H_s$$

En voor een berm boven water:

$$z_{2\%} = z_B \{1 - (d_h/z_{\tan \alpha \text{-beneden}})^2\} + d_h^2/z_{\tan \alpha \text{-beneden}} \quad \text{voor } 0 \leq d_h \leq z_{\tan \alpha \text{-beneden}}$$

Voor geknikte taluds wordt de methode van Saville (1957) voorgesteld om een karakteristieke taludhelling in de brekerparameter ξ te bepalen.

TR-2000

Dit document is een bewerking van het rapport Van der Meer (1997) waarop bepaalde aanpassingen zijn aangebracht. Deze aanpassingen betreffen niet zozeer de nieuwe inzichten vanuit nieuw onderzoek in die periode maar aanpassingen met het doel het praktisch gebruik van de in Van der Meer (1997) voorgestelde formuleringen te bevorderen. De algemene golfploopformulering in TR-2000 is:

$$\begin{aligned} z_{2\%} / H_s &= 1.6 \gamma_f \gamma_\beta \gamma_b \xi_{op} & \text{voor } \gamma_b \xi_{op} \leq 2 \\ z_{2\%} / H_s &= 3.2 \gamma_f \gamma_\beta & \text{voor } \gamma_b \xi_{op} \geq 2 \end{aligned} \quad (5)$$

waarbij de brekerparameter ξ_{op} gebaseerd is op de piekperiode T_p op diep water en de golfhoogte H_s van de inkomende golven bij de teen van

de dijk. De formule wordt geldig verondersteld voor $0.5 \leq \gamma_b \xi_{op} \leq 4$ à 5 op basis van metingen in de range van $0.6 \leq \gamma_b \xi_{op} \leq 3.4$. De coëfficiënten 1.6 en 3.2 in (5) geven niet zoals in eerder besproken documenten een beschrijving van de verwachtingswaarde voor de golfoploop (met 1.5 en 3.0 in (5) in plaats van 1.6 en 3.2) maar bevatten enige veiligheid gebaseerd op de verschillen tussen de formuleringen en de gebruikte meetgegevens.

Wijzigingen t.o.v. LR-1989 betreffen, naast de veranderde waarde van de coëfficiënt voor de mate van afhankelijkheid van de brekerparameter, ondermeer dat boven een bepaalde waarde van de brekerparameter zowel geen afhankelijkheid van de taludhelling als geen afhankelijkheid van de golfsteilheid meer in rekening wordt gebracht. Verder wordt gebruik gemaakt van de piekperiode op diep water voor situaties waarbij het spectrum van de golven enkeltoppig of “platgeslagen” is. Voor tweetoppige spectra wordt een bepaald gewogen gemiddelde bepaald. Niet eenduidig wordt vermeld op welke lokatie (op diep water of aan de teen van de dijk) het golfspectrum beschouwd wordt om te bepalen of de “gewone” piekperiode op diep water of een “gewogen” piekperiode in de formuleringen ingevuld wordt. Het al dan niet tweetoppig of “platgeslagen” zijn van een bepaald golfspectrum wordt in TR-2000 niet nader gedefinieerd.

Voor de invloed van ruwheid wordt wederom een reductiefactor γ_f voorgesteld maar worden aangepaste waarden per type bekleding gegeven. Nieuw is de afhankelijkheid van de brekerparameter: Voor waarden $\gamma_b \xi_{op} \leq 2$ (“brekende golven”) wordt de reductie maximaal verondersteld en voor waarden $\gamma_b \xi_{op} \geq 8$ (“niet-brekende golven”) wordt geen reductie in rekening gebracht. Daartussen wordt lineair geïnterpoleerd op basis van de waarde voor $\gamma_b \xi_{op}$. Voor variërende ruwheid langs het talud, bijvoorbeeld door diverse type bekledingen in één dijkprofiel, zijn aparte procedures opgesteld.

Voor de invloed van scheve golfaanval wordt wederom een reductiefactor γ_β voorgesteld maar met een aangepaste afhankelijkheid van de hoek van inval: $\gamma_\beta = 1 - 0.0022 |\beta|$ voor $0^\circ \leq \beta \leq 80^\circ$. Voor $80^\circ \leq \beta \leq 110^\circ$ wordt de maximale reductie uit deze formule gebruikt in combinatie met vermenigvuldigingsfactoren voor de golfhoogte en de golfperiode. Voor nog schevere golfaanval wordt de golfoploop op $z_{2\%}=0$ gesteld.

Bermen worden op een speciale manier behandeld. Als de berm niet horizontaal is wordt deze eerst volgens een procedure geschematiseerd tot een horizontale berm. Vervolgens wordt de berm uit het talud gehaald en wordt er met een iteratieve methode een equivalente helling bepaald die gebruikt wordt in de brekerparameter. Dan wordt op basis van het talud met de horizontale berm een reductiefactor γ_b verkregen die wederom iteratief wordt bepaald (iteratief omdat de te bepalen golfoploop als invoer dient voor de bepaling van zowel de equivalente helling als de reductiefactor). Wanneer de breedte van een berm tussen de gebruikte definities van een berm en een voorland in ligt, of wanneer de helling van een talud tussen de gebruikte definities van een berm en een talud in ligt, worden interpolatie procedures voorgesteld om toch een golfoploop te kunnen berekenen.

WL-2000

Het onderzoek dat richting heeft gegeven aan de formuleringen uit TR-2000 is voornamelijk gebaseerd geweest op gegevens en methodes tot 1997. Deze gegevens betreffen met name situaties met relatief diep water aan de teen van de dijk en één bepaalde vorm van het golfspectrum. Sinds 1997 zijn veel nieuwe gegevens en methodes beschikbaar gekomen die geresulteerd hebben in een formulering die als volgt weergegeven kan worden:

$$\begin{aligned} z_{2\%} / H_s &= \gamma_f \gamma_\beta (c_1 \xi_{s,-1}) && \text{voor } \xi_{s,-1} \leq p \\ z_{2\%} / H_s &= \gamma_f \gamma_\beta (c_2 - c_3 / \xi_{s,-1}) && \text{voor } \xi_{s,-1} \geq p \end{aligned} \quad (6)$$

waarin de brekerparameter $\xi_{s,-1}$ gebaseerd is op de golfhoogte H_s en de golfperiode $T_{m-1,0}$ van de inkomende golven bij de teen van de dijk, $c_2 = 0.25 c_1^2 / c_0$ en $p = 0.5 c_1 / c_0$. Als de golfparameters gebaseerd zijn op de energie in de korte golven, zoals meestal het geval is, zijn de coëfficiënten bepaald met $c_0 = 1.55$ en $c_1 = 5.4$ voor het verkrijgen van verwachtingswaarden van de golfoploop. Formulering (6) is opgesteld voor zowel diep water als ondiep water aan de teen van de dijk en voor willekeurige golfspectra aan de teen van de dijk. Wanneer het golfspectrum aan de teen van de dijk een standaard vorm heeft kan de golfperiode $T_{m-1,0}$ verkregen worden door een omrekening op basis van de gemiddelde periode of de piekperiode. Voor een theoretisch Jonswap spectrum (en dus ook enkeltoppige) geldt bijvoorbeeld $T_p = 1.107 T_{m-1,0}$.

Uit het onderzoek dat ten grondslag ligt aan Formulering (6) volgt dat de golfperiode $T_{m-1,0}$ op basis van het golfspectrum aan de teen van de dijk ook geschikt is voor gebruik bij zogenaamde “platgeslagen”, dubbeltoppige of meertoppige spectra. Net als de bij TR-2000 genoemde

“gewogen piekperiode” is de golfperiode $T_{m-1,0}$ voor veel situaties in de praktijk waar “platgeslagen spectra” of “dubbeltoppige spectra” te verwachten zijn, niet beschikbaar door het ontbreken van gegevens omtrent de golfenergiespectra. Gebruik van periodematen zoals de piekperiode kunnen voor zulke situaties tot aanzienlijke onnauwkeurigheden leiden. De piekperiode op diep water zoals in Formulerings (5) wordt gebruikt kan wel in Formulerings (5) of (6) gebruikt worden als het golfspectrum aan de teen van de dijk enkeltoppig is conform de vorm van een standaard golfspectrum (zoals het voor de afleiding van de formules gebruikte Jonswap spectrum) en dit golfspectrum aan de teen van de dijk gelijkvormig is met het golfspectrum op diep water.

Bermen worden in Formulerings (6) in rekening gebracht via het bepalen van een karakteristieke taludhelling, zonder een aanvullende reductie zoals bijvoorbeeld met een reductiefactor γ_b . Voor de invloed van scheve golfaanval wordt de formulering uit TR-2000 gebruikt. Voor de invloed van ruwheid kunnen de reductiefactoren uit TR-2000 gebruikt worden (zonder een afhankelijkheid van de brekerparameter).

Formulerings (6) is (nog) niet geoperationaliseerd in de huidige PC-Overslag versie. Soortgelijke nieuwe ontwikkelingen waarbij gestreefd wordt naar een geldigheidsgebied inclusief dat van ondiepe voorlanden zijn nog niet afgerond voor golfoverslag.

Globaal verloop algemene golfoploopformuleringen

In grote lijnen kan geconstateerd worden dat de lineaire afhankelijkheid van de taludhelling zoals al in de Delftse formule (1) weergegeven was, in alle daarop volgende formuleringen aanwezig was voor de lagere waarden van de brekerparameter. Sinds de introductie van de brekerparameter (ξ) in golfoploopformuleringen is ook vrijwel steeds de lineaire afhankelijkheid van de golfperiode via de brekerparameter in de formuleringen aanwezig geweest voor de lagere waarden van de brekerparameter. Wanneer ook voor hogere waarden van de brekerparameter een lineaire afhankelijkheid wordt gebruikt leidt dit veelal tot overschattingen van de golfoploop. Vandaar dat voor hogere waarden van de brekerparameter diverse formuleringen voorgesteld zijn. Deze betreffen meestal een abrupte overgang van een formule voor lagere waarden van de brekerparameter naar een formule voor de hogere waarden van de brekerparameter. De formuleringen voor de hogere waarden van de brekerparameter betreffen of een absoluut maximum voor de waarden van de relatieve (dimensieloze) golfoploop, of een verloop richting zo'n maximum in de limiet situatie ($\xi \rightarrow \infty$). Voor zo'n maximum geldt dat de golfoploop lineair afhankelijk wordt van de golfhoogte. Het in TR-2000 voorgestelde verloop combineert het lineaire verloop met de

taludhelling en het lineaire verloop met de golfperiode voor de lagere waarden van de brekerparameter met een, weliswaar abrupte, overgang naar een lineaire afhankelijkheid van de golfhoogte voor de hogere waarden van de brekerparameter. Deze ontwikkeling van golfoploopformuleringen kan als consistent gezien worden. In de bespreking van Figuur 1 wordt dit verloop nader toegelicht.

Als volgende stap in de ontwikkeling van de golfoploopformuleringen ligt het vereffenen van de abrupte overgang tussen de formuleringen voor lage en hoge waarden van de brekerparameter voor de hand. Hiervoor is reeds een formulering beschikbaar (Van Gent, 1999-a,b,c, 2000-a,b), mede op grond van nieuwe gegevens uit de periode 1998-2000. Deze formulering is aangegeven met WL-2000 en toegevoegd in Tabel 1, waar de genoemde formuleringen in een globaal overzicht zijn samengevat.

Methode	algemene golfoploop formuleringen	golf steilheid	golf spectra	ruwheid	scheve inval	berm
Delftse formule	$z_{2\%}/H_s = c_1 \tan \alpha$	-	-	-	-	-
TAW-1972	$z_{2\%}/H_s = c_2 \xi$	via ξ	T_m (evt. $T_m = T_p/c_{12}$)	γ_f	γ_β	γ_b
LR-1985	$z_{2\%}/H_s = c_3 \tan \alpha$ $\cot \alpha \leq p_1$ $z_{2\%}/H_s = c_4$ $\cot \alpha \geq p_1$	-	-	γ_f	γ_β	-
LR-1989	$z_{2\%}/H_s = c_5 \xi$ $\cot \alpha \leq p_2$ $z_{2\%}/H_s = c_6 / \sqrt{s}$ $\cot \alpha \geq p_2$	via ξ	T_m (evt. $T_m = T_p/c_{12}$)	γ_f	γ_B	γ_B
TR-2000	$z_{2\%}/H_s = c_7 \xi$ $\xi \leq p_3$ $z_{2\%}/H_s = c_8$ $\xi \geq p_3$	via ξ met max	T_p -diep (evt. 2-top methode)	$\gamma_f; f(\xi)$	γ_β	via ξ met γ_b
WL-2000	$z_{2\%}/H_s = c_9 \xi$ $\xi \leq p_4$ $z_{2\%}/H_s = c_{10} - c_{11}/\xi$ $\xi \geq p_4$	via ξ	$T_{m-1,0}$ -teen (evt. $T_{m-1,0} = T_p/c_{13}$)	γ_f	γ_β	via ξ

Tabel 1 Globaal overzicht golfoploopformuleringen.

Vergelijking van het verloop van algemene golfoploopformuleringen

Om de waarden van de coëfficiënten en het verloop van de golfoploop als functie van de brekerparameter $0 \leq \xi_p \leq 4$ te illustreren voor de diverse formuleringen wordt een vergelijking gemaakt. Dit betekent wel dat de formuleringen hier voor een deel inzichtelijk gemaakt worden in een gebied buiten hun eigenlijke geldigheidsgebied. Aangezien de betreffende formuleringen ook buiten hun geldigheidsgebied toegepast worden is het toch zinvol deze vergelijking voor het toepassingsgebied $0 \leq \xi_p \leq 4$ te maken. De verschillende formuleringen zijn voor een standaard enkeltoppig golfspectrum met een golfsteilheid van $s_p=0.0326$ aan de teen van de dijk te herschrijven als functie van de brekerparameter op basis van de piekperiode. De waarden van de diverse coëfficiënten kunnen met twee methodes bepaald worden: "Omrekening a" is op basis van in de verschillende documenten

aangenomen *verschillende* verhoudingen tussen de piekperiode en de gemiddelde periode, “Omrekening b” is op basis van *vaste* en realistische verhoudingen tussen de piekperiode en de gemiddelde periode.

Omrekening (a):

In TAW-1972 wordt voor de verhouding tussen de piekperiode en gemiddelde periode $T_p = 1.05 T_m$ genomen. In LR-1989 wordt de verhouding $T_s = 1.15 T_m$ gebruikt, waarbij hier de aanname wordt gedaan dat de significante golfperiode gelijk is aan de piekperiode ($T_s = T_p$). In LR-1985 en LR-1989 worden de Delftse formule en formulering uit TAW-1972 gebruikt met een reductiefactor $\gamma = 1.1$ voor gladde ondoorlatende taluds. Met deze aannamen zijn de verschillende formuleringen bij één bepaalde piekperiode te herschrijven als functie van de brekerparameter op basis van de piekperiode. De coëfficiënten in de derde kolom van Tabel 2 behoren dan bij gladde ondoorlatende taluds.

Omrekening (b):

Voor bepaalde golfspectra (bijvoorbeeld zogenaamde Jonswap spectra) is de verhouding tussen de piekperiode en de gemiddelde golfperiode vast. Voor drie type spectra, aangegeven met “smal”, “middel” en “breed”, is een bepaalde verhouding aangenomen. Met deze verhouding zijn de formuleringen te herschrijven als functie van de brekerparameter op basis van de piekperiode. Voor het smalle spectrum is gebruikt: $T_p = 1.15 T_m$ (en $T_p = 1.07 T_{m-1,0}$), voor het “middel” spectrum (een standaard theoretisch Jonswap golfspectrum): $T_p = 1.28 T_m$ (en $T_p = 1.107 T_{m-1,0}$) en voor het brede spectrum: $T_p = 1.5 T_m$ (en $T_p = 1.2 T_{m-1,0}$). De eerder genoemde “platgeslagen spectra” zijn overigens nog aanzienlijk smaller dan dit “brede” spectrum.

Methode	Herschreven golfploopformuleringen met vaste golfsteilheid.	(a) c_1	(b) Coëfficiënten per type spectrum		
			smal	middel	breed
Delftse formule	$z_{2\%}/H_s = c_1 \xi_p$	1.45	1.45	1.45	1.45
TAW-1972	$z_{2\%}/H_s = c_1 \xi_p$	1.76	1.61	1.45	1.23
LR-1985	$z_{2\%}/H_s = c_1 \xi_p \quad \xi_p \leq 2.2$	1.59	1.59	1.59	1.59
	$z_{2\%}/H_s = c_2 \quad \xi_p \geq 2.2$		3.5	3.5	3.5
LR-1989	$z_{2\%}/H_s = c_1 \xi_p \quad \xi_p \leq 2.2$	1.77	1.77	1.59	1.36
	$z_{2\%}/H_s = c_2 \quad \xi_p \geq 2.2$		3.9	3.5	3.0
TR-2000	$z_{2\%}/H_s = c_1 \xi_p \quad \xi_p \leq 2$	1.5	1.5	1.5	1.5
	$z_{2\%}/H_s = c_2 \quad \xi_p \geq 2$		3.0	3.0	3.0
WL-2000	$z_{2\%}/H_s = c_1 \xi_p \quad \xi_p \leq 1.9-2.1$	1.4	1.45	1.4	1.29
	$z_{2\%}/H_s = c_2-c_3/\xi_p \quad \xi_p \geq 1.9-2.1$		5.4,5.0	5.4,5.2	5.4,5.7

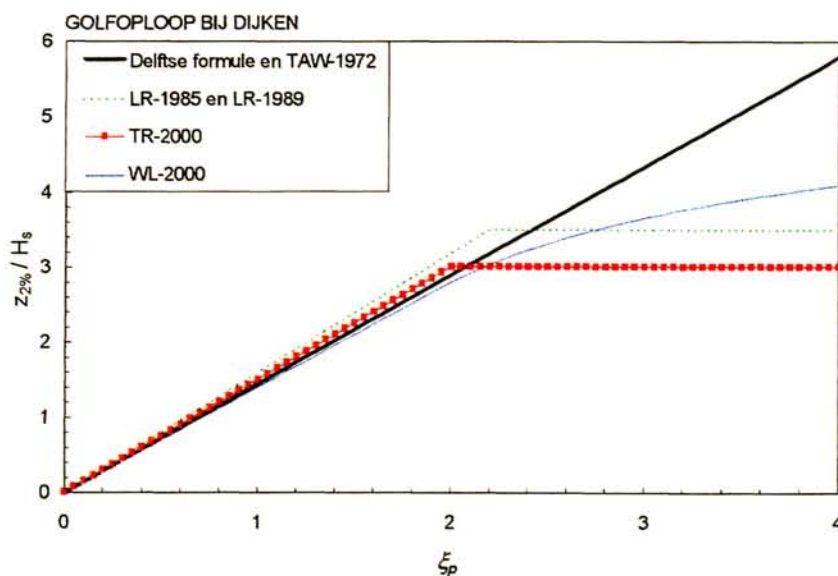
Tabel 2 Herschreven golfploopformuleringen voor een constante golfsteilheid ($s_p = 0.0326$); voor Omrekening (a) en Omrekening (b).

Tabel 2 illustreert de verschillende waarden van de coëfficiënten. In deze tabel zijn net als voor de andere formuleringen ook voor TR-2000 de coëfficiënten gebruikt voor het verkrijgen van verwachtingswaarden (1.5 en 3.0). Er wordt in TR-2000 echter ook enige veiligheid in rekening gebracht zodat voor de coëfficiënten uiteindelijk 1.6 en 3.2 zijn voorgesteld.

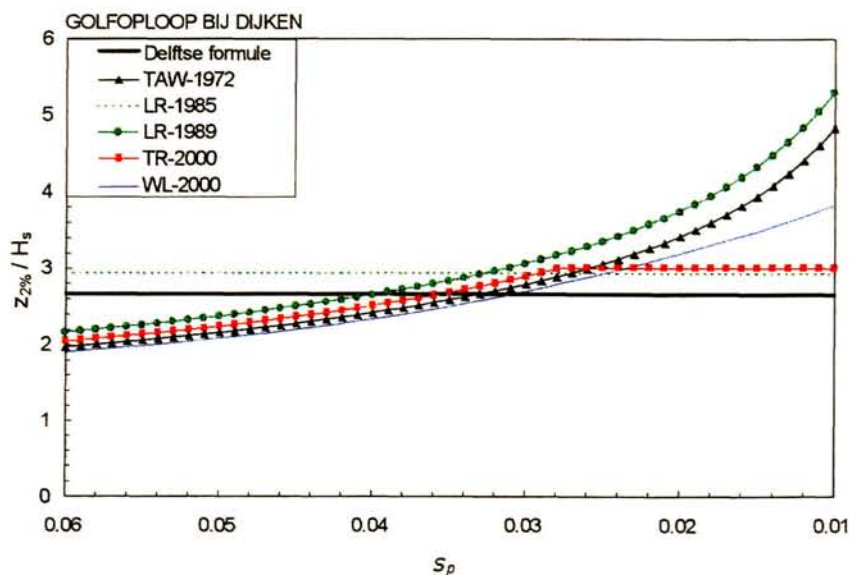
Voor het grafisch weergeven van het indicatieve verloop van de verschillende formuleringen is het getallenvoorbeeld voor het “middel” spectrum gebruikt. In de bijlage ‘Figuren’ zijn ook figuren opgenomen voor het “smalle” en “brede” spectrum (Figuren Flac). Bij een golfhoogte van $H_s=1$ m en een golfsteilheid van $s_p=0.0326$ aan de teen van de dijk is de variatie in brekerparameter gerealiseerd door middel van variaties in de taludhellingen. Figuur 1 geeft het indicatieve verloop van de relatieve (dimensieloze) golfloop als functie van de brekerparameter. De Delftse formule en de formulering uit TAW-1972 geven voor deze gekozen golfsteilheid een identiek verloop. Ook de formuleringen uit LR-1985 en LR-1989 geven bij die steilheid een identiek verloop. De formuleringen uit LR-1985, LR-1989 en TR-2000 geven duidelijk een abrupte overgang weer naar een maximale relatieve golfloop. De formulering uit WL-2000 geeft een vloeiend verloop weer met een ietwat lagere relatieve golfloop rond $\xi_p=2$ en voor de hogere waarden van de brekerparameter een verloop tussen de andere formuleringen in. De onderlinge verschillen zijn duidelijk het grootst voor de hogere waarden van de brekerparameter ($\xi_p>3$). Dit geldt zowel voor de gekozen golfsteilheid van $s_p=0.0326$ als voor andere golfsteilheden in de beschouwde range tussen $0.01<s_p<0.06$. Deze hogere waarden van de brekerparameter betreffen tevens het gebied waar de formuleringen die in Figuur 1 zijn gebruikt (met uitzondering van WL-2000), niet of nauwelijks gebaseerd zijn op meetgegevens. Deze hogere waarden van de brekerparameter (lagere golfsteilheden) kunnen met name in kustgebieden vaak voorkomen. Met het gebruik van formuleringen buiten het bereik van beschikbare gegevens moet uiteraard zeer voorzichtig omgegaan worden. In de periode 1998-2000 zijn gegevens beschikbaar zijn gekomen voor hogere waarden van de brekerparameter. Mede op grond van deze nieuwe gegevens kan gesteld worden dat de formuleringen die in Figuur 1 zijn gebruikt (met uitzondering van WL-2000) tot relatief grote onnauwkeurigheden kunnen leiden voor $\xi_p>3$.

Een tweede indicatie van het verloop van de verschillende golfloopformuleringen wordt gegeven, nu niet met een vaste golfsteilheid bij variërende taludhellingen, maar met een vaste taludhelling ($\cot \alpha=3$) en variërende golfsteilheid. Daarbij wordt weer een “middel” spectrum gebruikt met $T_p=1.28 T_m$ (en $T_p=1.107 T_{m-1,0}$). Figuur 2 geeft hiervan het resultaat. In de bijlage ‘Figuren’ zijn ook figuren opgenomen voor taludhellingen van 1:1.5 en 1:5 (Figuren F2a-c). De formulering uit TR-2000 geeft als enige formulering ook bij het verloop als functie van de golfsteilheid een geknikt verloop. Bij de lage golfsteilheden zijn

de verschillen groot. Voor deze situatie geeft het vergelijken van de formuleringen uit LR-1989 en TR-2000 bij een golfhoogte van $H_s=1$ m een verschil van 2.3 m in de golfoploop bij een golfsteilheid van $s_p=0.01$. Voor een lagere golfsteilheid, of voor een steiler talud, of voor een smaller spectrum, of voor een grotere golfhoogte, is het verschil groter. Voor het “smalle” spectrum uit Tabel 2, een golfsteilheid van $s_p=0.01$ en een talud van 1:2.5 ($\xi_p=4$) loopt dit verschil op tot 4.1 m bij een golfhoogte van $H_s=1$ m.



Figuur 1 Indicatief verloop van golfoploopformuleringen als functie van de brekerparameter op basis van de piekperiode (door middel van variatie in taludhellingen bij een constante golfsteilheid).



Figuur 2 Indicatief verloop van golfoploopformuleringen als functie van de golfsteilheid op basis van de piekperiode (door middel van variatie in golfsteilheid bij een vaste taludhelling).

Globaal verloop reductiefactoren voor ruwheid

Ruwheid op het talud heeft een reducerende invloed op de golfoploop. Deze ruwheid is verschillend per type bekleding. Voor verschillende type bekledingen zijn in verschillende documenten verschillende waarden voorgesteld. Tabel 3 geeft hiervan een overzicht. Voor LR-1985 en LR-1989 zijn de reductiefactoren gebruikt die corresponderen met 1.0 bij een glad ondoorlatend talud. In LR-1989 zijn weliswaar ook coëfficiënten genoemd die een factor 1.1 hoger liggen, maar deze invloed kan tevens verdisconteerd worden door de coëfficiënten uit (3) en (4) een factor 1.1 hoger te nemen (zoals gedaan in Tabel 2). In TR-2000 wordt in tegenstelling tot de andere methodes de reductiefactor voor ruwheid voor een beperkt bereik van de brekerparameter gebruikt waarbij het reducerend effect is verdwenen ($\gamma_f=1$) bij hogere waarden van de brekerparameter. Bij deze aanname is de oploop voor deze niet-brekende golven onafhankelijk van het type bekleding, waardoor bijvoorbeeld de berekende golfoploop bij een doorlatende dubbele laag stortsteen gelijk is aan de berekende golfoploop bij een gladde geasfalteerde taluds.

Bekleding	TAW-1972	LR-1985	LR-1989	TR-2000
glad, ondoorlatend	1	1	1	1
beton	0.9	0.9	0.9	1
gras	0.85-0.9	0.85-0.9	0.85-0.9	1
steenzetting (vlak, dicht)	-	-	-	1
steenzetting (basalt, etc.)	0.85-0.9	0.85-0.9	0.85-0.9	0.9
steenzetting (1/4 van zetting, 0,5*0,5m ² , 9cm boven talud uitstekend)	-	-	-	0.8
1 laag breuksteen (gestort)	-	-	-	0.6
2 lagen breuksteen (gestort)	0.5-0.6	0.5-0.6	0.5-0.6	0.55

Tabel 3 Reductiefactoren γ_f per type bekleding.

Globaal verloop reductiefactoren voor scheve golfaanval

Scheve golfaanval heeft een reducerende invloed op golfoploop. Voor de mate waarin dit gebeurt zijn formuleringen in TAW-1972 (ook gebruikt in LR-1985), LR-1989 en TR-2000 voorgesteld. Deze al eerder genoemde formuleringen kunnen als volgt samengevat worden:

- TAW-1972: $\gamma_\beta = \cos \beta$ voor $0^\circ \leq \beta \leq 45^\circ$.
- LR-1989: $\gamma_\beta = \gamma_B = \cos(\beta - 10^\circ)$ voor $10^\circ \leq \beta \leq 55^\circ$.
- TR-2000: $\gamma_\beta = 1 - 0.0022 |\beta|$ voor $0^\circ \leq \beta \leq 80^\circ$ met voor $80^\circ \leq \beta \leq 110^\circ$ $\gamma_\beta = 0.824$.

De formulering uit TR-2000 is mede gebaseerd om meetgegevens waarbij ook richtingsspreiding rond de gemiddelde hoek van inval is meegenomen. Deze formuleringen

zijn hier toegepast waarbij deze reductiefactor als functie van de hoek van inval is weergegeven in Figuur 3. Gebruik van de formulering uit TAW-1972 geeft over het algemeen de grootste reductie terwijl gebruik van de formulering uit TR-2000 over het algemeen de minste reductie geeft.

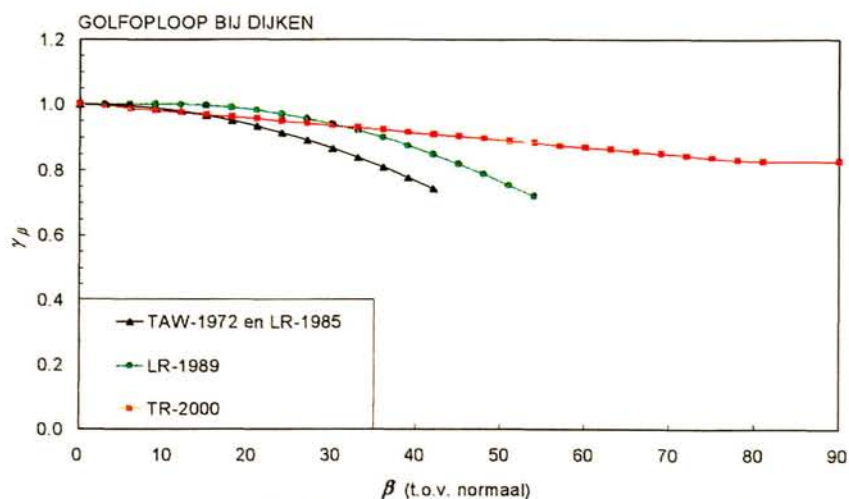
Globaal verloop reductiefactoren voor bermen

Bermen reduceren ook de golfoploop. In TAW-1972, LR-1989 en TR-2000 zijn formuleringen voor de reductie als gevolg van een berm gegeven. De formuleringen genoemd in TAW-1972 en LR-1989 kunnen als volgt geschreven worden voor bermen op de waterlijn bij loodrechte golfaanval:

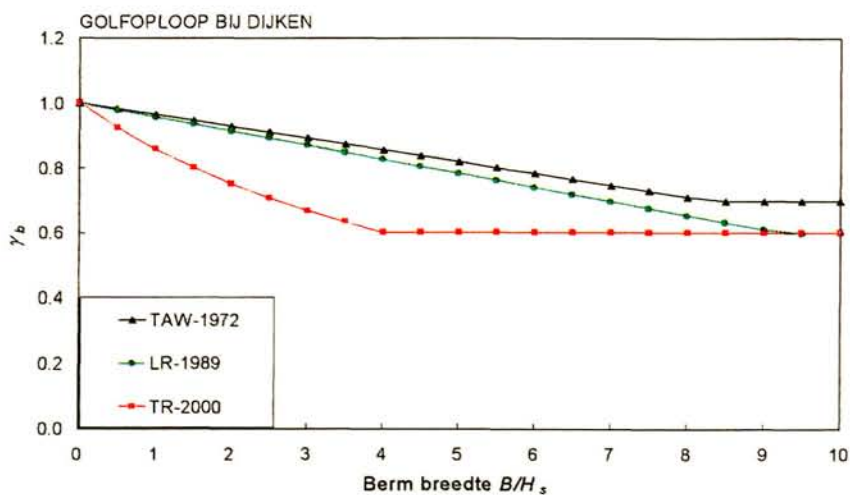
- TAW-1972: $\gamma_b = 1 - B / (2\pi / g T_m^2)$ met $\gamma_b \geq 0.7$.
- LR-1989: $\gamma_b = \gamma_B = 1 - B / (2\pi / g T_m^2)$ met $\gamma_B \geq 0.6$.

In TR-2000 zijn de formuleringen voor γ_b beschreven. Deze zijn gecompliceerd zodat hier volstaan wordt met een verwijzing naar TR-2000. De formulering uit TAW-1972 brengt alleen de breedte van de berm in rekening, de formuleringen uit LR-1989 verdisconteren ook de hoogteligging van de berm, en de methodes uit TR-2000 leiden ook tot verwachtingswaarden voor bermen onder een helling.

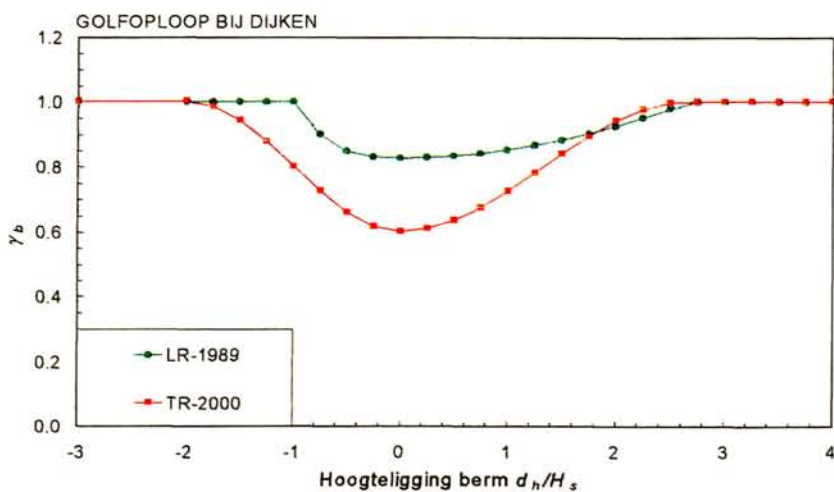
Om de reductiefactoren als gevolg van bermen indicatief weer te geven is één bepaalde situatie genomen waarbij één van de parameters “bermbreedte” of “hoogteligging van de berm” is gevarieerd. Deze situatie betreft een golfhoogte van $H_s = 1$ m, een golfsteilheid van $s_p = 0.0326$ en een talud van 1:3 (met bij TAW-1972 $T_p = 1.05 T_m$ en bij LR-1989 $T_p = 1.15 T_m$). Figuur 4 toont de reductiefactor als gevolg van variaties in de bermbreedte (bij een berm op de waterlijn). Gebruik van de formulering uit TR-2000 geeft duidelijk de grootste reductie in berekende golfoploop. Figuur 5 toont de reductiefactor als gevolg van variaties in de hoogteligging van de berm (bij een bermbreedte van $B = 4$ m). Ook deze reductie is met de formulering uit TR-2000 aanzienlijk groter dan met de formulering uit LR-1989. Bij de formuleringen uit TR-2000 hebben horizontale bermen niet altijd een maximaal effect als zij op de waterlijn liggen. Als de taludhellingen boven en onder de berm onderling verschillen kan de berm met de maximale invloed op de golfoploop bijvoorbeeld ruim onder of boven de waterlijn liggen. TR-2000 geeft ook een methode waarbij de golfoploop ook bij bermen onder een helling berekend kan worden. Het in TR-2000 voorgestelde effect van de hoogteligging van de berm bij een verschillen tussen de taludhelling boven de berm en de taludhelling onder de berm, is niet echt gebaseerd op een grondige validatie op basis van gegevens die de methode al dan niet duidelijk onderbouwt. Dit geldt ook voor het voorgestelde effect van de bermhelling op de golfoploop.



Figuur 3 Indicatief verloop van de reductiefactor voor scheve golfaanval bij golfoploop.



Figuur 4 Indicatief verloop van de reductiefactor voor bermen als gevolg van variaties in de breedte van de berm (berm op waterlijn).



Figuur 5 Indicatief verloop van de reductiefactor voor bermen als gevolg van variaties in de hoogteligging van de berm (vaste bermbreedte).

Omdat bij de methodes voor bermen uit TR-2000 de bermen zowel invloed hebben op de brekerparameter (via de daarin gebruikte helling) als op de reductiefactor zelf, is het zinvol om de totale invloed op de golfoploop te beschouwen en niet alleen de invloed via de reductiefactor zelf. Om de totale invloed van bermen op de berekende golfoploop indicatief weer te geven is één bepaalde situatie genomen waarbij één van de parameters “bermbreedte”, “hoogteligging van de berm” of “helling van de berm” is gevarieerd. Deze situatie betreft een golfhoogte van $H_s=1$ m, een golfsteilheid van $s_p=0.0326$ en een talud beneden de berm van 1:2.5 en een talud van 1:1.5 boven de berm. Omdat de methodes uit TR-2000 gecompliceerd zijn, is bij dit rekenvoorbeeld gebruik gemaakt van het softwareprogramma PC-Overslag. Figuren F3, F4 en F5 in de bijlage ‘Figuren’ geven respectievelijk een indicatie van het verloop van de waarde van golfoploop als functie van de bermbreedte (met de berm op de waterlijn), de hoogteligging van de berm (met een berm breedte van 4 m) en de helling van de berm (waarbij het zeewaartse punt van de berm constant is gebleven) voor de genoemde specifieke situatie.

2.2 Ontwikkeling golfoverslag formuleringsen

In dit hoofdstuk wordt een globaal overzicht van golfoverslagformuleringsen gegeven. Het overzicht richt zich met name op de gemiddelde golfoverslag en niet op parameters die meer extremere golfoverslag karakteriseren (zoals het overslagvolume dat door 2% van de golven wordt overschreden). In TAW-1972 en LR-1985 wordt al aandacht besteed aan overslagdebieten door middel van het presenteren van meetgegevens met bijbehorende beschouwingen. Echter, in deze documenten worden geen bepaalde golfoverslagformuleringsen aanbevolen. Vandaar, dat dit overzicht beperkt is tot formuleringsen voor de gemiddelde golfoverslag uit LR-1989 en TR-2000.

Globaal overzicht golfoverslagformuleringsen

LR-1989 In dit document worden meetgegevens, die ook al in TAW-1972 en LR-1985 in een figuur gepresenteerd waren, geparametriseerd met een formule die als volgt weergegeven kan worden:

$$Q = 0.025 \xi_m \sqrt{\cot \alpha} Y \quad \text{met}$$

$$h_k / H_s = 0.79 \gamma_f \gamma_B \xi_m X \quad \text{en} \quad (7)$$

$$^{10} \log Y = -0.214 X^2 - 0.787 X + 0.103$$

waarbij het gemiddelde overslagdebiet q (in $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) verkregen kan worden uit $Q=q/(gH_s^3)^{0.5}$ en de kruinhoogte h_k de benodigde kruinhoogte boven de waterstand betreft. Voor de invloed van ruwheid wordt

wederom een reductiefactor γ_f voorgesteld en wordt voor gladde ondoorlatende bekledingen de reductiefactor $\gamma_f = 1.1$ gebruikt (feitelijk een verhoging). Voor de reductiefactoren voor scheve golfaanval, bermen en ruwheid per type bekleding worden dezelfde waarden als voor golfoploop (zie ook Tabel 3) aanbevolen zolang het overslagdebiet beperkt blijft tot minder dan 10 l/s/m.

TR-2000

De algemene golfoverslagformulering uit dit document is te schrijven als:

$$Q^* = c_a \exp(-c_b R^*) \quad (8)$$

waarin voor het (dimensieloze) overslagdebiet Q^* en de (dimensieloze) kruinhoogte R^* de volgende formuleringen zijn voorgesteld:

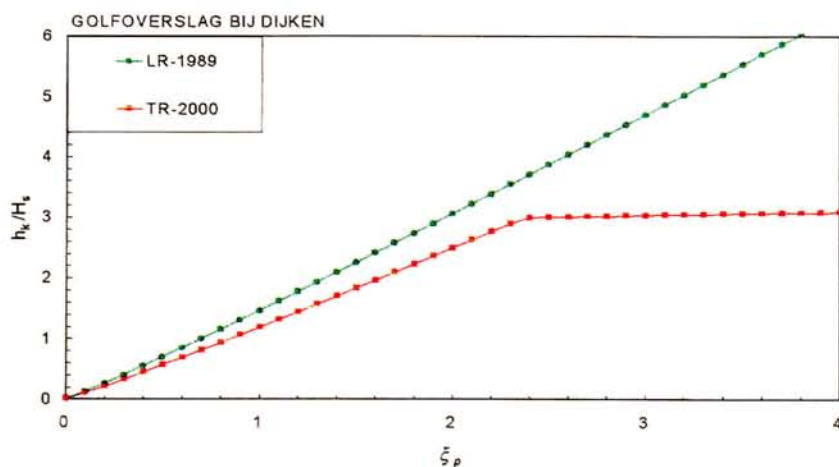
$$\begin{aligned} Q^* &= Q \sqrt{\tan \alpha} / (\gamma_b \xi_{op}) \\ R^* &= h_k / (\gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_v H_s \xi_{op}) \end{aligned} \quad (9)$$

met $Q = q / (g H_s^3)^{0.5}$ en $c_a = 0.06$ and $c_b = 4.7$ (voor de lagere waarden van de brekerparameter) en met een maximum bij:

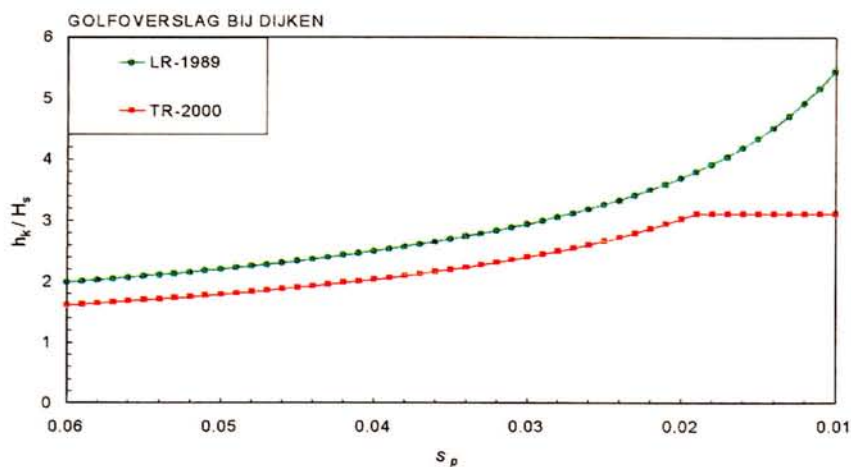
$$\begin{aligned} Q^* &= Q \\ R^* &= h_k / (\gamma_f \gamma_\beta H_s) \end{aligned} \quad (10)$$

met $c_a = 0.2$ en $c_b = 2.3$ (voor hogere waarden van de brekerparameter). De coëfficiënten c_b in beide takken van deze golfoverslagformulering (8) geven niet zoals in LR-1989 een beschrijving van de verwachtingswaarde voor de golfoverslag (met $c_b = 5.2$ en $c_b = 2.6$ in (8) in plaats van 4.7 en 2.3) maar bevatten enige veiligheid gebaseerd op de verschillen tussen de formuleringen en de gebruikte meetgegevens. De invloed van bermen en ruwheid wordt op een zelfde wijze in rekening gebracht als bij golfoploop. Voor de invloed van scheve golfaanval wordt wederom een reductiefactor γ_β voorgesteld maar met een andere afhankelijkheid van de hoek van inval: $\gamma_\beta = 1 - 0.0033 |\beta|$ voor $0^\circ \leq \beta \leq 80^\circ$. Voor $80^\circ \leq \beta \leq 110^\circ$ wordt de maximale reductie uit deze formule gebruikt in combinatie met vermenigvuldigingsfactoren voor de golfhogte en de golfperiode. Voor nog schevere golfaanval wordt de golfoverslag op $q=0$ gesteld.

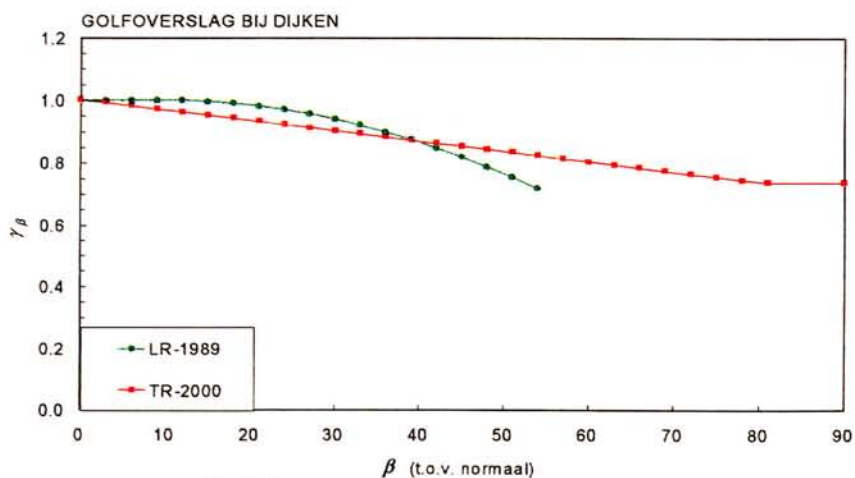
Voor het grafisch weergeven van het indicatieve verloop van de twee formuleringen voor golfoverslag is de benodigde kruinhoogte (verwachtingswaarden) bij een vast overslagdebiet van $q = 1$ l/s/m gegeven als functie van de brekerparameter en als functie



Figuur 6 Indicatief verloop van golfoverslagformuleringen als functie van de brekerparameter op basis van de piekperiode (door middel van variatie in taludhellingen bij een constante golfsteilheid).



Figuur 7 Indicatief verloop van golfploopformuleringen als functie van de golfsteilheid op basis van de piekperiode (door middel van variatie in golfsteilheid bij een vaste taludhelling).



Figuur 8 Indicatief verloop van de reductiefactor voor scheve golfaanval bij golfoverslag.

van de golfsteilheid, beide op basis van de piekperiode. De formulering uit LR-1989 is omgerekend van *gemiddelde* golfperiode naar de *piekperiode* met de verhouding $T_p = 1.15 T_m$ (smal spectrum), welke verhouding ook in LR-1989 gebruikt is.

Bij een golfhoogte van $H_s = 1$ m en een golfsteilheid van $s_p = 0.0326$ aan de teen van de dijk is de variatie in brekerparameter gerealiseerd door middel van variaties in de taludhellingen. Figuur 6 geeft het indicatieve verloop van de relatieve (dimensieloze) kruinhoogte als functie van de brekerparameter. De formulering uit LR-1989 geeft een stijgend verloop te zien terwijl de formuleringen uit TR-2000 een (abrupte) overgang geven naar een maximale relatieve kruinhoogte bij een bepaalde waarde van de brekerparameter. De benodigde kruinhoogte op basis van LR-1989 is hoger dan de op basis van TR-2000 berekende kruinhoogte, waarbij de verschillen groot zijn voor hogere waarden van de brekerparameter.

Een tweede indicatie van het verloop van verschillen tussen de golfoverslagformuleringen wordt gegeven, nu niet met een vaste golfsteilheid bij variërende taludhellingen, maar met een vaste taludhelling ($\cot \alpha = 3$) en variërende golfsteilheid. Figuur 7 geeft hiervan het resultaat. De formuleringen uit TR-2000 geven ook bij het verloop als functie van de golfsteilheid een geknikt verloop. Bij de lage golfsteilheden zijn de verschillen groot. Voor deze situatie geeft het vergelijken van de formuleringen uit LR-1989 en TR-2000 bij een golfhoogte van $H_s = 1$ m een verschil van 2.3 m in de benodigde kruinhoogte bij een golfsteilheid van $s_p = 0.01$. Voor een lagere golfsteilheid, of voor een steilere talud, of voor een lager overslagdebiet, of voor een grotere golfhoogte, is het verschil groter.

De formuleringen voor de reductiefactoren voor bermen en ruwheid zijn voor golfoverslag gelijk aan die voor golfoploop. Voor scheve golfaanval wordt in TR-2000 een andere reductiefactor gegeven voor golfoverslag. Figuur 8 toont de invloed van scheve golfaanval voor golfoverslag zoals verkregen met LR-1989 en TR-2000.

2.3 Aandachtspunten

Naar aanleiding van het doornemen van verschillende documenten met golfoploop en golfoverslag formuleringen komen een aantal aandachtspunten naar voren die betrekking hebben op achtergronden bij het technische rapport TR-2000 (versie september 2000). Een selectie daarvan is hier puntsgewijs weergegeven:

Golfoploop

- Een belangrijke verbetering in formules voor de berekening van golfoploop ten opzichte van de Delftse formule betreft de invoering van de afhankelijkheid van de *brekerparameter* (TAW-1972). De voortgang daarna betreft voornamelijk het

kwantificeren van de *invloed van diverse aspecten* zoals ruwheid, scheve golfaanval en bermen (met behulp van zogenaamde “invloedsfactoren”).

- Voor de mate van afhankelijkheid van de brekerparameter zijn sinds TAW-1972 diverse voorstellen gedaan. Daar waar in TAW-1972 de afhankelijkheid nog geheel *lineair* verondersteld werd, zijn daarna andere voorstellen (LR-1985, TR-2000) gedaan die met name het (abrupt) *begrenzen van de maximale (dimensieloze) golfploop* voor hogere waarden van de brekerparameter betreffen. Ook een middenweg is voorgesteld waarbij de golfploop voor lagere waarden van de brekerparameter lineair wordt verondersteld en voor hogere waarden vloeiend richting een begrenzing verloopt. Voor lagere waarden van de brekerparameter wordt steeds de afhankelijkheid van de brekerparameter lineair verondersteld maar voor de mate waarin dit gebeurt worden vaak *verschillende coëfficiënten* voorgesteld. Het beperken van de (dimensieloze) golfploop voor hogere waarden van de brekerparameter door het toepassen van TR-2000 leidt in het algemeen tot lagere golfploop dan op basis van voorgaande formules. Er is aan de hand van modelonderzoek (De Waal en Van der Meer, 1992; Van Gent, 1999-b,c) aanleiding te veronderstellen dat de berekende golfploop voor situaties met lage golfsteilheden en gladde rechte taluds op basis van TAW-1972 gemiddeld aan de *hoge kant* is en dat de berekende golfploop op basis van TR-2000 aan de *lage kant* kan zijn.
- Voor het omgaan met de invloed van *bermen* is veel aandacht besteed aan het vinden van manieren om voor allerlei geometrieën van de berm toch tot een golfploop te komen met de algemene golfploopformulering in TR-2000. Er is aanleiding te veronderstellen dat de nauwkeurigheid van de berekende golfploop bij dijken zonder bermen hoger is dan voor dijken met bermen. Dit is ondermeer het geval doordat de reductiefactor voor bermen in het algemeen extra spreiding rond een gemiddelde trend veroorzaakt. De mate waarin dit het geval is zou nog kunnen blijken uit een validatie van de uiteindelijk in TR-2000 gekozen manier voor het omgaan met bermen.
- De coëfficiënten in de golfploopformuleringen uit TR-2000 zijn bepaald aan de hand van meetgegevens. Deze coëfficiënten verwaarlozen de oploop van dunne watertongen omdat in de kleinschalige metingen waterlagen dunner dan 2.5 mm niet direct gemeten zijn (Van der Meer, 1997; Van Gent, 1999-b). Voor zeedijken (schaal orde 1:40) betekent dit bijvoorbeeld dat waterlongen van orde 10 cm verwaarloosd worden. Uit een schatting, mede gebaseerd op een vergelijking met veldmetingen, blijkt dat het oplooppniveau inclusief deze watertong gemiddeld ongeveer 10% hoger is.

Golfverslag

- De golfverslag formuleringen uit TR-2000 lijken over het algemeen golfverslag voor situaties met relatief *diep* water aan de teen van de dijk en een standaard enkeltoppig spectrum goed te berekenen. Voor situaties waarbij brekende golven optreden door

ondiep water voor de teen van de dijk, of brekende golven op de vooroever, is echter aanleiding te veronderstellen dat de gemiddelde debieten mogelijk *onderschat* worden (uit metingen zijn gevallen bekend waarbij de werkelijke debieten meer dan een factor 100 groter zijn; Van Gent, 1999-c; Oumeraci *et al*, 2000). Voor de extreme overslagdebieten, in TR-2000 vertegenwoordigd door de parameter “volume per golf dat door 2% van de golven wordt overschreden”, zijn er aanwijzingen dat deze mogelijk *overschat* worden voor situaties met bijvoorbeeld ondiep water aan de teen (conform voor deze situaties afwijkende golfhoogteverdelingen is het aannemelijk dat ook de golfoverslagverdelingen voor deze situaties afwijken). Deze parameter die een maat geeft voor de *extreme* golfoverslag is relatief minder onderzocht dan de *gemiddelde* golfoverslag. Het is aannemelijk dat de nauwkeurigheid van de berekende *gemiddelde* golfoverslag relatief groot is ten opzichte van de nauwkeurigheid van de berekende *extreme* golfoverslag.

- Voor golfoverslag worden in TR-2000 dezelfde invloedsfactoren voor ruwheid en bermen gebruikt als voor golfoploop. Dit lijkt zeker voor wat betreft de ruwheid een redelijke benadering zolang overslagdebieten berekend worden voor situaties waarbij de kruin in de buurt van de golfoploop ($z_{2\%}$) ligt. Zoals al in TAW-1972 is beschreven is het echter nog de vraag of voor relatief lage of hoge dijken de ruwheid voor golfoverslag benaderd kan worden als zijnde onafhankelijk van de dijkhoogte. Immers voor hogere dijken zijn de ruwheidselementen over een veel langere lengte aanwezig en effectief dan voor lage dijken en zou men dus ook *minder reductie* door ruwheid bij *lage* dijken verwachten. Dit is niet het geval bij de in TR-2000 beschreven methode. Er is aanleiding te veronderstellen dat de nauwkeurigheid van de invloedsfactor voor ruwheid bij dijken met een kruin in de buurt van $z_{2\%}$ relatief groot is ten opzichte van de nauwkeurigheid voor dijken met een relatief lage kruin.

Validatie, betrouwbaarheid en geldigheidsgebieden

- In TAW-1972 is uitvoering beschreven op welke gegevens bepaalde methodes gebaseerd waren, waarmee inzicht wordt verkregen in de mate van betrouwbaarheid van de daarmee te verkrijgen golfoploop of golfoverslag. Met TR-2000 kan voor een zeer groot bereik van mogelijke situaties golfoploop en golfoverslag berekend worden maar wordt beperkt inzicht gegeven in de gegevens die daar aan ten grondslag liggen. Aan diverse deel-methodes liggen ook geen gedocumenteerde gegevens ten grondslag en zijn de deel-methodes ook niet echt gevalideerd voor het beoogde toepassingsgebied. Dit geldt met name voor de geometrische methoden voor het in rekening brengen van de invloeden van “dubbeltoppige” spectra en “platgeslagen” spectra, de invloed van bermen, de zogenaamde interpolatie procedures, en de berekening van extreme golfoverslagvolumes ($V_{2\%}$). Met gegevens die in de periode 1998-2000 beschikbaar zijn gekomen is duidelijk geworden dat met TR-2000 verkregen waarden voor bepaalde omstandigheden tot aanzienlijk onveilige situaties *kunnen* leiden (lagere berekende

kruinhoogte dan in de werkelijkheid benodigde kruinhoogte). Voor andere situaties is ook het omgekeerde mogelijk. Onderschattingen van de benodigde kruinhoogtes kunnen met name voorkomen bij situaties met lage golfsteilheden die relatief vaak optreden in kustgebieden.

- De in TR-2000 voorgestelde formules en methoden zijn onvermijdelijk gebaseerd geweest op een beperkt bereik van beschikbare kwantitatieve gegevens. In TR-2000 wordt de term *toepassingsgebieden* gehanteerd maar dit beslaat duidelijk gebieden buiten het bereik van beschikbare gegevens. Het “toepassingsgebied” is dus duidelijk groter gedefinieerd dan het geldigheidsgebied. Het gebruik van formuleringen buiten het geldigheidsgebied (daar waar de formuleringen niet meer aantoonbaar nauwkeurig zijn) wordt hiermee door TR-2000 gestimuleerd. Om toch tot een betrouwbare voorspelling van golfoploop of golfoverslag te komen wanneer dit niet realiseerbaar is binnen de *geldigheidsgebieden* van TR-2000, verdient het wellicht de voorkeur gebruik te maken van resultaten uit fysisch modelonderzoek voor de betreffende specifieke situatie. Als gelijksoortige situaties reeds eerder onderzocht zouden zijn, zou gebruik gemaakt kunnen worden van zulke resultaten om toch tot een voorspelling te komen.
- De meeste methodes voor het in rekening brengen van de invloed van diverse aspecten zoals scheve golfaanval, ruwheid of bermen zijn verkregen door één van deze aspecten apart te beschouwen. Wanneer *meerdere van deze aspecten tegelijkertijd* een rol spelen worden de invloeden onafhankelijk van elkaar in rekening gebracht. Of bijvoorbeeld de invloed van scheve golfaanval inderdaad onafhankelijk is van de ruwheid of het al dan niet aanwezig zijn van een berm, is niet of nauwelijks onderzocht. Verwacht mag worden dat voor situaties waar meerdere invloedsfactoren een rol spelen de verschillen tussen berekeningen op basis van TR-2000 en de werkelijkheid over het algemeen toenemen. In TR-2000 wordt een maximum verbonden aan de toe te passen totale reductie als gevolg van een combinatie van meerdere invloedsfactoren. Vooral wanneer voor een specifieke situatie dit maximum bereikt wordt, is het zinvol om op andere wijze na te gaan of de berekende reductie inderdaad correct is, of dat er ruimte is voor verdere optimalisatie.

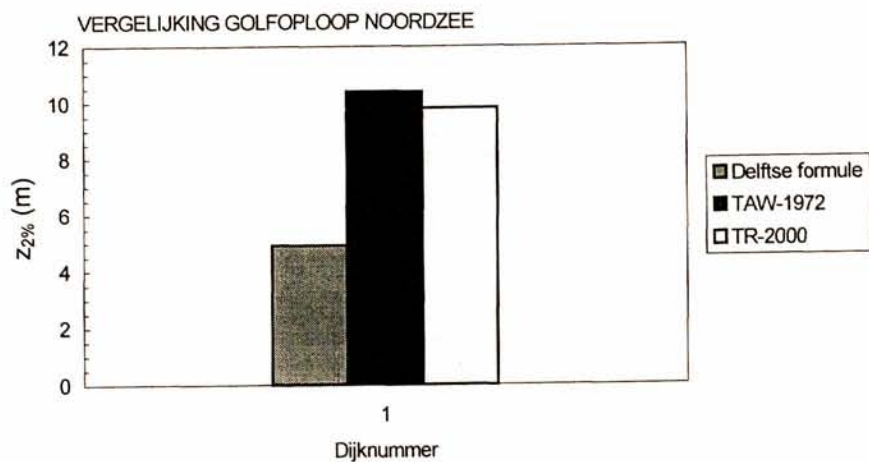
3 Voorbeeldberekeningen

Voor een aantal dijkprofielen (Figuren F6-1 tot F6-17 in de Bijlage “Figuren”) uit diverse watersystemen worden met diverse golfploopformuleringen uit Hoofdstuk 2 voorbeeldberekeningen gegeven om inzicht te geven in de onderlinge verschillen. De hydraulische randvoorwaarden die in deze voorbeeldberekeningen zijn gebruikt, zijn indicatief en zeker niet noodzakelijk de voor de betreffende dijken vastgestelde randvoorwaarden. Ook wordt in alle gevallen verondersteld dat het golfspectrum aan de teen van de dijk een standaard vorm heeft (en dus ook enkeltoppig) met een piekperiode die gelijk is aan die op diep water. Dit is naar alle waarschijnlijkheid voor een groot deel van de betreffende dijken niet het geval, waardoor deze voorbeeldberekeningen uiteindelijk niet direct te relateren zijn aan de betreffende dijken. Wel wordt het doel bereikt om aan de hand van deze voorbeelden inzicht te geven in de verschillen tussen de diverse formuleringen.

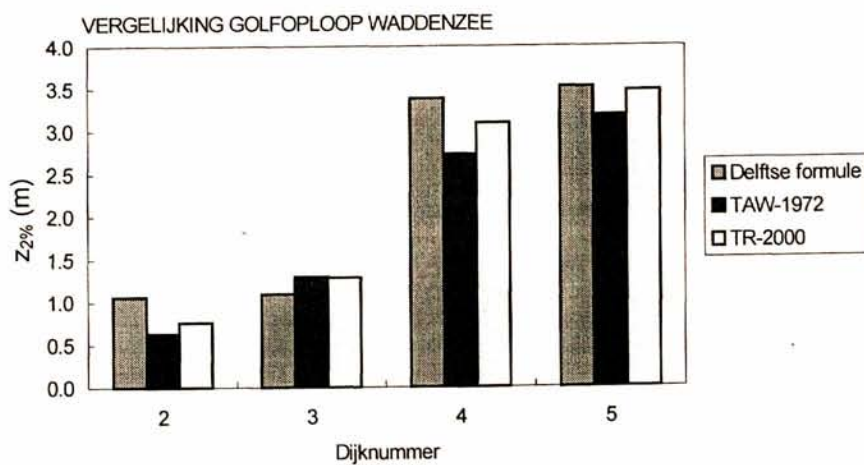
In de Bijlage “Tabellen” zijn in Tabel T1 de gebruikte hydraulische randvoorwaarden per dijkprofiel gegeven. Het betreft hier allemaal situaties waarbij de brekerparameter kleiner is dan 3. Zoals in Hoofdstuk 2 is beschreven kunnen de onderlinge verschillen relatief groot zijn voor hogere waarden van de brekerparameter. Als andere hydraulische randvoorwaarden gebruikt zouden worden, met lagere golfsteilheden, kunnen de verschillen groter worden dan in de hier gepresenteerde voorbeelden.

De formuleringen die in deze voorbeeldberekeningen gebruikt zijn, betreffen de Delftse formule, TAW-1972 en TR-2000. De formuleringen uit de leidraden LR-1985 en LR-1989 (voor rivieren) zijn hier buiten beschouwing gelaten omdat in dit hoofdstuk de vergelijking primair gericht is op de verschillen tussen TR-2000 enerzijds en de Delftse formule en TAW-1972 anderzijds. In TAW-1972 wordt de *gemiddelde* golfperiode T_m gebruikt terwijl in TR-2000 de *piekperiode* T_p is gebruikt. De indicatieve randvoorwaarden die zijn gebruikt, zijn gebaseerd op de *piekperiode*. De gemiddelde periode is verkregen door een vaste omrekeningsfactor tussen deze twee periodematen te kiezen ($T_p = 1.28 T_m$). Deze factor is in het algemeen niet constant maar hangt bijvoorbeeld af van het type golfspectrum, dat per situatie anders is. Voor deze indicatieve berekeningen voert het echter te ver om per situatie de hydraulische randvoorwaarden inclusief het golfspectrum te bepalen.

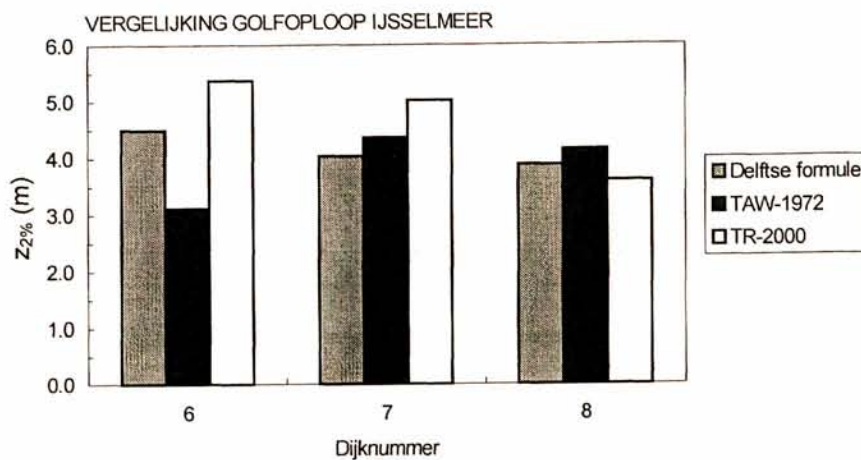
In TAW-1972 is geen methode aanbevolen voor situaties met bermen die niet op de waterlijn liggen of bermen die onder een helling liggen. Bij het gebruik van de Delftse formule en TAW-1972 is de methode van Saville (1957), die ook in TAW-1972 is genoemd, toegepast voor situaties met bermen. Bij het gebruik van de Delftse formule en TAW-1972 is niet zoals in TR-2000 enige veiligheid in rekening gebracht voor het verdisconteren van verschillen tussen de formuleringen en de meetgegevens waar de formuleringen op gebaseerd zijn. Bij de berekeningen is geen ruwheidsreductie in rekening gebracht.



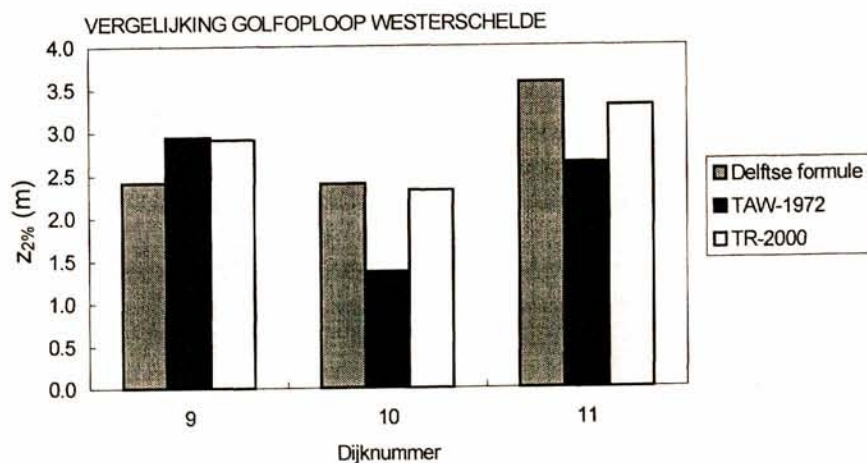
Figuur 9 Verschillen in berekende golfoploop Noordzee.



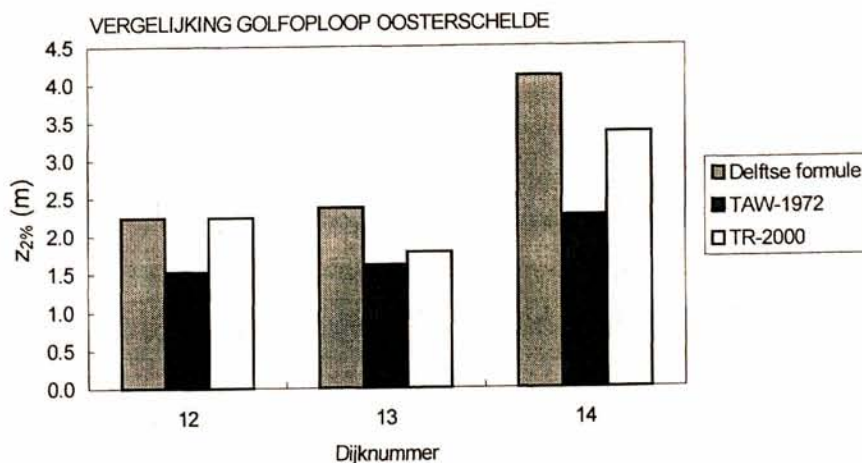
Figuur 10 Verschillen in berekende golfoploop Waddenzee.



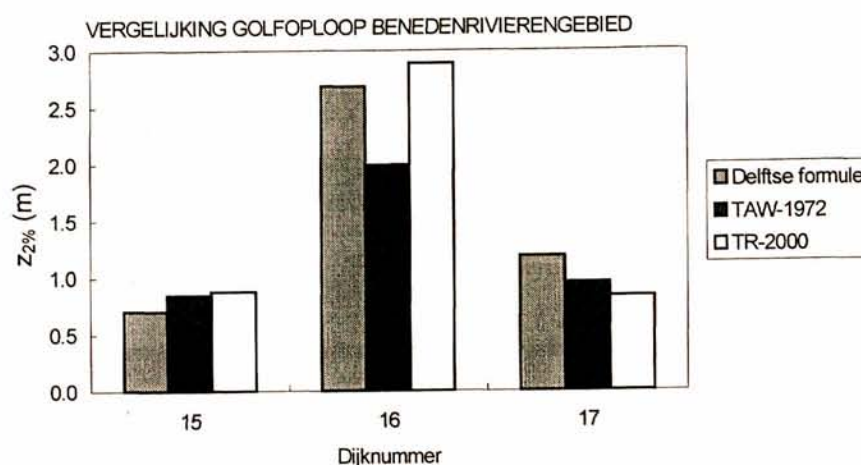
Figuur 11 Verschillen in berekende golfoploop IJsselmeer.



Figuur 12 Verschillen in berekende golfoploop Westerschelde.



Figuur 13 Verschillen in berekende golfoploop Oosterschelde.



Figuur 14 Verschillen in berekende golfoploop Benedenrivierengebied.

Tabel 4 geeft een overzicht van de procentuele verschillen tussen de berekende golfoploop met verschillende formuleringen. Figuren 9-14 geven staafdiagrammen te zien met de absolute waarden van de met de verschillende formuleringen berekende golfoploop.

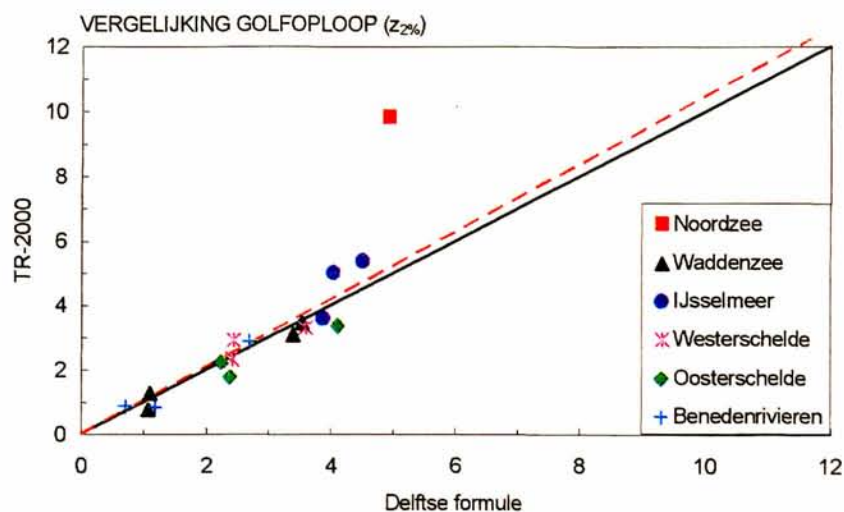
Het maximale verschil in berekende golfoploop tussen de Delftse formule en TR-2000 is 4.9 m. Dit is 99% van de met de Delftse formule berekende golfoploop voor de betreffende situatie (TR-2000 geeft een twee maal hogere golfoploop). Het gemiddelde procentuele verschil is 5%, waarbij TR-2000 voor bepaalde situaties hogere golfoploop geeft en voor andere situaties lagere golfoploop (zie ook Figuur 15). De standaard afwijking is 30%.

Het maximale verschil in berekende golfoploop tussen TR-1972 en TR-2000 is 2.3 m. Dit is 73% van de met TAW-1972 berekende golfoploop voor de betreffende situatie. Het gemiddelde procentuele verschil is 20%, waarbij TR-2000 voor meer situaties hogere dan lagere golfoploop geeft dan TAW-1972 (zie ook Figuur 16). De standaard afwijking is 27%.

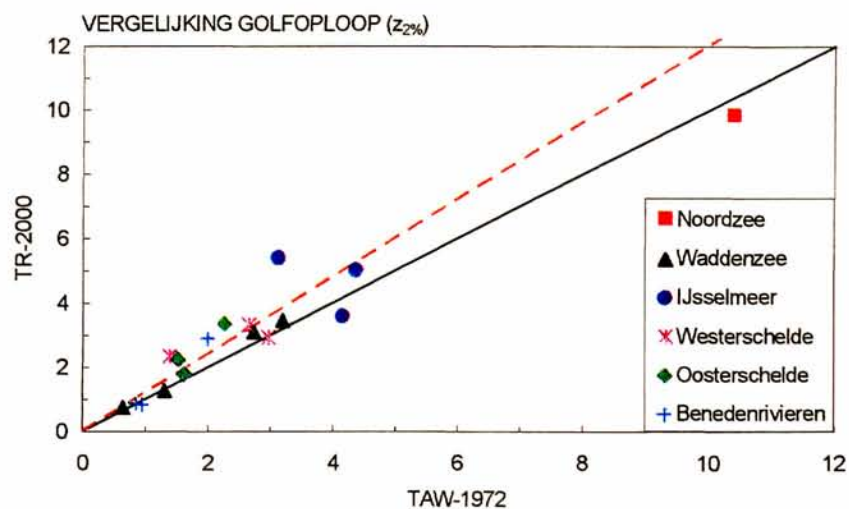
Watersysteem	Aantal dijken	Verskil TR-2000 en Delftse form.			Verskil TR-2000 en TAW-1972		
		gemiddeld	standaard afwijking	maximaal	gemiddeld	standaard afwijking	maximaal
Noordzee	1	+99	-	+99	-6	-	-6
Waddenzee	4	-5	19	-28	+11	9	+21
IJsselmeer	3	+12	17	+25	+25	44	+73
Westerschelde	3	+3	15	+21	+31	36	+70
Oosterschelde	3	-14	13	-25	+35	22	+49
Benedenrivieren	3	+1	28	-30	+12	30	+45
Totaal	17	+5	30	+99	+20	27	+73

Tabel 4 Verschillen tussen berekende golfoplooppniveaus (in % waarbij + betekent dat TR-2000 hogere waarden geeft).

De met TR-2000 berekende golfoploop is voor de meer situaties hoger dan lager in vergelijking met TAW-1972. De verschillen tussen TAW-1972 en TR-2000 worden met name veroorzaakt door de hogere waarde van de coëfficiënt die de mate van afhankelijkheid van de brekerparameter aangeeft (1.6 in TR-2000 ten opzichte van 1.45 in TAW-1972; zie ook Hoofdstuk 2) en de verschillende manieren waarop bermen in rekening worden gebracht. Bij Dijknummer 1 (Noordzee) is de lagere golfoploop bij TR-2000 met name het gevolg van verschillende manieren van het in rekening brengen van de invloed van de berm; bij Dijknummer 6 (IJsselmeer) is de hogere golfoploop bij TR-2000 het gevolg van zowel de genoemde coëfficiënt, de manier van omgaan met de berm en de formulering voor het in rekening brengen van de hoek van inval. Bijna alle situaties met bermen betreffen bermen onder een helling. Mede omdat de in TR-2000 gebruikte methode niet gevalideerd is voor bermen onder een helling is niet aan te geven welk van de methodes de werkelijke golfoploop bij de betreffende omstandigheden het best benadert. Wel is duidelijk dat de verschillen in golfoploop vrij groot kunnen zijn.



Figuur 15 Vergelijking tussen de Delftse formule en TR-2000 (de onderbroken lijn geeft het gemiddelde verschil aan, de doorgetrokken lijn geeft de lijn aan wanneer er geen verschillen zouden zijn).



Figuur 16 Vergelijking tussen TAW-1972 en TR-2000 (de onderbroken lijn geeft het gemiddelde verschil aan, de doorgetrokken lijn geeft de lijn aan wanneer er geen verschillen zouden zijn).

4 Bevindingen en aanbevelingen

Een aantal bevindingen en aanbevelingen betreffende achtergronden bij het technische rapport “Golfloop en golfoverslag bij dijken” (versie september 2000, hierna “TR-2000”) zijn hier puntsgewijs weergegeven:

- TR-2000 is er in geslaagd om formuleringen op te stellen die golfloop en golfoverslag waarden geven voor een zeer groot bereik van de relevante parameters. Binnen dit bereik zijn de formuleringen continu maar zijn de formuleringen uit TR-2000 slechts beperkt gevalideerd. Hierdoor zullen er wellicht per concrete situatie discussies ontstaan over het al dan niet geldig zijn van de uitkomsten van TR-2000 of andere formuleringen. Daarbij kunnen situaties ontstaan waarbij op basis van de ene formulering wel een aanpassing van het dijkprofiel wordt verlangd terwijl gebruik van een andere formulering niet tot een aanpassing zou leiden. Vooral voor situaties waarbij TR-2000 *indicatieve* waarden geeft (zie ook het derde punt in dit hoofdstuk) is het aanbevelenswaardig om de formuleringen verder te onderbouwen of aan te passen.
- Belangrijke *veranderingen* in de golfloop- en golfoverslagformuleringen van TR-2000 ten opzichte van de formuleringen uit andere beschouwde documenten betreffen ondermeer:
 - a) het gebruik van de *piekperiode* in TR-2000 in plaats van de voorheen ook gebruikelijke *gemiddelde* golfperiode,
 - b) de aanname in TR-2000 dat de golfloop en golfoverslag voor lage golfsteilheden (hoge waarden van de brekerparameter) *onafhankelijk* wordt van de golfsteilheid,
 - c) dat met name voor lage golfsteilheden de verwachtingswaarde van de benodigde kruinhoogte op basis van TR-2000 veelal *lager* is dan op basis van voorgaande formuleringen (voor gladde rechte taluds).Daarnaast zijn de formuleringen en methodes voor de invloed van scheve golfaanval, bermen en ruwheid veranderd.
- Belangrijke *uitbreidingen* in de formuleringen en methodes beschreven in TR-2000 betreffen met name het veel grotere bereik van type dijkprofielen. In het algemeen is het beoogde toepassingsgebied voor de formuleringen en methodes uit TR-2000 erg ruim. Voor een deel van dit toepassingsgebied zijn de formuleringen en methodes aantoonbaar gevalideerd en geldig. De geldigheid is met name (nog) niet aangetoond voor situaties met bermen (met name bermen onder een helling en bermen met verschillende beneden- en boventaluds), of situaties met ondiep water aan de teen van de dijk (zoals situaties met brekende golven op de vooroever), of situaties met een niet-standaard enkeltoppig golfspectrum aan de teen van de dijk, of situaties met combinaties van twee of meerdere

invloedsfactoren zoals scheve golfaanval, bermen en ruwheid. Wel kunnen met TR-2000 ook voor deze situaties indicatieve kruinhoogtes verkregen worden, die als startpunt kunnen dienen voor de werkelijke kwantificering van de benodigde kruinhoogte. Direct gebruik van *indicatieve* kruinhoogtes kan leiden tot onveilige situaties.

- Belangrijk aanvullend *aandachtspunt* bij het toepassingsgebied met rivier-, meer- en zeedijken, is dat voor situaties waarbij het golfveld vervormt onder de invloed van de bodem (ondiepe voorlanden) aanzienlijke verschillen kunnen ontstaan tussen de op basis van TR-2000 berekende waarden en de werkelijkheid. Dit aspect wordt ook onderkend in TR-2000. Uit een inventarisatie van Rijkswaterstaat (Kamsteeg *et al*, 1998) blijkt dat vrijwel de gehele Nederlandse kust en de grote meren gekarakteriseerd kunnen worden als watersystemen met ondiepe voorlanden.
- Voor een aantal bestaande dijkprofielen bij diverse watersystemen zijn indicatieve voorbeeldberekeningen uitgevoerd. Deze berekeningen geven aan dat de verschillen tussen de met diverse formuleringen berekende golfoploop vrij groot kunnen zijn.

Referenties

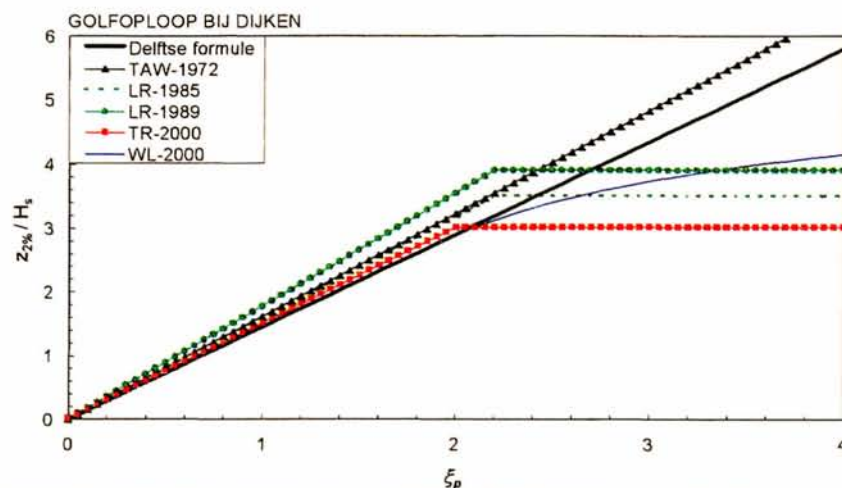
- Battjes, J.A. (1969), *Discussion of paper by J.N. Svašek: "Statistical evaluation of wave conditions in a deltaic area"*, Proc. Symp. "Research on wave action" at Delft Hydraulics, Vol. 1, Paper 1.
- Battjes, J.A. (1970), *Een oude golfploopformule gezien in het licht van moderne theorieën*, De Ingenieur, jaargang 82, nr. 45, 6 november 1970, pp.B169-B172.
- Battjes, J.A. (1974), *Computation of set-up, longshore currents, runup and overtopping due to wind-generated waves*, Ph.D.-thesis en Comm. On Hydraulics, Dept. of Civil Engineering, Delft University of Technology, Rapport 74-2.
- De Waal, J.P. and J.W. van der Meer (1992), *Wave run-up and overtopping on coastal structures*, ASCE, Proc. International Conference on Coastal Engineering - ICCE 1992, Vol.2, pp.1758-1771, Venice.
- Hunt, I.A. (1959), *Design of seawalls and breakwaters*, ASCE proceedings, Vol.85, no. WW 3 sept 1959, pp.123-152.
- Iribarren, C.R. and C. Nogales (1949), *Protection des ports*, Section II, Comm. 17th Int. Nav. Congress, pp-31-80, Lisbon.
- Kamsteeg, A.T., D. Beyer en J.P., de Waal (1998), *Inventarisatie van ondiepe voorlanden in Nederland*, Rijkswaterstaat Rapport.
- LR-1985, *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 1 bovenrivierengebied*, ISBN 90-12-05169-X, TAW Rapport 1985, 's-Gravenhage.
- LR-1989, *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 2 benedenrivierengebied*, ISBN 90-212-3168-9, TAW Rapport 1989, 's-Gravenhage.
- Oumeraci, H., H. Schüttrumpf, W. Sauer, J. Möller, T. Droste (2000), *Physical model tests on wave overtopping with natural sea states*, Report No. 852, Leichtweiss-Institut für Wasserbau (LWI), June 2000. Braunschweig.
- Saville, T. (1957), *Wave run-up on composite slopes*, Proc. 6th Conf. on Coastal Engineering, Council of Wave research, Chapter 41, pp.691-699.
- TAW-1972, *Golfploop en golfoverslag*, door J.A. Battjes, TAW Rapport januari 1972, 's-Gravenhage.
- TR-2000, *Golfploop en golfoverslag bij dijken*, concept rapport A-99-32, versie september 2000.
- Van der Meer, J.W. (1997), *Golfploop en golfoverslag bij dijken*, Delft Hydraulics Rapport H2458/H3051, Juni 1997, Delft.
- Van Gent, M.R.A. (1999-a), *Wave run-up and wave overtopping for double-peaked wave energy spectra*, Delft Hydraulics Rapport H3351, Januari 1999, Delft.
- Van Gent, M.R.A. (1999-b), *Physical model investigations on coastal structures with shallow foreshores; 2D model tests on the Petten Sea-defence*, MAST-OPTICREST rapport and Delft Hydraulics Rapport H3129, Juli 1999, Delft.
- Van Gent, M.R.A. (1999-c), *Physical model investigations on coastal structures with shallow foreshores; 2D model tests with single and double-peaked wave energy spectra*, Delft Hydraulics Rapport H3608, December 1999, Delft.
- Van Gent, M.R.A. (2000-a), *Wave run-up on dikes with shallow foreshores*, ASCE, Proc. International Conference on Coastal Engineering - ICCE 2000, Sydney.
- Van Gent, M.R.A. (2000-b), *Wave run-up on dikes with berms*, Delft Hydraulics Rapport H3205, September 2000, Delft.
- Van Oorschot, J.H. and K. d'Angremond (1968), *The effect of wave energy spectra on wave run-up*, Proc. ICCE'68, Chapter 57, pp.886-900, London.
- Wassing, F. (1957), *Model investigations of wave run-up on dikes carried out in the Netherlands during the past twenty years*, ASCE, Proc. 6th Conference on Coastal Engineering, Part IV, pp.700-714.

Tabellen

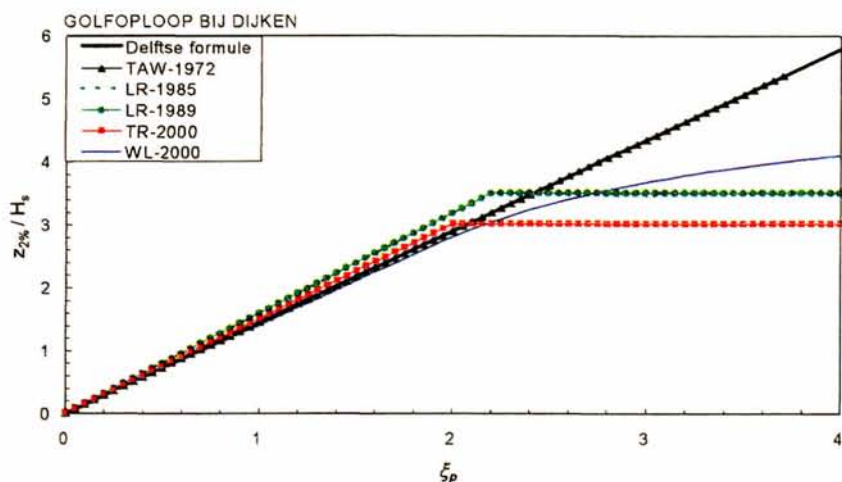
Watersysteem	Dijk nummer	waterstand t.o.v. NAP (m)	H_s (m)	T_p (m)	β (t.o.v. loodrechte golfaanval)	Golfploop $z_{2\%}$		
						Delftse formule	TAW-1972	TR-2000
Noordzee	1	4.70	3.00	14.00	0	4.92	10.40	9.81
Waddenzee	2	5.85	0.80	2.90	19	1.06	0.63	0.76
	3	4.85	0.90	5.00	0	1.09	1.29	1.28
	4	4.95	2.15	5.30	0	3.38	2.72	3.09
	5	4.70	2.20	5.90	7	3.52	3.18	3.47
IJsselmeer	6	1.60	2.40	7.00	60	4.50	3.11	5.38
	7	0.40	1.60	6.00	0	4.02	4.35	5.01
	8	0.40	1.20	6.00	30	3.87	4.13	3.59
Westerschelde	9	4.80	1.40	6.20	10	2.41	2.94	2.91
	10	5.40	1.50	5.00	50	2.39	1.37	2.32
	11	6.00	1.80	6.40	75	3.57	2.63	3.30
Oosterschelde	12	3.45	1.80	5.70	60	2.24	1.52	2.24
	13	3.85	1.40	5.50	85	2.37	1.61	1.78
	14	3.45	2.10	5.50	45	4.11	2.26	3.36
Benedenrivieren	15	2.45	0.31	4.14	53	0.70	0.84	0.88
	16	2.50	1.37	5.80	45	2.68	1.99	2.89
	17	3.00	0.50	2.50	0	1.19	0.95	0.83

Tabel T1 Voorbeeldberekeningen: gebruikte gegevens en berekende golfploop.

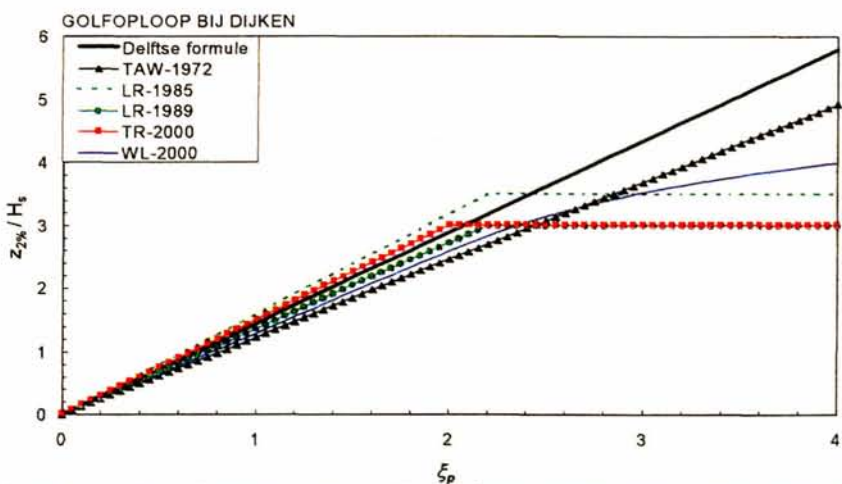
Figuren



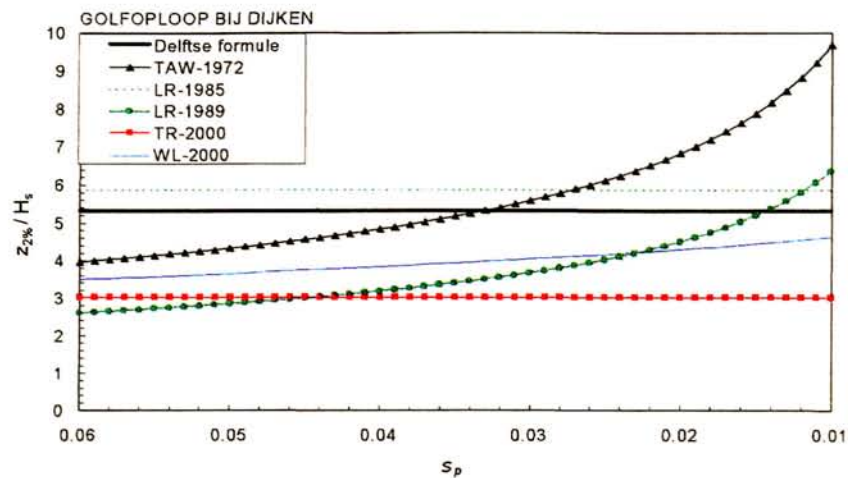
Figuur F1a Indicatief verloop van golfloopformuleringen als functie van de brekerparameter op basis van de piekperiode (door middel van variatie in taludhellingen bij een constante golfsteilheid bij een "smal" spectrum).



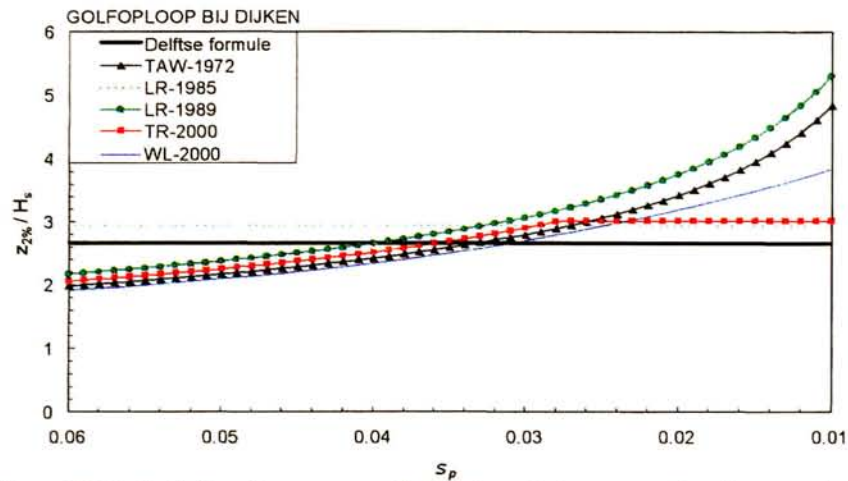
Figuur F1b Indicatief verloop van golfloopformuleringen als functie van de brekerparameter op basis van de piekperiode (door middel van variatie in taludhellingen bij een constante golfsteilheid bij een "middel" spectrum).



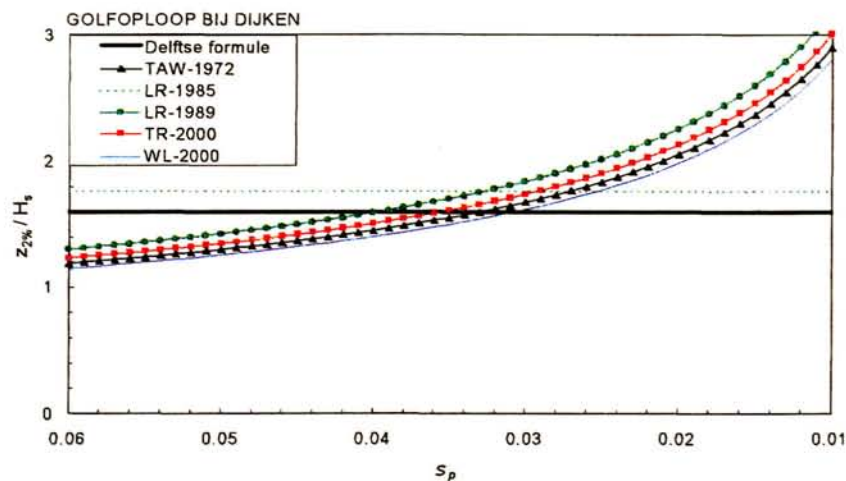
Figuur F1c Indicatief verloop van golfloopformuleringen als functie van de brekerparameter op basis van de piekperiode (door middel van variatie in taludhellingen bij een constante golfsteilheid bij een "breed" spectrum).



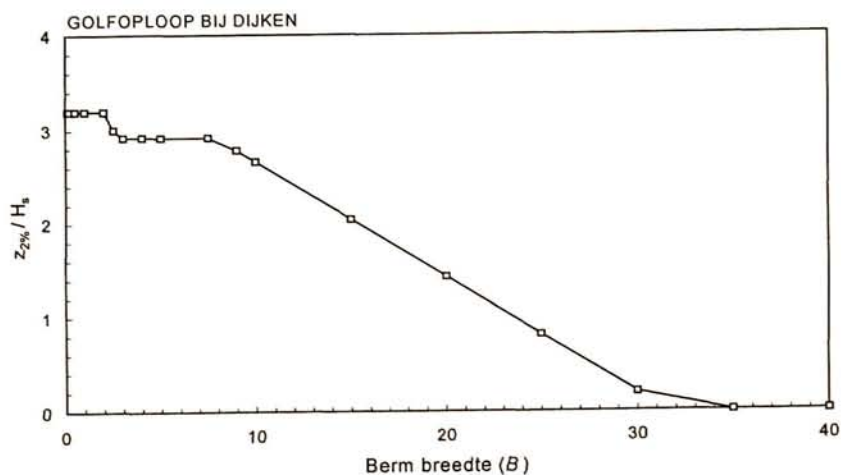
Figuur F2a Indicatief verloop van golfloopformuleringen als functie van de golfsteilheid op basis van de piekperiode (door middel van variatie in golfsteilheid bij een vaste taludhelling; "middel" spectrum; talud 1:1.5).



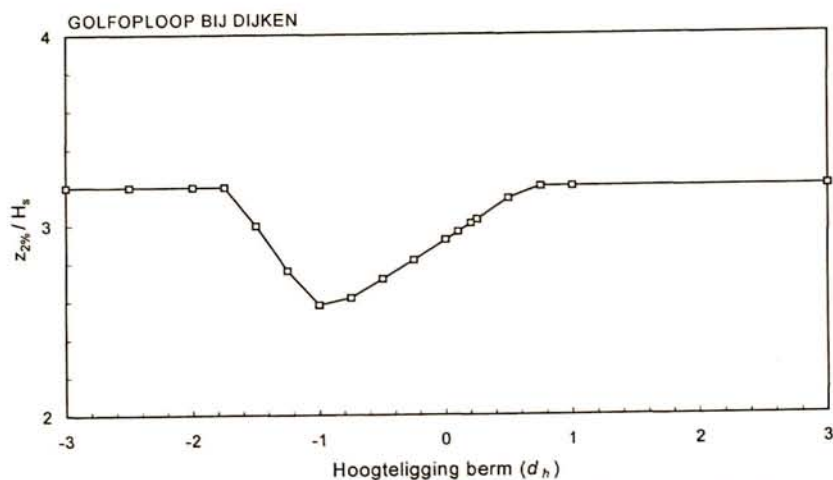
Figuur F2b Indicatief verloop van golfloopformuleringen als functie van de golfsteilheid op basis van de piekperiode (door middel van variatie in golfsteilheid bij een vaste taludhelling; "middel" spectrum; talud 1:3).



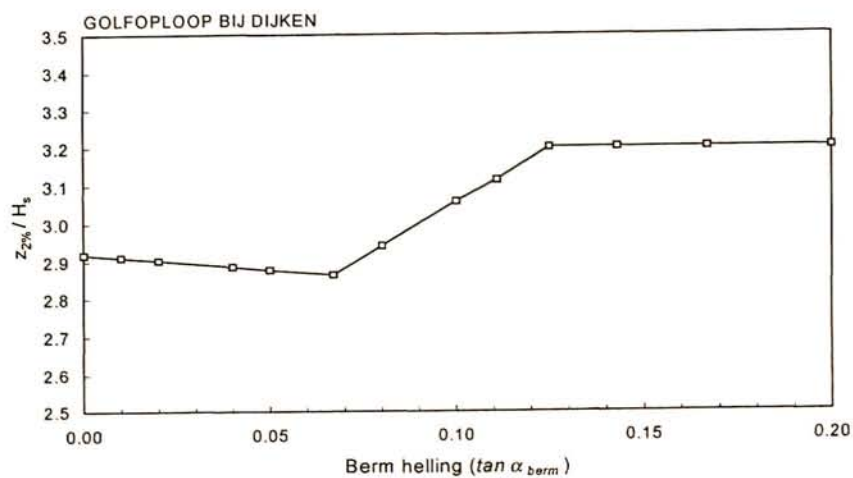
Figuur F2c Indicatief verloop van golfloopformuleringen als functie van de golfsteilheid op basis van de piekperiode (door middel van variatie in golfsteilheid bij een vaste taludhelling; "middel" spectrum; talud 1:5).



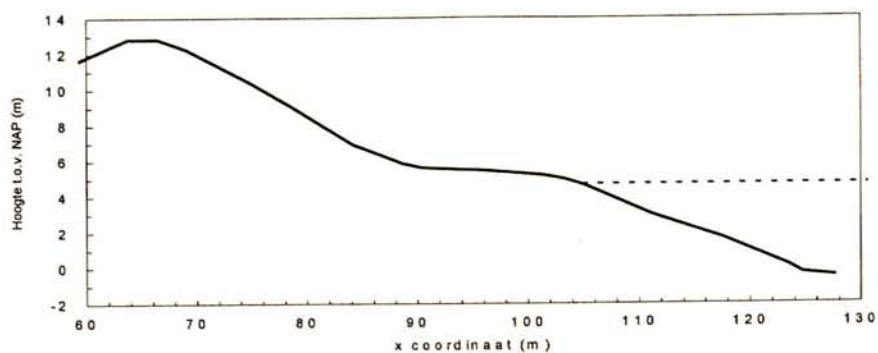
Figuur F3 Indicatief verloop van de berekende golfloop als functie van de bermbreedte (volgens TR-2000/PC-Overslag).



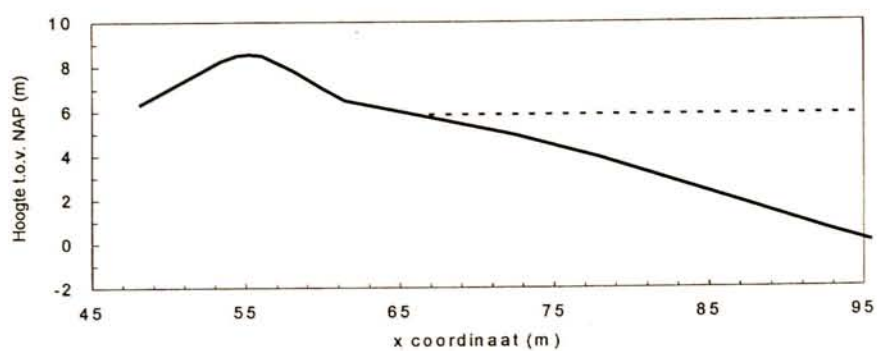
Figuur F4 Indicatief verloop van de berekende golfloop als functie van de hoogteligging van de berm (volgens TR-2000/PC-Overslag).



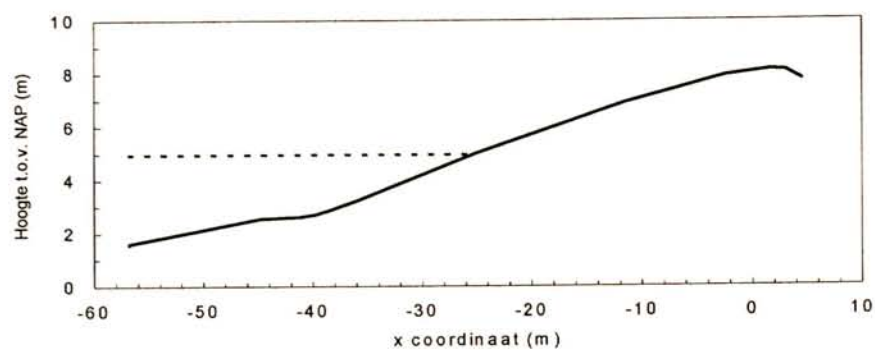
Figuur F5 Indicatief verloop van de berekende golfloop als functie van de helling van de berm (volgens TR-2000/PC-Overslag).



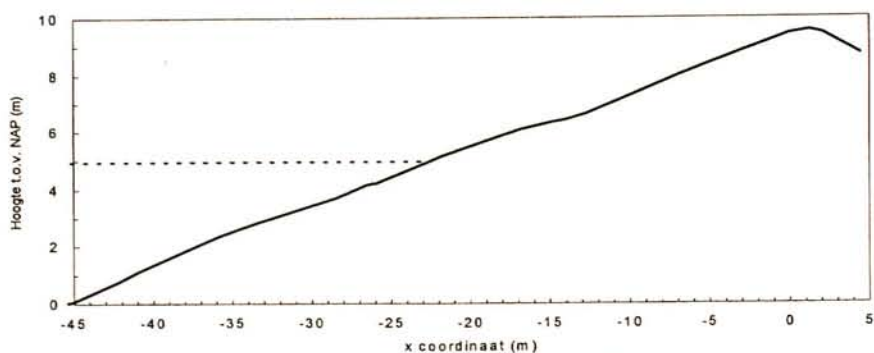
Figuur F6-1 Schets van dijkprofiel van Dijknummer 1 (Noordzee).



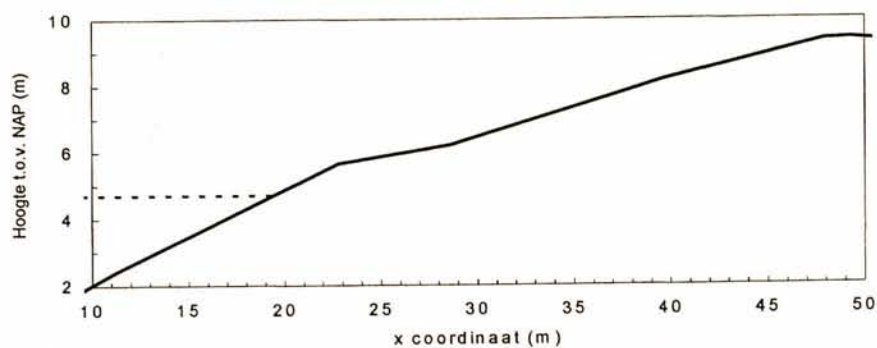
Figuur F6-2 Schets van dijkprofiel van Dijknummer 2 (Waddenzee).



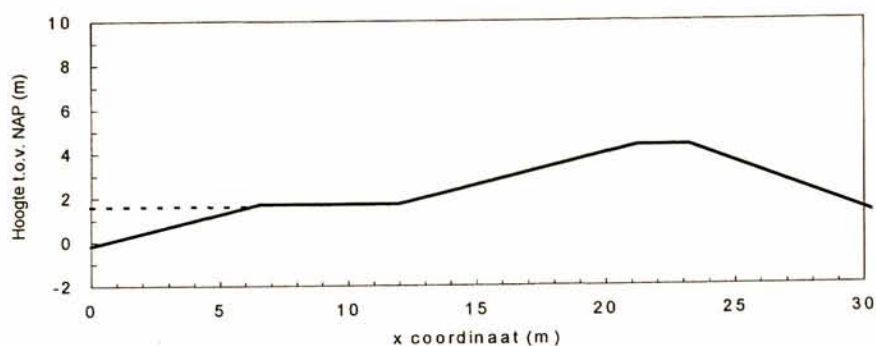
Figuur F6-3 Schets van dijkprofiel van Dijknummer 3 (Waddenzee).



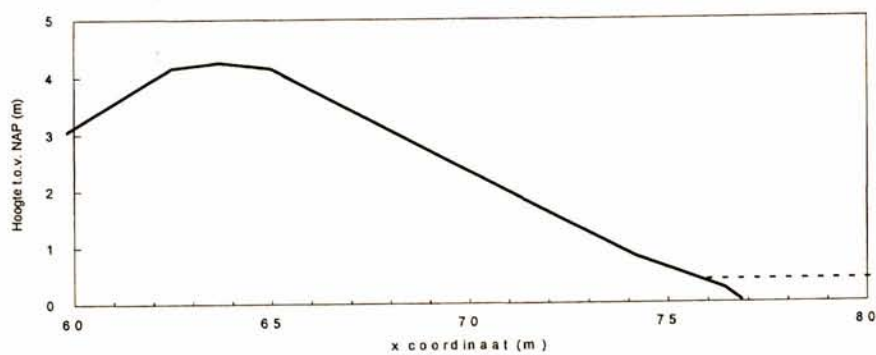
Figuur F6-4 Schets van dijkprofiel van Dijknummer 4 (Waddenzee).



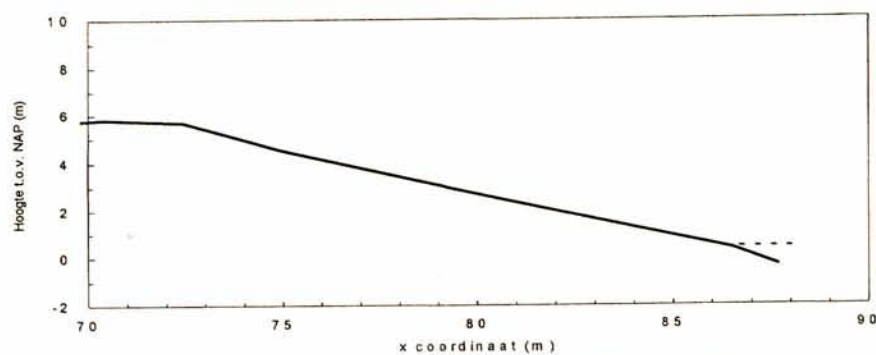
Figuur F6-5 Schets van dijkprofiel van Dijknummer 5 (IJsselmeer).



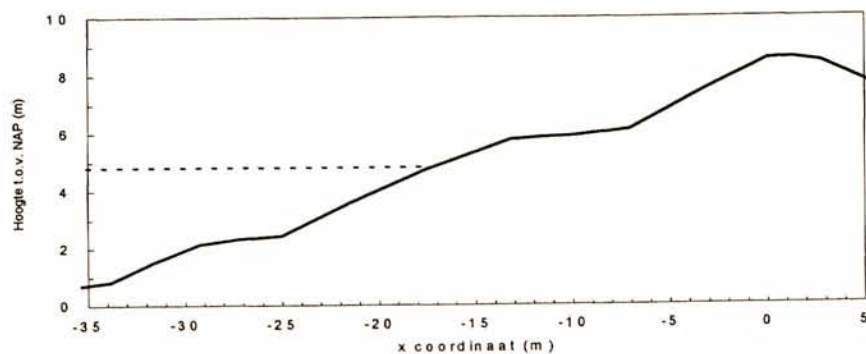
Figuur F6-6 Schets van dijkprofiel van Dijknummer 6 (IJsselmeer).



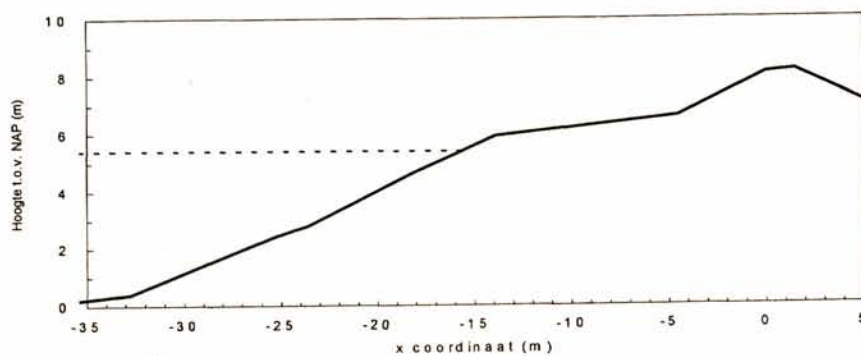
Figuur F6-7 Schets van dijkprofiel van Dijknummer 7 (IJsselmeer).



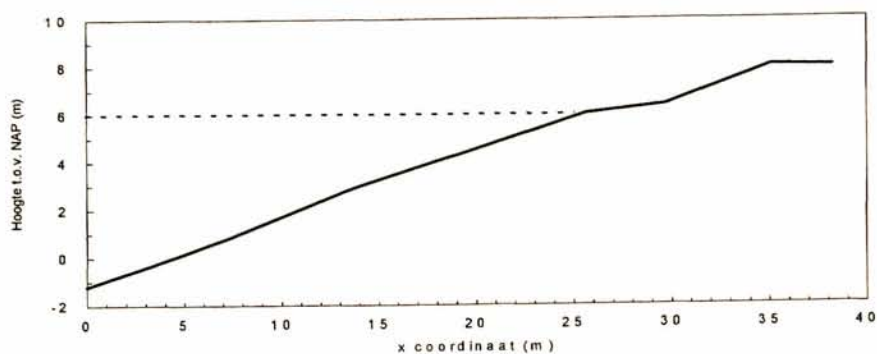
Figuur F6-8 Schets van dijkprofiel van Dijknummer 8 (Westerschelde).



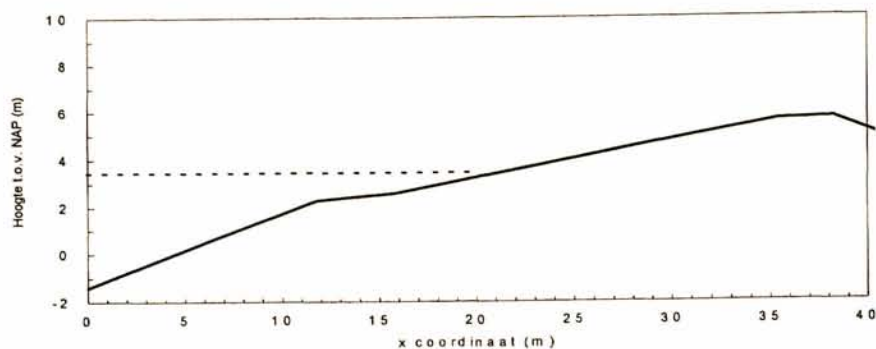
Figuur F6-9 Schets van dijkprofiel van Dijknummer 9 (Westerschelde).



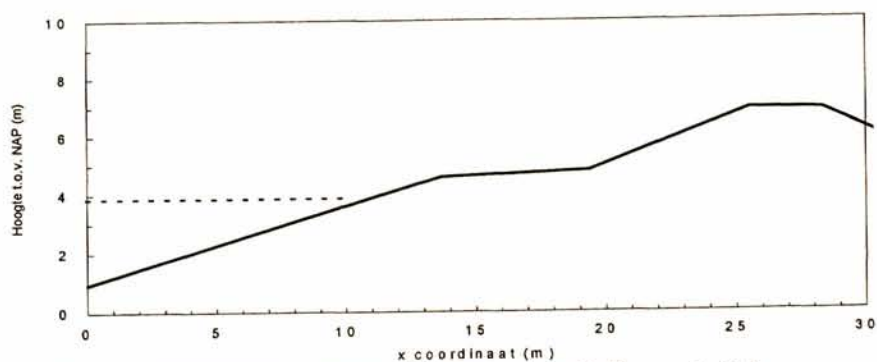
Figuur F6-10 Schets van dijkprofiel van Dijknummer 10 (Westerschelde).



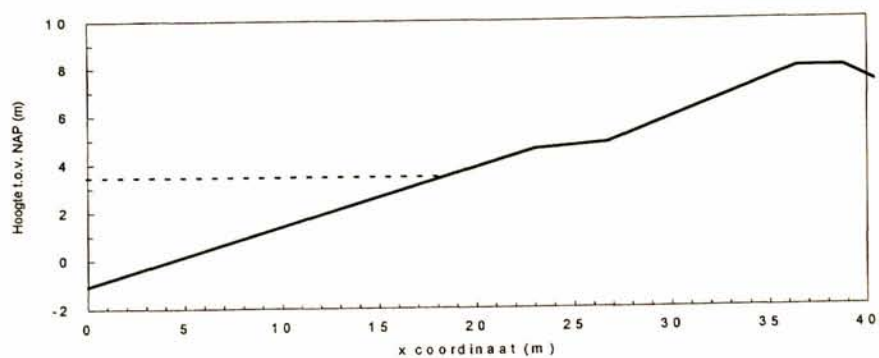
Figuur F6-11 Schets van dijkprofiel van Dijknummer 11 (Oosterschelde).



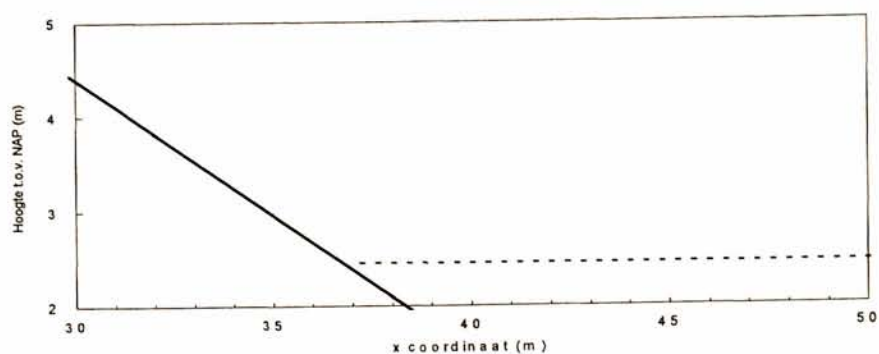
Figuur F6-12 Schets van dijkprofiel van Dijknummer 12 (Oosterschelde).



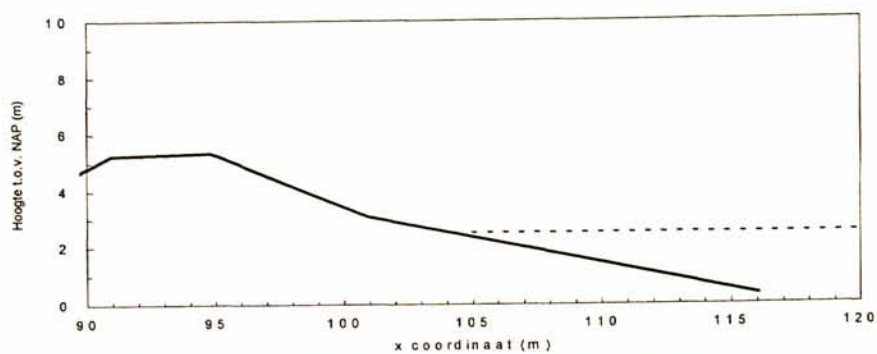
Figuur F6-13 Schets van dijkprofiel van Dijknummer 13 (Oosterschelde).



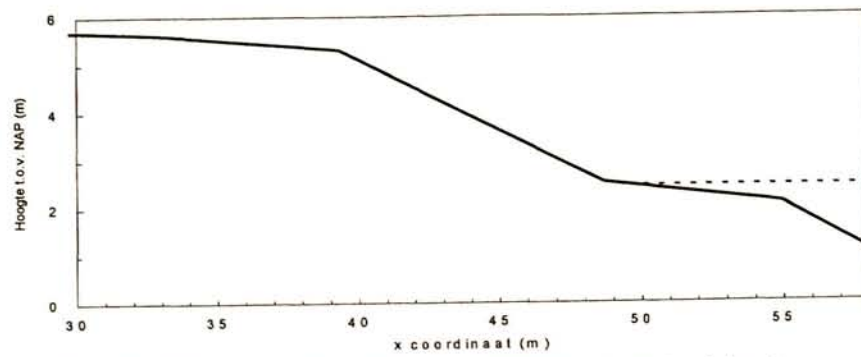
Figuur F6-14 Schets van dijkprofiel van Dijknummer 14 (Benedenrivieren).



Figuur F6-15 Schets van dijkprofiel van Dijknummer 15 (Benedenrivieren).



Figuur F6-16 Schets van dijkprofiel van Dijknummer 16 (Benedenrivieren).



Figuur F6-17 Schets van dijkprofiel van Dijknummer 17 (Benedenrivieren).



WL | Delft Hydraulics

Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon 015 285 85 85
telefax 015 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 285 85 85
telefax +31 15 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

