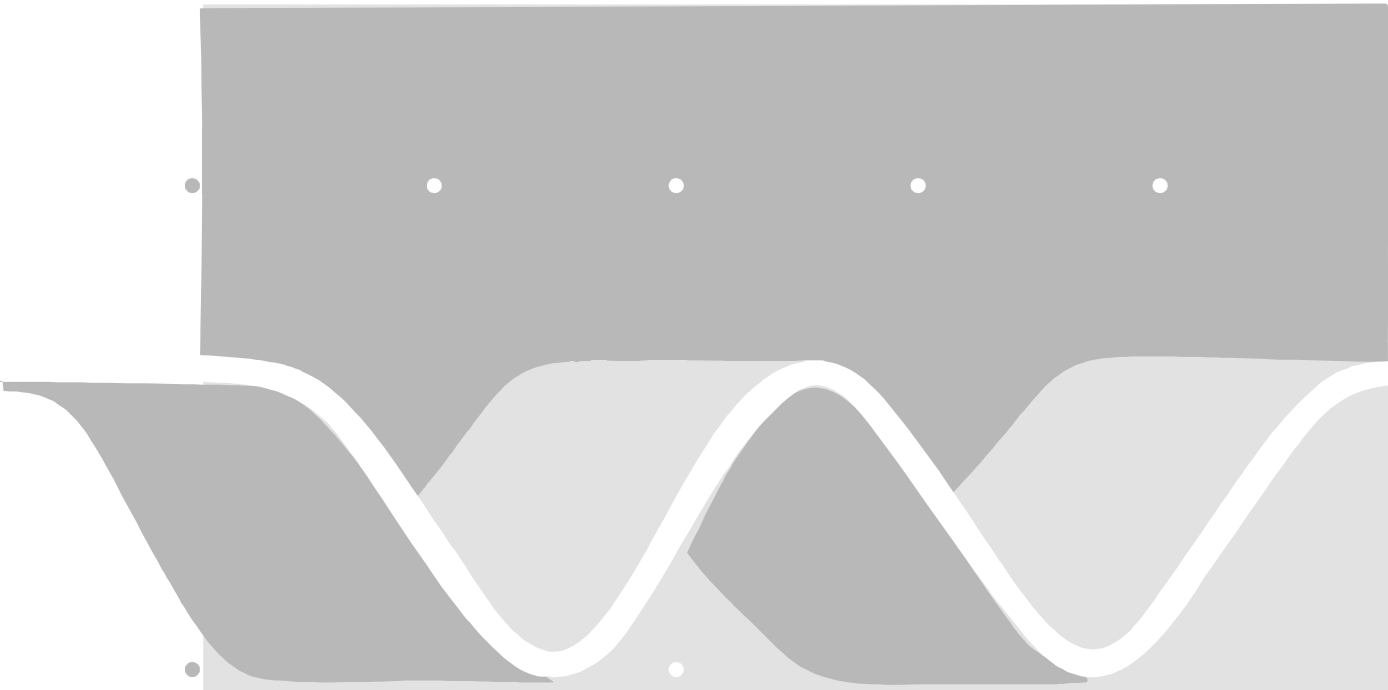




DG Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee

Haalbaarheidsstudie HYDRA-K

Fase 1 - Plan van aanpak

F.L.M. Diermanse, M. Klein Breteler, C. Kuiper, A.W. Vrouwenvelder,
H.M.G.M. Steenberghe

rapport

oktober 2003



Inhoud

1	Inleiding	1—1
2	Plan van aanpak fase 2.....	2—1
2.1	Inleiding.....	2—1
2.2	Faalmechanismen	2—1
2.3	Grenstoestandsfuncties voor de verschillende bekledingstypen.....	2—2
2.3.1	Inleiding	2—2
2.3.2	De rol van grenstoestandsfuncties binnen HYDRA-K.....	2—2
2.3.3	Grenstoestandsfunctie voor asfaltbekleding	2—3
2.3.4	Grenstoestandsfunctie voor grasbekleding	2—6
2.3.5	Grenstoestandsfunctie voor steenzetting.....	2—9
2.4	Aandachtspunten bij het inprogrammeren van grenstoestandsfuncties. 2—	11
2.4.1	Omgaan met meerdere typen bekledingen op één dijkprofiel. . 2—	11
2.4.2	Omgaan met het stormverloop	2—12
2.4.3	Stormduur als additionele stochast.....	2—14
2.5	Overige activiteiten fase 2	2—16
2.5.1	Visualisatie van de grenstoestandsfunctie	2—16
2.5.2	Monitoren van problemen en aandragen van oplossingen	2—16
3	Plan van aanpak fase 3.....	3—1
3.1	Inleiding.....	3—1
3.2	Activiteiten	3—2
4	Plan van aanpak fase 4.....	4—1

5	Plan van aanpak fase 5.....	5—1
5.1	Inleiding.....	5—1
5.2	Toevoegen van additionele stochasten aan HYDRA-K.....	5—1
5.3	Additionele werkzaamheden.....	5—3
6	Referenties	6—1

I Inleiding

Achtergrondinformatie

In het kader van de voorbereidingen voor het hydraulische randvoorwaardenboek wordt momenteel een rekenprogramma ontwikkeld door het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ). De voornaamste functionaliteiten van dit rekenprogramma (HYDRA-K) zijn:

- het berekenen van hydraulische randvoorwaarden langs de kust, die bestaan uit een combinatie van de waterstand en golfparameters (het zogenaamde “ontwerppunt” of “toetspunt”) en dienen als invoer voor een toets op de veiligheid;
- het berekenen van een faalkans van een waterkering; en
- het berekenen van de benodigde sterkte en/of dimensie van de waterkering voor een gegeven veiligheids criterium.

Genoemde functionaliteiten zijn momenteel binnen HYDRA-K ontwikkeld voor drie faalmechanismen:

- golfoploop;
- golfoverslag; en
- stabiliteit (van steenzetting).

In het kader van de voorbereidingen op het hydraulische randvoorwaardenboek zal HYDRA-K uitgebreid worden met een aantal faalmechanismen, behorende bij de volgende bekledingstypen:

- steenzetting (een uitbreiding van de huidige functionaliteit);
- asfaltbekleding; en
- grasbekleding.

Op langere termijn worden de faalmechanismen door middel van dll's in HYDRA-K ingebouwd. Tijdens de uitvoering van deze studie zullen de dll's nog niet beschikbaar zijn, maar de rekenregels waarop ze gebaseerd zijn, staan beschreven in de leidraad toetsen op veiligheid (TAW, 1999).

Probleemstelling

Het toevoegen van de in de inleiding genoemde additionele faalmechanismen en bekledingstypen aan HYDRA-K behelst meer dan alleen het inbouwen van een aantal dll's. De belastingelementen van de additionele faalmechanismen/bekledingen verschillen namelijk van de belastingelementen van de faalmechanismen/bekledingstypen die reeds zijn ingevoerd in HYDRA-K. Eerst dient daarom vastgesteld te worden of de additionele faalmechanismen/bekledingstypen binnen het bestaande concept van HYDRA-K passen.

Daarbij spelen de volgende vraagstukken:

- welke aanpassingen zijn nodig binnen HYDRA-K om de additionele faalmechanismen in te passen?
- hoeveel inspanning vergen deze aanpassingen?
- zijn alle gewenste aanpassingen mogelijk binnen het concept van HYDRA-K?
- is het mogelijk om middels work-arounds alternatieve oplossingen te vinden voor die aanpassingen die niet binnen het concept van HYDRA-K passen?
- is het op langere termijn technisch haalbaar om, middels enige wijzigingen aan het concept van HYDRA-K, alsnog alle gewenste aanpassingen te realiseren?
- welke inspanningen zijn nodig om een derde (of eventueel vierde) stochast aan HYDRA-K toe te voegen?

Doel van het project

Het doel van dit project is om de haalbaarheid van de inbouw van de genoemde faalmechanismen/bekledingstypen in HYDRA-K te onderzoeken. Afhankelijk van de uitkomst van de haalbaarheidsstudie zal een aantal van deze faalmechanismen in een demonstratiemodel van HYDRA-K ingebouwd worden. De nauwkeurigheid van de rekenresultaten van deze faalmechanismen zal geanalyseerd worden.

Voor de faalmechanismen die niet op korte termijn ingebouwd kunnen worden, wordt in de eerste plaats een work-around opgesteld en vervolgens wordt onderzocht of het op langere termijn technische haalbaar is om, middels enige wijzigingen aan het concept van HYDRA-K, deze faalmechanismen alsnog in te bouwen.

Fasering

Het project is opgedeeld in vijf fasen:

Fase 1: Plan van aanpak.

Fase 2: Inbouwen van additionele faalmechanismen en bekledingstypen in het demonstratiemodel.

Fase 3: Indicatieve bepaling van de nauwkeurigheid.

Fase 4: Alternatieven (work-arounds) voor het inbouwen van faalmechanismen.

Fase 5: Mogelijkheden voor de inbouw van faalmechanismen in HYDRA-K op langere termijn en effecten op de hydraulische randvoorwaarden.

Het voorliggende rapport vormt het eindproduct van fase 1: “*Plan van aanpak*”. Hierin wordt het werkplan voor fase 2 tot en met fase 5 uitgewerkt.

Leeswijzer

De lezer wordt verondersteld kennis te hebben van de achtergronden en toepassingsgebieden van HYDRA-K. Indien dat niet het geval is wordt aangeraden eerst het functioneel ontwerp (HKV, 2000) te bestuderen.

De opbouw van dit rapport is eenvoudig: elk van de hoofdstukken 2 tot en met 5 beschrijft het werkplan voor één van de vervolgfasen.

Auteurs en organisatie

Dit rapport is opgesteld door dr.ir. Ferdinand Diermanse (WL | Delft Hydraulics, projectleider), ir. M. Klein Breteler (WL | Delft Hydraulics), ing. C. Kuiper (WL | Delft Hydraulics), Prof. ir. A.C.W.M. Vrouwenvelder (TNO-Bouw) en ir. H.M.G.M. Steenbergen (TNO-bouw).

Het voorliggende rapport is één van de producten, zoals verwoord in RIKZ-opdrachtnummer RKZ-1345 d.d. 15 september 2003.

2 Plan van aanpak fase 2

2.1 Inleiding

De volgende activiteiten gaan uitgevoerd worden in fase 2:

1. inbouwen van de additionele bekledingstypen met bijbehorende faalmechanismen in een demonstratiemodel van HYDRA-K;
2. visualiseren van de grenstoestandsfunctie voor elk van de ingebouwde faalmechanismen en bekledingstypen; en
3. monitoren van problemen en aandragen van oplossingen.

Het grootste deel van de inspanning zal in het eerste onderdeel zitten. De in te bouwen additionele bekledingstypen en faalmechanismen worden beschreven middels zgn. *grenstoestandsfuncties* (ook wel Z-functies of betrouwbaarheidsfuncties genaamd).

In paragraaf 2.2 worden de verschillende faalmechanismen genoemd en wordt aangegeven welke van deze faalmechanismen in fase 2 van het project worden ingeprogrammeerd in het demonstratiemodel. In paragraaf 2.3 worden per bekledingstype de formules beschreven waaruit de Z-functies zijn opgebouwd. Vervolgens, in paragraaf 2.4, wordt een aantal aspecten beschreven die speciale aandacht behoeven bij het inprogrammeren van de nieuwe Z-functies. Het betreft het doorrekenen van faalkansen voor dijkprofielen met meerdere typen bekledingen (paragraaf 2.4.1), het in rekening brengen van het stormverloop (paragraaf 2.4.2) en de stormduur als additionele stochast (paragraaf 2.4.3). In paragraaf 2.5, ten slotte, worden de punten 2. en 3. in bovenstaande opsomming besproken.

2.2 Faalmechanismen

De volgende faalmechanismen komen in aanmerking om aan HYDRA-K toegevoegd te worden:

- opdrukken van asfalt;
- bezwijken van steenzetting of asfalt op een berm;
- lokale afschuiving bij steenzetting;
- materiaal transport bij steenzetting;
- schade aan de bekleding als gevolg van golfklappen op het buitentalud (voor gras, asfalt en steenzetting); en
- schade aan de grasbekleding als gevolg van stroming op het buitentalud.

Voor drie van deze faalmechanismen wordt op voorhand besloten dat deze niet in fase 2 in het demonstratiemodel worden ingeprogrammeerd, en wel om de volgende redenen:

- *Materiaaltransport*: Dit faalmechanisme wordt niet meegenomen omdat het niet afhankelijk is van de golfhoogte, periode en waterstand, en bovendien meestal niet maatgevend is.
- *Opdrukken van asfalt*: Voor dit faalmechanisme is een goed inzicht van de freatische lijn in de dijk nodig, hetgeen niet beschikbaar is.
- *Bezwijken van steenzetting of asfalt op een berm*: Faalmechanismen voor bermen wijken dusdanig af van faalmechanismen op het talud dat voorafgaand aan het project met de opdrachtgever is afgesproken om deze niet in het demonstratiemodel op te nemen.

Voor de drie genoemde faalmechanismen wordt in fase 4 getracht een work-around op te stellen. De overige faalmechanismen worden in fase 2 van het project geïmplementeerd in het demonstratiemodel.

2.3 Grenstoestandsfuncties voor de verschillende bekledingstypen

2.3.1 Inleiding

De uitbreiding van HYDRA-K met additionele faalmechanismen en bekledingstypen behelst in eerste instantie het toevoegen van een aantal grenstoestandsfuncties. Op lange termijn worden deze grenstoestandsfuncties door middel van dll's in HYDRA-K ingebouwd. Momenteel zijn deze dll's nog niet beschikbaar en worden in fase 2 als alternatief de formules uit de leidraad toetsen (TAW, 1999) ingeprogrammeerd in het demonstratiemodel.

2.3.2 De rol van grenstoestandsfuncties binnen HYDRA-K

De methode waarmee binnen HYDRA-K de faalkans van een kering wordt berekend staat uitgebreid beschreven in het functionele ontwerp (HKV, 2000). Samengevat worden de volgende stappen uitgevoerd:

stap 1. Inlezen van simultane waarnemingen van wind en waterstand.

stap 2. Selectie van de hoogste waterstanden tijdens elke stormgebeurtenis met de bijbehorende windsnelheid (deze stap wordt alleen uitgevoerd als de gebruiker de optie “hoogste waterstand” geselecteerd heeft. Indien de optie “ongunstigste belasting” geselecteerd is wordt de gehele meetreeks meegenomen).

Vervolgens worden voor elk van de geselecteerde simultane waarnemingen de volgende stappen uitgevoerd:

stap 3. Opschalen van de windsnelheid en de waterstand.

stap 4. Bepalen van de hydraulische belasting voor de teen van de dijk (waterstand, golfhoogte, -periode en -richting) op basis van de opgeschaalde waarden van windsnelheid en waterstand.

stap 5. Vaststellen of de hydraulische belasting groter is dan de weerstand van de kering, in welk geval de kering verondersteld wordt te falen.

Na voltooiing van deze vijf stappen wordt geteld voor hoeveel opgeschaalde stormgebeurtenissen falen optreedt, op basis waarvan de jaarlijkse faalkans van de kering wordt vastgesteld.

De grenstoestandsfuncties worden in stap 5 van de bovenstaande procedure aangeroepen. De generieke beschrijving van grenstoestandsfuncties van bekledingen is van de vorm:

$$Z = R(D, L, ..) - S(\Delta h, H_s, T_s/T_p)$$

Waarin:

Z	= grenstoestandsfunctie
R	= sterkte
S	= belasting
L	= typische afmeting bekledingsonderdeel
D	= dikte van de bekleding
...	= andere parameters
Δh	= $h - h_A$
h	= stilwaterstand (t.o.v. NAP)
h_A	= hoogte van het beschouwde onderdeel van de bekleding (t.o.v. NAP)
H_s	= significante golfhoogte
T_s of T_p	= maat voor de golfperiode

Falen van de kering wordt geacht op te treden als Z kleiner is dan nul; bij positieve Z is de constructie nog in tact.

In de paragrafen 2.3.3 tot en met 2.3.5 worden de grenstoestandsfuncties die in fase 2 aan het demonstratiemodel van HYDRA-K worden toegevoegd per bekledingstype uitgewerkt.

2.3.3 Grenstoestandsfunctie voor asfaltbekleding

De methode voor het vaststellen van de betrouwbaarheid van asfaltbekledingen is gebaseerd op de leidraad Toetsen op Veiligheid (TAW, 1999). De stabiliteitsformules voor asfalt zijn alleen gegeven voor het belastingtype golfklappen. Het faalmechanisme kan het beste omschreven worden als “*schade aan de bekleding als gevolg van golfklappen*”.

Voor een correcte toetsing ten aanzien van het faalmechanisme “*opdrukken van asfalt*” zou een goed inzicht van de freatische lijn in de dijk nodig zijn. Daarom wordt er in eerste instantie van afgezien om dit mechanisme in HYDRA-K onder te brengen. In fase 4 zal wel getracht worden een work-around op te stellen.

De volgende subtypen asfaltbekledingen zijn beschouwd:

- waterbouwasfalt beton (Type 1);
- open steenasfalt (Type 5).

Daarnaast wordt onderscheid gemaakt in twee typen ondergrond:

- zand;
- klei.

Voor de toetsing van asfaltbekledingen zijn de volgende invoer grootheden nodig:

H_s	: significante golfhoogte op de teen van de constructie (m)
D	: dikte van de asfaltbekleding (m)
h	: waterstand (m + NAP)
z_o	: niveau ondergrens van de te toetsen bekleding (m + NAP)
z_b	: niveau bovengrens van de te toetsen bekleding (m + NAP)
$\tan \alpha$	: taludhelling (-)
Type ondergrond	: zand of klei
Type asfalt	: waterbouwasfalt beton, Open steenasfalt
Type filter (bij open steenasfalt)	: geotextiel, zandasfalt

De toetsing start met een beoordeling of het stuk bekleding wel belast wordt:

Bovengrens:	als $h < z_o - \frac{1}{4} H_s$	=> bekleding faalt niet ($Z > 0$)
Ondergrens:	als $h > z_b + 2H_s$	=> bekleding faalt niet ($Z > 0$)

Als de waterstand tussen deze bovengrens en ondergrens ligt wordt verder getoetst, nl. de laagdikte. De eisen ten aanzien van de laagdikte zijn afhankelijk van het type asfalt.

Waterbouwasfaltbeton

De algemene formule voor het bepalen van de minimaal benodigde laagdikte wordt weergegeven met vergelijking (1):

$$D_{\min} = \max \{ D_a; C_3 + C_4 H_s \} \quad (1)$$

De waarde van D_a is een functie van golfhoogte H_s en taludhelling $\tan \alpha$. De functiebeschrijving is afhankelijk van het type onderliggende laag (zand of klei):

[1] waterbouwasfaltbeton met ondergrond zand:

$$D_a = (-0.18401 + 0.125056 H_s + 0.0014 H_s^2) (-1.69947 + 5.174361 \tan \alpha + 0.098738 H_s) \quad (2)$$

[2] waterbouwasfaltbeton met ondergrond klei:

$$D_a = (-0.06927 + 0.084858 H_s + 0.013069 H_s^2) (-0.93087 + 5.108631 \tan \alpha + 0.060252 H_s) \quad (3)$$

Beide vergelijkingen zijn afkomstig uit het softwarepakket "PC-Ring" (TNO-bouw, 2003a). De vergelijkingen leveren dezelfde resultaten op als de formules die in de leidraad toetsen op veiligheid (TAW, 1999) staan beschreven.

De waarden voor C_3 en C_4 zijn:

C_3	= 0,1
C_4	= 0,0167

Deze toetsingsmethode is alleen geldig wanneer de golfhoogte H_s kleiner dan 6,0 m is. Dit betekent dat alleen een score goed behaald kan worden als $H_s \leq 6,0$ m. Voor $H_s > 6,0$ m wordt de kering verondersteld te falen ($Z < 0$).

Wanneer de golfhoogte, H_s , kleiner is dan 6,0 m en de aanwezige laagdikte, D , groter is dan de hier berekende waarde D_{min} , dan geldt dat de kering tegen de golfbelasting bestand is. De grenstoestandsfunctie is als volgt gedefinieerd:

$$Z = D - D_{min} \quad (4)$$

Open steenasfalt

De algemene formule voor het bepalen van de minimaal benodigde laagdikte voor open steenasfalt wordt weergegeven met vergelijking (1). Evenals voor waterbouwasfaltbeton is de waarde van D_a een functie van golfhoogte H_s en taludhelling $\tan \alpha$ en is de functiebeschrijving afhankelijk is van het type onderliggende laag (zand of klei):

[3] open steenasfalt met ondergrond zand:

$$D_a = (-0.05785 + 0.025545 H_s + 0.026866 H_s^2)(-0.93087 + 5.108631 \tan \alpha + 0.060252 H_s) \quad (5)$$

[4] open steenasfalt met ondergrond klei:

$$D_a = (-0.1229 + 0.1782100 H_s + 0.03541978 H_s^2)(-1.36632 + 5.138124 \tan \alpha + 0.128026 H_s) \quad (6)$$

Afhankelijk van het filtertype moet voor de constanten C_3 en C_4 van vergelijking (1) de waarden uit Tabel 2.1 aangehouden worden.

Tabel 2.1 Parameters C_3 en C_4 voor open steenasfalt en twee verschillende typen filters.

	alle taluds	
	C_3	C_4
Geotextiel	0,2	0,025
Zandasfalt	0,1	0,025

Deze toetsingsmethode is alleen geldig wanneer de golfhoogte H_s kleiner dan 4,0 m is. Dit betekent dat alleen een score goed behaald kan worden als $H_s \leq 4,0$ m. Voor $H_s > 4,0$ m wordt de kering verondersteld te falen ($Z < 0$).

Wanneer de aanwezige laagdikte groter is dan de hier berekende waarde, dan geldt dat de kering voldoende sterk is. De grenstoestandsfunctie is hetzelfde voor waterbouwasfaltbeton (vergelijking (4)).

Aanname

De bovenstaande formules zijn gebaseerd op Figuur 3.2.2.6 en Figuur 3.2.2.7 van de Leidraad toetsen 1999. Bijbehorende constanten zijn afgeleid voor een beddingsconstante $c_{zand} = 100$ MPa/m en een $c_{klei} = 30$ MPa/m. Dit is in de meeste gevallen een veilige aanname.

2.3.4 Grenstoestandsfunctie voor grasbekleding

De methode voor het vaststellen van de betrouwbaarheid van grasbekledingen is gebaseerd op (WL, 2003). De stabiliteitsformules voor gras worden beschouwd voor de volgende belastingtypen:

- golfklappen op het buitentalud; en
- stroming op het buitentalud.

De stabiliteit van de kruin en het binnentalud is hierbij niet meegenomen, maar deze toetsing verloopt alsof het de buitenkruinlijn betreft en wijkt dus qua methode niet af. Er is onderscheid gemaakt tussen drie verschillende type grasmatten nl:

- goede grasmatt;
- matige grasmatt; en
- slechte grasmatt.

Voor de toetsing van grasbekledingen zijn de volgende invoergrootheden nodig:

H_s	:	significante golfhoogte op de teen van de constructie (m)
T_p	:	golfperiode behorende bij de piek van het spectrum (s)
h	:	waterstand (m + NAP)
z_o	:	niveau ondergrens van de te toetsen bekleding tov SWL (m)
z_q^1	:	oplooppniveau behorende bij overslag debiet van $q = 0.1$ l/s/m op een oneindig lang talud tov SWL (m)
t_s	:	tijdstap van de berekening (s)
$\tan \alpha$	:	gemiddelde taludhelling bepaald tussen SWL +/- $1.5H_s$. Hierbij telt een eventuele berm niet mee bij het bepalen van de gemiddelde helling (-)
Type grasmatt	:	goed, matig, slecht

De toetsing start met een beoordeling of het stuk bekleding wel belast wordt en of er sprake is van golfklappen of alleen stroming door golfoploop en golfneerloop:

- Als $z_o > z_q$ $\Rightarrow$ bekleding faalt niet ($Z > 0$)
- Als $z_o < h$ $\Rightarrow$ toetsing op golfklappen
- Als $h \leq z_o \leq z_q$ $\Rightarrow$ toetsing op stroming

Golfklappen

De toetsmethode voor golfklappen is gebaseerd op Figuur 4.7.2.2 uit de Leidraad toetsen. Afhankelijk van het type grasmatt (goed, matig of slecht) mag een maximaal toelaatbare golfhoogte worden bereikt. Voor een belastingduur die groter is dan $t_s = 5$ uur geldt dat de maximale toelaatbare golfhoogte afhankelijk is van de belasting duur t_s . In gevallen waarbij $t_s < 5$ uur is de algemene formule voor het bepalen van de maximaal toelaatbare golfhoogte onafhankelijk van t_s :

¹ deze waarde moet berekend worden met een routine die reeds aanwezig is binnen HYDRA-K. Hierbij moet dus het fictieve kruinniveau bepaald worden, waarbij het overslagdebiet gelijk is aan 0.1 l/s/m.

$$t_s < 5 \text{ uur: } H_{s;\max} = \left[C_1 \frac{1}{2} T_p^{-0.5} \tan \alpha^{-1} \right]^{\frac{1}{0.75}} \quad (7)$$

Waarbij C_1 afhangt van het type grasmat volgens Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Parameter C_1 voor golfklappen op grasbekledingen voor een belastingduur < 5 uur

	C_1
Goede grasmat	1
Matige grasmat	0,7
Slechte grasmat	0,2

Indien de belastingduur groter is dan 5 uur dan geldt:

$$t_s \geq 5 \text{ uur: } H_{s;\max} = \max \left\{ \left[C_2 t_s^{C_3} \frac{1}{2} T_p^{-0.5} \tan \alpha^{-1} \right]^{\frac{1}{0.75}} ; \left[0.2 \frac{1}{2} T_p^{-0.5} \tan \alpha^{-1} \right]^{\frac{1}{0.75}} \right\} \quad (8)$$

In deze formule is de waarde van t_s in uur uitgedrukt. Afhankelijk van het type grasmat kunnen de waarden voor C_2 en C_3 de volgende waarden worden aangehouden:

Tabel 2.3 Parameters C_2 en C_3 voor golfklappen op grasbekledingen voor een belastingduur ≥ 5 uur

	C_2	C_3
Goede grasmat	2.3	-0.52
Matige grasmat	1.6	-0.52
Slechte grasmat	0.2	0

Is de optredende golfhoogte groter dan $H_{s;\max}$ dan volgt uit de toetsing dat de sterkte van de dijk onvoldoende is. De grenstoestandsfunctie is gelijk aan:

$$Z = H_{s;\max} - H_s \quad (9)$$

Stroming

Hier volgt het stappenplan voor het toetsen van een grasmat op niveau z tov SWL op stroming:

Stap 1:

Bereken de rekensnelheid van de oplooptong

$$v_r = 700 \frac{H_s}{T_p} \left(0.085 - \frac{H_s}{\frac{g}{2\pi} T_p^2} \right) \sqrt{1 - \frac{z}{z_q} \tan \alpha} \quad (10)$$

hierin is g de valversnelling ($\approx 9.81 \text{ m/s}^2$)

Stap 2:

Bepaal met deze rekensnelheid de maximaal toelaatbare belastingduur (in seconden):

$$t_{s\max} = 3600 C_1 v_r^{C_2} \quad (11)$$

In Tabel 2.4 staan de waarden voor de constanten C_1 en C_2 voor elk type grasmat (Goed, Matig en Slecht).

Tabel 2.4 Constanten C_1 en C_2 voor stroming op grasbekledingen

Grasmat	C_1	C_2
Goed	1560	-4,8
Matig	276	-4,2
Slecht	50	-3,6

Stap 3

Bepaal de rekenwaarde van de belastingduur van de tijdstap t_s , waarvoor de berekening gemaakt wordt:

$$t_{sr} = \left(1 - \frac{z_o}{z_q}\right) t_s \quad (12)$$

Indien met tijdstappen van een uur gerekend wordt, is t_s in deze formule gelijk aan 3600 (s).

Stap 4

Bepaal de relatieve belasting door het quotiënt te bepalen van de rekenwaarde van de belastingduur (t_{sr}) ten opzichte van de maximaal toelaatbare belastingduur (t_{smax}):

$$belasting = \frac{t_{sr}}{t_{smax}} \quad (13)$$

Cumulatieve gras erosie:

Deze 4 stappen moeten voor alle tijdstappen in de storm herhaald worden.

De totale relatieve belasting wordt dan:

$$belasting = \sum \frac{t_{sr}}{t_{smax}} \quad (14)$$

De grenstoestandsfunctie is gelijk aan:

$$Z = 1 - \sum \frac{t_{sr}}{t_{smax}} \quad (15)$$

Dat wil zeggen: als de totale relatieve belastingduur groter is dan 1 treedt bezwijken van de grasmat op.

Algemene opmerkingen m.b.t. grastoets

Het toetsniveau voor grasbekleding moet hoger liggen dan het niveau met een belastingkans van 1/10 per jaar (punten die onder dit niveau liggen vallen onder het dagelijks beheer). De kruin en het binnentalud worden getoetst alsof het de buitenkruinlijn is.

2.3.5 Grenstoestandsfunctie voor steenzetting

De methode voor het vaststellen van de betrouwbaarheid van steenzettingen is gebaseerd op figuur 2.2.4.5 en 2.2.2.3 van de leidraad Toetsen op Veiligheid (TAW, 1999). Het faalmechanisme kan het beste omschreven worden als “*instabiliteit van de toplaag van de steenzetting of lokale afschuiving, als gevolg van golven*”. Het faalmechanisme “*materiaaltransport*” wordt niet meegenomen omdat deze niet afhankelijk is van de golfhoogte, periode en waterstand, en bovendien meestal niet maatgevend is.

Er zijn 2 type steenzettingen onderscheiden nl.:

- ongunstige steenzetting;
- normale steenzetting.

De basis voor de toetsing vormt de eenvoudige toetsmethode type c uit de leidraad, nl. ‘*ingeklemde stenen op een granulaire filter*’. Van dit type zullen alleen de ongunstige constructies en de normale constructies beschouwd worden.

Voor de toetsing van steenzettingen zijn de volgende invoergrootheden nodig:

H_s	: significante golfhoogte op de teen van de constructie (m)
h	: waterstand (m + NAP)
z_o	: niveau ondergrens van de te toetsen bekleding (m + NAP)
z_b	: niveau bovengrens van de te toetsen bekleding (m + NAP)
T_p	: golfperiode behorende bij de piek van het spectrum (s)
$\tan \alpha$	: gemiddelde taludhelling bepaald tussen SWL +/- $1.5H_s$. Hierbij telt een eventuele berm niet mee bij het bepalen van de gemiddelde helling (-)
D	: dikte van de toplaag (m)
b	: dikte van de filterlaag en kleilaag tezamen (m)
D_{15}	: karakteristieke korrelgrootte van het zand (m)
Δ	: relatieve dichtheid $\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$ (-)
ρ_w	: soortelijke massa van water (kg/m^3)
ρ_s	: soortelijke massa van toplaag (kg/m^3)
z_q	: oploophoogte behorende bij overslag debiet van $q = 0.1 \text{ l/s/m}$ op een oneindig lang talud (m + NAP)
type bekleding	: normaal, ongunstig

De toetsingsmethode verloopt aan de hand van de volgende stappen:

Stap 0, afschuiving

Er treedt geen falen als gevolg van afschuiving op als voldaan wordt aan:

$$\Delta D + b > \min \left\{ 0,16 H_s^{0,2} T_p^{1,6} (\tan \alpha)^{0,8} ; 1,5 H_s \right\} - 1334 \cdot (1 - 1,19 \cdot \tan \alpha) D_{15} \sqrt{T_p} \quad (16)$$

Het toetsresultaat is dan goed. De grenstoestandsfunctie is als volgt:

$$Z = \Delta D + b - \left(\min \left\{ 0,16 H_s^{0,2} T_p^{1,6} (\tan \alpha)^{0,8} ; 1,5 H_s \right\} - 1334 \cdot (1 - 1,19 \cdot \tan \alpha) D_{15} \sqrt{T_p} \right) \quad (17)$$

Stap 1 t.a.v. top laag stabiliteit

$$\text{Definieer: } z_t = h + \min \left\{ 0.11 H_s \left(\frac{g T_p^2 \tan \alpha}{2\pi H_s} \right)^{0.8}; 1.5 H_s \right\}$$

Als

- $z_t > z_b$ $\Rightarrow$ bekleding faalt niet ($Z > 0$).
- $h + \frac{1}{2} z_q < z_o$ $\Rightarrow$ bekleding faalt niet ($Z > 0$)
- $h < z_o$ en $h + \frac{1}{2} z_q > z_o$ $\Rightarrow D = D/0.8 \Rightarrow$ toetsing uitvoeren (Stap 2)
- geen van de voorgaande gevallen $\Rightarrow$ toetsing uitvoeren (Stap 2)

Stap 2

Bepaal het stabiliteitsgetal, n_s , en de golfbrekerparameter, ξ_{op} , als volgt:

$$n_s = \frac{H_s}{\Delta D} \quad (18)$$

$$\xi_{op} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_s}{\frac{g}{2\pi} T_p^2}}} \quad (19)$$

Stap 3

Bepaal de toetscriteria m.b.t. de grens tussen goed en twijfelachtig:

- Voor een *normale constructie* geldt m.b.t. de grens tussen goed en twijfelachtig:
 voor $0.6 < \xi_{op} \leq 2.0$ $\Rightarrow n_{s;onder} = 4.08 \xi_{op}^{-1.014}$
 voor $2.0 < \xi_{op} < 5.0$ $\Rightarrow n_{s;onder} = 11.0 \xi_{op}^{-4} + 0.03 \xi_{op} + 1.25$
- Voor een *ongunstige constructie* geldt m.b.t. de grens tussen goed en twijfelachtig:
 voor $0.6 < \xi_{op} \leq 2.0$ $\Rightarrow n_{s;onder} = 3.07 \xi_{op}^{-1.014}$
 voor $2.0 < \xi_{op} < 5.0$ $\Rightarrow n_{s;onder} = 6.5 \xi_{op}^{-4} + 0.02 \xi_{op} + 1.09$

De grenstoestandsfunctie tussen goed en twijfelachtig is als volgt:

$$Z = n_{s;onder} - n_s \quad (20)$$

Eventueel kan ook een toetsing uitgevoerd worden m.b.t. de grens tussen twijfelachtig en onvoldoende. Bij de opzet van HYDRA-K is er echter voor gekozen om te toetsen op de grens tussen goed en twijfelachtig, waardoor onderstaande formules niet nodig zijn. Voor testdoeleinden kan wel gebruik gemaakt worden van deze grens omdat deze een iets afwijkend verloop heeft dan de grens tussen goed en twijfelachtig:

- Voor een *normale constructie* geldt m.b.t. de grens tussen twijfelachtig en onvoldoende:
 voor $0.6 < \xi_{op} \leq 2.1$ $\Rightarrow n_{s;boven} = 6.68 \xi_{op}^{-0.723}$
 voor $2.1 < \xi_{op} < 5.0$ $\Rightarrow n_{s;boven} = 12.0 \xi_{op}^{-1.5} + 1.5 \xi_{op} - 3.12$

- Voor een *ongunstige constructie* geldt m.b.t. de grens tussen twijfelachtig en onvoldoende:
 voor $0.6 < \xi_{op} \leq 2.3$ $\Rightarrow n_{s; boven} = 3.07 \xi_{op}^{-1.014}$
 voor $2.3 < \xi_{op} < 5.0$ $\Rightarrow n_{s; boven} = 13.8 \xi_{op}^{-4} + 0.26 \xi_{op} + 1.53$

De grenstoestandsfunctie tussen goed en twijfelachtig is als volgt:

$$Z = n_{s; onder} - n_s \quad (21)$$

2.4 Aandachtspunten bij het inprogrammeren van grenstoestandsfuncties

2.4.1 Omgaan met meerdere typen bekledingen op één dijkprofiel

In de huidige versie van HYDRA-K wordt gerekend met één bekledingstype, nl. steenzetting (blokken). Zodra de additionele bekledingstypen (gras en asfalt) zijn toegevoegd aan HYDRA-K (of aan het demonstratiemodel) moeten analyses met meerdere bekledingstypen op één dijkprofiel tot de mogelijkheden van HYDRA-K behoren. Tevens moet HYDRA-K om kunnen gaan met dijkprofielen waarbij voor één type (bijvoorbeeld een steenzetting) er verschillende diktes aanwezig kunnen zijn.

Daarom wordt voorgesteld om de dijkdoorsnede door de gebruiker te laten opsplitsen in (kleine) delen waarvoor het mogelijk is de eigenschappen van de bekleding in te voeren en aan te geven tussen welke niveaus deze bekleding aanwezig is. Zo zou men kunnen aangeven dat van NAP + 1,20 m tot NAP + 2,30 m er een normale steenzetting is met dikte van 0,30 m. en soortelijke massa van $\rho = 2.350 \text{ kg/m}^3$, dat die van NAP + 2,30 m tot NAP + 5,30 m. 0,40 m. dik is en dat vanaf NAP + 5,30 m er een goede grasmatten aanwezig is. Het programma rekent dan voor elk van deze delen de faalkans uit. Dit betekent dat gedurende een faalkansberekening de Z-functie per wind/waterstand combinatie binnen HYDRA-K meerdere keren doorgerekend moet worden. In de huidige versie van HYDRA-K is dat nog maar beperkt mogelijk, d.w.z. slechts voor het faalmechanisme blokkenstabiliteit, waar de dijk in twee delen is onderverdeeld (namelijk boven en onder de berm).

Voor ontwerpberekeningen geldt eveneens dat meerdere niveaus van de dijk doorgerekend moeten worden. Per bekledingstype moet dan bepaald worden aan welke karakteristieken voldaan moet worden om de door de gebruiker ingevoerde faalkans te realiseren. Voor steenzetting en asfalt betekent dit dat de dikte vastgesteld moet worden. Voor grasbekleding worden drie condities doorgerekend (goed, matig of slecht, zie paragraaf 2.3.4) en wordt bepaald of aan de faalkans voldaan kan worden en zo ja, welke graskwaliteit daarvoor nodig is.

2.4.2 Omgaan met het stormverloop

Probleemstelling

Onder invloed van een golfaanval kan een taludbekleding (gras, steen, asfalt) bezwijken en daarmee het falen van de gehele kering inleiden. De beschrijving van het gehele faalproces is uitermate complex. Bij een steenbekleding zullen meestal eerst enkele lokale beschadigingen optreden. Daarna krijgen de golven meer vat op de constructie en kan een gat van enkele vierkante meters in de bekleding worden geslagen. Dit stadium wordt vervolgt door het aantasten van het onderliggende filter en kleilagen waarna tenslotte de zand- of kleikern aan erosie wordt blootgesteld.

In het programma PC-Ring is dit hele proces gemodelleerd en in de berekening opgenomen (TNO-bouw, 2003a). Uiteraard bevat dit proces een groot aantal vereenvoudigingen en schematiseringen. Eén van de belangrijkste vereenvoudigingen is dat gedaan wordt alsof de waterstand en golfhoogte zich gedurende de gehele storm op het maximale niveau bevinden. Verder wordt elke bekleding die op het talud aanwezig is geacht aan die belasting te worden blootgesteld. Tenslotte wordt het falen van de bekleding (gras uitgezonderd) geacht plaats te vinden direct bij het begin van de storm: de onderliggende lagen en kleikern krijgen bij falen van de bekleding dus de hele stormduur te verwerken.

Afwegingen

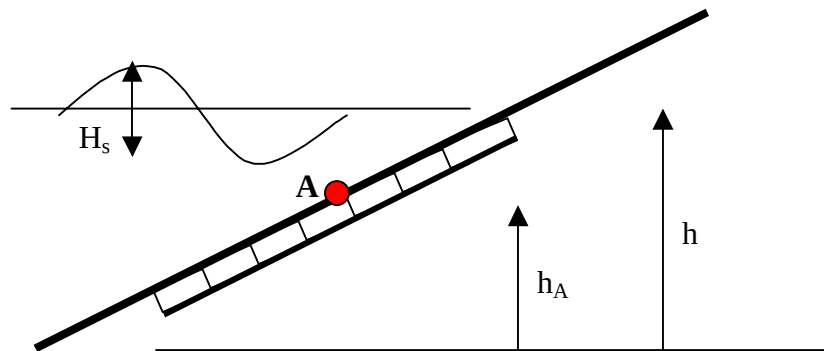
De vraag is nu welk model bij HYDRA-K zal worden ingevoerd. In vergelijking met bovengeschetste schematisering zal het programma worden beperkt tot de beschadiging van de toplaag. Voor de mechanismebeschrijving wordt aangesloten bij de leidraad toetsing (TAW, 1999). Hiermee is dus een sterke vereenvoudiging bereikt. Aan de andere kant wordt wel rekening gehouden met het feit dat de storm een zeker verloop heeft en dat derhalve de meeste onderdelen van het talud maar gedurende een korte tijd en niet altijd bij maximale golfbelasting zullen worden aangevallen.

Uiteindelijk gaat het vervolgens om het uitrekenen van een toetspunt (of een aantal toetspunten) waarmee eenvoudige controles en ontwerpberekeningen kunnen worden uitgevoerd. Het is dus niet de bedoeling om via HYDRA-K een gedetailleerde of geavanceerde toetsing of ontwerp uit te voeren.

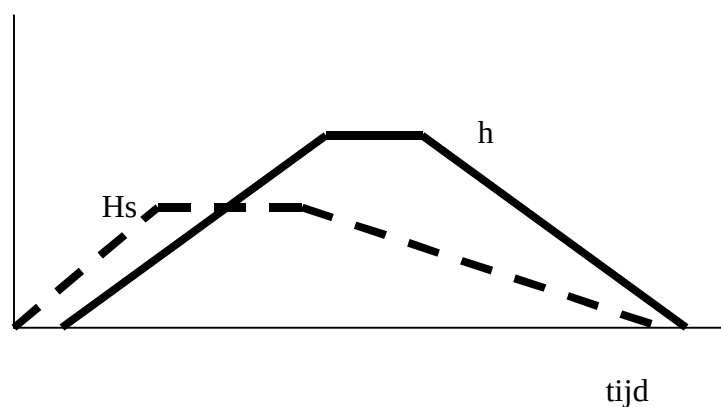
Bij een toetsing kan het eindresultaat voldoende, onvoldoende of twijfelachtig zijn. Bij “voldoende” of “onvoldoende” is inderdaad afdoende aangetoond dat geen of wel maatregelen nodig zijn. Bij het predikaat “twijfelachtig” is nog geen voldoende veiligheid aangetoond maar wordt de kans redelijk geacht dat nader onderzoek alsnog tot een voldoende resultaat zal leiden. Dit nader onderzoek kan van velerlei aard zijn. Het kan bijvoorbeeld zijn dat van een bepaalde bekleding de dikte niet bekend is en er voorlopig van een kleine waarde is uitgegaan. Nader onderzoek zou dan zekerheid kunnen verschaffen over de werkelijke dikte en daarmee uitsluitsel geven over het al dan niet voldoen van de bekleding. Ook kan mogelijk gedrag tijdens een recente storm gebruikt worden als een update van de berekening. Men kan echter ook denken aan het hanteren van betere en meer verfijnde modellen. In al deze gevallen kan men via simulaties vooraf nagaan of een

dergelijke actie zinvol is. Als dat het geval is, is daarmee de status twijfelachtig gerechtvaardigd. Voor de procedure zelf heeft dit geen consequenties.

Beschouw nu een bepaald niveau van het talud (punt A in Figuur 2.1). De belasting heeft gedurende de storm een verloop als weergegeven in Figuur 2.2. Eerst bevindt het onderdeel zich ver boven de stilwaterlijn en is er in het geheel geen belasting. Vervolgens zullen de tongen van de hoogste golven de plaats A op het talud bereiken. Met het voortschrijden van de tijd zullen de intensiteit van de golven en de waterstand toenemen. Het stilwaterniveau zal afhankelijk van de positie van A dit punt al dan niet passeren. In een later stadium van de storm kan eventueel de belastingshistorie in omgekeerde richting worden afgelegd.



Figuur 2.1 Talud onder golfaanval



Figuur 2.2 Verloop van waterstand en significante golfhoogte in de tijd

Voorgestelde uitvoering in HYDRA-K

Ter bepaling van de faalkans met HYDRA-K wordt eerst (zie het stappenplan van paragraaf 2.3.2) een selectie gemaakt uit de beschikbare simultane wind/waterstandmetingen. De wijze van selecteren is afhankelijk van de keuze van de gebruiker omtrent welke hydraulische belasting als representatief voor een stormgebeurtenis wordt beschouwd:

Optie I: de belasting op het moment dat de *waterstand* maximaal is; of

Optie II: de belasting op het moment dat de *belasting* maximaal is.

In het eerste geval worden uit de meetreeks eerst de hoogste waterstanden met bijbehorende windsnelheden geselecteerd en vervolgens de stappen 2 t/m 5 doorlopen. In het tweede geval worden de stappen 2 t/m 5 uit paragraaf 2.3.2 doorlopen voor alle beschikbare simultane metingen, waarna vervolgens per stormgebeurtenis het moment van maximale belasting wordt vastgesteld. Het doorrekenen van het verloop van de storm kan derhalve reeds met de huidige versie van HYDRA-K (versie 2.05) uitgevoerd worden.

Met name vanwege het feit dat HYDRA-K in de toekomst (en in het demonstratiemodel van fase 2) om moet kunnen gaan met meerdere bekledingstypes op één dijkprofiel, maakt dat optie I voor het bepalen van de faalkans van bekledingen onbruikbaar wordt². Immers, een stuk bekleding dat op een relatief laag niveau ligt, bevindt zich op het moment van de hoogste waterstand wellicht onder de stilwaterlijn waardoor bijvoorbeeld de belasting door golfklappen op dat moment nihil is. In de aanloop naar of de uitloop van de stormgebeurtenis kan de belasting door golfklappen mogelijk wel groot zijn op het moment dat het bewuste deel van het profiel zich boven de stilwaterlijn bevindt. De keuze voor optie I zou derhalve een grove onderschatting van de hydraulische belasting opleveren.

Voor alle bekledingstypes wordt daarom voorgesteld om het principe van optie II te volgen, d.w.z. voor elk uur in de storm wordt de hydraulische belasting bepaald en vervolgens wordt de maximale belasting per stormgebeurtenis bepaald. Dit maximum wordt per taludniveau bepaald. Voor het belastingtype “stroming op het buitentalud” bij grasbekleding wordt daarbij ook nog eens de duur van de belasting bepaald. Optie I komt derhalve te vervallen voor alle bekledingstypes en zal niet meer gepresenteerd worden in de user-interface (behalve wanneer de gebruiker de faalmechanismen golfoploop en golfoverslag selecteert). Opgemerkt moet worden dat de keuze voor het principe van optie II zal leiden tot significant langere rekentijden.

2.4.3 Stormduur als additionele stochast

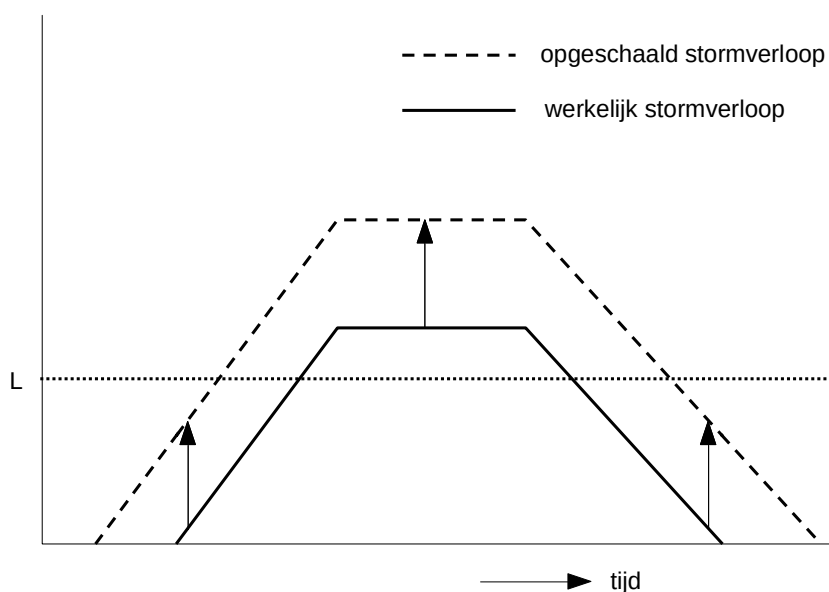
Voor het belastingtype “stroming op het buitentalud” bij grasbekleding is de duur van de hydraulische belasting (stormduur) één van de bepalende factoren. In feite is de stormduur daarmee op “verborgen” wijze verworpen tot één van de stochasten in het hydraulische belastingmodel. Met “verborgen” wordt bedoeld op het feit dat de duur niet expliciet is opgenomen in de methode de Haan, maar door het opschalen van de windsnelheid en de waterstand wel degelijk toeneemt en in feite dus ook opgeschaald wordt. Echter, het is niet gezegd dat deze wijze van opschalen van de stormduur zomaar is toegestaan. Immers, de

² voor het bepalen van faalkansen voor de faalmechanismen “golfoploop” en “golfoverslag” is optie I wel bruikbaar

overige twee stochasten (windsnelheid en waterstand) moeten ook voldoen aan bepaalde voorwaarden om de “methode de Haan” te mogen toepassen (nl. onderlinge asymptotische afhankelijkheid).

Aan welke eisen exact voldaan moet worden hangt af van de wijze waarop de duur gemodelleerd wordt. Eén van de mogelijkheden is om een verdelingsfunctie voor de duur af te leiden en op basis daarvan de duur op te schalen in het standaard exponentiële vlak, op dezelfde wijze als de windsnelheid en de waterstand. In dat geval dient de duur asymptotisch afhankelijk te zijn van de wind en de waterstand. Een andere mogelijkheid is om de stormduur af te leiden uit de hydraulische belasting voor de dijk, die volgt uit de opgeschaalde windsnelheid en waterstand (zoals eerder geschetst). Door opschaling van wind en waterstand neemt de stormduur automatisch toe (zie Figuur 2.3). Uit data-analyse zal moeten blijken of bij een toename van de windsnelheid en de waterstand de stormduur in werkelijkheid gemiddeld evenveel toeneemt als weergegeven in deze figuur.

In de offerte-fase is met de opdrachtgever overeengekomen dat faalmechanismen en bekledingstypen die niet binnen het concept van HYDRA-K passen niet geïmplementeerd worden in het demonstratiemodel van fase 2 en dat een work-around wordt beschreven in fase 4. De term “binnen het concept passen” is nogal subjectief, maar afhankelijk van de uitkomsten van bovenstaande data-analyses kan gesteld worden dat het belastingtype “stroming op het buitentalud” bij grasbekleding vanwege de invloed van de duur voor deze kwalificatie in aanmerking komt. Desondanks wordt voorgesteld om dit belastingstype toch in te programmeren in fase 2. De reden hiervoor is dat het belastingtype “golfklappen” voor grasbekleding in elk geval ingeprogrammeerd wordt (daar speelt de duur immers geen rol) waardoor het toevoegen van het belastingtype “stroming op het buitentalud” een relatief kleine extra inspanning oplevert. Zolang benadrukt wordt dat in dat geval *wellicht* niet aan de vereiste voorwaarden van de gebruikte methode wordt voldaan is dat niet erg. Het gaat hier immers om een demonstratiemodel en niet om een “echte” versie van HYDRA-K. In ieder geval wordt in fase 4 onderzocht of het opstellen van een workaround voor het belastingtype “stroming op het buitentalud” bij grasbekleding noodzakelijk is.



Figuur 2.3 Schematische weergave van het opschalen van het stormverloop in de tijd, hetgeen leidt tot een toename in de overschrijdingsduur van het niveau L

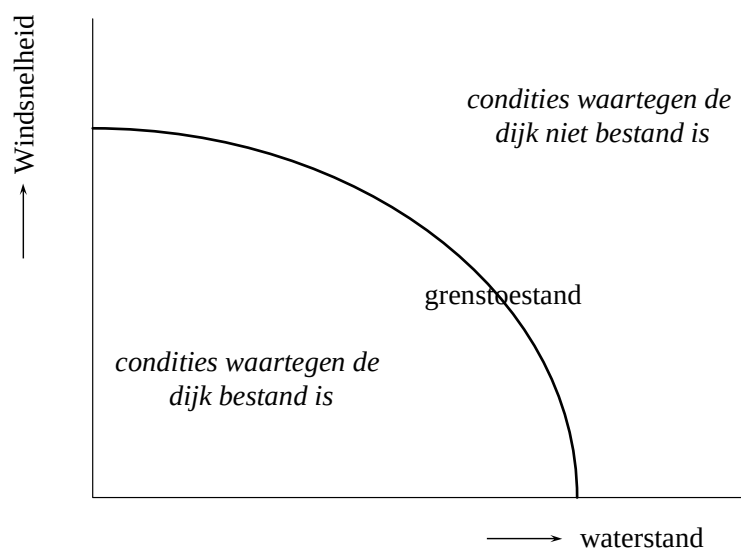
2.5 Overige activiteiten fase 2

Behalve het inbouwen van de bekledingstypen met bijbehorende faalmechanismen, wordt in fase 2 nog een aantal activiteiten uitgevoerd:

1. Visualisatie van de grenstoestandsfunctie voor elk van de ingebouwde faalmechanismen en bekledingstypen; en
2. Monitoren van problemen en aandragen van oplossingen.

2.5.1 Visualisatie van de grenstoestandsfunctie

Dit onderdeel vergt relatief weinig inspanning aangezien grotendeels geprofiteerd kan worden van datgene wat reeds beschikbaar is in de code van HYDRA-K. Voor de momenteel in HYDRA-K beschikbare faalmechanismen en bekledingstypen kan immers de grenstoestandsfunctie gevisualiseerd worden. De belangrijkste activiteit bestaat dan ook uit het verzorgen van de correcte aanroep naar deze functionaliteit. Onderstaande figuur geeft ter illustratie een indruk van de wijze waarop de grenstoestandsfunctie kan worden gevisualiseerd.



Figuur 2.4 Schematische weergave van de grenstoestand

2.5.2 Monitoren van problemen en aandragen van oplossingen

Voor de volgende drie locaties worden aan het eind van fase 2 testberekeningen uitgevoerd:

1. Den Helder: $x = 111752$; $y = 553252$;
2. Pettemer zeewering: $x = 104548$; $y = 527420$; en
3. Vlissingen: $x = 29571$; $y = 384983$.

Het voornaamste doel van de testen is om vast te stellen of HYDRA-K dié berekeningen uitvoert die de gebruiker aanroept en of de uitvoer in het gewenste format beschikbaar komt. Verder zal op basis van ervaring met eerdere berekeningen met HYDRA-K een inschatting gemaakt worden van het realiteitsgehalte van de uitkomsten van de berekeningen.

3 Plan van aanpak fase 3

3.1 Inleiding

In fase 3 worden de ingebouwde faalmechanismen in HYDRA-K getest op nauwkeurigheid, door controleberekeningen uit te voeren met een ander statistisch rekenprogramma, nl. PC-Ring. De volgende activiteiten gaan uitgevoerd worden in fase 3:

1. vergelijking voor gestileerde modellen;
2. inbouwen faalmechanismen in PC-Ring;
3. berekeningen voor drie testlocaties met PC-Ring en HYDRA-K; en
4. vergelijking van HYDRA-K en PC-Ring.

Elk van deze stappen wordt in het restant van dit hoofdstuk nader toegelicht.

PC-Ring

PC-Ring is een softwarepakket dat door TNO is ontwikkeld in opdracht van DWW om overstromingskansen van dijkkringgebieden in Nederland te bepalen (zie TNO-Bouw, 2003a,b,c). In het kader van het project “de veiligheid van Nederland in kaart” (VNK) zijn de hydraulische belastingmodellen in PC-Ring recentelijk aangepast aan de modellen die in het kader van het hydraulische randvoorwaardenboek zijn (of worden) ontwikkeld (zie WL/HKV, 2003a,b). Voor de kustsystemen is gekozen om de belastingmodellen zoveel mogelijk analoog aan HYDRA-K op te zetten. In grote lijnen betekent dit dat de hydraulische belastingmodellen in PC-Ring en HYDRA-K identiek zijn met betrekking tot:

- de onderverdeling van de Nederlandse kust in een zestal deelgebieden, waarvoor aparte wind-waterstand statistieken worden afgeleid;
- het gebruik van marginale statistieken van de windsnelheid en waterstand voor sectoren van 30 graden in een aantal meetstations langs de kust (zie RIKZ, 2000);
- het gebruik van simultane wind-waterstandsmetingen voor verschillende combinaties van wind- en waterstandstations langs de Nederlandse kust, op basis waarvan de wind-waterstandstatistiek wordt afgeleid;
- het bepalen van lokale waterstanden op basis van triangulaire interpolatie tussen de waterstanden in de stations waarvoor de statistiek voor sectoren van 30 graden bekend is;
- het uitvoeren van een correctie op de berekende waterstand opdat deze gelijk is aan het toetspeil (N.B. deze correctie is uitgevoerd voor de Westerschelde, de gesloten kust en de Waddenzee, maar vooralsnog niet voor de Oosterschelde).
- het bepalen van lokale waterstanden in de Oosterschelde op basis van triangulaire interpolatie en invoerbestanden, afkomstig van IMPLIC-berekeningen;
- het bepalen van de lokale golfbelasting uit de wind en waterstand op basis van invoerbestanden, afkomstig van SWAN-berekeningen.

Het grote verschil tussen HYDRA-K en PC-Ring is dat eerstgenoemde de faalkansberekeningen uitvoert op basis van de “methode De Haan”, terwijl laatstgenoemde in principe de FORM-methode (First Order Reliability Method) hanteert, maar tevens de mogelijkheid biedt om SORM (Second Order Reliability Method), directional sampling of numerieke integratie te hanteren. Verder kan met PC-Ring ook voor het sterktemodel met een groot aantal stochasten worden gerekend. Zodoende kan ook de invloed van de parameters in het sterktemodel op het ontwerppunt worden bepaald.

PC-Ring is uitermate geschikt voor het uitvoeren van de controleberekeningen van HYDRA-K omdat de grote overeenkomsten in belastingmodellen een “eerlijke vergelijking” mogelijk maken.

3.2 Activiteiten

Een vergelijking voor gestileerde modellen

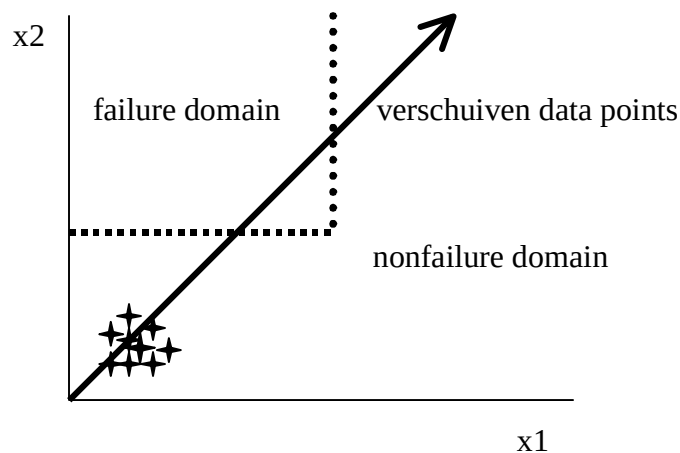
In eerdere vergelijkingsstudies (TNO/WL, 2003) tussen PC-Ring en HYDRA-modellen is naast de “formele” vergelijking ook een vergelijking gemaakt tussen gestileerde versies van de beide modellen. Met gestileerde modellen wordt bedoeld dat de modellen ontdaan zijn van de complexe en rekenintensieve onderdelen (zoals triangulaire interpolatie van waterstanden en golfberekeningen met het model SWAN), waardoor analytische berekeningen uitgevoerd kunnen worden. Doel van een dergelijke studie is om de kern van de beide methoden bloot te leggen en de wezenlijke verschillen en overeenkomsten te kunnen vastleggen. In (TNO/WL, 2003) is ervaren dat zo, met een relatief kleine inspanning, veel inzicht in de materie verkregen wordt.

De uitbreiding van het belastingmodel in HYDRA-K met één of meer stochastische variabelen is een onderwerp dat in aanmerking komt voor een gestileerde analyse. We onderscheiden daarbij variabelen die wel en niet asymptotisch zijn gecorreleerd met de waterstand en de windsnelheid. Voor niet asymptotisch gecorreleerde variabelen (bijvoorbeeld sterkteparameters) zijn er (zie hoofdstuk 5) twee methoden in gedachten:

- niveau II
- Monte Carlo

Voor asymptotisch gecorreleerde variabelen (zoals naar het zich laat aanzien bijvoorbeeld de significante golfperiode) is er een extra mogelijkheid, namelijk de uitbreiding van de methode De Haan van twee naar drie variabelen. Verder is er de variabele stormduur, die min of meer impliciet in de signalen aanwezig is. Ook hiervoor is de “laboratoriumomgeving” van de gestileerde analyse bijzonder geschikt om de meest geëigende werkwijze op het spoor te komen.

Tenslotte zal aandacht worden gegeven aan niet reguliere faaldomeinen waarbij tijdens de verschuivingsoperatie van de methode De Haan de punten eerst het faaldomein binnenlopen maar er bij doorschuiven vervolgens weer uitlopen (zie Figuur 3.1). Dergelijke fenomenen zijn zeker bij laag liggende bekledingen te verwachten.



Figuur 3.1 Schets van een niet-regulier faaldomein

Inbouwen faalmechanismen en bekledingstypen in PC-Ring

Om een controleberekening van de in fase 2 ingebouwde faalmechanismen mogelijk te maken, dienen de faalmechanismen eveneens in PC-Ring ingebouwd te worden. Hoewel een aantal van de faalmechanismen reeds geprogrammeerd is in PC-Ring, is het van eminent belang dat exact dezelfde rekenregels gehanteerd worden als in HYDRA-K. De rekenregels die, conform de leidraad toetsen, in fase 2 zijn geprogrammeerd in HYDRA-K zullen daarom ook in PC-Ring geprogrammeerd worden.

Berekeningen voor drie testlocaties met PC-Ring en HYDRA-K

Voor de volgende drie locaties worden aan het eind van fase 2 testberekeningen uitgevoerd:

1. Den Helder: $x = 111752$; $y = 553252$;
2. Pettemer zeewering: $x = 104548$; $y = 527420$; en
3. Vlissingen: $x = 29571$; $y = 384983$.

Voor de drie locaties wordt een standaard formaat van het talud aangenomen, nl helling 1:3, zonder berm. Telkens zullen voor een achttal herhalingstijden ($T=10, 30, 100, 300, 1.250, 2.000, 4000$ en 10.000 jaar) ontwerpsommen uitgevoerd worden. Deze ontwerpsommen worden uitgevoerd voor de steenbekleding en asfalt. Voor grasbekleding worden geen ontwerpsommen uitgevoerd, maar een faalkansberekening voor de drie gedefinieerde typen grasmatten (goed, matig en slecht).

Vergelijking van HYDRA-K en PC-Ring

De rekenresultaten van HYDRA-K en PC-Ring zullen naast elkaar gelegd worden en de verschillen zullen gekwantificeerd worden. De verschillen zullen geanalyseerd en (waar mogelijk) verklaard worden.

4 Plan van aanpak fase 4

Voor de faalmechanismen waarvan in fase 1 besloten is ze niet nu al in HYDRA-K in te bouwen, wordt in fase 4 een voorstel gedaan voor alternatieven voor het afleiden van de hydraulische randvoorwaarden. De volgende activiteiten gaan uitgevoerd worden in fase 4:

1. Opstellen rekenregels voor work-arounds;
2. Beschrijven werkplan voor het realiseren van work-arounds.

Afhankelijk van de bevindingen in fase 2 komen de volgende faalmechanismen hiervoor in aanmerking:

- opdrukken van asfalt;
- bezwijken van steenzetting of asfalt op een berm;
- lokale afschuiving bij steenzetting;
- materiaal transport bij steenzetting; en
- schade aan de grasbekleding als gevolg van stroming op het buitentalud.

Van de bovenstaande faalmechanismen zijn alleen de eerste twee door de opdrachtgever als optie expliciet genoemd in de offerteaanvraag. Er zal daarom eerst overlegd worden met de opdrachtgever of de wens bestaat om genoemde faalmechanismen (op de lange termijn) aan HYDRA-K toe te voegen.

Het plan van aanpak zal een voorstel bevatten over de in de work-arounds te hanteren statistische methode en de te hanteren rekenregels voor het faalmechanisme. Daarnaast zal gebruik gemaakt worden van de beschikbare kennis en ervaring die voor een aantal van de genoemde faalmechanismen is opgedaan binnen PC-Ring. Het faalmechanisme “opdrukken van asfalt” is immers reeds opgenomen in PC-Ring. Ten aanzien van het bezwijken van steenzettingen op een berm kan de methode opgenomen worden uit het toetsprogramma STEENTOETS 3.20 van WL. Voor asfaltbekledingen is echter nog geen methode beschikbaar voor het doorrekenen van een bekleding op een berm. Desondanks kan met de ervaring over de bezwijkmechanismen van deze bekledingen op taluds ad-hoc een methode opgesteld worden die bruikbaar is als work-around.

Voor faalmechanismen waar een derde stochast geïntroduceerd moet worden, is het uitvoeren van random trekkingen op basis van een (nog af te leiden) kansverdeling binnen HYDRA-K een mogelijke work-around. In hoofdstuk 5 wordt deze methode nader uitgewerkt (onder het kopje “methode 3”) maar wordt hier vast genoemd omdat de methode momenteel reeds geïmplementeerd is binnen HYDRA-K voor het belastingmodel Oosterschelde. De methode heeft derhalve in de praktijk al bewezen toepasbaar te zijn binnen HYDRA-K en is daarom een “zekere” optie om als work-around te dienen.

Tot slot kan overwogen worden om het programma PC-Ring zelf als de work-around te beschouwen. Het hydraulische belastingmodel van de kusten is reeds geprogrammeerd in PC-Ring en zoveel mogelijk gespiegeld aan het belastingmodel van HYDRA-K (zie fase 3). Een groot voordeel van PC-Ring is dat het toevoegen van een derde stochast relatief weinig inspanning vergt.

5 Plan van aanpak fase 5

5.1 Inleiding

In fase 5 wordt onderzocht of het op langere termijn technische haalbaar is om, middels enige wijzigingen aan het concept van HYDRA-K, de faalmechanismen waarvoor in fase 4 work-arounds zijn afgeleid alsnog in te bouwen in HYDRA-K. De volgende activiteiten gaan uitgevoerd worden in fase 5:

1. beschrijven methode voor het toevoegen van additionele stochasten aan HYDRA-K;
2. beschrijven van een methode voor de inbouw van faalmechanismen en bekledingstypen waarvoor in fase 4 een work-around is opgesteld; en
3. inschatten van het effect van de inbouw ten opzichte van de work-around.

Deze drie onderdelen zijn sterk aan elkaar gerelateerd. Immers, de work-arounds in fase 4 zijn opgesteld voor faalmechanismen/bekledingstypen waarvoor in fase 2 is vastgesteld dat deze niet in het huidige concept van HYDRA-K passen.

5.2 Toevoegen van additionele stochasten aan HYDRA-K

Oplossingsrichtingen die in aanmerking komen voor het toevoegen van additionele stochasten zijn:

- methode I* : Opschalen van de additionele stochasten volgens methode De Haan;
methode II : Niveau II sommen voor additionele stochasten;
methode III : Monte Carlo simulaties voor additionele stochasten;

De beschikbare methoden zullen onderzocht en uitgewerkt worden. Vervolgens zal een keuzevoorstel gemaakt worden en wordt een plan van aanpak beschreven voor de toevoeging van de stochast binnen HYDRA-K. Onderstaand worden de methoden in meer detail beschreven.

Methode I: Opschalen van de additionele stochasten volgens de methode De Haan

De faalkans- en ontwerpberekeningen in HYDRA-K zijn gebaseerd op de methode De Haan, waarmee aangenomen is dat de twee stochasten windsnelheid en waterstand onderling asymptotisch afhankelijk zijn. Indien extra stochasten aan HYDRA-K worden toegevoegd kunnen deze op dezelfde wijze opgeschaald worden als de windsnelheid en de waterstand **mits** deze stochasten asymptotische afhankelijkheid vertonen met de windsnelheid en de waterstand. Indien dat niet het geval is, vervalt deze methode als mogelijk alternatief.

Elke additionele stochast zal derhalve getest moeten worden op asymptotische afhankelijkheid met de windsnelheid, de waterstand en eventuele overige additionele stochasten. In het functioneel ontwerp van HYDRA-K (HKV, 200) staat beschreven hoe een dergelijke test uitgevoerd kan worden.

Methoden II: Niveau II sommen voor additionele stochasten

Indien nieuwe stochasten worden geïntroduceerd is het niet meer honderd procent helder of een punt in het faaldomein gelegen is of niet. Dit hangt af van de waarde van de stochast. Uiteindelijk vindt men dus voor een combinatie van windsnelheid, v , en waterstand, h , een conditionele kans op falen. De niet-conditionele faalkans volgt dan uit:

$$P_F = \frac{\exp(-\lambda)}{n} \sum_{k=1}^n P_{F_{con}}(k) \quad , \text{ met : } P_{F_{con}}(k) = P[Z < 0 | h(k), v(k)] \quad (22)$$

Waarin:

k	=	het volgnummer van de geselecteerde simultane wind-waterstandmeting
n	=	het totaal aantal geselecteerde simultane wind-waterstandmetingen
v	=	windsnelheid
h	=	waterstand
λ	=	de lengte van de verschuiving van de windsnelheid en de waterstand in het exponentiele vlak
Z	=	grenstoestandsfunctie Z
P_F	=	de faalkans van de dijk
$P_{F_{con}}$	=	de faalkans, gegeven de windsnelheid en de waterstand

De conditionele faalkans $P_{F_{con}}$ kan op verschillende manieren worden bepaald, bijvoorbeeld via een eenvoudige niveau II som.

De berekeningsgang kan ook worden omgekeerd (methode II b): men bepaalt de faalkans $P(Z < 0)$ met een niveau II procedure, daarbij echter de variabelen v en h buiten beschouwing latend. De Z -functie wordt genoteerd als:

$$Z = \beta^*(\mathbf{X}) - u$$

$$\Phi(-\beta^*(\mathbf{X})) = P(Z < 0 | \mathbf{X}) \quad (23)$$

waarin:

Z	=	kunstmatige grenstoestandsfunctie
$\mathbf{X}$	=	vector van alle nieuwe stochasten (dus m.u.v. v en h)
β^*	=	betrouwbaarheidsindex bij gegeven waarden van de parameters $\mathbf{X}$
Φ	=	verdelingsfunctie van de normale verdeling
u	=	standaard normaal verdeelde variabele

De kans $P(Z < 0 | \mathbf{X})$ wordt steeds berekend met de Methode De Haan. De formulering is eenvoudig te snappen als $\mathbf{X}$ deterministische grootheden zijn. We berekenen dan de kans $P(Z < 0)$ bij de betreffende waarden van $\mathbf{X}$. Via de tweede formule bepalen we de waarde van

β^* . Vervolgens geeft de eerste formule aan dat voor het gemiddelde, μ , en de standaarddeviatie, σ , van Z geldt:

$$\begin{aligned}\mu(Z) &= \mu(\beta^*(X)) - \mu(u) = \beta^*(X) \\ \sigma(Z) &= \sigma(u) = 1\end{aligned}\tag{24}$$

zodat voor Z de betrouwbaarheidsindex β^* terugkomt.

Als X random is, wordt $P(Z < 0 | X)$ random en daarmee wordt ook de β^* in de eerste vergelijking random. Het is immers een functie van random grootheden. We vergeten nu vervolgens de oorspronkelijk betekenis van deze β^* en vatten het gewoon op als een functievoorschrift. We kunnen dan nu voor Z een gewone niveau II som opzetten.

Methode III: Monte Carlo simulaties

In de huidige versie van HYDRA-K bevat het belastingmodel Oosterschelde reeds meer stochastische variabelen dan de alleen de wind en de waterstand, nl: [1] de duur van de windopzet [2] het faseverschil tussen het getij en de maximale windopzet, [3] het wel/niet moeten inzetten van de noodsluiter en [4] de voorspelfout van de waterstand aan de buitenzijde van de kering. Voor elk van deze vier stochasten wordt per opgeschaalde stormgebeurtenis een random trekking gedaan uit de van toepassing zijnde kansverdelingsfunctie. Deze verdelingsfuncties zijn niet gerelateerd aan de waarde van de (opgeschaalde) windsnelheid en waterstand. Daarmee is expliciet aangenomen dat de additionele stochasten onafhankelijk zijn van de windsnelheid en de waterstand. Verder is aangenomen dat de additionele stochasten ook onafhankelijk zijn van elkaar.

Deze methode is dus reeds beschikbaar in HYDRA-K en kan derhalve met een relatief klein aantal aanpassingen ook toegepast worden voor de overige watersystemen (Westerschelde, gesloten kust en Waddenzee). Daartoe dient echter eerst vastgesteld te worden of eventuele additionele stochasten daadwerkelijk onafhankelijk zijn van de windsnelheid en de waterstand en van elkaar. Indien dat niet het geval is moet de afhankelijkheid ingebouwd worden bij het uitvoeren van de random trekkingen.

Net als bij methode II (de niveau II sommen) kan de berekeningsgang ook worden omgekeerd, d.w.z. men bepaalt de faalkans $P(Z < 0)$ met een Monte Carlo berekening, daarbij echter de variabelen v en h buiten beschouwing latend (methode III b).

5.3 Additionele werkzaamheden

In fase 5 zal ook aandacht besteed worden aan een belangrijk gevolg van het toevoegen van additionele stochasten aan HYDRA-K zoals bijvoorbeeld de golfperiode of golfhoogte. In dat geval moeten namelijk nieuwe berekeningen met het golfmodel SWAN uitgevoerd worden. De huidige SWAN-sommen gaan uit van een deterministische relatie op diep water tussen enerzijds de windrichting, windsnelheid en de waterstand en anderzijds de golfhoogte en golfperiode. Voor elke combinatie van windrichting, windsnelheid en waterstand op diep water is daarom (per kustlocatie) “slechts” één SWAN-berekening uitgevoerd, aangezien de bijbehorende golfhoogte en golfperiode als bekend is verondersteld. Echter, als de

golfparameters op diep water als stochasten gemodelleerd worden, heeft dat tot gevolg dat er meerdere realisaties van de golfparameters mogelijk zijn voor een gegeven combinatie van windrichting, windsnelheid en waterstand. Voor elke combinatie van windrichting, windsnelheid en waterstand op diep water dienen daarom (per kustlocatie) meerder SWAN-berekeningen uitgevoerd te worden.

6 Referenties

- HKV, 2000: HYDRA-K, functioneel ontwerp, HKV LIJN IN WATER; december 2000.
- TAW, 1999: Leidraad toetsen op veiligheid, Technische adviescommissie voor de waterkeringen (TAW), augustus 1999.
- TNO bouw, 2003a: *Theoriehandleiding PC-ring. Deel A: Mechanismebeschrijving*, Steenbergen, H.M.G.M. en Vrouwenfelder, A.C.W.M., TNO-rapport 2003-CI-R0020. april 2003.
- TNO-bouw, 2003b: *Theoriehandleiding PC-ring. Deel B: Statistische modellen*, Vrouwenfelder, A.C.W.M. en Steenbergen, H.M.G.M., TNO-rapport 2003-CI-R0021. april 2003.
- TNO-bouw, 2003c: *Theoriehandleiding PC-ring. Deel C: Rekentechnieken*. Vrouwenfelder, A.C.W.M. en Steenbergen, H.M.G.M., TNO-rapport 2003-CI-R0022. april 2003.
- TNO/WL, 2003: Belastingmodellen Westerschelde/Waddenzee; Vergelijking HYDRA-K en PC-Ring, Vrouwenfelder, A.C.W.M. , Steenbergen, H.M.G.M, Diermanse, F.L.M., ., TNO-rapport 2003-CI-R0032. juni 2003.
- WL, 2003: *Geavanceerde toetsing(a,b) bij de Houtribsluizen*, project H4169, juni, 2003.
- WL/HKV, 2003a: De veiligheid van Nederland in Kaart, Inventariseren en inbouwen van hydraulische randvoorwaarden in PC-Ring, Fase 1: Inventarisatie belastingmodellen en gegevensverzameling; F. Diermanse, B. Thonus, I. Lammers, F. den Heijer; WL Delft Hydraulics en HKV LIJN IN WATER; april 2003.
- WL/HKV, 2003:b De veiligheid van Nederland in Kaart, Inventariseren en inbouwen van hydraulische randvoorwaarden in PC-Ring, Fase 2: Uitwerken en implementeren van belastingmodellen, B. Thonus,