

**Effectieve duur van
langeduurbelasting met
variërende golfhoogte**

Stabiliteit van steenzettingen



Effectieve duur van langeduurbelasting met variërende golfhoogte

Stabiliteit van steenzettingen

Mark Klein Breteler

1204727-013

Titel

Effectieve duur van langeduurbelasting met variërende golfhoogte

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
RWS Waterdienst	1204727-013	1204727-013-HYE-0004	18

Trefwoorden

Steenzettingen, belastingduur

Samenvatting

In het rekenmodel Steentoets wordt weliswaar rekening gehouden met de belastingduur, maar gedurende de belastingperiode wordt gerekend met een constante golfhoogte.

Voor het meewegen van een variërende golfhoogte gedurende de belastingperiode zijn er twee methodes vergeleken. Om de twee methodes goed te kunnen vergelijken is de werkelijke belastingduur met variërende significante golfhoogte omgerekend naar een kortere periode met constante significante golfhoogte (gelijk aan de maximale). Deze kortere periode wordt de effectieve belastingduur genoemd.

De methoden zijn:

- 1 Energiemethode: de effectieve belastingduur wordt zo gekozen dat de totale golfenergie gelijk is aan die in de werkelijke belastingperiode.
- 2 Drempelwaardemethode: de effectieve belastingduur wordt zo gekozen dat het aantal golven dat boven een bepaalde drempelwaarde uitkomt gelijk is aan die in de werkelijke belastingperiode.

De energiemethode blijkt een beduidend grotere effectieve belastingduur op te leveren dan de drempelwaardemethode.

Op basis van ervaring met steenzettingen is geconcludeerd dat de voorkeur uitgaat naar de drempelwaardemethode. Als eerste schatting is de drempelwaarde gelijk gesteld aan de significante golfhoogte op de top van de storm. De invloed van de mate waarin de drempelwaarde afwijkt van de significante golfhoogte op de top van de maatgevende storm, blijkt beperkt.




Het onderhavige onderzoek is uitgevoerd in het kader van het meerjarige project 'Adviesing steenbekledingen Zeeland' voor het Projectbureau Zeeweringen (PBZ). Dit projectbureau is opgericht ten behoeve van de renovatie van de steenzettingen in Zeeland en is een samenwerking van Rijkswaterstaat Zeeland en het Waterschap Scheldestromen. Contractueel is de Waterdienst van Rijkswaterstaat de opdrachtgever namens PBZ voor het onderhavige onderzoek. Het deel van het project dat gericht is op kennisontwikkeling sluit aan op het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen dat uitgevoerd is in de periode van 2003-2009 in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat namens PBZ.

Referenties

Waterdienst zaaknummer 31054958 / 4500180616

Contactpersoon Waterdienst: K. Saathof

Contactpersoon Projectbureau Zeeweringen van RWS: Y. Provoost

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	nov. 2011	Mark Klein Breteler		Robert 't Hart		Marcel van Gent	
2	febr. 2012	Mark Klein Breteler		Robert 't Hart		Marcel van Gent	

Status

definitief

Titel

Effectieve duur van langeduurbelasting met
variërende golfhoogte

Opdrachtgever

RWS Waterdienst

Project

1204727-013

Kenmerk

1204727-013-HYE-0004

Pagina's

18

Inhoud

1 Inleiding	1
2 Methode 1: Vertaling naar constante H_s met gelijkblijvende totale golfenergie	3
3 Methode 2: vertaling op basis van aantal golven boven $H_{drempel}$	7
4 Vergelijking van de methoden	9
5 Conclusie	13
6 Referenties	15
Bijlage(n)	
A Mathematische benadering lange duur sterkte van steenzettingen (Infram, 2009)	A-1
B Langeduur sterkte van steenzettingen uit proeven bepalen	B-1

1 Inleiding

In 2005 is een rapport opgesteld over de invloed van langeduurbelasting op steenzettingen (Klein Breteler e.a. 2005). De conclusies in dat rapport zijn gebaseerd op proeven in de Deltagoot waarbij gedurende vele uren enkele typen steenzettingen zijn belast. Dit heeft geleid tot de noodzakelijke informatie over het afnemen van de stabiliteit naarmate de belastingduur groter is.

De proeven in de Deltagoot zijn uitgevoerd met een constante golfhoogte en constante waterstand. In de werkelijkheid is er vrijwel altijd een variërende waterstand en golfhoogte tijdens de maatgevende storm. Voor het meenemen van de invloed van de variërende waterstand is in Steentoets al een bevredigende methode opgenomen. Het komt er hierbij op neer dat alleen de belastingduur meetelt als de waterstand tussen twee niveaus ten opzichte van de maximaal belaste steen zit.

Voor het meenemen van de variërende golfhoogte kunnen verschillende methoden gebruikt worden. In dit rapport worden twee methodes gepresenteerd.

De tweede methodes zijn in essentie:

- 1 Het vertalen van de periode met variërende significante golfhoogte H_s naar een (kortere) periode met een constante H_s gelijk aan de maximale H_s tijdens de storm, waarbij de totale golfenergie op de betreffende steenzetting hetzelfde is.
- 2 Een vertaling op basis van een specifiek gekozen drempelwaarde van de golfhoogte $H_{drempel}$. In elk deel van de storm worden alleen de afzonderlijke golven beschouwd die groter zijn dan $H_{drempel}$. Als de significante golfhoogte klein is, dan zijn dit slechts weinig golven, terwijl tijdens de top van de storm het percentage golven groter dan $H_{drempel}$ veel meer is. Hierbij moet gebruikgemaakt worden van een goed gekozen golfhoogteverdeling (zoals Rayleigh of Weibull).

Deze tweede methode is voorgesteld door Ep van Hijum. Zijn rapport (Hijum e.a. 2009) is integraal opgenomen in appendix A.

Deze rapportage is bedoeld als discussiestuk om een keuze te maken uit deze twee methodes en te beslissen in hoeverre het noodzakelijk is om de analyse van de proeven uit 2005 overnieuw te doen.

Voor het gebruik van de drempelwaardemethode is het voldoende om simpelweg het aantal golven boven de drempel te tellen, want volgens de hypothese dragen alleen die bij aan het instabiel worden van de steenzetting. In de huidige rapportage is er echter voor gekozen om op basis hiervan een effectieve belastingduur te bepalen. Dit maakt een vergelijking van de methodes eenvoudig mogelijk.

Het onderhavige onderzoek is uitgevoerd in het kader van het meerjarige project 'Advisering steenbekledingen Zeeland' voor het Projectbureau Zeeweringen (PBZ). Dit projectbureau is opgericht ten behoeve van de renovatie van de steenzettingen in Zeeland en is een samenwerking van Rijkswaterstaat Zeeland en het Waterschap Scheldestromen. Contractueel is de Waterdienst van Rijkswaterstaat de opdrachtgever namens PBZ voor het onderhavige onderzoek. Het deel van het project dat gericht is op kennisontwikkeling sluit aan op het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen dat uitgevoerd is in de periode van 2003-2009 in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat namens PBZ.

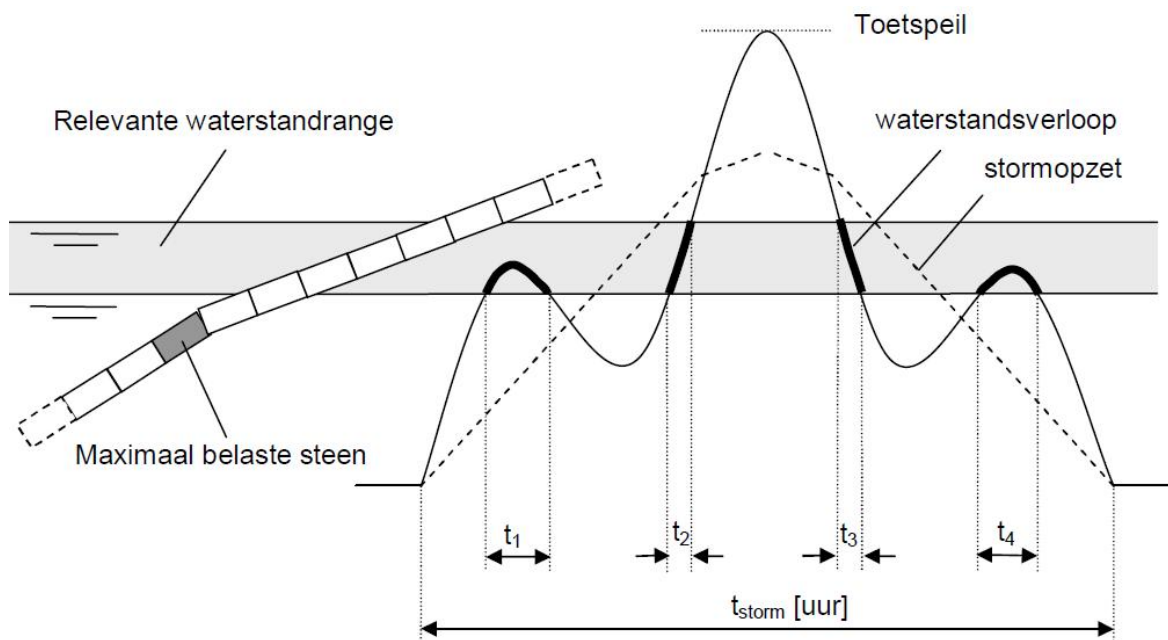
2 Methode 1: Vertaling naar constante H_s met gelijkblijvende totale golfenergie

In de Deltagoot zijn een aantal type steenzettingen beproefd met een langeduurbelasting. Hieruit is gebleken dat naarmate de golfbelasting langer aanhoudt, de schade al ontstaat bij een kleinere significante golfhoogte. Deze proeven zijn uitgevoerd met een bijna constante waterstand en significante golfhoogte.

In de praktijk willen we deze kennis toepassen op locaties waar zowel de waterstand als de golfhoogte tijdens de toetsomstandigheden varieert.

Voor een deel wordt daar al rekening mee gehouden in de huidige versie van Steentoets (vanaf Steentoets2008 versie1.00). In Steentoets wordt daarvoor de volgende procedure gehanteerd (zie Figuur 2.1):

- 1 Bij het zoeken naar de maatgevende waterstand voor de te toetsen steenzetting wordt in een loop een bepaalde waterstand gekozen: h_{mws} .
- 2 Bij h_{mws} wordt de maximaal belaste steen berekend.
- 3 Dan wordt de range van waterstanden berekend waarbij de golven deze steen zwaar belasten. Daarvoor wordt gerekend met de golfcondities bij h_{mws} .
- 4 De totale duur dat de waterstand tussen deze grenzen ligt, is gelijk aan de belastingduur.
- 5 De stabiliteit van de steenzetting wordt vervolgens berekend met de golfcondities bij h_{mws} en de zo berekende belastingduur.



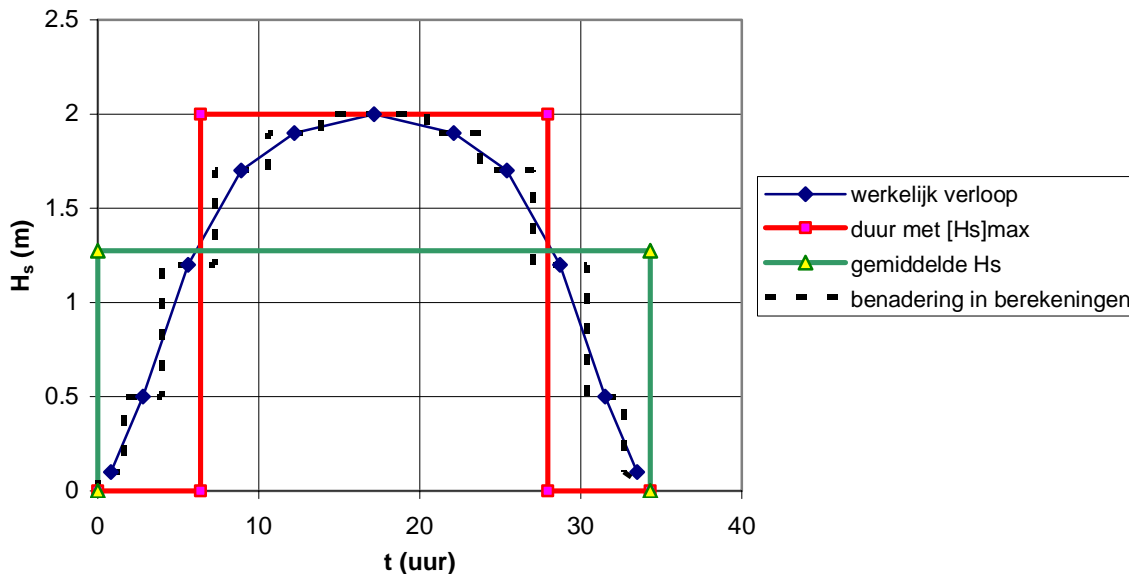
Figuur 2.1 Belastingduur voor maximaal belaste steen ($t_1 + t_2 + t_3 + t_4$)

Dat betekent dat de steenzetting doorgerekend wordt met een constante golfhoogte gedurende de gehele belastingperiode. In werkelijkheid zal de golfbelasting variëren.

De variërende golfbelasting kan alleen via een omweg op een praktisch haalbare manier in de berekeningen verdisconteerd worden. Een van de methoden daarvoor is het omrekenen

van de werkelijke belastingduur met variërende golfcondities naar een effectieve belastingduur met constante golfcondities op basis van golfenergie. De effectieve belastingduur moet zo gekozen worden dat de totale golfenergie gelijk is aan die in de werkelijke belastingperiode.

Dit is in Figuur 2.2 in beeld gebracht.



Figuur 2.2 Voorbeeld van variërende golfhoogte als functie van de tijd, en twee alternatieven met dezelfde golfenergie.

In deze figuur is het werkelijke verloop van de golfhoogte eerst geschematiseerd tot een aantal korte perioden met constante golfhoogte. In elk van deze perioden is de bijdrage aan de totale golfenergie berekend met de volgende formule:

$$E_i \triangleq N_i \cdot H_{s,i}^2 \quad (2.1)$$

Met:

- E_i = golfenergie in periode i (W/m)
- N_i = aantal golven in periode i (-)
- $H_{s,i}$ = significante golfhoogte in periode i (m)

Deze formule geldt met name voor relatief ondiep water. Voor diep water zou hier de golfperiode aan toegevoegd moeten worden, maar omdat onder toetsomstandigheden de waterdiepte voor de dijk niet al te groot is ten opzichte van de golflengte, wordt hier voor de eenvoud uitgegaan van de ondiepwater-benadering.

De rode lijn in Figuur 2.2 geeft het verloop van de golfhoogte weer met dezelfde golfenergie, maar een constante significante golfhoogte ter grootte van de maximale significante golfhoogte. De duur van de belastingperiode is korter gemaakt om te zorgen dat de golfenergie hetzelfde is. Hiervoor zijn de volgende formules gebruikt:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n N_i H_{s,i}^2}{[H_s]_{\max}^2} \quad (2.2)$$

$$t_{\text{belast}} \approx N \cdot T_p / 1,1 \quad (2.3)$$

Met:

N = aantal golven in de effectieve belastingduur (-)

$[H_s]_{\text{max}}$ = maximale significante golfhoogte in de belastingperiode (m)

t_{belast} = belastingduur (s)

T_p = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

3 Methode 2: vertaling op basis van aantal golven boven

$H_{drempel}$

Het effect van de variërende golfcondities op de stabiliteit van de steenzetting kan ook verdisconteerd worden door uit te gaan van de hypothese dat in een golfveld alleen de golven die hoger zijn dan een bepaalde waarde meetellen. Deze hypothese gaat uit van een specifieke drempelwaarde van de golfhoogte. Elke golf die boven deze drempelwaarde uitkomt, draagt bij aan de belastingduur die uiteindelijk tot instabiliteit kan leiden. Deze hypothese is onderstaand en in appendix A nader toegelicht.

In een golfveld met constante significante golfhoogte heeft elke afzonderlijke golf een andere hoogte. Als de waterdiepte niet al te klein is ($d/H_s > \text{ca. } 3$) is de verdeling van golfhoogtes ongeveer overeenkomstig die van Rayleigh. In dat geval zijn 13,5% van de golven hoger dan de significante golfhoogte. Verder geldt bijvoorbeeld dat de golfhoogte met overschrijdingsfrequentie van 2% ca. 1,4 maal hoger is dan H_s .

Voor de relatie tussen de hoogte van afzonderlijke golven en de overschrijdingsfrequentie geldt de volgende formule:

$$p = \exp\left(-2\left(\frac{H_{p\%}}{H_s}\right)^2\right) \quad (3.1)$$

Ofwel:

$$\frac{H_{p\%}}{H_s} = \sqrt{\frac{\ln(p)}{-2}} = \sqrt{\frac{\ln(p)}{\ln(0,135)}} \quad (3.2)$$

Met:

$H_{p\%}$ = hoogte van afzonderlijke golven met overschrijdingsfrequentie p (m)

p = overschrijdingsfrequentie (-)

$\ln(x)$ = natuurlijke logaritme van x

$\exp(x) = e^x$

Volgens deze hypothese gaat het niet primair om het aantal uren dat de golven op de steenzetting beuken, maar gaat het om het aantal golven dat boven een bepaalde drempelwaarde $H_{drempel}$ uitkomt. Bij een lage significante golfhoogte is dat maar bijvoorbeeld 1 op de 100 golven, maar zodra de significante golfhoogte toeneemt kan die toenemen tot bijvoorbeeld 1 op de 3 golven.

Aangenomen wordt dat de effectieve belastingduur evenredig is met het aantal golven dat boven de drempelwaarde uitkomt.

Het aantal golven, dat in een deel van de belastingperiode boven de drempelwaarde uitkomt, kan berekend worden met:

$$N_{H>drempel} = N_i \cdot \exp\left(-2\left(\frac{H_{drempel}}{H_{s,i}}\right)^2\right) \quad (3.3)$$

Met:

N_i = aantal golven in periode i (-)

$N_{H>drempel}$ = aantal golven boven de drempel in periode i (-)

$H_{s,i}$ = significante golfhoogte in periode i (m)

$H_{drempel}$ = drempelwaarde van de golfhoogte (m)

De hoogte van de drempelwaarde is, gezien de fysische betekenis, afhankelijk van de eigenschappen van de steenzetting. Hoe groter de toplaagdikte, bijvoorbeeld, hoe hoger de drempelwaarde $H_{drempel}$. De waarde van $H_{drempel}$ kan volgens hoofdstuk 4 van Appendix A direct worden berekend uit proefresultaten. Het ligt in de lijn van de verwachting dat voor verschillende typen constructies verschillende drempelwaarden uit proefresultaten worden gevonden: geklemde zettingen gedragen zich anders dan zettingen met losse blokken. Voorts zal de drempelwaarde gekoppeld zijn aan de maximaal toelaatbare significante golfhoogte.

Maar een handige arbitraire keuze voor $H_{drempel}$ dient ook te worden overwogen. De twee volgende mogelijkheden worden daarom tegen elkaar afwogen:

- Een factor maal de maximaal toelaatbare significante golfhoogte volgens Steentoets conform de formules in hoofdstuk 4 van Appendix A (daar wordt Anamos genoemd, maar dat is inmiddels vervangen door Steentoets). De factor zou dan moeten volgen uit de heranalyse van de langeduurproeven.
- Een factor maal de maximale significante golfhoogte in de totale belastingperiode, $H_{s,max}$ (top van de storm), zoals genoemd in hoofdstuk 3 van Appendix A. De factor moet wederom volgen uit de heranalyse van de langeduurproeven.

Hoewel het relateren van $H_{drempel}$ aan de bezwijkgolffhoogte volgens Steentoets theoretisch het beste is, leidt dit tot praktische problemen. Om dit in Steentoets te kunnen onderbrengen, zal in elke iteratie van het bepalen van de maatgevende golfhoogte deze bezwijkgolffhoogte bepaald moeten worden. Het bepalen van de bezwijkgolffhoogte vergt echter een iteratie op zich, die relatief veel rekentijd vraagt. Daardoor zal het rekenmodel aanzienlijk trager worden.

Het relateren van $H_{drempel}$ aan $H_{s,max}$ is eenvoudig in Steentoets te realiseren. Het is fysisch gezien echter niet de meest optimale oplossing en moet dus gezien worden als een benadering. Deze benadering is nauwkeuriger naarmate $H_{s,max}$ in de buurt ligt van de bezwijkgolffhoogte volgens Steentoets. Juist dan is het belangrijk om nauwkeurig te rekenen, omdat we dan in de buurt zitten van het goed of afkeuren van de steenzetting. Daarom kan deze benadering als een praktische en voldoende nauwkeurige oplossing gezien worden.

De invloed van het hoger of lager kiezen van $H_{drempel}$ op de grootte van de belastingduur is voor twee voorbeelden gegeven in Tabel 4.2.

Als gekozen wordt voor $H_{drempel} = c_L \cdot H_{s,max}$ wordt de formule om de effectieve belastingperiode te berekenen als volgt:

$$N = \frac{1}{0,135} \cdot \sum_{i=1}^n \left(N_i \cdot \exp \left(-2 \left(\frac{c_L [H_s]_{max}}{H_{s,i}} \right)^2 \right) \right) \quad (3.4)$$

$$t_{belast} \approx N \cdot T_p / 1,1 \quad (3.5)$$

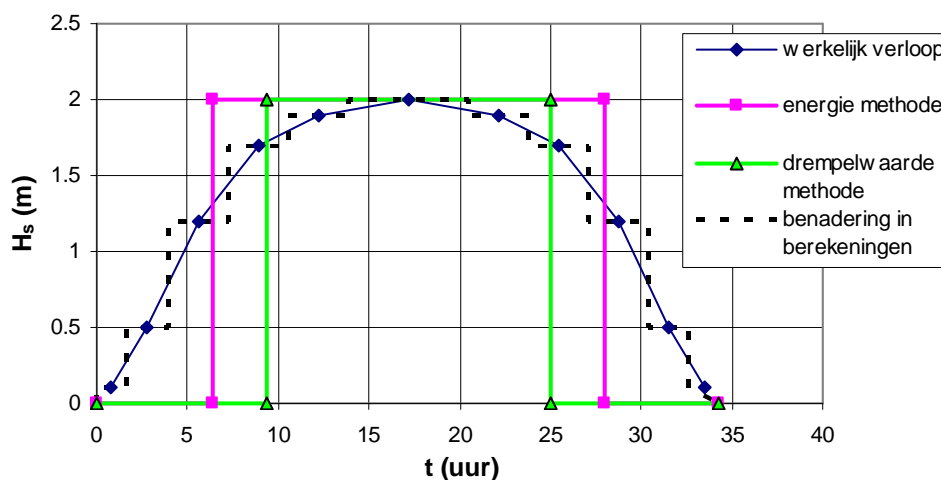
Met:

- N = aantal golven in de effectieve belastingduur (-)
- $[H_s]_{max}$ = maximale significante golfhoogte in de belastingperiode (= $H_{drempel}$) (m)
- t_{belast} = belastingduur (s)
- c_L = factor te bepalen uit de heranalyse van de langeduurproeven (-)
- T_p = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

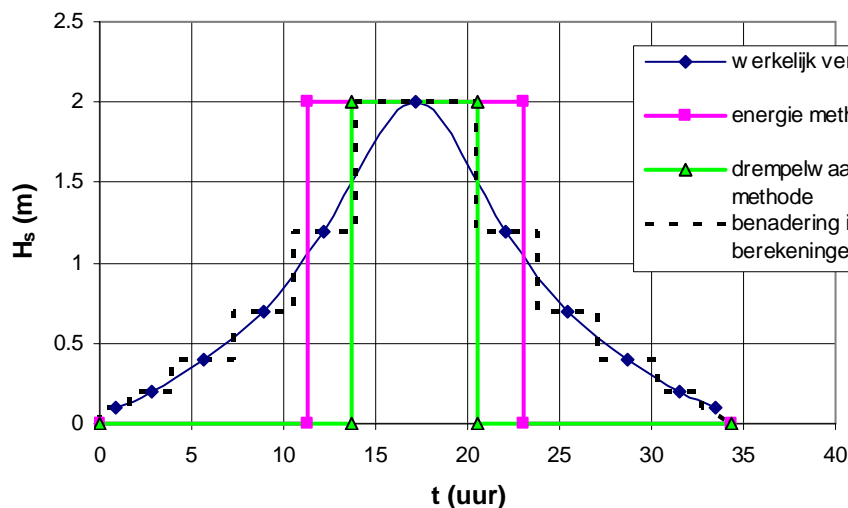
4 Vergelijking van de methoden

De twee methoden voor het berekenen van de effectieve belastingduur geven een verschillend resultaat. Dit kan eenvoudig gedemonstreerd worden aan de hand van twee voorbeelden, zie figuur Figuur 4.1 en Figuur 4.2.

Het belastingverloop is in deze figuren geschematiseerd tot het getrapte verloop (stippellijn). Zo zijn afzonderlijke perioden met constante golfhoogte gecreëerd (trede van de trap), waarna formule (2.2) en (3.4) kunnen worden toegepast.



Figuur 4.1 Verloop van werkelijke golfhoogte als functie van de tijd en het geschematiseerde verloop volgens de energiemethode en de drempelwaarde-methode.



Figuur 4.2 Verloop van werkelijke golfhoogte als functie van de tijd en het geschematiseerde verloop volgens de energiemethode en de drempelwaarde-methode.

In het voorbeeld van Figuur 4.1 is er relatief lang een vrij grote golfhoogte, terwijl dit in het voorbeeld van Figuur 4.2 juist vrij kort is. In onderstaande tabel zijn de resultaten van het omrekenen met de energie-methode en de drempelwaarde-methode gegeven. De factor c_L ,

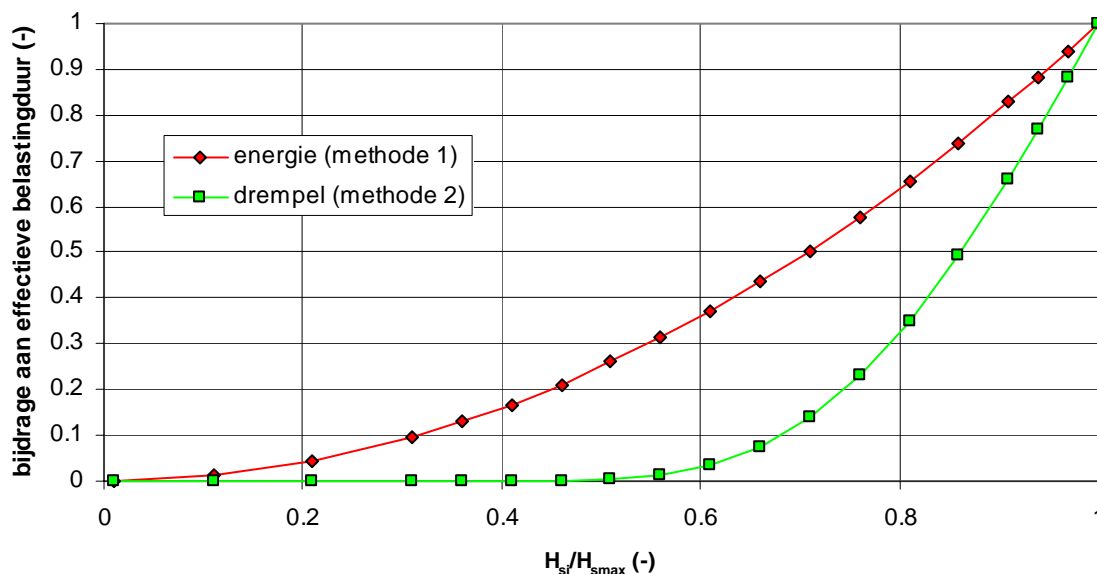
die nodig is om de drempelwaarde te bepalen, is voor deze verkenning gelijk genomen aan 1, dus $H_{drempel} = H_{s,max}$.

Het valt op dat de twee methoden een behoorlijk verschillend resultaat opleveren. Bovendien is de verhouding tussen de effectieve belastingduur volgens de tweede methodes niet constant.

H _s -verloop	Effectieve belastingduur (uur)		verhouding
	energiemethode	drempelwaardemethode	
Figuur 4.1	21,6	15,6	1,38
Figuur 4.2	11,8	6,8	1,73

Tabel 4.1 Effectieve belastingduur voor twee voorbeelden en twee methoden.

Het grote verschil tussen deze twee methodes is te begrijpen als gekeken wordt naar de bijdrage van de afzonderlijke perioden (treden van de trap in het geschematiseerde belastingverloop in Figuur 4.1 en Figuur 4.2). Als in zo'n periode de golfhoogte vrij klein is, draagt deze periode in de drempelwaardemethode veel minder bij dan in de energiemethode. Dit verschil is goed te zien in Figuur 4.3. In deze figuur is de significante golfhoogte in een afzonderlijke periode (H_{si}) dimensieloos gemaakt met de maximale significante golfperiode in de gehele belastingduur ($H_{s,max}$: top van de storm). Op de verticale as is de bijdrage aan de effectieve belastingduur gegeven, namelijk N/N_i volgens formule (2.2) en (3.4), voor een specifieke periode i uit de totale belastingduur.



Figuur 4.3 Bijdrage aan de effectieve belastingduur als functie van de significante golfhoogte in periode i .

Zolang $H_{si}/H_{s,max}$ kleiner is dan 0,6, is de bijdrage van de betreffende belastingperiode in de drempelwaardemethode vrijwel nihil. Voor de energiemethode is de bijdrage bij $H_{si}/H_{s,max} = 0,6$ maar liefst ruim 35%.

De energiemethode resulteert voor een concreet geval derhalve in een grotere effectieve belastingduur, dat met de formules van Klein Breteler (2005) leidt tot een lagere stabiliteit.

De keuze voor $H_{drempel} = H_{s,max}$, oftewel $c_L = 1$, is slechts een arbitraire. In Tabel 4.2 zijn de consequenties te zien als de drempelwaarde hiervan afwijkt.

H _s -verloop	Effectieve belastingduur (uur)		
	H _{drempel} = 0,8H _{s,max}	H _{drempel} = H _{s,max}	H _{drempel} = 1,2H _{s,max}
Figuur 4.1	17,7	15,6	14,0
Figuur 4.2	7,5	6,8	6,7

Tabel 4.2 Effectieve belastingduur met H_{s,max} volgens drempelmethode als H_{drempel} hoger of lager is dan H_{s,max}

Uit de tabel blijkt dat de belastingduur orde 10% afwijkt als de drempelwaarde 20% wordt gevarieerd. Omdat de logaritme van de belastingduur bepalend is voor de stabiliteit van de steenzetting, is deze invloed vrij klein.

Helaas zijn de resultaten van het modelonderzoek in de Deltagoot niet geschikt om een keuze te maken tussen de energiemethode en de drempelwaardemethode, omdat de proeven zijn uitgevoerd met een constante golfhoogte en de resulterende formules afgeijkt worden op de toegepaste methode en de proefresultaten. Voor beide methoden geldt dan dat de totale duur van de proef gelijk is aan de effectieve belastingduur.

Toch geven de proeven, en de overige Deltagootproeven uit het verleden, een aanwijzing hierover. Ervaring met steenzettingen leert dat een golfbelasting gelijk aan de helft van de bezwijkhoogte ongeveer oneindig lang kan voortduren zonder dat schade ontstaat. Dat komt omdat de stijghoogteverschillen over de toplaag dan klein zijn ten opzichte van het eigengewicht van de stenen. Zolang de stijghoogteverschillen niet regelmatig hoger zijn dan het eigengewicht, zal er geen schade ontstaan.

Op grond van deze constatering lijkt de drempelwaardemethode logischer dan de energiemethode. Volgens de energiemethode zou namelijk bij H_s = 0,5·H_{s,schade} de effectieve belastingduur ongeveer een kwart zijn van de werkelijke duur (zie Figuur 4.3). Als er schade ontstaat bij H_s = H_{s,schade} na t uur, zal dit volgens deze methode na 4t ontstaan bij H_s = 0,5·H_{s,schade}. De drempelwaardemethode geeft in dit geval aan dat er schade zal ontstaan na 400t, en dat lijkt logischer.

Op basis van het bovenstaande kan geconcludeerd worden dat de twee methoden heel verschillend zijn, maar dat de drempelwaardemethode de voorkeur verdient. De waarde voor de factor c_L moet nog worden afgeleid uit het langduuronderzoek, maar de invloed van deze factor is waarschijnlijk beperkt.

5 Conclusie

Voor het toetsen en ontwerpen van steenzettingen wordt thans gebruikgemaakt van Steentoets. Dat rekenmodel houdt op een vereenvoudigde wijze rekening met de belastingduur. De basis daarvoor is een vertaling van de in de Deltagoot gemeten relatie tussen de belastingduur en de bezwijkgolffhoogte bij constante golffhoogte en waterstand. De methode houdt echter geen rekening met het feit dat de golffhoogte varieert in de loop van de belastingperiode: bij lagere waterstanden is de golffhoogte ook lager. Daardoor wordt de invloed van de belastingduur door Steentoets overschat.

Voor het meewegen van een variërende golffhoogte zijn er twee methoden vergeleken. Om de twee methodes goed te kunnen vergelijken is de werkelijke belastingduur met variërende significante golffhoogte omgerekend naar een kortere periode met constante significante golffhoogte (gelijk aan de maximale). Deze kortere periode wordt de effectieve belastingduur genoemd.

De methodes zijn:

- 1 Energiemethode: de effectieve belastingduur wordt zo gekozen dat de totale golfenergie gelijk is aan die in de werkelijke belastingperiode.
- 2 Drempelwaardemethode: de effectieve belastingduur wordt zo gekozen dat het aantal golven dat boven een bepaalde drempelwaarde uitkomt gelijk is aan die in de werkelijke belastingperiode.

De energiemethode blijkt een beduidend grotere effectieve belastingduur op te leveren dan de drempelwaardemethode.

Op basis van ervaring met steenzettingen is geconcludeerd dat de voorkeur uitgaat naar de drempelwaardemethode. Als eerste schatting is de drempelwaarde gelijk gesteld aan de significante golffhoogte op de top van de storm. De invloed van de mate waarin de drempelwaarde afwijkt van de significante golffhoogte op de top van de maatgevende storm, blijkt beperkt.

Een heranalyse van de proeven met langeduurbelasting (Klein Breteler e.a., 2005), gericht op het bepalen van de mate waarin de drempelwaarde afwijkt van de significante golffhoogte op de top van de maatgevende storm, dient te worden overwogen. In Appendix B is de methode hiervoor nader uitgewerkt.

6 Referenties

- Blom, J.A.H. en L.W. van Nieuwenhuijzen (2007), *Gevoeligheidsanalyse Effectieve Belastingduur Steenzettingen, Onderzoek naar de relatie tussen sterkte en belasting*. Haskoning, Kust en rivieren, eindrapport 9S2392.A0/R0003, 4 januari 2007.
- Blom, J.A.H., en L.W. van Nieuwenhuijzen (2007), *Implementatie Effectieve Belastingduur Steenzettingen, Fase 1 Tijdelijke waarden langeduursterkte*. Haskoning, Kust en rivieren, tweede conceptrapport 9S2392.B0/R0002, 22 juni 2007.
- Hart, R. t (2005), *Ontwikkeling golfrandvoorwaarden tijdens een storm*, RWS-DWW, memo d.d. 15 augustus 2005.
- Hart, R. t (2006), *Sommeren van belastingduren met verschillende golfhoogten*, RWS-DWW, memo d.d. 21 februari 2006.
- Hart, R. t (2007), *Herinterpretatie langeduurproeven*. RWS-DWW, memo d.d. 13 februari 2007.
- Hart, R. t (2007), *Invloed golfsteilheid*. RWS-DWW, memo d.d. 23 februari 2007.
- Hijum, E. van, en J. Wouters(2009), *Mathematische benadering langeduursterkte van steenzettingen*. Infram, (concept)rapport 07i128/01, 5 januari 2009.
- Klein Breteler, M. (2004), *Zone met grote golfbelasting*. WL Delft | Hydraulics, memo d.d. 7 april 2004.
- Klein Breteler, M., en W.D. Eysink (2005), *Langeduursterkte van Steenzettingen, Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen*. WL Delft | Hydraulics, rapport H4475, november 2005.
- Klein Breteler, M. (2009), *Documentatie Steentoets2008, Kennisleemtes Steenbekledingen*. WL Delft | Hydraulics, rapport H4846, v64 juni 2009.
- Ledden, M. van, E. Arnold en L. van Nieuwenhuijzen (2007), *Advies Belastingsfactor Langeduursterkte Ontwerp Steenzettingen Oosterschelde, (Robbedoes, ROBuuste BElastingsDuur OostErSchelde)*. Haskoning, Kust & rivieren, eindrapport 9S2629.B0/R0003, 13 juni 2007.

A Mathematische benadering lange duur sterkte van steenzettingen (Infram, 2009)

Mathematische benadering langeduursterkte van steenzettingen

OPDRACHTGEVER: Opdrachtnummer ZLDO35080051 d.d. 11 februari 2008

PROJECTNUMMER: 07i128

VERSIE: 01

05-01-2009



INFRAM B.V.

Postbus 16

8316 ZG MARKNESSE

Tel.: 0527 – 24 11 20

Fax: 0527 – 24 11 19

www.infram.nl

Projectgegevens

Titel: Mathematische benadering langeduursterkte van steenzettingen
Versie: 01
Opdrachtgever: RWS Zeeland, Projectbureau Zeeweringen
Projectnummer: 07i128
Partners:
Omschrijving project: Vergelijkend onderzoek naar het bezwijkgedrag van een steenzetting bij langdurende- en kortdurende belasting heeft geresulteerd in methode om beide aan elkaar te relateren (de DR methode). In de voorliggende notitie wordt een beschouwing over de bij de opstelling van de DR-methode toegepaste wijze van werken gegeven. Ook bevat voorliggende notitie een aanzet tot een mogelijk eenvoudigere en minder drastische aanpassing van genoemde criteria door rekening te houden met het verwachte niet-stationaire gedrag van de golfbelasting in de natuur.

Uitgevoerd door: ir. E. van Hijum en ir. J. Wouters

Inhoudsopgave

1	Aanleiding	2
2	Probleemstelling en de gevolgde aanpak	3
3	De DR-methode	5
4	Voorstel voor aanpassen van de DR-methode	7
5	Rekenschema voor een maatgevende storm	10
6	Hoe verder	11
A.	BIJLAGE 1	12
	A.1 Sterktevariatie $H_s/\Delta D$ als $f(\xi_0 p)$ bij loodrechte golfaanval	12
B.	BIJLAGE 2	14
	B.1 Bepaling $H_{drempel}$ en p	14
C.	REFERENTIES	16

1 Aanleiding

Bij het Projectbureau Zeeweringen loopt een onderzoek gericht op het vergelijken van het bezwijkgedrag van gezette steenbekledingen onder langdurige golfaanval met het gedrag onder kortdurende golfaanval (zie [1]).

Reden voor het onderzoek was het vermoeden dat de uitkomsten, in het bijzonder voor de bekledingen langs de Oosterschelde, zullen leiden tot een verzwaring van de vigerende toets- en ontwerpcriteria.

In het kader van dat onderzoek zijn de volgende studies verricht:

(a) Modelonderzoek door Deltares in de Scheldegoot en de Deltagoot

De resultaten hiervan staan, onder meer, in de referenties [2] t/m [5] en [12]. De conclusie is dat de trend in de afname van de sterkte van een steenbekleding bij stationaire belasting beschreven kan worden als een functie van het totaal aantal golven N . Het onderzochte belastingtraject beperkt zich tot globaal $1,4 < \xi_{0p} < 2,5$.

(b) Bureaustudie door Royal Haskoning

De resultaten hiervan staan, onder meer, in de referenties [6], [8] en [9]. Daarin is een benadering gepresenteerd voor het combineren van een belastingbeeld voor Oosterschelde (open en dicht), IJsselmeer en Zeekust met de resultaten van onderzoek (a). De studie geeft een berekeningswijze voor een rekenwaarde N' ($< N$), die een maat is voor het aantal belastende golven.

De studie is nog niet afgerond; in [7] staat een plan van aanpak voor het vervolg.

De vertaling van de resultaten van het Deltares-onderzoek naar de praktijk in de belastinganalyse door Royal Haskoning wijzen inderdaad op een aanmerkelijke verzwaring van de toets- en ontwerpcriteria.

In het vervolg van deze notitie is het geheel van (a) en (b) aangeduid als de DR-methode.

(c) Second opinion door Infram

In notitie [10], een beschouwing over de bij de opstelling van de DR-methode toegepaste wijze van werken, staat een aanzet tot een mogelijk eenvoudiger en minder drastische aanpassing van genoemde criteria door rekening te houden met het verwachte niet-stationaire gedrag van de golfbelasting in de natuur.

De nu voorliggende notitie, die geschreven is door ir. E. van Hijum en ir. J. Wouters, bevat de uitwerking van notitie [10]. Ook is aangegeven op welke vraag- en aandachtspunten nog verdere inspanningen nodig zijn om te komen tot nieuwe toets- en ontwerpregels.

2 Probleemstelling en de gevolgde aanpak

De gezamenlijke belasting van de hoogste golven (de golven met een hoogte groter dan een drempelwaarde $H_{drempel}$) uit een golfveld veroorzaakt het geleidelijk verzwakken van een bekleding en kan uiteindelijk leiden tot falen. De waarde van $H_{drempel}$ is afhankelijk van het karakteristieke bezwijkgedrag van de bekleding en daarmee dus typeafhankelijk.

De tot op heden gehanteerde sterkteberekening is gerelateerd aan het gedrag van de bekleding bij een "stormduur" van circa 1000 golven, met de significante golfhoogte H_{s1000} (op basis van energie) en de piekperiode van het energiedichtheidspectrum T_p als karakteristieke waarden voor de golfbelasting. De vigerende toets- en ontwerpregels zijn afgeleid op basis van dit "belastingpakket", waarbij de voor de beschouwde locatie maximaal (op de top van de storm) te verwachten golfcondities in rekening worden gebracht. Bij het vaststellen van de vigerende rekenregels in 1996 bestond de verwachting dat deze simpele aanpak bij de gegeven nauwkeurigheid van de sterktemodellering een voldoende conservatieve benadering betekent van het werkelijke belastingverloop tijdens de maatgevende storm.

De nu nagestreefde verfijning van de beschrijving van het belastingbeeld tijdens de maatgevende storm houdt in dat rekening moet worden gehouden met zowel de verzwarende als de verlichtende factoren ten opzichte van de vigerende benadering: langere belastingduur betekent aan de ene kant dat er meer golven zijn (bij stationaire belasting mogelijk zelfs hogere) maar aan de andere kant dat de golven in de natuur vaak lager zullen zijn dan de voorgeschreven waarde door variatie in waterstand, windrichting en windsterkte tijdens de storm. Bij het modelleren van het gedrag van de bekleding bij een stationaire langere belastingduur moet dus een koppeling van de karakteristieke waarden H_{s1000} en T_p worden gelegd met:

- de drempelwaarde van de golfhoogte $H_{drempel}$,
- het aantal golven N (en daarmee met de duur van de beschouwde storm), en
- de hoogte van de afzonderlijke golven boven de drempelwaarde (te karakteriseren door de maximale golfhoogte H_{maxN}).

Het modelleren van deze koppeling is reeds voor een groot deel uitgevoerd: De wijze waarop de golfbelasting in Deltagoot en Scheldegoot is gesimuleerd staat in [3]. Het voorstel tot ombouw van de vigerende rekenregels staat in [3] t/m [5] en [12]. In de rapportages [6] t/m [9] staat een methode tot karakterisering van het te verwachten golfbeeld in de natuur onder toets- of ontwerpomstandigheden.

Op een aantal punten is verbetering mogelijk. De belangrijkste zijn:

- Er is gerekend met een voor alle bekledingstypen constante drempelwaarde van de golfhoogte, terwijl deze naar verwachting sterk afhankelijk is van het bezwijkgedrag van het type bekleding. Dit betekent dat het ene type "gevoeliger" zal zijn voor de gevolgen van langdurige belasting dan het andere type.

- Er is verschil in stationariteit tussen het in de golfgoten opgewekte belastingbeeld en dat in de natuur. Dit moet meegenomen worden in de vertaling van de resultaten van het modelonderzoek naar de aan te passen rekenregels.

Een voorstel tot aanpassing staat in de volgende hoofdstukken. Hoofdstuk 3 toont schematisch de DR-methode, in hoofdstuk 4 volgt de onderbouwing van de voorgestelde aanpassing, en het resulterende rekenschema voor een maatgevende storm staat in hoofdstuk 5. De nog op te lossen vraag- en aandachtspunten staan tenslotte in hoofdstuk 6.

3 De DR-methode

In [5] is een model voor steenbekledingen ontwikkeld, waarmee op een relatief eenvoudige wijze de koppeling tussen de rekenregels, die gebaseerd zijn op een "stormduur" van 1000 golven, en rekenregels voor daarvan afwijkende belastingduren kan worden gelegd. In de bekende badkuiprelatie (zie Bijlage 1) betekent dit dat de significante golfhoogte op de verticale as moet worden verzwaaard door te delen door een factor f waarvoor geldt:

$$f = f_S * f_B$$

waarin:

f_S = invloedsfactor m.b.t. de sterkte, die de invloed van het aantal golven boven de drempelwaarde geeft

f_B = invloedsfactor m.b.t. de belasting, die de invloed van de voorkomende maximale golfhoogte geeft

In [5] en [1] is de afname van de sterkte van een bekleding als volgt samengevat:

$$H_{sN} (\Delta D)^{-1} = \min\{6\xi_{op}^{-2/3}; f_B f_S H_{s1000} (\Delta D)^{-1}\}$$

$$f_B = \frac{1,71 \cdot \min\{1,54; c_H\}}{\min\{\sqrt{\ln N}; c_H (\ln N)^{1/3,6}\}}$$

$$f_S = \max\left\{1 - c_1 \cdot \log \frac{N}{1000}; c_2\right\}$$

$$c_H = \max\left\{1,06; 0,8 + \frac{(0,098 + 1,62 \tan \alpha_{bodem}) h^2}{0,673 H_{s1000} h + 0,203 H_{s1000}^2}\right\}$$

* voor Basalt, Basalton en Hydroblocks: $c_1 \approx 0,2$ en $c_2 \approx 0,8$

* voor Blokken op hun kant: $c_1 \approx 0,35$ en $c_2 \approx 0,65$

met:

H_{s1000} = maximaal toelaatbare significante golfhoogte volgens ANAMOS (echter zonder rekening te houden met de 6-ksi regel) c.q. de badkuipkromme uit Bijlage 1 [m]

H_{sN} = maximaal toelaatbare significante golfhoogte bij een belastingduur van N golven [m]

α_{bodem} = bodemhelling voor de constructie [°]

h = waterdiepte bij de teen [m]

N = aantal golven gedurende een storm binnen het belastingvenster voor een gegeven taludniveau [-]

In [6] is de koppeling gelegd met de in rekening te brengen natuurlijke golfbelasting. Beschreven is:

- De duur van de belasting van een taludniveau. Deze is afhankelijk van de waterstand en de ligging van het belastingvenster.
- Het waterstandsverloop door stormopzet en getij, conform de VTV.
- Het verloop van de golfhoogte H_s onder invloed van het verloop van de windsnelheid en het waterstandsverloop (dieptebeperking). Als pragmatische benadering is voor de vorm van het verloop van de golfhoogte door de wind gekozen voor een vorm analoog aan het stormopzetverloop. Deze benadering geeft naar verwachting een overschatting van de golfhoogten (zie de figuren 3.3 en 3.4 in [8]).
- Het verloop van de golfsteilheid s_{0p}
- De keuze voor gelijkstelling van $H_{drempel}$ aan H_s op de topwaterstand
- De verandering van $H_{drempel}(t)$ als functie van $\xi_{0p}(t)$. Door de gelijkstelling met H_s volgt $H_{drempel}$ daarbij de "badkuip"lijn (zie Bijlage 1).
- De berekening van een "equivalent" aantal golven N_{eq} dat als de N -waarde in de bovenstaande formules moet worden ingevoerd. Dit terugrekenen gebeurt op basis van de sommering van het aantal golven hoger dan de drempelwaarde over de tijdvakken.

De methode is nog niet volledig "draaiklaar". In [7] staat een voorstel voor een verdere analytische en wiskundige uitwerking tot algemene formules.

4 Voorstel voor aanpassen van de DR-methode

Zoals in Hoofdstuk 2 al is opgemerkt zijn er in de DR-methode een tweetal aspecten die bijzondere aandacht vergen:

- het verschil in stationariteit van de golfbelasting tussen die in de golfgoten en die in de natuur
- de aangenomen typeonafhankelijke drempelwaarde $H_{drempel}$

Over de stationariteit van de golfbelasting

Bij een voldoende waterdiepte kan de waarschijnlijkheidsverdeling van de golfhoogte worden benaderd met de Rayleigh verdeling. Bij bijvoorbeeld breken van de golven als gevolg van een beperkte waterdiepte zullen met name de hoge golven af gaan wijken van de Rayleigh verdeling. Deze verdeling heeft slechts één parameter (de gemiddelde golfhoogte). Als deze bekend is ligt de verdelingsfunctie dus vast. Er zijn beperkingen betreffende de geldigheid van de Rayleigh verdeling voor de hoogten van windgolven:

- 1 Het golfbeeld moet in statistische zin "stationair" zijn, dus constant in de tijd. Door variaties in windsnelheid, waterdiepte/waterstand, stroomsterkte e.d. zijn windgolven in de natuur zelden langer dan gedurende circa een half uur als stationair te beschouwen. Dit betekent dat bij metingen in de natuur en bij het opstellen van rekenregels een compromis moet worden gevonden tussen de eis van stationair zijn enerzijds en de wens van een grote betrouwbaarheid anderzijds.
- 2 De golfhoogte is volgens de Rayleigh verdeling ongelimiteerd. Dit is natuurlijk niet realistisch. Naarmate de belastingduur toeneemt neemt de kans op een toevallig grote waarde wel toe, en daarmee de waarde van de maximale golfhoogte. Beperking in hoogte kan optreden door golfsteilheid en waterdiepte. In Hoofdstuk 4.4.1 van [5] staat de benadering door Battjes en Groenendijk waarmee de verwachtingswaarde van de maximale golfhoogte in een golfveld kan worden berekend.

Door de gekozen wijze van verwerking (zie [5], paragraaf 4.4.2 en 4.4.3, en [12]) kunnen de proevenseries die gebruikt zijn bij het afleiden van de formules uit Hoofdstuk 3 bij benadering als stationair worden beschouwd. Dit is in afwijking van het belastingbeeld in de natuur, zoals beschreven is in [6] t/m [9] en [11]. Vanwege de gradiënten in het verloop van de H_s is het (gewogen) optellen van belastingperioden (tijdvakken) met verschillende golfhoogte (zie [12]) niet aan te bevelen. Als gevolg hiervan zijn de formules uit Hoofdstuk 3, die ook zijn opgenomen in Paragraaf 2.2 van [1], niet zonder meer toepasbaar bij de aanpassing van de vigerende rekenregels voor toetsen en ontwerpen. Bij de uitwerking van de twee invloedsfactoren f_s en f_B voor het belastingbeeld in de natuur is wat betreft het in rekening brengen van de golfbelasting het van belang op welke wijze het beschouwde gedeelte van een bekleding wordt belast: continue of discontinue. Een discontinue belasting doet zich voor bij die locaties waar sprake is van wisselende waterstanden, bijvoorbeeld getij. De daardoor bepaalde belastingvensters bepalen de verdeling en de lengte van de in rekening te brengen belastingtijdvakken gedurende de beschouwde storm. Binnen een belastingtijdvak moet vervolgens worden bepaald of een onderverdeling in de tijd nodig is vanwege de vereiste stationariteit. Deze verdere onderverdeling

is van belang voor het bepalen van het aantal golven dat ingevoerd moet worden bij het schatten van de maximale golfhoogte in zo'n stationair verondersteld golfveld met de methode van Battjes en Groenendijk: N_{f_B} .

Voor het bepalen van het aantal golven op basis waarvan de f_S wordt berekend - N_{f_S} - moet een gewogen sommatie over alle belastingtijdvakken worden uitgevoerd.

Het zal duidelijk zijn dat in veel gevallen, zelfs bij bekledingen langs de Oosterschelde, N_{f_B} beduidend kleiner is dan N_{f_S} , zelfs kleiner dan 1000 kan worden, en dat f_B hierdoor groter kan worden dan 1.

Over de drempelwaarde in de golfbelasting

In paragraaf 4.5 van [5] staat een beschrijving van de verschillende processen die spelen met betrekking tot de belasting en de sterkte tijdens de geleidelijke degeneratie van de steenzetting onder invloed van langdurige golfbelasting. Duidelijk is dat dit mede afhankelijk is van het type bekleding. Van belang is het aantal belastingwisselingen van de hoogste golven en de verdeling (grootte) van deze hoogste golven. Het ene type bekleding zal meer gevoelig voor de echt zware klappen zijn (zal dus een hoge drempelwaarde hebben), het andere type meer voor het aantal wisselingen (zal dus een lagere drempelwaarde hebben).

Voorstel voor aanpassing

De verwerking van deze twee aspecten lijkt op het eerste gezicht de uitwerking richting nieuwe rekenregels nog complexer te maken.

Er is echter een eenvoudige pragmatische oplossing mogelijk door voor het belastingbeeld in de de natuur niet meer terug te rekenen naar de invloedsfactoren f_S en f_B conform de DR-methode, maar door te kiezen voor een karakterisering van de langeduur-Invloed via de drempelwaarde die afgeleid is uit het modelonderzoek.

Aansluitend bij [12] geldt daarbij het volgende:

- De virtuele belastingduur van 1000 golven die leidt tot bezwijken is gekarakteriseerd door de significante golfhoogte H_{s1000} op de teenlijn en de golfperiode bij de piek van het spectrum T_{p1000} .
- Alleen de grootste golven, groter dan de drempelwaarde $H_{drempel}$ ($p\%$ van 1000 golven = $1000p$ golven), zijn bepalend voor de stabiliteit.
- De volgorde van de belastingen is niet relevant. Dit betekent dat bezwijken bij een belastingduur langer dan 1000 golven optreedt nadat $1000p$ golven hoger dan $H_{drempel}$ zijn gepasseerd.
- De belastingen per golf zijn, evenals de golfhoogtes, Weibull of Rayleigh verdeeld.

$H_{drempel}$ is, zoals eerder gezegd, afhankelijk van het type bekleding. Op basis van de formules uit Hoofdstuk 3 zijn voor de daar genoemde bekledingstypen de waarden van $H_{drempel}$ en van p te bepalen.

$$H_{drempel} = \beta H_{s1000} \{ (1 - f^{-a})^{-1} \ln (1000/N_2) \}^{1/a} \quad [m]$$

$$p = \exp - [H_{drempel} (\beta H_{s1000})^{-1}]^a \quad [-] \quad (\text{Weibull verdeling})$$

waarin:

H_{s1000}	= kritieke significante golfhoogte bij 1000 golven (uit badkuipkromme, ANAMOS)
α, β	= parameters Weibull verdeling
f	= $f_B * f_S$
f_B	= belastingfactor
f_S	= sterktefactor
N_2	= aantal golven bij langeduurproef

Rayleigh:

$$\alpha = 2$$

$$\beta = 0,71$$

(Voorlopige aanname: p geldt voor alle ξ_{0p})

De afleiding van de formule voor $H_{drempel}$ staat in Bijlage 2.

Het criterium voor de toelaatbare belasting in de natuur is dan eenvoudig:

Tijdens de maatgevende storm mogen in de belastingvensters voor het te toetsen niveau gesommeerd niet meer dan 1000p golven hoger dan $H_{drempel}$ zijn.

Toepassing

Aansluitend aan het voorbeeld in [5], paragraaf 4.5.4, Oosterschelde.

$$N_2 = 20.000$$

Rayleigh verdeling

Blokken: $f = f_B * f_S = 0,90 * 0,65 = 0,585$

$$H_{drempel} = 0,89 H_{s1000}$$

$$p = 21\%, \text{ dus maximaal } 210 \text{ golven} > H_{drempel} \text{ toelaatbaar}$$

Zuilen: $f = f_B * f_S = 0,90 * 0,80 = 0,720$

$$H_{drempel} = 1,28 H_{s1000}$$

$$p = 4\%, \text{ dus maximaal } 40 \text{ golven} > H_{drempel} \text{ toelaatbaar}$$

5 Rekenschema voor een maatgevende storm

Door toepassen van de resultaten uit Hoofdstuk 4 wordt voor toetsen het rekenschema voor een toplaag als volgt:

Gegeven:

- Maatgevende storm: verloop $H_s(t)$, $h(t)$, $T_p(t)$, $\xi_0 p(t)$, α , β
- Bekleding
 - Type + dimensies
 - Bijbehorende badkuipkromme, geeft H_{s1000}
 - Drempelwaarden p en $H_{drempel}$
 - Te toetsen niveau

Bepaal:

- Belastingvensters bij het te toetsen niveau
- H_s per belastingvenster + Weibull/Rayleigh verdeling
- Aantal golven $> H_{drempel}$ per belastingvenster
- Sommeer dit aantal over alle vensters
- Toetscriterium: aantal $< 1000 \cdot p$

Opmerkingen:

- Via rekenlussen kan dit schema natuurlijk ook voor ontwerpen worden gebruikt.
- Het rekenschema sluit voor wat betreft het vormgeven van de maatgevende storm aan op Hoofdstuk 2 uit (6). Aanbevolen wordt het verloop van de golfhoogte $H_s(t)$ niet te relateren aan het verloop van de stormopzet, maar te proberen aansluiting te vinden bij het verloop van de waterstand. In de figuren 3.3 en 3.4 uit [8] is duidelijk een periodiciteit te herkennen gelijk aan de getijperiode. De in [8] aangehouden benadering met omhullenden lijkt een forse verzwaring van het belastingbeeld te veroorzaken.

6 Hoe verder

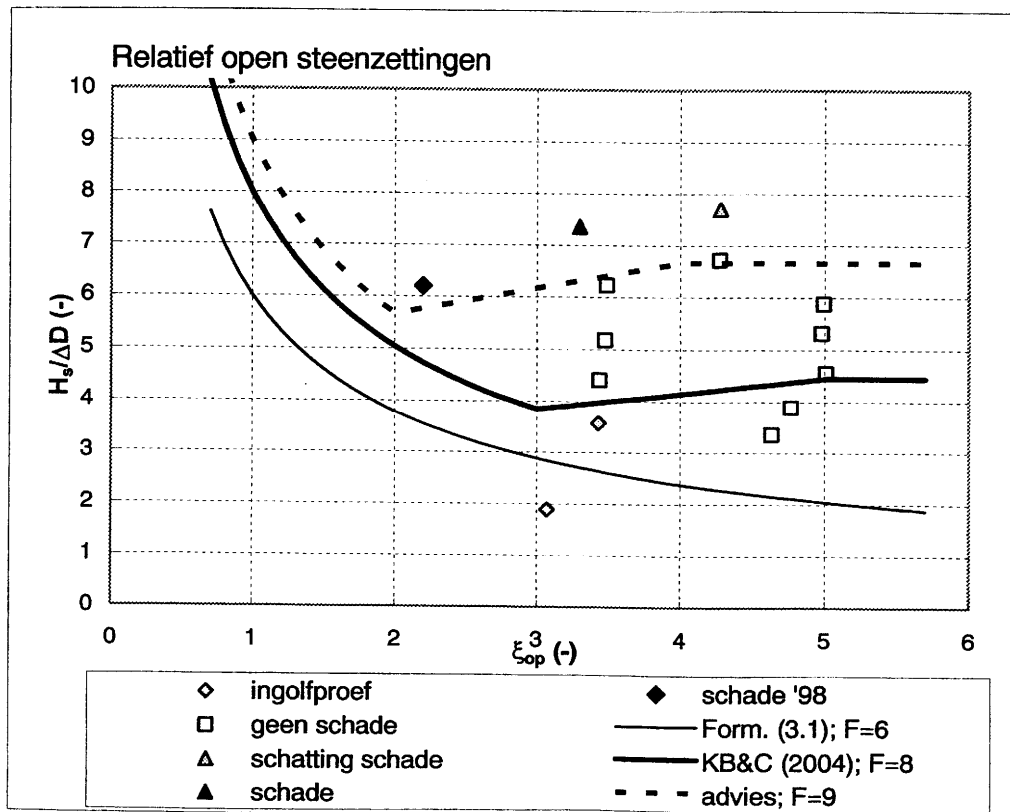
Ondanks het feit dat het onderzoek naar langeduur belasting al een aantal jaren loopt zijn er nog een aantal zaken die nog moeten worden uitgezocht of verfijnd, zowel aan de belasting- als aan de sterktekant. Op hoofdlijnen zijn dit:

- Het verder vormgeven van de maatgevende stormen voor Oosterschelde (dicht en open), IJsselmeer, Kust en Rivieren. Zie ook de opmerking hierover in Hoofdstuk 5. Deze meer dan 15 jaar oude wens van de toenmalige TAW-Projectgroep Leidraad Toetsing is nog nooit vervuld.
- Het behoeft geen betoog dat de basis waarop het bepalen van de waarden van de invloedsfactoren f_s en f_B is gestoeld erg smal is. Zie ook de aanbevelingen voor vervolgonderzoek uit [5].
- Uitbreiding naar andere bekledingtypen en grotere ξ_{op} .

Aanbevolen wordt de bevindingen uit deze notitie te verwerken in een volgende versie van [7].

A. BIJLAGE 1

A.1 Sterktevariatie $H_s/\Delta D$ als $f(\xi_{0p})$ bij loodrechte golfaanval



Figuur 6.2 uit WL-H4421 [4]

De aangepaste "badkuipkromme" voor relatief open steenzettingen

Bij toename van ξ_{0p} verandert het karakter van het golfbeeld op het talud, ongeveer als volgt:
 rond $\xi_{0p} = 1$ spilling in de rechterflank en in het centrale gedeelte van het energiedichtheidsspectrum, en plinging in de linkerflank,
 rond $\xi_{0p} = 3$ plinging in rechts en centraal, en collapsing in de linkerflank,
 rond $\xi_{0p} = 7$ surging in links en centraal, met collapsing en nog zwakke plinging in de rechterflank.
 bij dubbeltoppers is sprake van plungers op surgers (zonder veel klappen).

Aantal en grootte van de klappen in de enkeltoppige spectra zullen dus lopend van 1 naar circa 2 à 3 eerst toenemen en vervolgens naar 7 weer afnemen.

Ergens zou er tussen 1 en 2 à 3 een punt moeten liggen waar voor de beschouwde bekledingen de klappen bepalend worden voor de blokbeweging, en ergens tussen 2 à 3 en 7 een punt waarbij de belasting door surging het wint van die door plinging. De figuur geeft hoop op een bevestiging van de verwachte belastingreductie voor steenbekledingen bij langere golven. De figuur lijkt illustratief is voor de overgang van plunge-gedomineerd (< 2 à 3) via collapse-gedomineerd ($3-5$) naar surge-gedomineerd (> 5).

B. BIJLAGE 2

B.1 Bepaling $H_{drempel}$ en p

Aansluitend bij [12] geldt het volgende:

- De virtuele belastingduur van 1000 golven die leidt tot bezwijken is gekarakteriseerd door de significante golfhoogte H_{s1000} op de teenlijn en de golfperiode bij de piek van het spectrum T_{p1000} .
- Alleen de grootste golven, groter dan de drempelwaarde $H_{drempel}$ ($p\%$ van 1000 golven = $1000p$ golven), zijn bepalend voor de stabiliteit.
- De volgorde van de belastingen is niet relevant. Dit betekent dat bezwijken in de natuur bij een belastingduur langer dan 1000 golven optreedt nadat $1000p$ golven hoger dan $H_{drempel}$ zijn gepasseerd.
- De belastingen per golf zijn, evenals de golfhoogtes, Weibull of Rayleigh verdeeld.

Overschrijdingskans $H_{drempel}$ bij 1000 golven:

$$p(H_{drempel}) = \exp [- H_{drempel}^a (\beta H_{s1000})^{-a}] \quad (1)$$

Bij een belastingduur van N_2 golven mogen slechts $1000p$ golven $> H_{drempel}$ zijn. Noem de golfhoogte in dat golfveld waarbij dat het geval is H_x . Daarvoor geldt:

$$p(H_x) = \exp [- H_x^a (\beta H_{sN_2})^{-a}] \quad (2)$$

H_x moet een waarde krijgen gelijk aan $H_{drempel}$. Dit gebeurt door H_{sN_2} te laten zakken naar een waarde $f * H_{s1000}$

$$H_{sN_2} = f H_{s1000} \quad (3)$$

Nu geldt:

$$N_{1000} p(H_{drempel}) = N_2 p(H_x) \quad (4)$$

Door (1), (2) en (3) in (4) te substitueren volgt:

$$H_{drempel} = \beta H_{s1000} \{ (1 - f^{-a})^{-1} \ln (1000/N_2) \}^{1/a}$$

waarin:

H_{s1000} = kritieke significante golfhoogte bij 1000 golven

α, β = parameters Weibull verdeling

f = $f_B * f_S$

f_B = belastingfactor

f_S = sterktefactor

N_2 = aantal golven bij langeduurproef

Rayleigh:

$$\alpha = 2$$

$$\beta = 0,71$$

C. REFERENTIES

- [1] Yvo Provoost, Projectbureau Zeeweringen, Brochure 4 december 2007
Onderzoek loont
- [2] Deltares/WL H4941, Concept Rapport Augustus 2007
Stabiliteit van steenzetting met blokken op hun kant; grootschalig onderzoek in de Deltagoot
- [3] Deltares/WL H4421, Notitie d.d. 23 november 2007
Golfhoogte-overschrijdingskromme in Deltagoot en Scheldegoot
+ aanvulling per e-mail d.d. 24 juli 2008 over een heranalyse van de golfcondities in de Deltagoot
- [4] Deltares/WL H4421, Concept Rapport juni 2006
Kwantificering van de golfbelasting en invloed lange golven.
- [5] Deltares/WL H4475, Rapport november 2005
Langeduursterkte van steenzettingen
- [6] Royal Haskoning, Rapport augustus 2007
Effectieve Belastingduur Steenzettingen; fase 2.1: Tijdelijke waarden
langeduursterkte.
- [7] Royal Haskoning, Notitie d.d. 6 september 2007
Plan van aanpak EBS fase 2.2: Mathematische oplossing effectieve belastingduur steenzettingen
- [8] Royal Haskoning, Rapport juni 2007
Advies belastingfactor langeduursterkte ontwerp steenzettingen Oosterschelde
- [9] Royal Haskoning, Rapport januari 2007
Belastingduur Steenzettingen Oosterschelde
- [10] Infram, Memo i765-23 d.d. 6 december 2007
Second opinion over de studies "Gekantelde blokken" (Deltares/WL) en "Langdurige belasting"
(Royal Haskoning)
- [11] P. Groen en R. Dorrestein
Zeegolven; derde herziene druk
Staatsdrukkerij, Den Haag, 1976
- [12] Deltares/WL, Notitie februari 2006
Het optellen van belastingperioden met verschillende golfhoogte

B Langeduur sterkte van steenzettingen uit proeven bepalen

H_{drempel} en $N_{H>\text{drempel}}$ bepalen uit proefresultaten

Conform bijlage 2 van Appendix A (formule 1) kan de frequentie waarmee afzonderlijke golven in een golfveld boven een waarde H uitkomen, in geval van een Weibull-verdeling, berekend worden met de volgende formule:

$$p(\text{golfhoogte} > H) = p = \exp\left(-\left(\frac{H}{\beta H_s}\right)^\alpha\right) \quad (1.1)$$

Met:

- p = frequentie waarmee golven boven een bepaalde waarde uitkomen (-)
- α = parameter van de Weibull-verdeling (als Rayleigh, dan $\alpha = 2$) (-)
- β = parameter van de Weibull-verdeling (als Rayleigh, dan $\beta = 1/\sqrt{2}$) (-)
- H = golfhoogte van afzonderlijke golf in golfveld met significante golfhoogte gelijk aan H_s (m)
- H_s = significante golfhoogte (m)

Voor bijvoorbeeld $H = H_s$ levert bovenstaande formule $p = 0,135$ in geval van een Rayleigh verdeling, hetgeen betekent dat in een normaal golfveld 13,5% van de golven hoger is dan H_s .

Voor het aantal golven die groter zijn dan H geldt:

$$N_{\text{golven}>H} = pN = N \cdot \exp\left(-\left(\frac{H}{\beta H_s}\right)^\alpha\right) \quad (1.2)$$

Met:

- N = aantal golven in het golfveld met significante golfhoogte H_s (-)
- $N_{\text{golven}>H}$ = aantal golven die groter zijn dan H (-)

Bovenstaande algemene theorie kan toegepast worden op het aantal golven boven een specifieke drempelwaarde die leiden tot schade aan de steenzetting. Formule (1.2) wordt dan:

$$N_{H>\text{drempel}} = pN_1 = N_1 \cdot \exp\left(-\left(\frac{H_{\text{drempel}}}{\beta H_{s1}}\right)^\alpha\right) \quad (1.3)$$

Met:

- N_1 = aantal golven in het golfveld met significante golfhoogte H_{s1} (-)
- $N_{H>\text{drempel}}$ = aantal golven boven de drempelwaarde (-)
- H_{drempel} = drempelwaarde van de golfhoogte, waarboven de golven de steenzetting aantasten (m)

Aangenomen wordt dat de waarde van H_{drempel} en $N_{H>\text{drempel}}$ onafhankelijk zijn van H_s voor een bepaalde steenzetting. Uitgangspunt voor de drempelwaardemethode is dat er schade ontstaat als er $N_{H>\text{drempel}}$ golven boven de drempelwaarde zijn geweest. De waarde $N_{H>\text{drempel}}$ is afhankelijk van het type steenzetting (zuilen, blokken, ...), maar niet afhankelijk van de afmetingen van de steenzetting of het filter.

Tijdens het modelonderzoek is voor enkele specifieke steenzettingen de duur bepaald tot schade ontstond, waarbij de significante golfhoogte constant was gedurende de proef. Deze duur wordt uitgedrukt in het aantal golven: N_i . Als er voor een specifieke steenzetting

tenminste twee proeven zijn uitgevoerd met verschillende significante golfhoogte, waarin de duur tot schade is vastgesteld, kan met bovenstaande formule de waarde van p , $N_{H>drempel}$ en $H_{drempel}$ bepaald worden. Dit is onderstaand uitgewerkt.

In proef 1 is bij een significante golfhoogte H_{s1} na N_1 golven schade ontstaan. Overeenkomstig is bij proef 2 bij H_{s2} na N_2 golven schade ontstaan. Omdat $N_{H>drempel}$ in beide gevallen gelijk zijn, geldt:

$$N_{H>drempel} = p_1 N_1 = p_2 N_2 \quad (1.4)$$

$$N_{H>drempel} = N_1 \exp\left(-\left(\frac{H_{drempel}}{\beta H_{s1}}\right)^\alpha\right) = N_2 \exp\left(-\left(\frac{H_{drempel}}{\beta H_{s2}}\right)^\alpha\right) \quad (1.5)$$

$$\ln\left(\frac{N_1}{N_2}\right) = -\left(\frac{H_{drempel}}{\beta}\right)^\alpha \left(\frac{1}{H_{s2}^\alpha} - \frac{1}{H_{s1}^\alpha}\right) \quad (1.6)$$

$$H_{drempel} = \beta \left(\frac{\ln\left(\frac{N_1}{N_2}\right)}{\frac{1}{H_{s1}^\alpha} - \frac{1}{H_{s2}^\alpha}} \right)^{1/\alpha} \quad (1.7)$$

In geval van een Rayleigh verdeling geldt met $\alpha = 2$ en $\beta = 1/\sqrt{2}$:

$$H_{drempel} = \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{N_1}{N_2}\right)}{2\left(\frac{1}{H_{s1}^2} - \frac{1}{H_{s2}^2}\right)}} \quad (1.8)$$

Tenslotte kan de waarde van $N_{H>drempel}$ bepaald worden uit formule (1.2).

In bijlage 2 van Appendix A wordt gebruikgemaakt van de stelling dat:

$$H_s = f \cdot H_{s1000} \quad \text{en} \quad f = f_B \cdot f_s \quad (1.9)$$

Met:

- H_{s1000} = significante golfhoogte die leidt tot schade bij 1000 golven (m)
- f = invloedsfactor voor de invloed van de belastingduur (-)
- f_B = invloedsfactor vanwege het feit dat de hoogste golf hoger wordt naarmate de belastingduur toeneemt uit Klein Breteler e.a. (2005) (-)
- f_s = invloedsfactor vanwege het feit dat de sterkte afneemt naarmate de belastingduur toeneemt uit Klein Breteler e.a. (2005) (-)

Hierdoor wordt formule (1.7) gelijk aan formule (5) van bijlage 2 van Appendix A als $N_1 = 1000$:

$$H_{drempel} = \beta H_{s1000} \left(\frac{\ln\left(\frac{1000}{N_2}\right)}{1 - \frac{1}{f^\alpha}} \right)^{1/\alpha} \quad (1.10)$$

Toepassing in de praktijk

Als aan de hand van de proeven de waarde van $H_{s\text{drempel}}$ en $N_{H>\text{drempel}}$ zijn bepaald voor de verschillende typen steenzettingen, moeten deze gebruikt kunnen worden in de praktijk. Het is echter te verwachten dat de waarde van $H_{s\text{drempel}}$ afhankelijk is van de eigenschappen van de steenzetting. Hoe dikker de toplaag, hoe hoger $H_{s\text{drempel}}$.

Voor de steenzetting waarvan de stabiliteit bij een bepaalde belastingduur moet worden berekend, moet de waarde van $H_{s\text{drempel}}$ dus nog worden bepaald. Deze wordt $[H_{\text{drempel}}]_{\text{praktijk}}$ genoemd.

Voorlopig wordt verondersteld dat dit lineair afhankelijk is van de bezwijkgolffhoogte bij een belastingduur van 1000 golven:

$$[H_{\text{drempel}}]_{\text{praktijk}} = \frac{[H_{s1000}]_{\text{praktijk}}}{[H_{s1000}]_{\text{proef}}} [H_{\text{drempel}}]_{\text{proef}} \quad (1.11)$$

Met:

$[H_{\text{drempel}}]_{\text{praktijk}}$ = drempelwaarde van de steenzetting waarvoor de stabiliteit bij een bepaalde belastingduur moet worden berekend (m)

$[H_{\text{drempel}}]_{\text{proef}}$ = drempelwaarde van de steenzetting zoals die bepaald is tijdens een proefpaar in de Deltagoot (m)

$[H_{s1000}]_{\text{praktijk}}$ = bezwijkgolffhoogte bij 1000 golven volgens Steentoets van de steenzetting, waarvoor de stabiliteit bij een bepaalde belastingduur moet worden berekend (m)

$[H_{s1000}]_{\text{proef}}$ = bezwijkgolffhoogte bij 1000 golven volgens Steentoets van de steenzetting uit de Deltagoot (m)

De waarde van $N_{H>\text{drempel}}$ is in de praktijk hetzelfde als tijdens de proef in de Deltagoot.