

Belastingfunctie voor keuze maatgevende golfcondities

ir M. Klein Breteler

1 Inleiding

In het kader van het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen zijn vele nieuwe formules ontwikkeld voor het toetsen en ontwerpen van steenzettingen. Het is belangrijk dat deze nieuwe kennis ook wordt gebruikt bij het afleiden van de maatgevende golfcondities. Die worden in Zeeland ten behoeve van het ontwerp van nieuwe bekledingen berekend met het programma Wind-Water2004.

In dat programma worden momenteel eenvoudige Z-functies toegepast die aansluiten op de oude Steentoets 4.0, zoals $Z1 = H_s T_p$, $Z2 = H_s T_p^2$ en $Z3 = H_s^2 T_p$. De golfrandvoorwaarden met de grootste waarde van de Z-functie is maatgevend.

De belangrijkste vernieuwingen in de formules voor het ontwerpen van steenzettingen, die van invloed zijn op de keuze van de maatgevende golfcondities, zijn:

1. invloed van lange golven op de stabiliteit van de toplaag
2. invloed van hoek van golfinval op de stabiliteit van de toplaag
3. afschuiving

2 Invloed van lange golven

De invloed van lange golven is van belang zolang de leklengte kort is. Als de leklengte Λ kleiner is dan ongeveer 0,5 m, dan is er een grote invloed van lange golven, die zich uit in een geleidelijke toename van de stabiliteit als de brekerparameter ξ_{op} boven 2 toeneemt. De leklengte en brekerparameter zijn als volgt gedefinieerd:

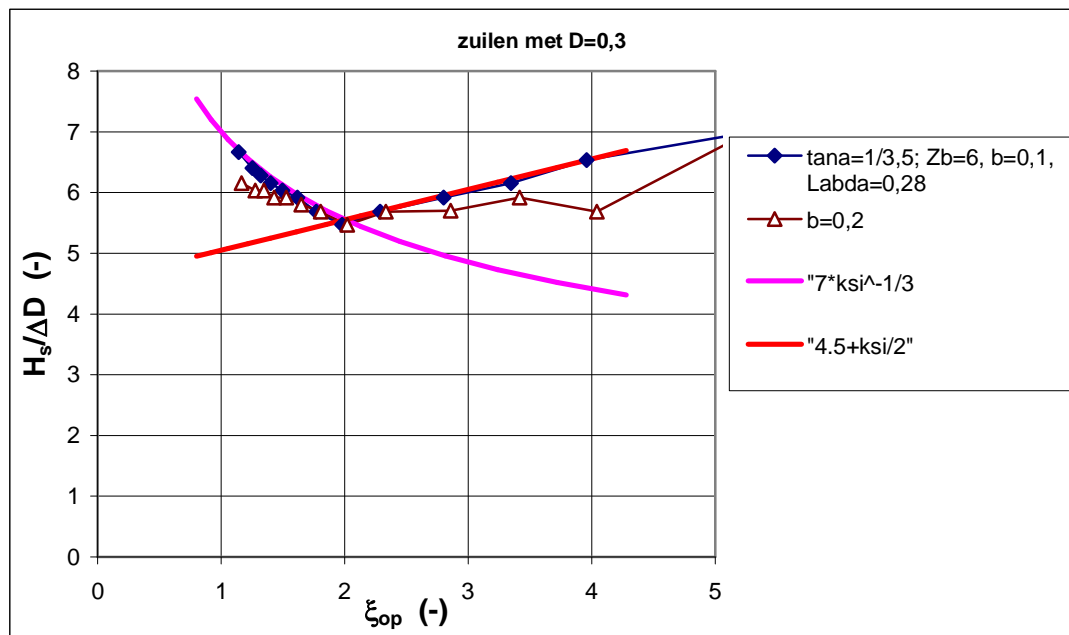
- $\Lambda = \sqrt{(bDk/k')} =$ leklengte (m)
- $\xi_{op} = \tan\alpha/\sqrt{(H_s/(1,56T_p^2))} =$ brekerparameter (-)
- $H_s =$ significante golfhoogte (op basis van energie) (m)
- $T_p =$ golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
- $\alpha =$ taludhelling ($^\circ$)
- $D =$ dikte van de toplaag (m)
- $b =$ dikte van de filterlaag (m)
- $k =$ doorlatendheid van het filter (m/s)
- $k' =$ doorlatendheid van de toplaag (m/s)

Als de leklengte groter is dan ongeveer 0,8 m, dan is er een dalende trend van de stabiliteit als ξ_{op} toeneemt, ook voor grote ξ_{op} . Er is sprake van een overgangsgebied voor $0,5 < \Lambda < 0,8$ m.

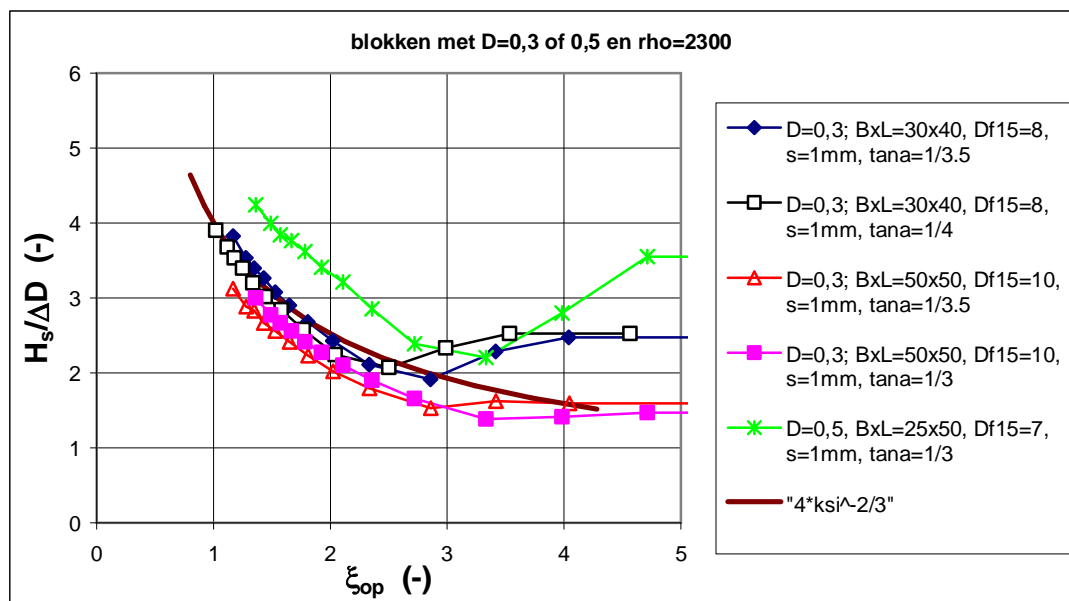
In figuur 1 en 2 is de stabiliteit, uitgedrukt in de belastingparameter $H_s/\Delta D$, gegeven als functie van ξ_{op} . De belastingparameter bevat de volgende variabelen:

- $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho =$ relatieve soortelijke massa van de stenen (-)

ρ_s = soortelijke massa van de stenen (kg/m^3)
 ρ = soortelijke massa van water (kg/m^3)



Figuur 1, Stabiliteit van voorbeeldsteenettingen met zuilen (talud 1:3,5, bovenste overgangsconstructie op NAP+6m, toetspeil op NAP+5m, leklengte=0,28m)



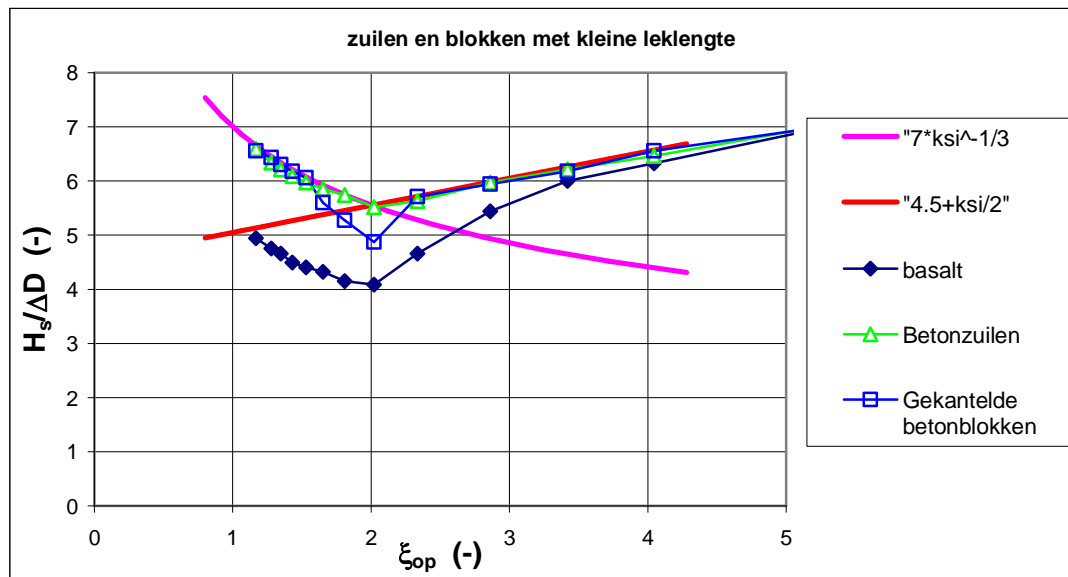
Figuur 2, Stabiliteit van voorbeeldsteenettingen met blokken (tana = taludhelling, Dx BxL = blokafmetingen, Df15 = korrelgrootte van het filter, s = spleetbreedte = 1mm)

In figuur 1 valt op dat de trend in $H_s/\Delta D$ voor $\xi_{op} < 2$ overeenkomt met $\xi_{op}^{-1/3}$, terwijl voor grotere waarden de trend overeenkomt met $\xi_{op}/2$. Bedenk echter wel dat er eindeloos veel combinaties van eigenschappen van de steenetting mogelijk zijn, waardoor elke keer het lijntje iets anders komt te liggen. Zo zijn er ook steenettingen waarbij de rechter tak veel steiler omhoog loopt, of ongeveer horizontaal loopt. De hier gekozen

steen-zetting kan gezien worden als een soort gemiddelde. Deze trend komt ook goed overeen met de resultaten van Deltagootproeven (Klein Breteler 2006b).

In figuur 2 zijn gemiddelde steenzettingen gegeven met blokken. Hier valt op dat de trend in $H_s/\Delta D$ voor $\xi_{op} < 3$ overeenkomt met $\xi_{op}^{-2/3}$, terwijl voor grotere waarden van ξ_{op} de stabiliteit soms toeneemt, en soms ook niet.

Voor het vaststellen van de maatgevende golfcondities is het niet nodig om alle details in de trends mee te nemen. Het globale verloop van de stabiliteit als functie van ξ_{op} is al voldoende. Er moet echter wel onderscheid gemaakt worden tussen steenzettingen met een korte lek-lengte (doorgaans bestaande uit zuilen) en steenzettingen met een lange lek-lengte (doorgaans bestaande uit blokken). Hoewel het zuiverder is om het onderscheid te maken aan de hand van de lek-lengte is het praktischer om onderscheid te maken tussen zuilen en blokken. Daarom wordt dit laatste gekozen.



Figuur 3, Stabiliteit van voorbeeldsteen-zettingen met kleine lek-lengte, aangeleverd door PBZ.

Blokken

Aan de hand van de trends in bovenstaande figuren worden de volgende Z-functies afgeleid voor het bepalen van de maatgevende golfcondities. Voor de trend $H_s/\Delta D = F \cdot \xi_{op}^{-2/3}$ (blokken) volgt de Z-functie uit:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = F \xi_{op}^{-2/3} \Rightarrow \Delta D = \frac{H_s \xi_{op}^{2/3}}{F} = \frac{H_s}{F} \left(\frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s / (1,56 T_p^2)}} \right)^{2/3} = \frac{H_s}{F} \left(\frac{\sqrt{1,56} \cdot T_p \tan \alpha}{\sqrt{H_s}} \right)^{2/3} = \frac{1,16}{F} \cdot (H_s T_p \tan \alpha)^{2/3}$$

met: F = constructie-afhankelijke constante (-)

Doordat er slechts gezocht wordt naar een maximale ΔD kan de Z-functie vereenvoudigd worden tot $Z = H_s T_p \tan \alpha$. Voor een specifieke locatie is de taludhelling een gegeven. Dat maakt dat ook $\tan \alpha$ uit de Z-functie weggelaten kan worden.

Zuilen

Voor zuilen met $\xi_{op} < 2$ verloopt de afleiding van de Z-functie vergelijkbaar als bovenstaand, uitgaande van de trend $H_s/\Delta D = f \cdot \xi_{op}^{-1/3}$. Dit levert als resultaat: $Z = H_s^5 T_p^2$. De invloed van de golfhoogte is dus nu veel groter.

Voor zuilen met $\xi_{op} > 2$ is het een stuk gecompliceerder. De trend is dan als volgt:

$$H_s/\Delta D = f \cdot 2^{-1/3} - 1 + \xi_{op}/2 \Rightarrow$$

$$\Delta D = \frac{H_s}{f \cdot 2^{-1/3} - 1 + \xi_{op}/2}$$

Hier lopen we tegen het probleem dat deze functie niet te vereenvoudigen is, en bovendien de waarde van f en $\tan\alpha$ nodig zijn om ermee te rekenen. Dat laatste kan opgelost worden als we ons realiseren dat de exacte waarde en exacte trend niet zo relevant is voor het vaststellen van de maatgevende golfrandvoorwaarden. Daarom wordt voorgesteld om te rekenen met gemiddelde waarden. De waarde van f in figuur 1 is nog wat aan de hoge kant (zie ook figuur 3), en daarom wordt gekozen voor: $f = 6$ en $\tan\alpha = 1/3,5$. Daardoor wordt deze functie:

$$Z = \Delta D = \frac{H_s}{3,8 + 1/(7\sqrt{s_{op}})}$$

met:

$$s_{op} = H_s/(1,56T_p^2) = \text{golfsteilheid (-)}$$

Voorgesteld wordt om ook bij het bepalen of er sprake is van $\xi_{op} < 2$ of > 2 te rekenen met $\tan\alpha = 1/3,5$. Daardoor verandert het criterium in $s_{op} > 0,02$ (was $\xi_{op} < 2$) of $s_{op} < 0,02$.

Resultaat

Resumerend zijn de trends en Z-functies:

1. Zuilen

$$\text{Trend: } H_s/\Delta D = \max(f \cdot \xi_{op}^{-1/3}; f \cdot 2^{-1/3} - 1 + \xi_{op}/2)$$

$$\text{Z-functie als } s_{op} \geq 0,02: Z = H_s^5 T_p^2$$

$$\text{Z-functie als } s_{op} < 0,02: Z = H_s / (3,8 + 1/(7\sqrt{s_{op}}))$$

2. Blokken:

$$\text{Trend: } H_s/\Delta D = F \cdot \xi_{op}^{-2/3}$$

$$\text{Z-functie: } Z = H_s T_p$$

3 Invloed van hoek van golfaanval

Naarmate de hoek van golfaanval groter is (meer afwijkt van loodrechte golfaanval), neemt de belasting op de steenzetting af. Hiervoor is de volgende invloedsfactor bepaald (Klein Breteler e.a., 2006a):

$$f_\beta = (\cos\beta)^{2/3}$$

Met:

$$\beta = \text{hoek van golfaanval (loodrecht invallend: } \beta = 0) (^{\circ})$$

Als we deze factor meenemen in de trends en Z-functies krijgen we ($-90 < \beta < 90^{\circ}$):

1. Zuilen

$$\text{Trend: } H_s/\Delta D = \max(f \cdot \xi_{op}^{-1/3}; 1 + f \cdot 2^{-1/3} + \xi_{op}/2) \cdot (\cos\beta)^{-2/3}$$

$$\begin{aligned} \text{Z-functie als } s_{op} \geq 0,02: Z &= H_s^5 T_p^2 \cdot (\cos\beta)^4 \\ \text{Z-functie als } s_{op} < 0,02: Z &= (\cos\beta)^{2/3} \cdot H_s / (3,8 + 1/(7\sqrt{s_{op}})) \end{aligned}$$

2. Blokken:

$$\text{Trend: } H_s/\Delta D = F \cdot \xi_{op}^{-2/3} \cdot (\cos\beta)^{-2/3}$$

$$\text{Z-functie: } Z = H_s T_p \cos\beta$$

Eventueel kan voor $\cos\beta$ een minimumwaarde aangehouden worden, bijvoorbeeld 0,089, om te voorkomen dat strijkgolven helemaal niet meer meetellen. Dit komt overeen met zoals het geprogrammeerd is in Steentoets, maar heeft bij de selectie van maatgevende golfcondities waarschijnlijk geen invloed.

4 Afschuiving

Voor het toetsen op afschuiving moet met de nieuwe toetsregels onderscheid gemaakt worden tussen dijken met een kleilaag en zonder kleilaag. Omdat in Zeeland er vrijwel alleen maar dijken zijn met een kleilaag, kan het selecteren van de maatgevende golfcondities hierop gericht worden. De toetsregel is als volgt:

$$H_s/(\Delta D + b + b_k) \leq 3 \cos\alpha$$

Met:

b_k = dikte van de kleilaag (m)

Met dezelfde systematiek als in hoofdstuk 3 kan hieruit een Z-functie afgeleid worden:

$$Z = H_s$$

5 Toetsing als $\xi_{op} > 2$

Als met bovenstaande Z-functies de maatgevende golfcondities worden bepaald, kan het toch zijn dat bij deze omstandigheden $\xi_{op} > 2$. Als het dan ook mogelijk is dat dezelfde golfhoogte kan optreden met een kleinere golfperiode, dan moet de toetsing van een steenzetting met kleine leklengte (zuilen) met die kleinere golfperiode uitgevoerd worden. De stabiliteit is namelijk het kleinst als $\xi_{op} = 2$.

Golfcondities met grote ξ_{op} treden doorgaans op in de volgende gevallen:

1. Ondiep voorland, waardoor de golven breken voordat ze op de dijk komen.
2. Als door refractie en/of diffractie de golven sterk bijdraaien richting de normaal op de dijk (zie figuur 4)

Brekende golven

In het eerste geval gaat het om golven die in dieper water zijn opgewekt, en vervolgens in de buurt van de dijk in ondiep water komen. De golven gaan dan breken, wat voornamelijk een verlaging van de golfhoogte met zich meebrengt. De periode wordt doorgaans nauwelijks kleiner. De golfhoogte past zich aan aan de waterdiepte, wat er vereenvoudigt ongeveer op neer komt dat de significante golfhoogte ongeveer de helft wordt van de waterdiepte.

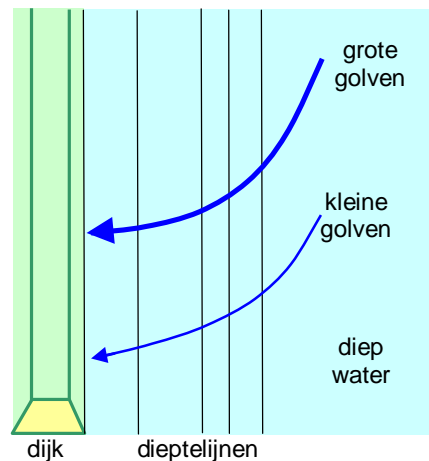
Bij een lagere windsnelheid zal de golfhoogte en golfperiode op het diepe water wat kleiner zijn. Maar de lokale golfhoogte bij de dijk wordt bepaald door de lokale waterdiepte, en zal bij een gegeven waterstand nog steeds hetzelfde zijn. Bij de dijk is

daardoor bij een lagere windsnelheid de golfhoogte gelijk, maar de golfperiode kleiner. Dat leidt ertoe dat ξ_{op} kleiner is.

Deze redenatie gaat op zolang de golfhoogte op het diepe water zo groot is dat de golven breken in het ondiepe water.

Refractie en diffractie

Het tweede geval treedt bijvoorbeeld op als de golven op enige afstand van de dijk, waar de waterdiepte wat groter is, met een grote hoek naar de dijk lopen (β is bijvoorbeeld groter dan ongeveer 45°). In de buurt van de dijk is de waterdiepte meestal kleiner. De golven hebben dan de neiging om van richting te veranderen, omdat ze de voorkeur hebben om zo loodrecht mogelijk op de dieptelijnen te lopen (refractie, zie figuur 4). Daarom wordt in het traject richting de dijk de waarde van β steeds kleiner. Tegelijkertijd wordt ook de golfhoogte kleiner, terwijl de golfperiode ongeveer hetzelfde blijft. Daardoor zijn onder deze omstandigheden de golfhoogte vrij klein en de golfperiode vrij groot (t.o.v. golfhoogte), wat leidt tot een grote waarden van ξ_{op} .



Figuur 4, Refractie van golven richting de dijk

Bij verandering van de richting ten gevolge van diffractie spelen ongeveer dezelfde processen, met vergelijkbaar resultaat.

Als in dit geval de windsnelheid wat kleiner is bij dezelfde waterstand, zullen zowel de golfhoogte als periode in het diepe water kleiner worden. En hetzelfde gebeurt op het ondiepe water: zowel de golfhoogte als golfperiode nemen beide af. Het effect van refractie wordt dan weliswaar iets minder, maar het nettoresultaat is toch dat de waarde van ξ_{op} nauwelijks verandert.

Mogelijk dat de golven iets schever gaan invallen, maar door hier geen rekening mee te houden, rekent Steentoets conservatief (veilig).

Een lagere windsnelheid leidt dus niet tot een verandering van ξ_{op} , zoals dat wel was bij een ondiep voorland waar golven op breken.

Conclusie en implementatie in Steentoets

Uit het bovenstaande blijkt dat alleen bij een ondiep voorland, waarop de golven breken, de golfperiode voor het toetsen van de steenzetting verkleind moet worden.

Voorgesteld wordt om de verkleining van de golfperiode in Steentoets2008 als volgt op te nemen, mits er sprake is van een kleine lek lengte, $\xi_{op} > 2$ en bovendien de steenzetting niet geheel en al boven het toetspeil ligt.

In Steentoets wordt stap voor stap de waterstand verlaagd om te zoeken naar de maatgevende waterstand, die de laagste stabiliteit van de te toetsen steenzetting geeft. In dit proces zal bij elke waterstand gecontroleerd moeten worden of $\xi_{op} > 2$. Als dat het geval is, dan moet ook een berekening uitgevoerd worden met een gereduceerde golfperiode zodat $\xi_{op} = 2$, en ontstaat er dus een tweede reeks waarden van f_{gt} . Voor beide wordt apart het minimum bepaald (laagste waarde van f_{gt}). Uiteindelijk wordt de waterstand gekozen met laagste van deze twee minima. Als bij die waterstand de laagste waarde was berekend bij $\xi_{op} = 2$ en bovendien $f_{gt} < 1$ (toetsresultaat is geavanceerd of onvoldoende), dan volgt een waarschuwing. Het toetsresultaat wordt gebaseerd op de berekening met $\xi_{op} = 2$.

De waarschuwing luidt: "Golfperiode verkleind tot $\xi_{op} = 2$. Controleer of dit terecht is.". In de handleiding kan dit nader toegelicht worden.

In het werkblad "Algemeen" wordt een optie toegevoegd waarmee deze procedure kan worden uitgeschakeld. Er wordt dan dus gerekend met de werkelijk ingevoerde waarden van de golven.

Referenties

Kuijper, B. en M. Duits (2006)

WindWater2006, technische documentatie, versie 4.0

HKV, verslag PR932, november 2006

Klein Breteler, M., C. Kuiper en A. Bezuijzen (2006a)

Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

Invloed scheve golfaanval op stabiliteit van steenzettingen

WL | Delft Hydraulics, verslag H4420, maart 2006

Klein Breteler, M., I. van de Werf en I. Wenneker (2006b)

Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

Kwantificering golfbelasting en invloed lange golven

WL | Delft Hydraulics, conceptverslag H4421, juni 2006