

**Vereenvoudiging van  
Steentoets tot enkele  
eenvoudige formules**





# **Vereenvoudiging van Steentoets tot enkele eenvoudige formules**

M. Klein Breteler  
G.C. Mourik

1204727-009



## Titel

Vereenvoudiging van Steentoets tot enkele eenvoudige formules

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Waterdienst en Rijkswaterstaat Zeeland	1204727-009	1204727-009-HYE-0003	44

## Trefwoorden

Steenzettingen, toetsing, dijkbekleding

## Samenvatting

Het rekenmodel Steentoets wordt gebruikt in het kader van de wettelijk verplichte zesjaarlijkse toetsing van de waterkeringen en wordt daarnaast als hulpmiddel voor het ontwerpen van steenzettingen gebruikt.

Vanwege het enorme scala aan soorten steenzettingen en dijkgeometriën, in combinatie met de diverse aspecten van de golfbelasting, is Steentoets in de loop der jaren een steeds gecompliceerder rekenmodel geworden. Hoewel dit voor de gebruiker geen extra werk oplevert, wordt de complexiteit toch als een nadeel ervaren.

Daarnaast wordt er overwogen om de deterministische toetsing te verruilen voor een probabilistische toetsing, gericht op het berekenen van de overstromingskans. Het huidige model is te complex om in een probabilistische rekenomgeving te kunnen gebruiken.

Daarom is in dit onderzoek een aantal eenvoudige formules afgeleid die ongeveer hetzelfde resultaat geven als Steentoets. In eerste instantie zijn formules afgeleid voor geklemde rechthoekige blokken en zuilen zonder gietasfalt op een talud dat zich (deels) onder het toetspeil bevindt (niet op een berm, boventalud, kruin of binnentalud). Het onderhavige rapport beschrijft de methode waarop deze vereenvoudigde formules zijn afgeleid, en geeft een waardeoordeel over de resulterende formules. Voor het gebruik van de formules moet wel eerst de maatgevende waterstand en belastingduur handmatig bepaald worden, waardoor het gebruik van de formules niet al te handig is. Helaas voldoet de nauwkeurigheid net niet aan de wensen: 95% van de doorgerekende steenzettingen heeft een fout die kleiner is dan 12%, terwijl gestreefd werd naar 99% met een kleinere fout dan 10%.




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.

## Referenties

Waterdienst zaaknummer 31054958 / 4500180616 (opdracht van 7 juni 2011)

Contactpersoon Waterdienst: K. Saathof

Contactpersoon Projectbureau Zeeweringen van RWS: Y. Provoost

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	feb. 2012	M. Klein Breteler		R. 't Hart		M.R.A. van Gent	

## Status

definitief



## Inhoud

### Symbolenlijst

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2 Aanpak</b>	<b>3</b>
2.1 Inleiding	3
2.2 Belangrijkste variabelen	3
2.3 Vaststellen van de trends	5
<b>3 Geklemde rechthoekige blokken</b>	<b>7</b>
3.1 Het centrale punt van waaruit de trends zijn gekwantificeerd	7
3.2 Kwantificering van de trends voor geklemde rechthoekige blokken	8
3.3 Samenstelling van trends tot integrale formule voor geklemde rechthoekige blokken	13
3.4 Verificatie van de resulterende formule voor geklemde rechthoekige blokken	16
<b>4 Zuilen</b>	<b>21</b>
4.1 Het centrale punt van waaruit de trends zijn gekwantificeerd	21
4.2 Kwantificering van de trends voor zuilen	22
4.3 Samenstelling van trends tot integrale formule voor zuilen	26
4.4 Verificatie van de resulterende formule voor zuilen	28
<b>5 Toepassing van de formules</b>	<b>31</b>
<b>6 Conclusies</b>	<b>37</b>
<b>7 Referenties</b>	<b>39</b>
<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A Leklengte</b>	<b>A-1</b>





## Symbolenlijst

$A_{ro}$	Deel van de toplaag die bestaat uit respectievelijk stootvoegen en langsvoegen (-)
$a_f$	Lineaire weerstandscoefficiënt van het granulair materiaal (s/m)
$a_{ftop}$	Lineaire weerstandscoefficiënt van het granulaire materiaal direct onder de spleten (s/m)
$a_s$	Lineaire weerstandscoefficiënt van de spleten (s/m)
$a_i$	Lineaire weerstandscoefficiënt van het inwasmateriaal (s/m)
$b_f$	Turbulente weerstandscoefficiënt van het granulair materiaal ( $s^2/m^2$ )
$b_{ftop}$	Turbulente weerstandscoefficiënt van het granulaire materiaal direct onder de spleten ( $s^2/m^2$ )
$b_i$	Turbulente weerstandscoefficiënt van het inwasmateriaal ( $s^2/m^2$ )
$b_s$	Turbulente weerstandscoefficiënt de spleten ( $s^2/m^2$ )
$B$	Breedte van de stenen in de toplaag (m)
$b_1$	Dikte van de bovenste granulaire laag (uitvullaag) (m)
$b_2$	Dikte van de tweede filterlaag, indien aanwezig (m)
$B_{klap50\%2\%}$	Breedte van de golfklap halverwege de golfklaphoogte met 2% overschrijdingsfrequentie (langs het talud gemeten) (m)
$c_1, c_2$	Coëfficiënten in verband met de belastingduur (-)
$d_m$	Maatgevende waterdiepte op halve diepwatergolflengte van de teen van de dijk (m)
$D$	Toplaagdikte (m)
$D_{i15}$	Korrelgrootte van het inwasmateriaal in de voegen (m)
$D_{f15,1}$	Korrelgrootte van de bovenste granulaire laag (uitvullaag) (m)
$D_{f15,2}$	Korrelgrootte van de tweede filterlaag (m)
$f_{s,front}$	Invloedsfactor in Steentoets voor de belastingduur (-)
$f_{od,front}$	Invloedsfactor in verband met ondiepe voorlanden (locatie van het front) (m)
$f_{od,klap}$	Invloedsfactor in verband met ondiepe voorlanden (locatie van de klap) (m)
$g$	Versnelling van de zwaartekracht ( $m/s^2$ )
$H_s$	Significante golfhoogte bij de teen van de dijk (m)
$H_s/(\Delta D)$	Dimensieloze belastingparameter (-)
$[H_s/(\Delta D)]_{max}$	bovengrens voor de maximaal toelaatbare $H_s/(\Delta D)$ in Steentoets (-)
$[H_s/(\Delta D)]_{Steentoets}$	met Steentoets berekende maximaal toelaatbare waarde van $H_s/(\Delta D)$ bij een specifieke waarde van de parameter die gevarieerd wordt (-)
$[H_s/(\Delta D)]_{centraal\ punt}$	met Steentoets berekende maximaal toelaatbare waarde van $H_s/(\Delta D)$ bij het centrale punt (-)
$h$	Waterstand uit deze iteratieslag (m)
$h_{toets}$	Toetspeil ten opzichte van NAP (m)
$h_{MVS}$	Maatgevende waterstand voor de te toetsen steenzetting, ten opzichte van NAP (m)
$h_L$	Niveau van de ondergrens van de zone waarbinnen de waterstand moet liggen om een grote golfbelasting te hebben (NAP+m)
$h_H$	Niveau van de bovengrens van de zone waarbinnen de waterstand moet liggen om een grote golfbelasting te hebben (NAP+m)
$k_1$	Doorlatendheid van de bovenste granulaire laag (uitvullaag) (m/s)
$k_2$	Doorlatendheid van de tweede filterlaag, indien aanwezig (m/s)
$k'$	Doorlatendheid van de toplaag (m/s)
$L$	Lengte van de stenen in de toplaag (m)
$N$	Aantal golven die een belangrijke belasting geven op het te toetsen niveau op de steenzetting (-)
$n_1$	Porositeit van de bovenste granulaire laag (uitvullaag) (-)
$n_2$	Porositeit van de tweede filterlaag (-)

$p$	Invloedsfactor die de invloed van de gevarieerde parameter weergeeft ten opzichte van het resultaat bij het centrale punt (-)
$p_D$	Invloedsfactor van van de toplaagdikte (m)
$p_\Delta$	Invloedsfactor van $\Delta$ (-)
$p_N$	Invloedsfactor van N (-)
$p_{\tan\alpha}$	Invloedsfactor van dimensieloze taludhelling (-)
$p_\beta$	Invloedsfactor van $\beta$ (-)
$p_\Lambda$	Invloedsfactor van dimensieloze leklengte $\Lambda/D$ (-)
$p_{Z_b}$	Invloedsfactor van het dimensieloze niveau van de bovenste overgangsconstructie ten opzichte van de stilwaterlijn, $(Z_b - h_{MWS})/H_s$ (-)
$p_{s,op}$	Invloedsfactor voor de invloed van de golfsteilheid (-)
$s$	Spleetbreedte in de toplaag (m)
$s_s$	Breedte van de stootvoeg (m)
$s_l$	Breedte van de langsvoeg (m)
$s_{op}$	Golfsteilheid op basis van de significante golfhoogte bij de teen van de dijk en fictieve golflengte op diep water, berekend met de piekperiode bij de teen van de dijk (-)
$t_{belast}$	Belastingduur (s)
$T_p$	Golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
$x_{\phi max}$	Horizontale afstand van de snijlijn van de stilwaterlijn en het talud tot de locatie met grootste stijghoogte in de golfklap (m)
$Z_{bodem}$	Niveau van de teen van de dijk (m+NAP)
$Z_o$	Niveau van de ondergrens van de te toetsen steenzetting (m+NAP)
$Z_b$	Niveau van de bovenste overgangsconstructie van de te toetsen steenzetting (m+NAP)
$Z_o$	Niveau van de onderste overgangsconstructie van de te toetsen steenzetting (m+NAP)
$Z_{belast}$	Niveau waar de maximale belasting optreedt ten opzichte van NAP (m)
$\alpha$	Taludhelling ( $^\circ$ )
$\alpha_{bodem}$	Helling van het voorland ( $^\circ$ )
$\beta$	Hoek van golfaanval ( $0^\circ =$ loodrechte golfaanval) ( $^\circ$ )
$\Delta$	$(\rho_s - \rho)/\rho =$ relatieve soortelijke massa van de stenen in de toplaag (-)
$\mu$	Gemiddelde waarde
$\rho$	Soortelijke massa van het water ( $kg/m^3$ )
$\rho_s$	Soortelijke massa van de stenen in de toplaag ( $kg/m^3$ )
$\sigma$	Standaardafwijking
$\xi_{op}$	$\tan\alpha/\sqrt{s_{op}} =$ brekerparameter (-)
$\nu$	Kinematische viscositeit van water ( $= 1,2 \cdot 10^{-6} m^2/s$ )
$\Omega$	Open oppervlak (%)

## 1 Inleiding

In het kader van de toetsing van de waterkeringen zoals voorgeschreven in de Waterwet dienen ook steenzettingen elke zes jaar getoetst te worden. Volgens de VTV2006 moet dit uitgevoerd worden met het Excel-programma Steentoets (Klein Breteler, 2011). Daarnaast kan Steentoets gebruikt worden als hulpmiddel voor het ontwerpen van steenzettingen.

Vanwege het enorme scala aan soorten steenzettingen en dijkgeometriën, in combinatie met de diverse aspecten van de golfbelasting, is Steentoets in de loop der jaren een steeds gecompliceerder rekenmodel geworden. Hoewel dit voor de gebruiker geen extra werk oplevert, wordt de complexiteit toch als een nadeel ervaren. De resultaten blijken soms moeilijk te begrijpen te zijn, hoewel een nadere analyse ervan vrijwel altijd tot de conclusie heeft geleid dat de resultaten juist zijn.

Daarnaast wordt er overwogen om de deterministische toetsing te vervuilen voor een probabilistische toetsing, gericht op het berekenen van de overstromingskans. Het huidige model is te complex om in een probabilistische rekenomgeving te kunnen gebruiken.

Dat heeft geleid tot de wens om eenvoudige formules af te leiden die ongeveer hetzelfde resultaat geven als Steentoets. Het onderhavige rapport beschrijft de methode waarop deze vereenvoudigde formules zijn afgeleid, en geeft een waardeoordeel over de resulterende formules.

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.

Het doel van het onderzoek is het vinden van een set eenvoudige formules waarmee de stabiliteit van een steenzetting (toplaag) onder golfaanval kan worden beoordeeld met een acceptabele nauwkeurigheid, bijvoorbeeld een verschil met Steentoets van ten hoogste 10% ten aanzien van de waarde van  $H_s/(\Delta D)$  bij bezwijken. Om goed bruikbaar te zijn is het gewenst dat bij ongeveer 99% van de steenzettingen aan deze nauwkeurigeis voldaan wordt.



## 2 Aanpak

### 2.1 Inleiding

Steentoets is een complex rekenprogramma met tientallen invoervariabelen en vele honderden formules die bepalend zijn voor de beoordeling van de stabiliteit. Dat maakt het onmogelijk om de formules langs analytische weg samen te voegen om zo te komen tot het gewenste doel.

Daarom is ervoor gekozen om uit te gaan van vele berekeningen van de maximaal toelaatbare  $H_s/(\Delta D)$ :

$H_s/(\Delta D)$  = dimensieloze belastingparameter (-)

Met:

$H_s$  = significante golfhoogte bij de teen van de dijk (m)

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

$D$  = dikte van de toplaag (m)

$\rho$  = soortelijke massa van het water ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_s$  = soortelijke massa van de stenen in de toplaag ( $\text{kg/m}^3$ )

Vervolgens zijn formules opgesteld die de resultaten van de berekeningen zo goed mogelijk benaderen.

### 2.2 Belangrijkste variabelen

De stabiliteit van een steenzetting is enerzijds afhankelijk van de golfcondities en de waterstand, en anderzijds afhankelijk van een groot aantal constructie-gerelateerde parameters. Uitgaande van een normale steenzetting (met granulaire uitvul/filterlaag, zonder gaten in de stenen en geen geotextiel tussen de toplaag en filter) op een buitentalud (niet op een berm, kruin of binnentalud), deels of geheel onder het toetspeil, zijn deze parameters:

1. Helling van het voorland:  $\tan\alpha_{\text{bodem}}$  (-)
2. Niveau van de teen van de dijk:  $Z_{\text{bodem}}$  (m+NAP)
3. Niveau van de ondergrens van de te toetsen steenzetting:  $Z_o$  (m+NAP)
4. Niveau van de bovengrens van de te toetsen steenzetting:  $Z_b$  (m+NAP)
5. Taludhelling:  $\tan\alpha$  (-)
6. Type toplaag: zuilen / blokken / blokken op hun kant / koperslakblokken / etc
7. Toplaagdikte:  $D$  (m)
8. Breedte en lengte van de stenen in de toplaag:  $B$  en  $L$  (m)
9. Spleetbreedte of relatieve open oppervlak in de toplaag:  $s$  (m) of  $\Omega$  (%)
10. Soortelijke massa van de stenen:  $\rho_s$  ( $\text{kg/m}^3$ )
11. Korrelgrootte van het inwasmateriaal in de voegen:  $D_{f15}$  (m)
12. Of de steenzetting geklemd is of niet
13. Diepte van de eventuele ingieting met gietasfalt en resultaat van de VGD-meting:  $d_g$  en  $E_{\text{VGD}}$  (GPa)
14. Dikte van de bovenste granulaire laag (uitvullaag):  $b_1$  (m)
15. Korrelgrootte van de bovenste granulaire laag (uitvullaag):  $D_{f15,1}$  (m)
16. Porositeit van de bovenste granulaire laag (uitvullaag):  $n_1$  (-)
17. Dikte van de tweede filterlaag, indien aanwezig:  $b_2$  (m)
18. Korrelgrootte van de tweede filterlaag:  $D_{f15,2}$  (m)
19. Porositeit van de tweede filterlaag:  $n_2$  (-)

## 20. Kwaliteit van de eventuele afstandshouders

Sommige van deze parameters hebben betrekking op steenzettingen die niet zoveel voorkomen, zoals steenzettingen met een ingegoten toplaag, blokken op hun kant met afstandshouders of steenzettingen met twee filterlagen. In eerste instantie worden deze steenzettingen buiten beschouwing gelaten, waardoor parameter 13 en 17 tot en met 20 voorlopig vervallen.

Er is ook een aantal parameters dat voornamelijk van invloed is op de leklengte. De formules voor het berekenen van de leklengte zijn weliswaar gecompliceerd, maar niet zo complex dat ze niet met de hand uitgerekend kunnen worden. Daarom wordt ervoor gekozen de leklengte te gebruiken als constructie beschrijvende parameter, in plaats van alle parameters die van invloed zijn op de leklengte. Daardoor vervangt de leklengte de parameters 8 tot en met 11 en 14 tot en met 16.

Er blijven daardoor nog 11 parameters over. Het doel is het vinden van een relatie tussen deze parameters en de belastingparameter  $H_s/(\Delta D)$  waarbij volgens Steentoets nog net geen instabiliteit van de toplaag optreedt. Voor de formule die deze relatie beschrijft, heeft het de voorkeur om met dimensieloze parameters te werken. Op basis van de ervaring met steenzettingen en de de formules in Steentoets zijn de volgende dimensieloze parameters opgesteld aan de hand van bovenstaande lijst. De lijst is aangevuld met enkele dimensieloze belastingparameters:

- Waterdiepte bij de teen van de dijk:  $\frac{h_{MWS} - z_{bodem}}{H_s}$  (2.1)

- Niveau van de bovenste overgangsconstructie ten opzichte van de maatgevende waterstand:  $\frac{Z_b - h_{MWS}}{H_s}$  (2.2)

- Taludhelling:  $\tan \alpha$  (2.3)

- Dimensieloze soortelijke massa van de stenen:  $\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$  (2.4)

- Dimensieloze leklengte:  $\frac{\Lambda}{D}$  (2.5)

- Dimensieloze belasting:  $\frac{H_s}{\Delta D}$  (2.6)

- Golfsteilheid:  $s_{op} = \frac{H_s}{1,56T_p^2}$  (2.7)

- Hoek van golfaanval:  $\beta$  (2.8)

- Belastingduur:  $N = \frac{\text{belastingduur}}{T_p / 1,1}$  (2.9)

Met:

$h_{MWS}$  = maatgevende waterstand voor de te toetsen steenzetting, ten opzichte van NAP (m)

$N$  = aantal golven die een belangrijke belasting geven op het te toetsen niveau op de steenzetting (-)

$s_{op}$  = golfsteilheid op basis van de significante golfhoogte bij de teen van de dijk en de fictieve golf lengte op diep water, berekend met de piekperiode bij de teen van de dijk (-)

$\beta$  = hoek van golfaanval ( $0^\circ$  = loodrechte golfaanval) ( $^\circ$ )

In deze lijst is het niveau van de onderste overgangsconstructie achterwege gelaten, omdat het de verwachting is dat deze parameter bij normale steenzettingen weinig invloed heeft. Dit wordt pas belangrijk als de steenzetting geheel en al boven het toetspeil zit. Dergelijke steenzettingen worden vooralsnog buiten beschouwing gelaten.

Ook het type toplaag komt in de bovenstaande lijst met dimensieloze parameters niet voor. Het is de intentie om voor de meestvoorkomende typen afzonderlijke formules af te leiden.

### 2.3 Vaststellen van de trends

Er zijn vele honderden berekeningen uitgevoerd met Steentoets om de invloed van de gekozen dimensieloze parameters op de maximaal toelaatbare belasting te bepalen. Daarbij is een geschikt geachte steenzetting als uitgangspunt gekozen, om vanuit dit uitgangspunt stap voor stap één parameter te variëren. Op deze wijze is de trend bij variatie van de betreffende parameter vastgesteld.

Voor het zichtbaar maken van de trend van de maximaal toelaatbare waarde van  $H_s/(\Delta D)$  als functie van een van de dimensieloze parameters is gebruikgemaakt van een invloedsfactor  $p$  die als volgt gedefinieerd is:

$$p = \frac{[H_s / (\Delta D)]_{\text{Steentoets}}}{[H_s / (\Delta D)]_{\text{centraal punt}}} \quad (2.10)$$

Met:

$p$	= invloedsfactor die de invloed van de gevarieerde parameter weergeeft ten opzichte van het resultaat bij het centrale punt (-)
$[H_s/(\Delta D)]_{\text{Steentoets}}$	= met Steentoets berekende maximaal toelaatbare waarde van $H_s/(\Delta D)$ bij een specifieke waarde van de parameter die gevarieerd wordt (-)
$[H_s/(\Delta D)]_{\text{centraal punt}}$	= met Steentoets berekende maximaal toelaatbare waarde van $H_s/(\Delta D)$ bij het centrale punt (-)

Het doel is om voor elke parameter een formule te creëren die de relatie geeft tussen  $p$  en de gevarieerde parameter. Later zijn al deze formules samengesteld tot een grote formule waarmee het Steentoets-resultaat voorspeld kan worden.

Hoewel Basalton en Hydroblocks de meest toegepaste steenzettingen zijn in renovatiewerken, is dat type toch niet gekozen als eerste uitgangspunt. Bij dat type steenzettingen is het open oppervlak ( $\Omega$ ) relatief groot, en bovendien varieert het slechts in een beperkte range (van ongeveer 11 tot 15%). Door het relatief grote open oppervlak is de stabiliteit vrij groot, en wordt deze in vele gevallen begrensd door de maximale stabiliteit volgens Steentoets. Deze maximale stabiliteit is geïntroduceerd door Klein Breteler (2009) om te zorgen dat een uitgekiende steenzetting geen onrealistisch hoge stabiliteit krijgt volgens Steentoets. Voor een kortdurende belasting met loodrechte golfaanval en  $\xi_{\text{op}} < 2$  is deze maximale belasting  $H_s/(\Delta D) = 7\xi_{\text{op}}^{-1/3}$ .

In hoofdstuk 3 is daarom eerst gewerkt met een bekleding van geklemde rechthoekige blokken (koperslakblokken). Vervolgens is in hoofdstuk 4 met dezelfde werkwijze een formule afgeleid voor zuilen (Basalton).





### 3 Geklemde rechthoekige blokken

#### 3.1 Het centrale punt van waaruit de trends zijn gekwantificeerd

Voor het vaststellen van de trend in de stabiliteit van steenzettingen volgens Steentoets is uitgegaan van een geschikt geachte steenzetting. Van daaruit is steeds één parameter gewijzigd om de invloed van die parameter op de stabiliteit te kunnen vaststellen.

Om praktische redenen is gekozen voor een bekleding van koperslakblokken, omdat dit blokken zijn waarbij de spleetbreedte behoorlijk kan variëren en omdat deze bekleding klemming heeft. De eigenschappen van de constructie, die als uitgangspunt is genomen, zijn:

- Helling van het voorland:  $\tan\alpha_{\text{bodem}} = 1/50$
- Niveau van de teen van de dijk:  $Z_{\text{teen}} = -5$  m
- Niveau van de ondergrens van de te toetsen steenzetting:  $Z_o = 2$  m+NAP
- Niveau van de bovengrens van de te toetsen steenzetting (type b2):  $Z_b = 6$  m+NAP
- Taludhelling:  $\tan\alpha = 1/3,5$
- Type toplaag: koperslakblokken
- Toplaagdikte:  $D = 0,35$  m
- Breedte en lengte van de stenen in de toplaag:  $B = 0,30$  en  $L = 0,40$  m
- Spleetbreedte in de toplaag:  $s = 8$  mm
- Soortelijke massa van de stenen:  $\rho_s = 2500$  kg/m<sup>3</sup>
- Korrelgrootte van het inwasmateriaal in de voegen:  $D_{15} = 7$  mm
- de steenzetting is geklemd, maar niet ingegoten met gietasfalt
- Dikte van de uitvullaag:  $b_1 = 0,10$  m
- Korrelgrootte van de uitvullaag:  $D_{15,1} = 17$  mm
- Porositeit van de uitvullaag:  $n_1 = 0,35$
- Er is geen tweede filterlaag

Het uitgangspunt voor de belasting is gekozen op:

- Maatgevende waterstand gelijk aan toetspeil: NAP+5,2 m
- Golfsteilheid:  $s_{op} = 0,04$
- Hoek van golfaanval:  $\beta = 0^\circ$
- Belastingduur:  $N = 3000$
- Gemiddeld hoogwater: NAP+1,0 m
- Gemiddeld laagwater: NAP-1,0 m
- Watersysteem: Westerschelde, maar er is gerekend met een vaste waterstand en kunstmatig opgelegde belastingduur, zodat het type watersysteem eigenlijk niet meer ter zake doet.

Deze combinatie van constructie en belasting wordt in het vervolg het 'centrale punt' genoemd. In het centrale punt geldt volgens Steentoets  $H_g/(\Delta D) = 4,39$ .

Vanuit dit centrale punt is de invloed van elke dimensieloze parameter berekend door één invoerparameter van Steentoets te variëren. Wat betreft de dimensieloze waterdiepte bij de teen is gekozen voor het variëren van  $Z_{\text{bodem}}$ . Wat betreft het dimensieloze niveau van de bovenste overgangsconstructie is gekozen voor het variëren van  $Z_b$ .

De dimensieloze leklengte wordt bepaald door een aantal invoerparameters. Daarom zijn berekeningen gemaakt waarbij steeds één van de volgende parameters is gevarieerd:

- Toplaagdikte:  $D$  (m)
- Spleetbreedte in de toplaag:  $s$  (m)

- Dikte van de bovenste granulaire laag (uitvullaag):  $b_1$  (m)
- Korrelgrootte van de bovenste granulaire laag (uitvullaag):  $D_{f15,1}$  (m)

Zo zijn er vele series berekeningen uitgevoerd waarbij steeds één parameter is gevarieerd. Omdat het vermoeden bestaat dat het werken vanuit één centraal punt mogelijk niet tot een optimale formule zou kunnen leiden, is gewerkt met 5 centrale punten. Voor deze centrale punten zijn alle variabelen gelijk als in bovenstaande lijst, behalve:

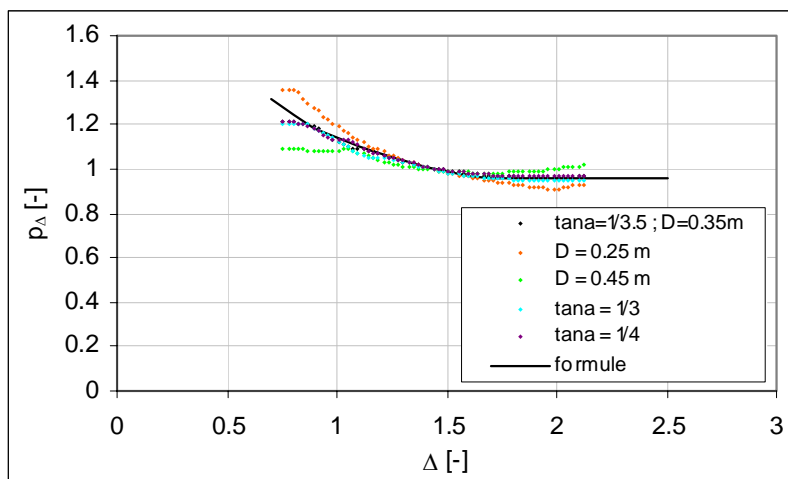
- Toplaagdikte van respectievelijk 25, 35 en 45 cm met de taludhelling van 1:3,5
- Taludhelling van 1:3, 1:3,5 en 1:4 en toplaagdikte van 35 cm

Op deze wijze is de invloed van de toplaagdikte en de taludhelling, die beiden als een belangrijke parameter gezien worden, wat sterker meegewogen in het bepalen van de trends.

### 3.2 Kwantificering van de trends voor geklemde rechthoekige blokken

De dimensieloze soortelijke massa van de stenen ( $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$ ) is de eerste parameter die gevarieerd is. Het resultaat van de berekeningen is gegeven in Figuur 3.1. In deze figuur is voor de constructie zoals gespecificeerd in paragraaf 3.1 de waarde van  $p$  berekend voor drie verschillende waarden van de taludhelling (1:3, 1:3,5 en 1:4) en drie verschillende waarden van de toplaagdikte ( $D = 0,25$ ;  $0,35$  en  $0,45$ ). Voor elk van deze vijf series zijn 60 berekeningen met Steentoets gemaakt, waarbij de  $\Delta$  in kleine stapjes gevarieerd is van  $0,75$  tot  $2,1$ . In de figuur zijn derhalve 300 Steentoets-berekeningen gepresenteerd.

Eigenlijk zou men hier een horizontale trend verwachten, omdat de invloed van  $\Delta$  al verwerkt zit in de dimensieloze belastingparameter ( $H_s/\Delta D$ ). Uit de figuur blijkt dat er toch nog een invloed overblijft die verdisconteerd moet worden in een formule. Kennelijk is volgens Steentoets de waarde van  $\Delta$  niet omgekeerd evenredig met de golfhoogte en recht evenredig met de toplaagdikte.



Figuur 3.1 Invloed van de dimensieloze soortelijke massa van de toplaag ( $\Delta$ ) (geklemde rechthoekige blokken)

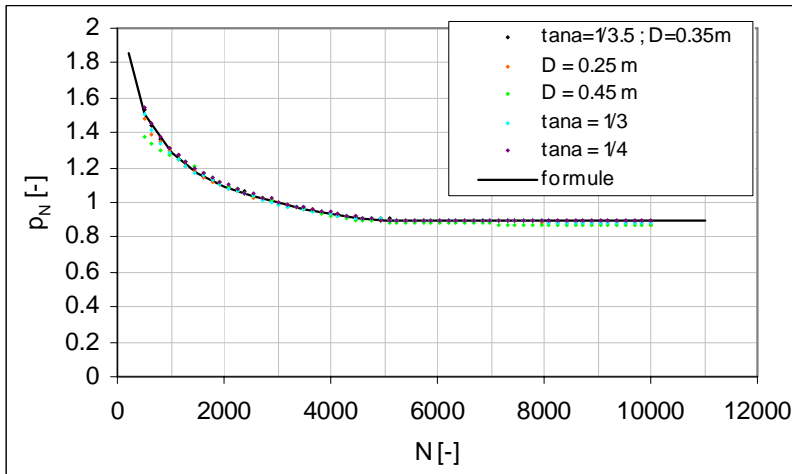
In de figuur is te zien dat de trend voor de verschillende taludhellingen en toplaagdiktes gelijk is in het grootste deel van de doorgerekende range. Bij erg lage waarden van  $\Delta$  ontstaat er meer spreiding, maar omdat in de praktijk  $\Delta$  meestal groter is dan  $1,1$ , is dat minder belangrijk.

In de figuur is de volgende trendlijn getekend die vrij goed aansluit op de rekenresultaten:

$$p_{\Delta} = \max(0,54 \cdot \Delta^{-0,79} + 0,6; 0,96) \quad (3.1)$$

Met:

$p_{\Delta}$  = invloedsfactor van  $\Delta$  (-)



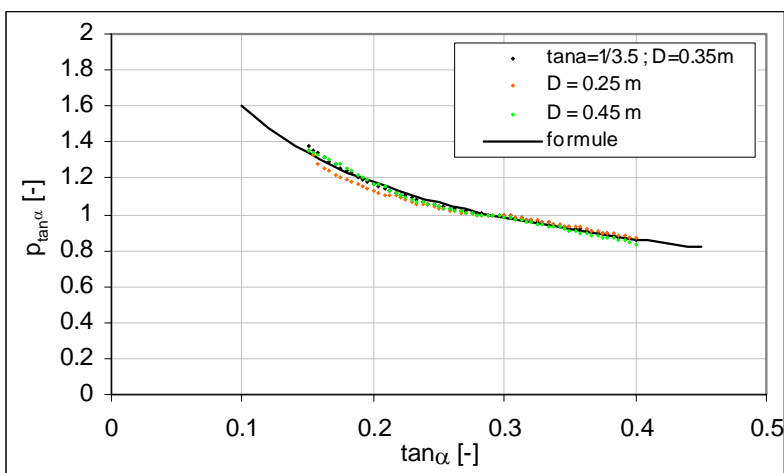
Figuur 3.2 Invloed van het dimensieloze belastingduur (aantal golven, N) (geklemderechthoekige blokken)

De tweede parameter die gevarieerd is, is de belastingduur (aantal golven, N). Het resultaat van de berekeningen is te zien in Figuur 3.2. Ook hier is de invloed van de toplaagdikte en taludhelling op de trend betrekkelijk gering. In de figuur is de volgende trendlijn getekend die vrij goed aansluit op de rekenresultaten:

$$p_N = \max(6,3 \cdot N^{-0,23}; 0,89) \quad (3.2)$$

Met:

$p_N$  = invloedsfactor van N (-)



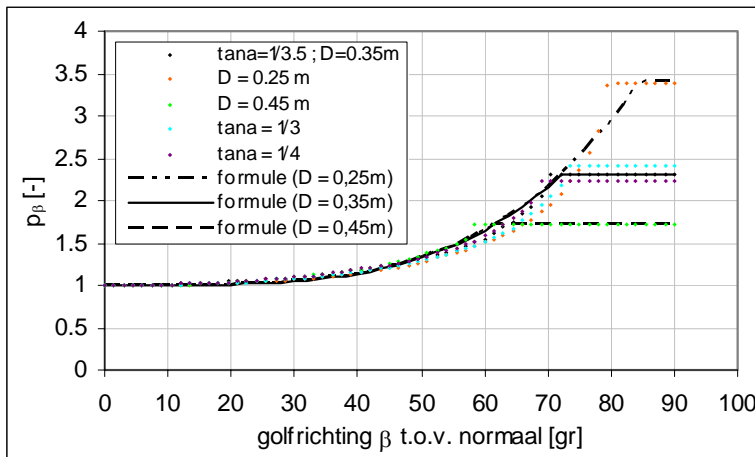
Figuur 3.3 Invloed van taludhelling (geklemderechthoekige blokken)

De invloed van de taludhelling is te zien in Figuur 3.3. De trend blijkt voor de verschillende blokdiktes steeds ongeveer hetzelfde te zijn. De volgende trendlijn sluit goed aan op de rekenresultaten:

$$p_{\tan \alpha} = 0,57 \cdot \tan \alpha^{-0,45} \quad (3.3)$$

Met:

$p_{\tan\alpha}$  = invloedsfactor van dimensieloze taludhelling (-)



Figuur 3.4 Invloed van de golfrichting  $\beta$  ten opzichte van de normaal op de dijk (geklemde rechthoekige blokken)

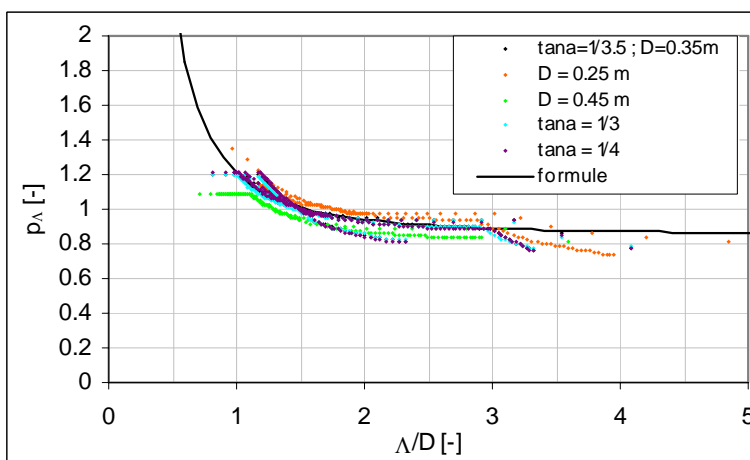
De invloed van de golfrichting  $\beta$  ten opzichte van de normaal op de dijk is te zien in Figuur 3.4. Zolang  $\beta < 50^\circ$  is de spreiding als gevolg van de verschillende toplaagdiktes en taludhellingen betrekkelijk klein, maar bij grotere hoeken ontstaan er grote verschillen. De globale trend wordt weergegeven door de volgende formule:

$$p_\beta = \min(10^{-7} \cdot \beta^{3,83} + 1; 0,69 \cdot D^{-1,15}) \quad (3.4)$$

Met:

$p_\beta$  = invloedsfactor van  $\beta$  (-)

In tegenstelling tot de formule (3.1) tot en met (3.3) is in deze formule niet alleen de gevarieerde dimensieloze parameter  $\beta$  opgenomen, maar was het ook nodig om de invloed van de toplaagdikte in de formules tot uiting te laten komen. Dat heeft als nadeel dat de formule niet meer volledig dimensieloos is.



Figuur 3.5 Invloed van de dimensieloze leklengte  $\Lambda/D$  (geklemde rechthoekige blokken)

De invloed van de leklengte is geïnventariseerd door de volgende constructieparameters te variëren:

- Toplaagdikte:  $0,15 \leq D \leq 0,55$  m

- Spleetbreedte in de toplaag:  $1 \leq s \leq 20$  mm
- Dikte van de uitvullaag:  $0,03 \leq b \leq 0,50$  m
- Korrelgrootte van de uitvullaag:  $5 \leq D_{f15} \leq 40$  mm

Voor elk van deze parameters zijn 60 berekeningen gemaakt in de aangegeven range. In totaal zijn er derhalve 240 berekeningen gemaakt om de invloed van de lek lengte in kaart te brengen. De resultaten van de berekeningen zijn gegeven in Figuur 3.5.

Helaas blijkt de spreiding in de figuur wat groter te zijn dan in de vorige figuren. Kennelijk is de lek lengte niet de enige parameter via welke de invloed van de spleetbreedte en filtereigenschappen doorwerken in het eindresultaat. In een groot deel van de doorgerekende range van waarden van  $\Lambda/D$  liggen de punten van de dunne toplagen wat aan de hoge kant, en de dikkere toplagen wat aan de lage kant. Bij grote waarde van  $\Lambda/D$  draait dit echter weer om.

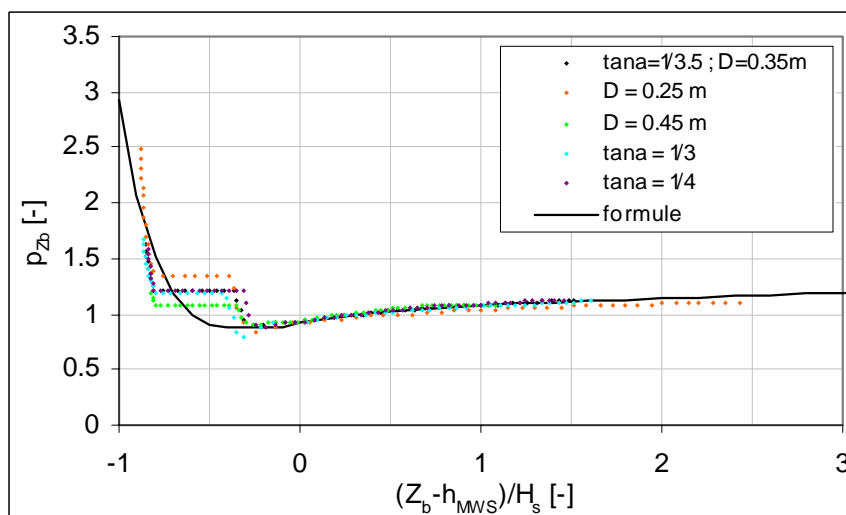
De trend wordt weergegeven door de volgende formule:

$$p_{\Lambda} = 0,36 \cdot \left( \frac{\Lambda}{D} \right)^{-2} + 0,85 \quad (3.5)$$

Met:

$p_{\Lambda}$  = invloedsfactor van dimensieloze lek lengte  $\Lambda/D$  (-)

Voor het berekenen van de invloed van het niveau van de bovenste overgangsconstructie is dit niveau gevarieerd van 3,2 m onder de maatgevende waterstand tot 3,8 m erboven. Als de overgangsconstructie erg diep onder water ligt, wordt de steenzetting niet belast, en resulteert dat in een extreem grote stabiliteit. In Figuur 3.6 zijn de resultaten van de berekeningen weergegeven.



Figuur 3.6 Invloed van het dimensieloze niveau van de bovenste overgangsconstructie (geklemde rechthoekige blokken)

In de figuur is te zien dat de spreiding van de resultaten vanaf  $(Z_b - h_{MWS})/H_s > -0,2$  vrij klein is en goed weergegeven wordt door de trendlijn. Bij kleinere waarden is er duidelijk iets bijzonders aan de hand. Het bijzondere verloop van de rekenresultaten wordt veroorzaakt door de wijze waarop Steentoets de berekeningen uitvoert. In Steentoets worden vijf verschillende belastingsituaties doorgerekend in twee typen golfklappen en twee typen golffronten. Zodra de bovenste overgangsconstructie zo diep zit dat de golfklap niet meer op de steenzetting aangrijpt, schiet de stabiliteit een stuk omhoog. In de figuur gebeurt dit bij  $(Z_b$

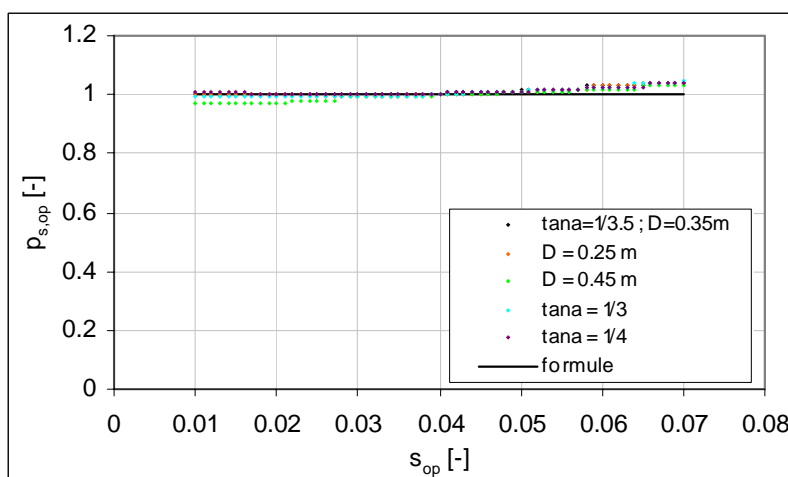
–  $h_{MWS})/H_s \approx -0,3$ . Zodra ook het hoge stijghoogtefront geen belasting meer geeft op de steenzetting, schiet de stabiliteit nogmaals omhoog. Dat laatste gebeurt bij  $(Z_b - h_{MWS})/H_s \approx -0,8$ .

Met het bepalen van de trendlijn is niet geprobeerd om dit bijzondere gedrag van Steentoets exact te reproduceren, omdat de indruk bestaat dat Steentoets de werkelijkheid hier niet goed weergeeft. In werkelijkheid zal het niveau van de bovenste overgangsconstructie in deze range van waarden wel een belangrijke invloed hebben, maar deze invloed zal niet zo abrupt stapsgewijs gaan als Steentoets suggereert. Daarom is ervoor gekozen een vloeiende trendlijn aan te houden. De resulterende formule, die ook getekend is in Figuur 3.6, is:

$$p_{Z_b} = \max \left[ \begin{array}{l} 1,03 \cdot \left( \max \left[ \frac{Z_b - h_{MWS}}{H_s}; -0,4 \right] + 0,4 \right)^{0,12}; \\ 5 \cdot \left( \min \left[ \frac{Z_b - h_{MWS}}{H_s}; -0,2 \right] + 0,2 \right)^4 + 0,87 \end{array} \right] \quad (3.6)$$

Met:

$p_{Z_b}$  = invloedsfactor van het dimensieloze niveau van de bovenste overgangsconstructie ten opzichte van de stilwaterlijn,  $(Z_b - h_{MWS})/H_s$  (-)



Figuur 3.7 Invloed van de golfsteilheid (gekleemde rechthoekige blokken)

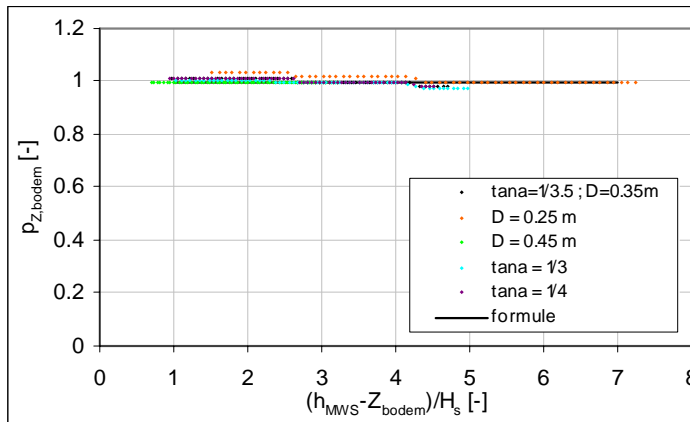
In Figuur 3.7 is te zien dat de invloed van de golfsteilheid verwaarloosbaar is. Dit is opmerkelijk, omdat in vele formules in Steentoets de golfsteilheid een belangrijke parameter is. Kennelijk valt deze invloed grotendeels tegen elkaar weg, waardoor in een brede range van golfsteilheden de maximaal toelaatbare  $H_s/\Delta D$  ongeveer hetzelfde is. Daardoor wordt de formule voor de invloed van de golfsteilheid:

$$p_{s_{op}} = 1 \quad (3.7)$$

Met:

$p_{s_{op}}$  = invloedsfactor voor de invloed van de golfsteilheid (-)

Ook de invloed van de waterdiepte blijkt verwaarloosbaar te zijn, zie Figuur 3.8.



Figuur 3.8 Invloed van de waterdiepte voor de dijk (geklemde rechthoekige blokken)

### 3.3 Samenstelling van trends tot integrale formule voor geklemde rechthoekige blokken

De wijze waarop in de vorige paragraaf de trends zijn vastgesteld voor steenzettingen met geklemde rechthoekige blokken, maakt het mogelijk om ze gemakkelijk samen te stellen tot een integrale formule, die de invloed van alle parameters combineert. Deze formule is het product van alle afzonderlijke formules voor de afzonderlijke trends:

$$p = \frac{[H_s / (\Delta D)]_{\text{Steentoets}}}{[H_s / (\Delta D)]_{\text{centraal punt}}} = p_{Z_b} \cdot p_{\tan \alpha} \cdot p_{\Lambda} \cdot p_{\Delta} \cdot p_N \cdot p_{\beta} \quad (3.8)$$

Immers, als voor alle variabelen de waarde uit het centrale punt wordt genomen, behalve bijvoorbeeld de  $\Delta$ , dan zijn  $p_{Z_b} = p_{\tan \alpha} = p_{\Lambda} = p_N = p_{\beta} = 1$  en wijkt alleen  $p_{\Delta}$  van 1 af. Dat levert dus precies de juiste waarde op.

Zodra echter meerdere parameters afwijken van de waarde in het centrale punt, wordt het resultaat waarschijnlijk minder nauwkeurig.

In de formule zijn  $p_{s,op}$  en  $p_{Z,bodem}$  achterwege gelaten omdat deze variabelen altijd gelijk aan 1 zijn.

Omdat voor het centrale punt geldt dat  $H_s/(\Delta D) = 4,39$ , wordt de formule:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = 4,39 \cdot p_{Z_b} \cdot p_{\tan \alpha} \cdot p_{\Lambda} \cdot p_{\Delta} \cdot p_N \cdot p_{\beta} \quad (3.9)$$

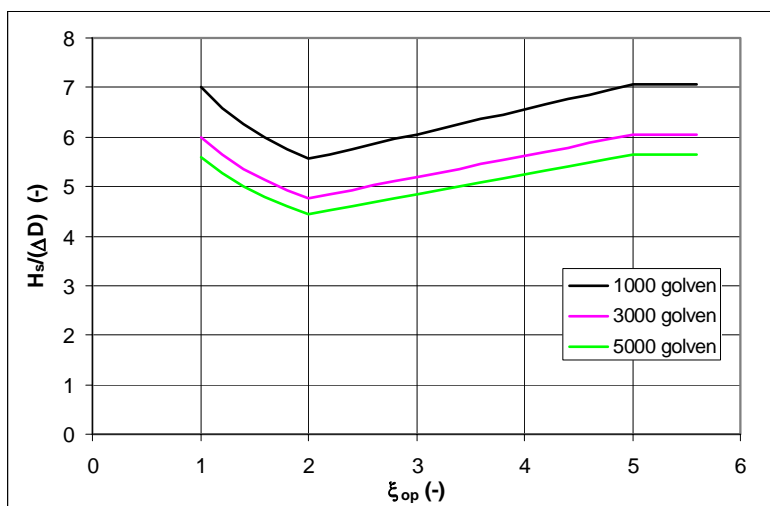
Zoals reeds in paragraaf 2.3 is vermeld, houdt Steentoets een bepaalde maximale stabiliteit aan. Er wordt in feite een bovengrens aangehouden voor de waarde van  $H_s/(\Delta D)$  bij het bezwijken van de steenzetting. Het is logisch om deze bovengrens voor de maximaal toelaatbare  $H_s/(\Delta D)$  ook mee te nemen in bovenstaande formule. Deze bovengrens kan berekend worden met de volgende formules (voor buitentalud van een dijk onder de maatgevende waterstand, maar niet op een berm):

$$\left[ \frac{H_s}{\Delta D} \right]_{\max} = \frac{\left( 7 \left( \min(\xi_{op}; 2) \right)^{\frac{1}{3}} + \max \left( 0,5 \left( \min(\xi_{op}; 5) - 2 \right); 0 \right) \right)}{\max \left( (\cos \beta)^{2/3}; 0,4 \right)} \cdot f_{\text{sfront}} \quad (3.10)$$

$$f_{\text{sfront}} = \max \left( 1 - c_1 \cdot \log \left( \frac{N}{1000} \right); c_2 \right) \quad (3.11)$$

Met:

- $[H_s/(\Delta D)]_{\max}$  = bovengrens voor de maximaal toelaatbare  $H_s/(\Delta D)$  in Steentoets (-)  
 $f_{s,front}$  = invloedsfactor in Steentoets voor de belastingduur (-)  
 $\xi_{op}$  =  $\tan\alpha/\sqrt{s_{op}}$  = brekerparameter (-)  
 $c_1, c_2$  = coëfficiënten in verband met de belastingduur (-)



Figuur 3.9 Bovengrens voor  $H_s/(\Delta D)$  bij het bezwijken van steenzettingen volgens Steentoets (loodrechte golfaanval, geen zuilen of blokken op hun kant)

Voor de waarde van de coëfficiënten  $c_1$  en  $c_2$  geldt:

- Blokken:  $c_1 = 0,30$   $c_2 = 0,80$
- Zuilen:  $c_1 = 0,15$   $c_2 = 0,85$
- Blokken op hun kant:  $c_1 = 0,35$   $c_2 = 0,80$

Deze formules zijn grafisch weergegeven in Figuur 3.9 voor blokken met loodrechte golfaanval ( $\beta = 0$ ).

Als deze bovengrens wordt meegenomen in formule (3.9) dan krijgen we:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = \min \left[ 4,39 \cdot p_{Z_b} \cdot p_{\tan\alpha} \cdot p_{\Lambda} \cdot p_{\Delta} \cdot p_N \cdot p_{\beta} ; \left( \frac{H_s}{\Delta D} \right)_{\max} \right] \quad (3.12)$$

Als het goed is, sluit deze formule goed aan op de resultaten van alle uitgevoerde Steentoets-berekeningen. Om dat te controleren is een figuur gemaakt met op de verticale as de waarde van  $H_s/(\Delta D)$  volgens formule (3.12), en op de horizontale as de berekende waarde volgens Steentoets, zie Figuur 3.10.

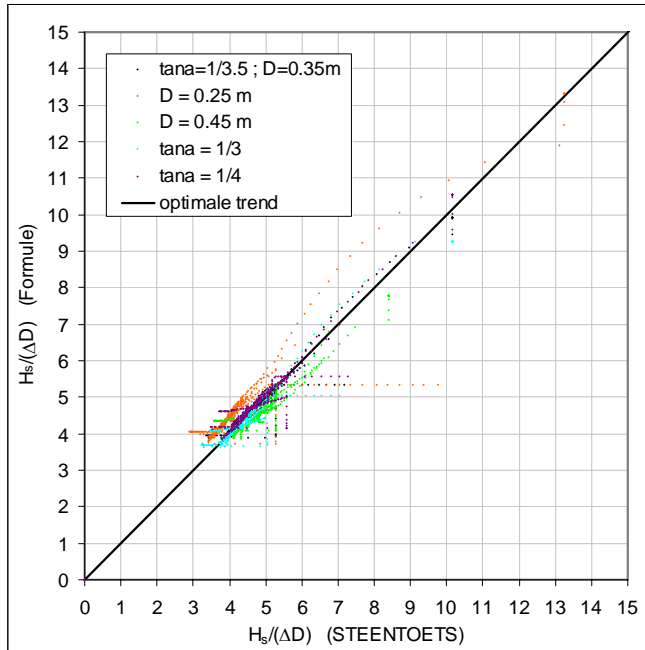
In de figuur valt op dat er een hoge correlatie is tussen de resultaten uit de formule en de Steentoetsresultaten. In die zin is de formule goed gelukt. Als wat meer op de details gelet wordt, dan is te zien dat de berekeningen met een dunne toplaag allemaal iets te hoog zijn uitgevallen, en die met een dikke toplaag juist te laag zijn. Daardoor lijkt het zinnig om de formule aan te vullen met een term met de toplaagdikte. Het blijkt dat de volgende term toegevoegd moet worden:

$$p_D = \frac{1}{0,04 \cdot D^{-1,38} + 0,84} \quad (3.13)$$

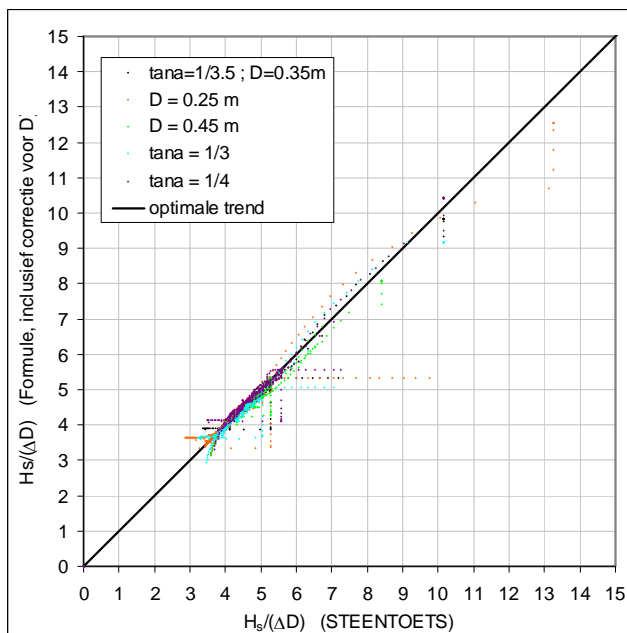
Met:



$p_D$  = invloedfactor van van de toplaagdikte (m)



Figuur 3.10 De waarde van  $H_s/(\Delta D)$  volgens formule (3.12) tegen de waarde volgens Steentoets



Figuur 3.11 De waarde van  $H_s/(\Delta D)$  volgens formule (3.14) tegen de waarde volgens Steentoets voor geklemde rechthoekige blokken

De formules voor het berekenen van de maximaal toelaatbare waarde van  $H_s/(\Delta D)$  wordt hiermee voor geklemde rechthoekige blokken:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = \min \left[ 4,39 \cdot p_{Z_0} \cdot p_{\tan \alpha} \cdot p_{\Lambda} \cdot p_{\Delta} \cdot p_N \cdot p_{\beta} \cdot p_D ; \left( \frac{H_s}{\Delta D} \right)_{\max} \right] \quad (3.14)$$

Voor  $p_{Zb}$ ,  $p_{\tan\alpha}$ ,  $p_{\Lambda}$ ,  $p_{\Delta}$ ,  $p_N$ ,  $p_{\beta}$  en  $p_D$  wordt verwezen naar Formule (3.1) tot en met (3.6) en (3.13). Voor  $[H_s/(\Delta D)]_{\max}$  wordt verwezen naar de formules (3.10) en (3.11).

In Figuur 3.11 is te zien dat door toevoeging van formule (3.13) de spreiding flink is afgenomen. De punten die redelijk ver van de lijn af liggen zijn voor het overgrote deel berekend met een vrij lage waarde van  $(Z_b - h_{MWS})/H_s$ . Zoals in de vorige paragraaf is vermeld, zijn er argumenten om te stellen dat de formule hier wellicht beter is dan Steentoets.

In de figuren zijn de resultaten van 3355 Steentoets-berekeningen opgenomen. De variatiecoëfficiënt ( $\sigma/\mu$ ) van de verhouding tussen het resultaat van de formule en Steentoets is 0,048.

Dat maakt dat 95% van de berekeningen een kleinere afwijking heeft dan 10%.

### 3.4 Verificatie van de resulterende formule voor geklemde rechthoekige blokken

Tot nu toe is nog maar een beperkt aantal variaties in de parameters beschouwd. Er is namelijk steeds maar één parameter gewijzigd vanuit een van de vijf centrale punten. De nauwkeurigheid van de formules wordt waarschijnlijk een stuk minder als aan meerdere parameters een van het centrale punt afwijkende waarde wordt gegeven. Door zo willekeurige steenzettingen door te rekenen en te vergelijken met de formules, kan de nauwkeurigheid vastgesteld worden.

De invoer is wel steeds zo gekozen dat alle parameters binnen de range vallen die doorgerekend is in paragraaf 3.2.

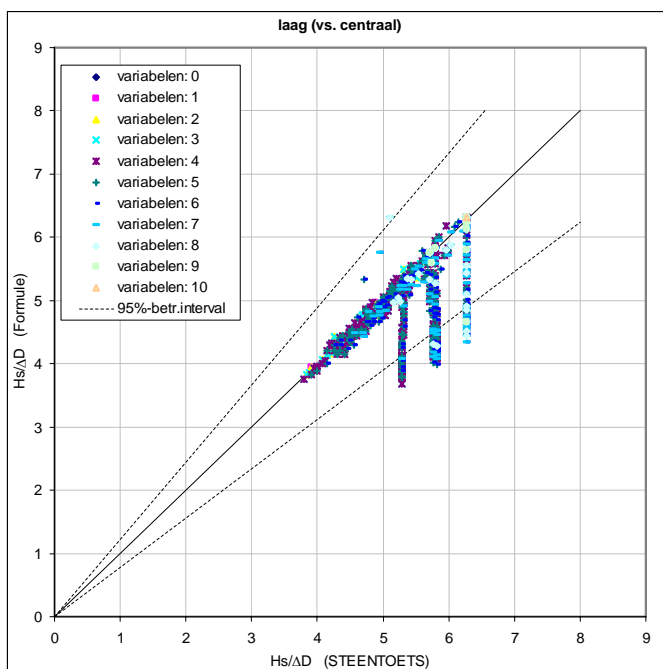
Voor sommige berekeningen bleek echter de golfhoogte groter te worden dan 5 m. Omdat Steentoets begrensd is voor deze golfhoogte, kon daardoor in die gevallen de golfhoogte, die nog net geen bezwijken geeft, niet vastgesteld worden. Die punten zijn weggelaten.

De rekenresultaten zijn gegroepeerd naar het aantal parameters dat een andere waarde heeft gekregen dan in het centrale punt (zie de verschillende symbolen in de figuur). Naar verwachting neemt de nauwkeurigheid af naarmate er meer parameters een andere waarde hebben. Om het aantal berekeningen enigszins te beperken, zijn de afwijkende parameters steeds zo gekozen dat ze halverwege de grens van de range en het centrale punt zitten (in de ene berekening boven het centrale punt, en in de andere eronder).

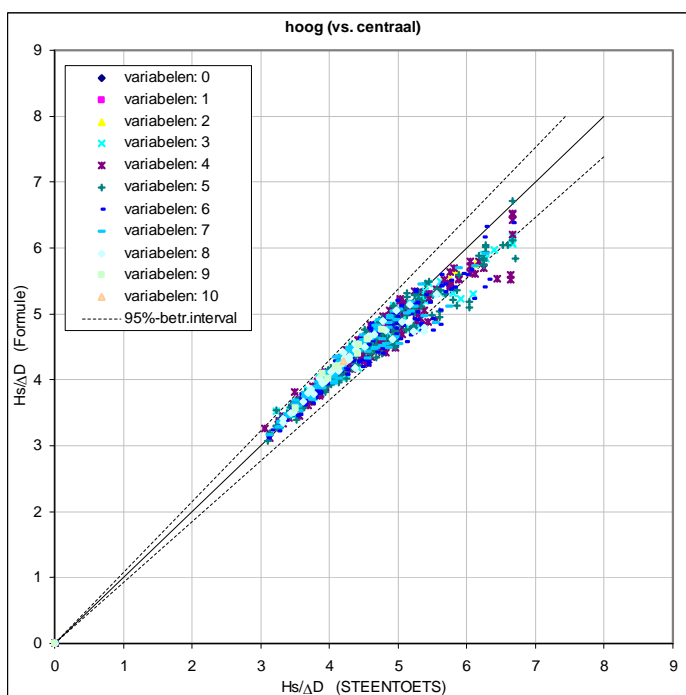
De resultaten zijn gepresenteerd in drie figuren:

- Alle berekeningen waarin één of meer parameters een waarde onder het centrale punt heeft gekregen: Figuur 3.12. De variatiecoëfficiënt van de verhouding tussen het resultaat van de formule en Steentoets is voor deze berekeningen: 0,11.
- Alle berekeningen waarin één of meer parameters een waarde boven het centrale punt heeft gekregen: Figuur 3.13. De variatiecoëfficiënt is voor deze berekeningen: 0,038.
- Alle berekeningen waarin sommige parameters een waarde onder het centrale punt en andere erboven hebben gekregen: Figuur 3.14. De variatiecoëfficiënt is voor deze berekeningen: 0,20.

In de figuren zijn stippellijnen getekend waarbinnen 95% van de punten liggen. De variatiecoëfficiënt ( $\sigma/\mu$ ) van de verhouding tussen het resultaat van de formule en Steentoets is voor alle 2916 berekeningen tezamen 0,13.



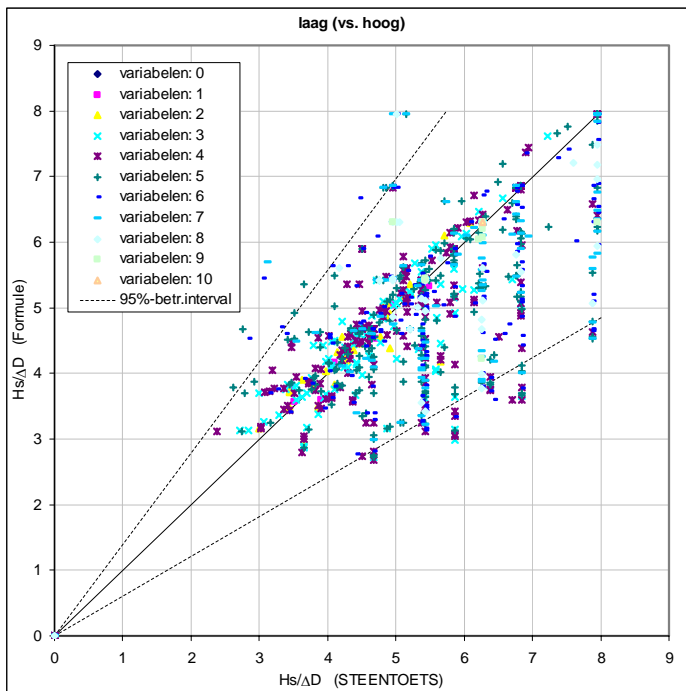
Figuur 3.12 De waarde van  $H_s/(\Delta D)$  volgens formule (3.14) tegen de waarde volgens Steentoets (1024 berekeningen met één of meer parameters onder het centrale punt)



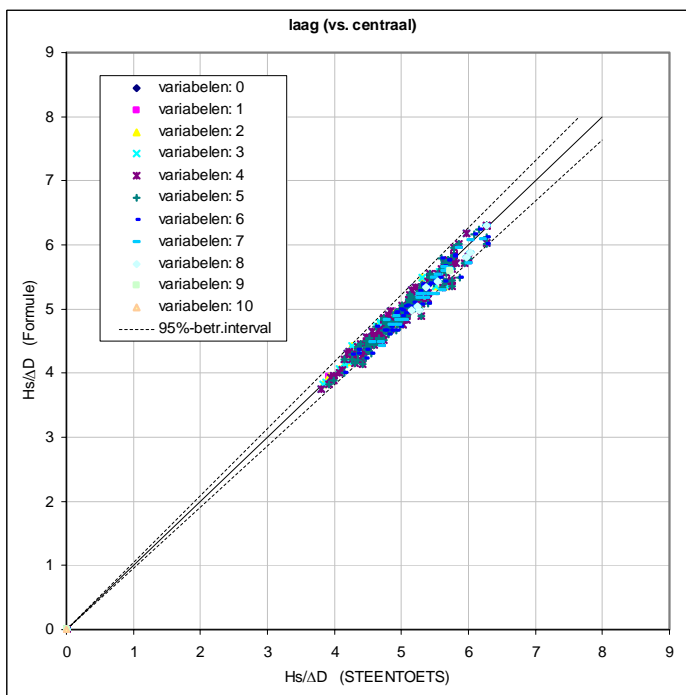
Figuur 3.13 De waarde van  $H_s/(\Delta D)$  volgens formule (3.14) tegen de waarde volgens Steentoets (978 berekeningen met één of meer parameters boven het centrale punt)

In Figuur 3.12 en Figuur 3.14 is te zien dat de afwijking in de resultaten nu veel groter is dan in Figuur 3.11, terwijl in Figuur 3.13 de afwijkingen wel meevallen. De grote afwijkingen, en het feit dat het in Figuur 3.13 wel meevalt, worden voor een belangrijk deel veroorzaakt door de berekeningen met een lage bovenste overgangsconstructie. In de vorige paragraaf was al geconstateerd dat hier grote verschillen door ontstaan. Doordat Steentoets slechts met twee

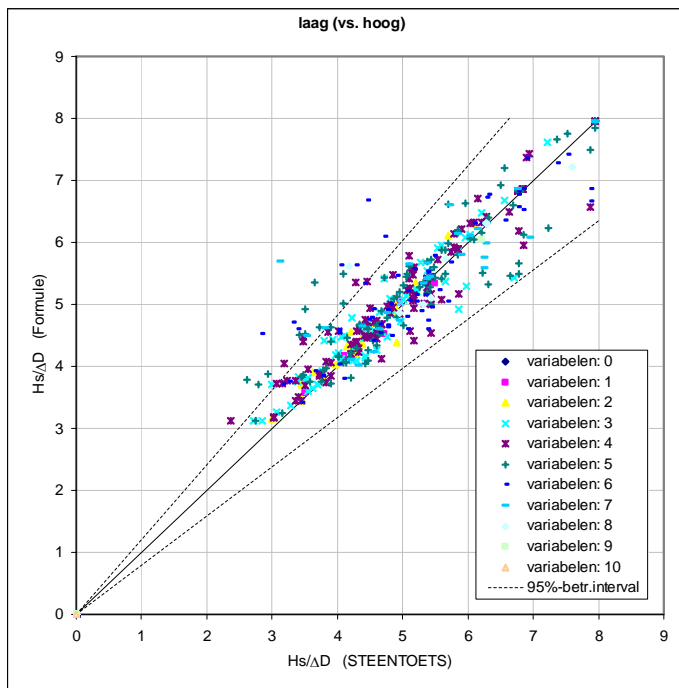
golfklappen en twee stijghoogtefronten werkt, leidt het verlagen van de bovenste overgangsconstructie in Steentoets tot abrupte veranderingen in de stabiliteit. Waarschijnlijk is dit niet realistisch, en is het vloeiender verloop van de formules beter.



Figuur 3.14 De waarde van  $H_s/(\Delta D)$  volgens formule (3.14) tegen de waarde volgens Steentoets (914 berekeningen met sommigen parameters onder het centrale punt en andere erboven)



Figuur 3.15 De waarde van  $H_s/(\Delta D)$  volgens formule (3.14) tegen de waarde volgens Steentoets (512 berekeningen met één of meer parameters onder het centrale punt, behalve die met een lage  $Z_b$ )



Figuur 3.16 De waarde van  $H_s/(\Delta D)$  volgens formule (3.14) tegen de waarde volgens Steentoets (461 berekeningen met sommigen parameters onder het centrale punt en andere erboven, behalve die met een lage  $Z_b$ )

Als de berekeningen met een lage overgangsconstructie worden weggelaten, dan wordt de gemiddelde afwijking een stuk kleiner. Dit is te zien in Figuur 3.15 en Figuur 3.16.

Deze selectie heeft geen invloed op Figuur 3.13. De variatiecoëfficiënt in Figuur 3.15 en Figuur 3.16 is respectievelijk 0,02 en 0,10. Voor alle 1951 rekenresultaten tezamen, behalve die met een lage  $Z_b$ , is de variatiecoëfficiënt nu 0,062. Dit betekent dat 95% van de doorgerkende steenzettingen minder dan 12% afwijking geeft.

Helaas lukt het niet om de afwijkingen in de afgeleide formules voor geklemde rechthoekige blokken te verkleinen. Ondanks dat een vrij redelijk resultaat is verkregen, moet toch geconcludeerd worden dat het gestelde doel uit hoofdstuk 1, namelijk een afwijking van hooguit 10% in 99 % van de gevallen, niet gehaald is.



## 4 Zuilen

### 4.1 Het centrale punt van waaruit de trends zijn gekwantificeerd

In het vorige hoofdstuk is een formule afgeleid voor geklemde rechthoekige blokken. Op vergelijkbare wijze zijn formules afgeleid voor steenzettingen met een toplaag van zuilen. Bij het afleiden van de formules is nu meer gelet op de bovengrens van de stabiliteit die in Steentoets is geïmplementeerd (maximale  $H_s/(\Delta D)$  bij het bezwijken), omdat bij dit type steenzettingen de stabiliteit relatief hoog is.

Er is weer gebruik gemaakt van vijf centrale punten voor deze steenzetting:

- Helling van het voorland:  $\tan\alpha_{\text{bodem}} = 0$
- Niveau van de teen van de dijk:  $Z_{\text{teen}} = -5$  m
- Niveau van de ondergrens van de te toetsen steenzetting:  $Z_o = 2$  m+NAP
- Niveau van de bovengrens van de te toetsen steenzetting (type b2):  $Z_b = 6$  m+NAP
- Taludhelling:  $\tan\alpha = 1/3,5$  en de variaties hierop:  $1/3$  en  $1/4$ .
- Type toplaag: Basalton
- Toplaagdikte:  $D = 0,35$  m en de variaties hierop:  $0,25$  en  $0,45$  m.
- Open oppervlak in de toplaag:  $\Omega = 12\%$
- Soortelijke massa van de stenen:  $\rho_s = 2500$  kg/m<sup>3</sup>
- Korrelgrootte van het inwasmateriaal in de voegen:  $D_{f15} = 7$  mm
- de steenzetting is geklemd, maar niet ingegoten met gietasfalt
- Dikte van de uitvullaag:  $b_1 = 0,10$  m
- Korrelgrootte van de uitvullaag:  $D_{f15,1} = 17$  mm
- Porositeit van de uitvullaag:  $n_1 = 0,35$
- Er is geen tweede filterlaag

Het uitgangspunt voor de belasting is gekozen op:

- Maatgevende waterstand gelijk aan toetspeil: NAP+5,2 m
- Golfsteilheid:  $s_{op} = 0,04$
- Hoek van golfaanval:  $\beta = 0^\circ$
- Belastingduur:  $N = 3000$
- Gemiddeld hoogwater: NAP+1,0 m
- Gemiddeld laagwater: NAP-1,0 m
- Watersysteem: Westerschelde, maar er is gerekend met een vaste waterstand en kunstmatig opgelegde belastingduur, zodat het type watersysteem eigenlijk niet meer ter zake doet.

Voor deze centrale punten gelden volgens Steentoets de volgende waarden van  $H_s/(\Delta D)$  waarbij nog net geen schade ontstaat:

- $D = 0,35$  m en  $\tan\alpha = 1/3,5$ :  $H_s/(\Delta D) = 5,76^*$ .
- $D = 0,25$  m en  $\tan\alpha = 1/3,5$ :  $H_s/(\Delta D) = 5,40$ .
- $D = 0,45$  m en  $\tan\alpha = 1/3,5$ :  $H_s/(\Delta D) = 5,76^*$ .
- $D = 0,35$  m en  $\tan\alpha = 1/4$ :  $H_s/(\Delta D) = 6,00^*$ .
- $D = 0,35$  m en  $\tan\alpha = 1/3$ :  $H_s/(\Delta D) = 5,45^*$ .

Daar waar een \* achter de waarde staat, is deze beperkt door de bovengrens van de stabiliteit volgens Steentoets.

Net als in paragraaf 3.2 is weer vanuit deze centrale punten de invloed van elke dimensieloze parameter berekend door één invoerparameter van Steentoets te variëren. Wat betreft de dimensieloze waterdiepte bij de teen is gekozen voor het variëren van  $Z_{\text{bodem}}$  en wat betreft het dimensieloze niveau van de bovenste overgangsconstructie is gevarieerd met  $Z_b$ . De invloed van de toplaagdikte, het open oppervlak, de dikte van de filterlaag en de korrelgrootte van de filterlaag zijn weer bepaald via de leklengte, zoals ook in paragraaf 3.2 gedaan is.

Zo zijn er vele series berekeningen uitgevoerd waarbij steeds één parameter is gevarieerd.

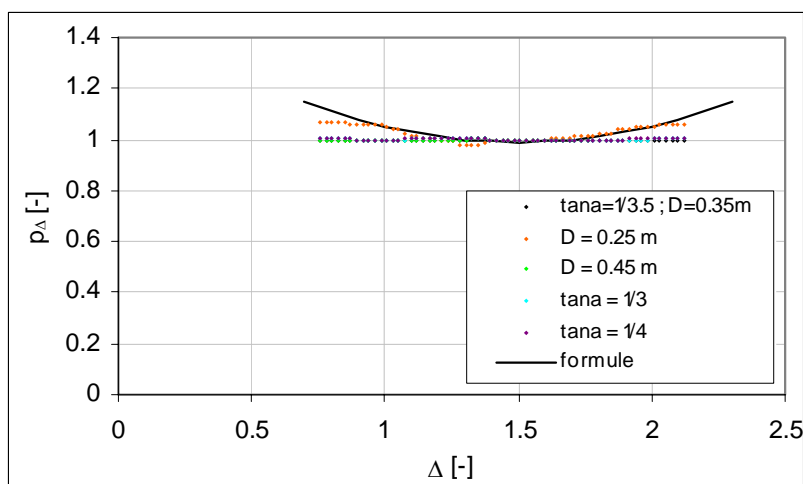
## 4.2 Kwantificering van de trends voor zuilen

Voor het zichtbaar maken van de trend van de maximaal toelaatbare waarde van  $H_s/(\Delta D)$  als functie van een van de dimensieloze parameters is weer gebruikgemaakt van de invloedsfactor  $p$ :

$$p = \frac{[H_s / (\Delta D)]_{\text{Steentoets}}}{[H_s / (\Delta D)]_{\text{centraal punt}}} \quad (4.1)$$

Net als in paragraaf 3.2 is het doel om voor elke parameter een formule te creëren die de relatie geeft tussen  $p$  en de gevarieerde parameter. Later kunnen al deze formules samengesteld worden tot een grote formule waarmee het Steentoets-resultaat voorspeld kan worden.

De dimensieloze soortelijke massa van de stenen ( $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$ ) is de eerste parameter die gevarieerd is. Het resultaat van de berekeningen is gegeven in Figuur 4.1.



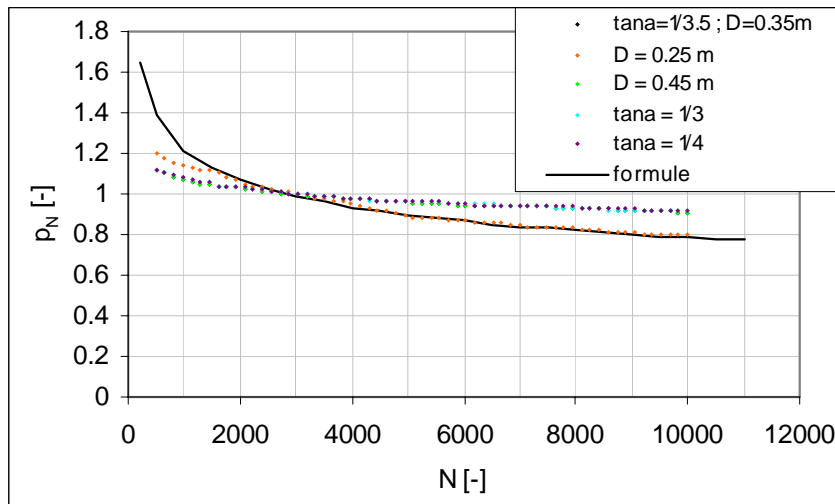
Figuur 4.1 Invloed van de dimensieloze soortelijke massa van de toplaag ( $\Delta$ )(zuilen)

In deze figuur valt het op dat voor bijna alle rekenresultaten van Steentoets geldt dat  $p_{\Delta} = 1$ , behalve voor de berekeningen met  $D = 0,25$  m. Dit is een gevolg van het feit dat bij al die berekeningen de bovengrens van de stabiliteit maatgevend is (formule (3.10)). Alleen voor  $D = 0,25$  m is dat niet het geval zolang  $1 < \Delta < 2$ . Daarom is de formule vooral op die rekenresultaten gericht. Het is namelijk de bedoeling om bij het samenstellen van de totale formule ook weer de bovengrens toe te voegen, zoals dat ook gedaan is voor de geklemde rechthoekige blokken. Daardoor gaan de overige rekenresultaten straks ook goed kloppen met de totale formule.



De getekende formule die aansluit op de rekenresultaten met  $D = 0,25$  m luidt:

$$p_{\Delta} = 0,25 \cdot (\Delta - 1,5)^2 + 0,99 \quad (4.2)$$



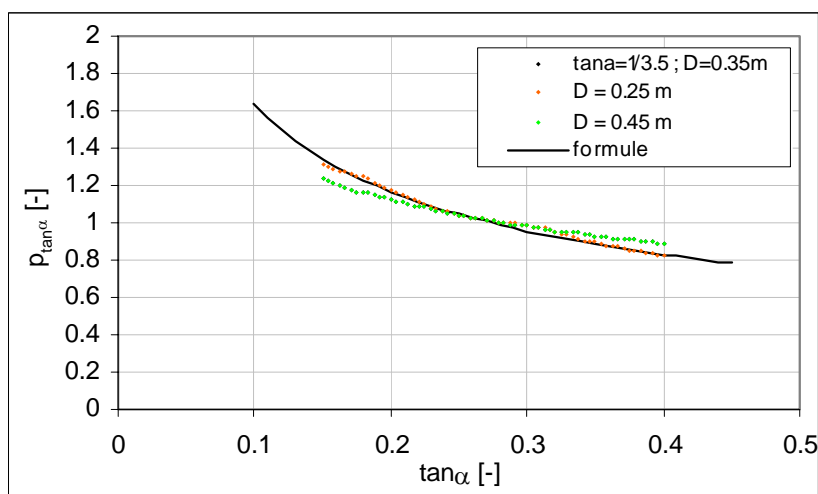
Figuur 4.2 Invloed van het dimensieloze belastingduur (aantal golven,  $N$ ) (zuilen)

De invloed van de belastingduur is te zien in Figuur 4.2. Ook hier geldt dat de meeste rekenresultaten weer bepaald worden door de bovengrens van de stabiliteit, behalve die met  $D = 0,25$  m in de range  $1800 < N < 10000$ . De formule die op die laatstgenoemde resultaten aansluit, is:

$$p_N = 4,52 \cdot N^{-0,19} \quad (4.3)$$

Voor de invloed van de taludhelling wordt verwezen naar Figuur 4.3. Ook hier geldt weer hetzelfde als voor de belastingduur en is de formule afgestemd op de rekenresultaten met  $D = 0,25$  m:

$$p_{\tan \alpha} = 0,53 \cdot \tan \alpha^{-0,49} \quad (4.4)$$

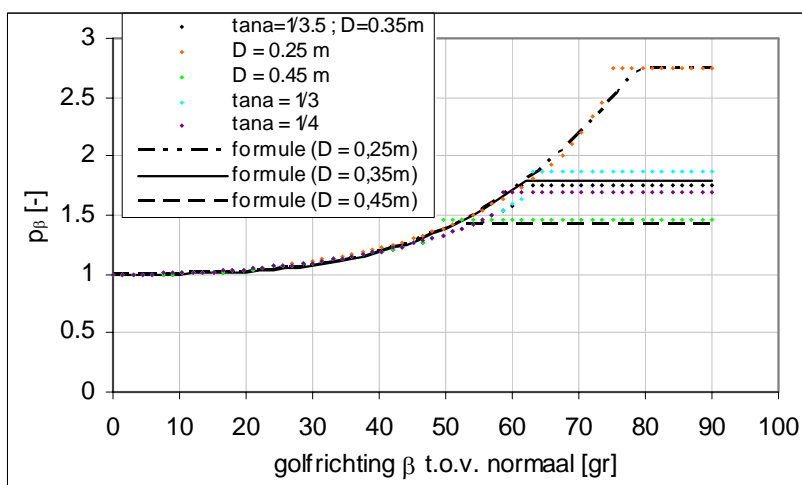


Figuur 4.3 Invloed van taludhelling (zuilen)

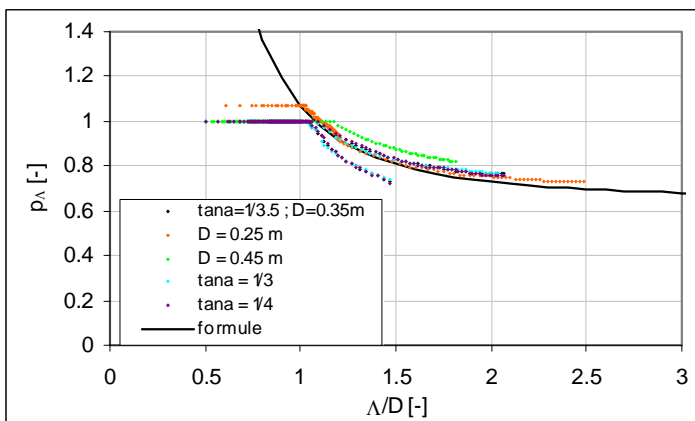
In Figuur 4.4 is de invloed van de hoek van golfaanval te zien. De trend wordt weergegeven met de volgende formule:

$$p_{\beta} = \min(10^{-6} \cdot \beta^{3,29} + 1; 0,063 \cdot D^{-2,4} + 1) \quad (4.5)$$

In tegenstelling tot formule (4.2) tot en met (4.4) is in deze formule niet alleen de gevarieerde dimensieloze parameter  $\beta$  opgenomen, maar was het ook nodig om de invloed van de toplaagdikte in de formules tot uiting te laten komen. Dat heeft als nadeel dat de formule niet meer volledig dimensieloos is.



Figuur 4.4 Invloed van de golfrichting  $\beta$  ten opzichte van de normaal op de dijk (zuilen)



Figuur 4.5 Invloed van de dimensieloze leklengte  $\Lambda/D$  (zuilen)

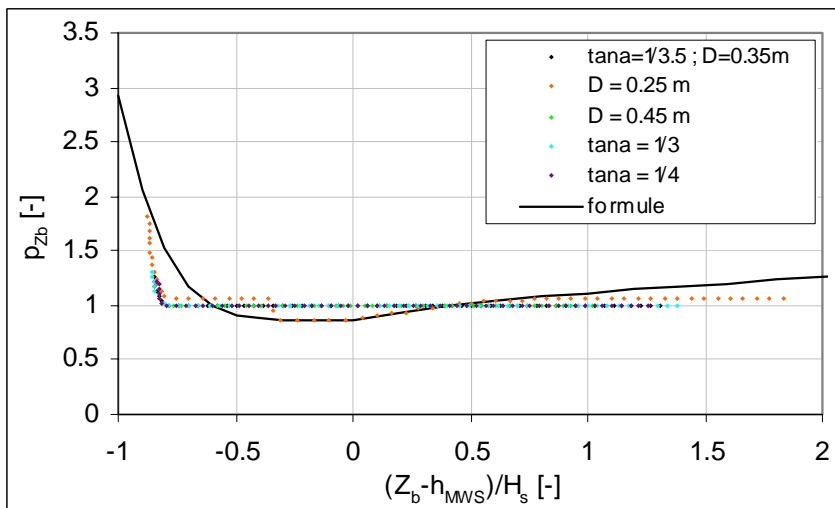
De invloed van de leklengte is geïnventariseerd door de volgende constructieparameters te variëren:

- Toplaagdikte:  $0,15 \leq D \leq 0,55$  m
- Open oppervlak in de toplaag:  $10 \leq \Omega \leq 15\%$
- Dikte van de uitvullaag:  $0,03 \leq b \leq 0,50$  m
- Korrelgrootte van de uitvullaag:  $5 \leq D_{f15} \leq 40$  mm

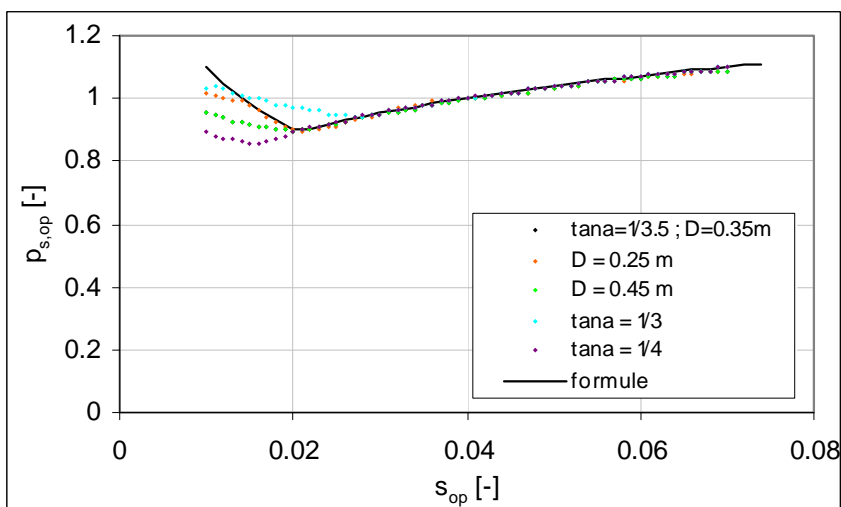
Voor elk van deze parameters zijn 60 berekeningen gemaakt in de aangegeven range. In totaal zijn er derhalve 240 berekeningen gemaakt om de invloed van de leklengte in kaart te brengen. De resultaten van de berekeningen zijn gegeven in Figuur 4.5. Duidelijk is de

bovengrens van de stabiliteit volgens Steentoets te zien voor  $\Lambda/D < 1$ . De formule die aansluit op de punten met  $\Lambda/D > 1$  is:

$$p_{\Lambda} = 0,42 \cdot \left(\frac{\Lambda}{D}\right)^{-2,4} + 0,65 \quad (4.6)$$



Figuur 4.6 Invloed van het dimensieloze niveau van de bovenste overgangsconstructie (zuilen)



Figuur 4.7 Invloed van de golfsteilheid (zuilen)

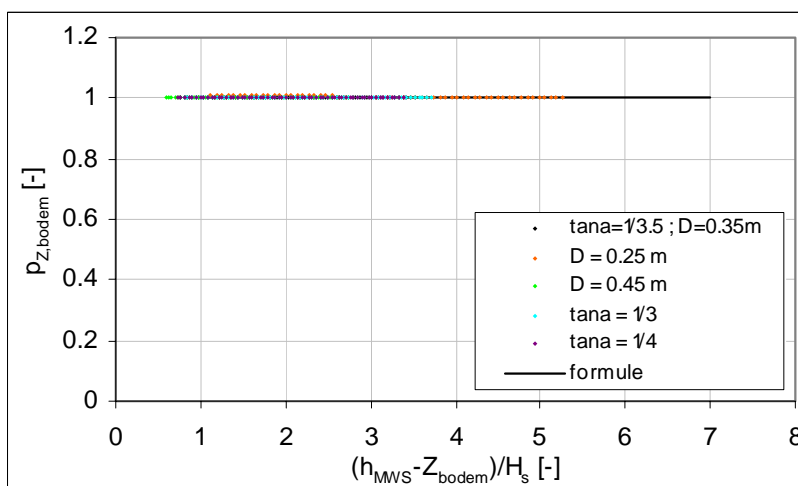
De invloed van de bovenste overgangsconstructie is doorgerekend door het niveau te variëren van NAP+2,0 m tot NAP+9,0 m, terwijl de maatgevende waterstand NAP+5,2 m was. Het resultaat van de berekeningen is te zien in Figuur 4.6. De invloed blijkt bijzonder klein te zijn zolang  $(Z_b - h_{MWS})/H_s > -0,8$ . Als de overgangsconstructie nog lager zit, neemt de stabiliteit zeer snel toe, omdat de golven de te toetsen steenzetting nauwelijks meer kunnen bereiken. De getekende formule is:

$$p_{Z_b} = \max \left[ \begin{array}{l} 0,99 \cdot \left( \max \left[ \frac{Z_b - h_{MWS}}{H_s}; -0,6 \right] + 0,6 \right)^{0,25}; \\ 5 \cdot \left( \min \left[ \frac{Z_b - h_{MWS}}{H_s}; -0,2 \right] + 0,2 \right)^4 + 0,87 \end{array} \right] \quad (4.7)$$

Zoals te zien is in Figuur 4.7 is de invloed van de golfsteilheid voor zuilen veel groter dan voor geklemde rechthoekige blokken. De getekende formule is weer met name gericht op de berekeningen met  $D = 0,25$  m en  $s_{op} > 0,014$ , omdat voor de overige punten de bovengrens van de stabiliteit maatgevend is:

$$p_{s,op} = \max(0,29 \cdot s_{op}^{-0,29}; 1,73 \cdot s_{op}^{0,17}) \quad (4.8)$$

De invloed van de waterdiepte op het voorland is verwaarloosbaar, zie Figuur 4.8,



Figuur 4.8 Invloed van de waterdiepte voor de dijk (zuilen)

### 4.3 Samenstelling van trends tot integrale formule voor zuilen

Net als in paragraaf 3.3 kunnen de afgeleide formules per parameter gebruikt worden om een samengestelde formule te ontwikkelen. Deze formule is het product van alle afzonderlijke formules voor de afzonderlijke trends:

$$p = \frac{[H_s / (\Delta D)]_{\text{Steentoets}}}{[H_s / (\Delta D)]_{\text{centraal punt}}} = p_{Z_b} \cdot p_{\tan \alpha} \cdot p_{\Lambda} \cdot p_{\Delta} \cdot p_N \cdot p_{\beta} \cdot p_{s_{op}} \quad (4.9)$$

Omdat voor het centrale punt geldt dat  $H_s / (\Delta D) = 5,76$ , zou de formule voor zuilen als volgt moeten worden:

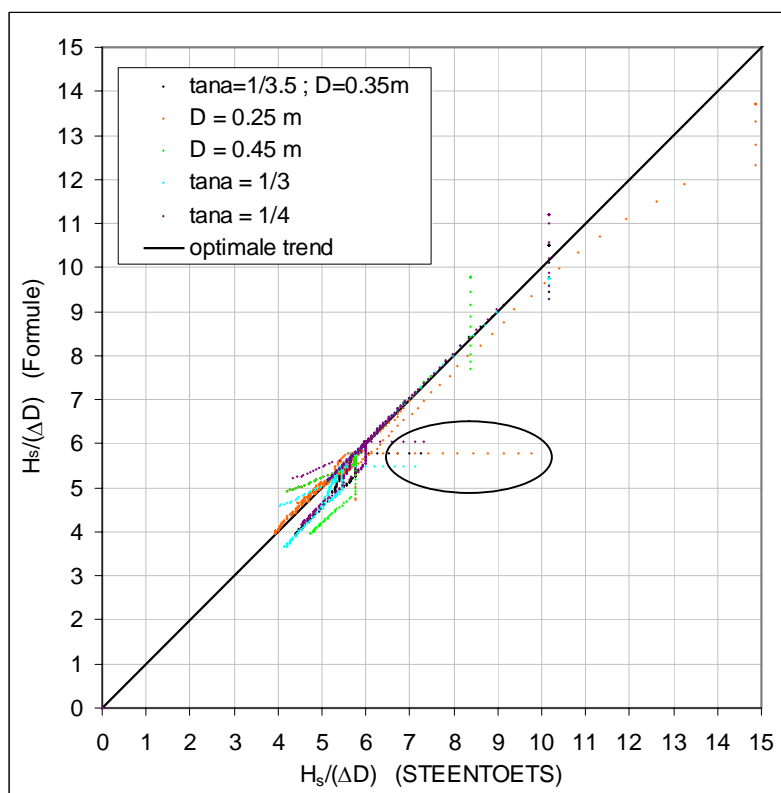
$$\frac{H_s}{\Delta D} = 5,76 \cdot p_{Z_b} \cdot p_{\tan \alpha} \cdot p_{\Lambda} \cdot p_{\Delta} \cdot p_N \cdot p_{\beta} \cdot p_{s_{op}} \quad (4.10)$$

Dit bleek echter gemiddeld een kleine onderschatting te geven, waardoor de factor iets is verhoogd. Door tevens de bovengrens voor de stabiliteit in de formule te verwerken (zie formule (3.10)) wordt de formule:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = \min \left[ 6,16 \cdot p_{Z_b} \cdot p_{\tan \alpha} \cdot p_{\Lambda} \cdot p_{\Delta} \cdot p_N \cdot p_{\beta} \cdot p_{s_{op}} ; \left( \frac{H_s}{\Delta D} \right)_{\max} \right] \quad (4.11)$$

Voor  $p_{Z_b}$ ,  $p_{\tan \alpha}$ ,  $p_{\Lambda}$ ,  $p_{\Delta}$ ,  $p_N$ ,  $p_{\beta}$  en  $p_{s_{op}}$  wordt verwezen naar Formule (4.2) tot en met (4.7). Voor  $[H_s/(\Delta D)]_{\max}$  wordt verwezen naar de formules (3.10) en (3.11).

Als het goed is, sluit deze formule goed aan op de resultaten van alle uitgevoerde Steentoets-berekeningen. Om dat te controleren is een figuur gemaakt met op de verticale as de waarde van  $H_s/(\Delta D)$  volgens formule (4.11), en op de horizontale as de berekende waarde volgens Steentoets, zie Figuur 4.9.



Figuur 4.9 De waarde van  $H_s/(\Delta D)$  volgens formule (4.11) tegen de waarde volgens Steentoets

Uit de figuur blijkt dat de formule over het algemeen het resultaat van Steentoets vrij dicht benadert. De variatiecoëfficiënt ( $\sigma/\mu$ ) van de verhouding tussen de formule en Steentoets is voor deze 3355 berekeningen 0,044. Dat betekent dat 95% van de rekenresultaten een kleinere fout heeft dan 9%.

Het is nu niet mogelijk om met een extra term in de formule de spreiding te verkleinen, zoals wel gelukt was bij de koperslabblokken.

In de figuur zijn een aantal punten aangewezen met een ovaal, die vrij ver van de gewenste waarden afliggen. Voor deze punten geldt dat de bovenste overgangsconstructie erg ver onder water ligt. Hier geeft de formule een flinke onderschatting van de stabiliteit omdat het de stabiliteit begrenst op de bovengrens. Steentoets herkent daarentegen dat het gaat om een zeer diep liggende steenzetting, en berekent daardoor een hogere stabiliteit. Omdat in zo'n geval een iets lagere waterstand doorgaans maatgevend zal zijn, is ervoor gekozen om dit niet op te lossen door de formule gecompliceerder te maken.

#### 4.4 Verificatie van de resulterende formule voor zuilen

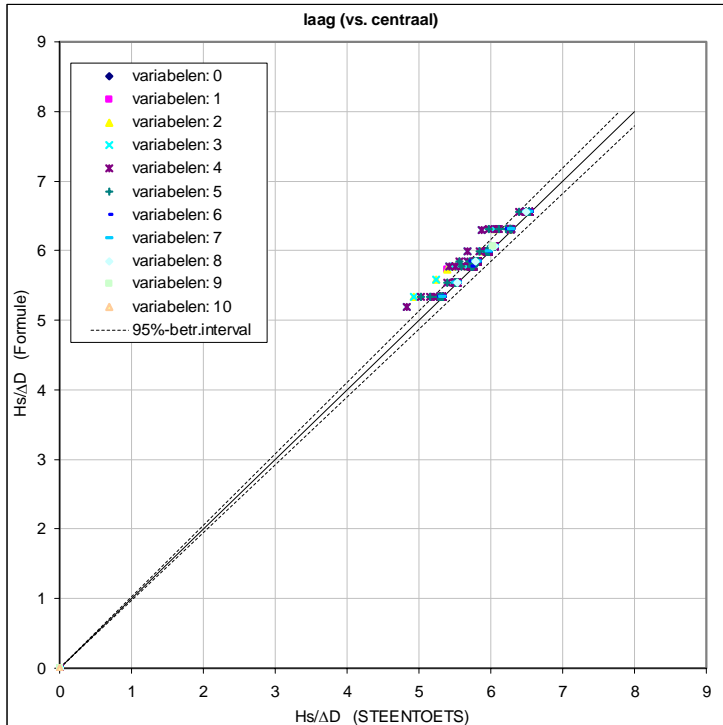
Tot nu toe is nog maar een beperkt aantal variaties in de parameters beschouwd. Er is namelijk steeds maar één parameter gewijzigd vanuit een van de vijf centrale punten. In deze paragraaf is een verificatie van de formule uitgevoerd door meerdere parameters tegelijk te variëren. Waarschijnlijk zal de nauwkeurigheid van de resultaten daardoor kleiner zijn dan in de vorige paragraaf.

De invoer is wel steeds zo gekozen dat alle parameters binnen de range vallen die doorgerekend is in paragraaf 4.2. Voor vele berekeningen bleek echter de golfhoogte groter te worden dan 5 m. Omdat Steentoets begrensd is voor deze golfhoogte, kon daardoor in die gevallen de golfhoogte, die nog net geen bezwijken geeft, niet vastgesteld worden.

Verder zijn de rekenresultaten met een zeer lage bovenste overgangsconstructie weggelaten, zoals ook gedaan is bij de koperslabblokken.

Hierdoor bleven er 1793 berekeningen over.

De rekenresultaten zijn gegroepeerd naar het aantal parameters dat een andere waarde heeft gekregen dan in het centrale punt (zie de verschillende symbolen in de figuur). Om het aantal berekeningen enigszins te beperken, zijn de afwijkende parameters steeds zo gekozen dat ze halverwege de grens van de range en het centrale punt zitten (in de ene berekening boven het centrale punt, en in de andere eronder).

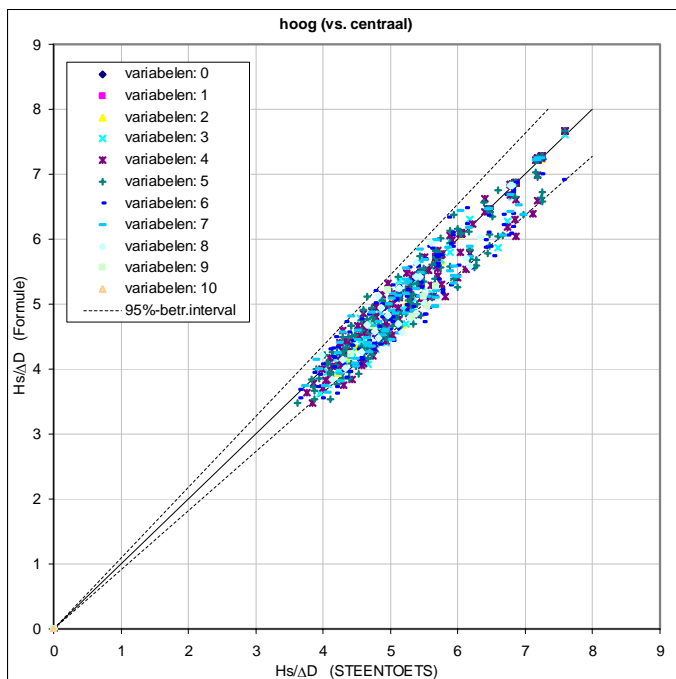


Figuur 4.10 De waarde van  $H_s/(\Delta D)$  volgens formule (4.11) tegen de waarde volgens Steentoets (512 berekeningen met één of meer parameters onder het centrale punt)

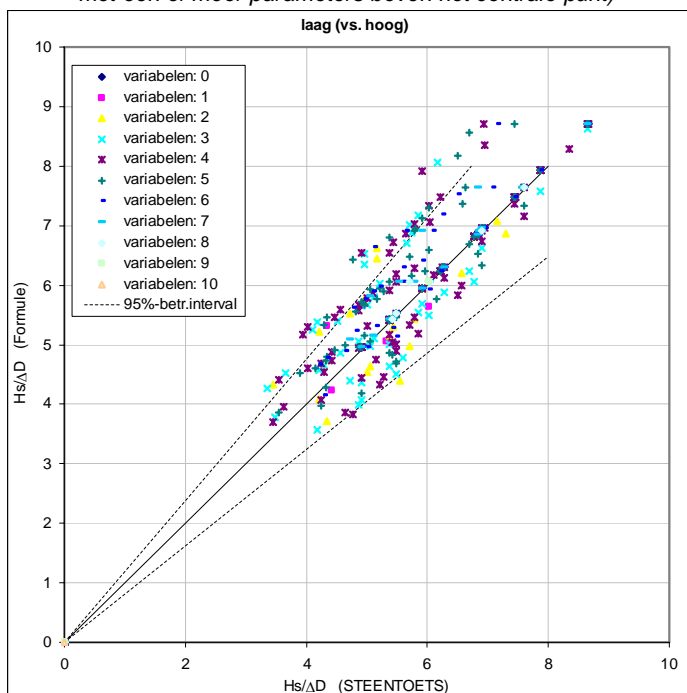
De resultaten zijn gepresenteerd in drie figuren:

- Alle berekeningen waarin één of meer parameters een waarde onder het centrale punt heeft gekregen: Figuur 4.10. De variatiecoëfficiënt van de verhouding tussen het resultaat van de formule en Steentoets is voor deze 512 berekeningen: 0,013.

- Alle berekeningen waarin één of meer parameters een waarde boven het centrale punt heeft gekregen: Figuur 4.11. De variatiecoëfficiënt is voor deze 859 berekeningen: 0,046.
- Alle berekeningen waarin sommige parameters een waarde onder het centrale punt en andere erboven hebben gekregen: Figuur 4.12. De variatiecoëfficiënt is voor deze 422 berekeningen: 0,095.



Figuur 4.11 De waarde van  $H_s/(\Delta D)$  volgens formule (4.11) tegen de waarde volgens Steentoets (859 berekeningen met één of meer parameters boven het centrale punt)



Figuur 4.12 De waarde van  $H_s/(\Delta D)$  volgens formule (4.11) tegen de waarde volgens Steentoets (422 berekeningen met sommigen parameters onder het centrale punt en andere erboven)

In de figuren zijn stippellijnen getekend waarbinnen 95% van de punten liggen. De variatiecoëfficiënt ( $\sigma/\mu$ ) van de verhouding tussen het resultaat van de formule en Steentoets is voor alle 1793 berekeningen tezamen 0,061.

Dit betekent dat 95% van de doorgerekende steenzettingen minder dan 12% afwijking geven.

Helaas lukt het niet om de afwijkingen in de afgeleide formules te verkleinen. Ondanks dat een vrij redelijk resultaat is verkregen, moet toch geconcludeerd worden dat het gestelde doel uit hoofdstuk 1, namelijk een afwijking van hooguit 10% in 99 % van de gevallen, niet gehaald is.



## 5 Toepassing van de formules

In dit hoofdstuk wordt de procedure uitgelegd die gevolgd moet worden om met de afgeleide formules de stabiliteit van een concrete steenzetting te beoordelen. De formules zijn namelijk niet direct toepasbaar, omdat eerst de lek lengte, de belastingduur en de maatgevende waterstand bepaald moeten worden.

Het probleem met de maatgevende waterstand is dat dit iteratief bepaald moet worden. De stabiliteit van de steenzetting moet bij diverse waterstanden doorgerekend worden, om vervolgens de waterstand te kiezen waarbij de stabiliteit het laagste is.

### Stap 1: Lek lengte

De eerste stap betreft het berekenen van de lek lengte  $\Lambda$ . De benodigde formules zijn gegeven in appendix A.

### Stap 2: Belastingduur bij een bepaalde waterstand

In de tweede stap wordt de belastingduur bepaald bij een gekozen waterstand. Omdat de maatgevende waterstand meestal iets onder het toetspeil ligt, maar niet te diep onder de bovenste overgangsconstructie, is het verstandig te beginnen bij:

$$h = \max \left( h_{\text{toets}} - \frac{H_s}{4}; Z_b - 0,7H_s \right) \quad (5.1)$$

Met:

$h_{\text{toets}}$  = toetspeil ten opzichte van NAP (m)

$h$  = waterstand in deze rekenstap ten opzichte van NAP (m)

$H_s$  = significante golfhoogte bij de waterstand in deze rekenstap (m)

$Z_b$  = niveau van de bovenste overgangsconstructie ten opzichte van NAP (m)

Het gaat om een schatting van de waterstand, dus is het ook voldoende om met een schatting van de significante golfhoogte in bovenstaande formule te werken.

Als de waterstand is gekozen, kunnen ook de golfcondities bepaald worden ( $H_s$ ,  $T_p$  en  $\beta$ ).

De golfsteilheid en brekerparameter kunnen berekend worden met:

- Golfsteilheid:  $s_{\text{op}} = \frac{H_s}{1,56T_p^2}$  (5.2)

- Brekerparameter:  $\xi_{\text{op}} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_{\text{op}}}}$  (5.3)

Bereken de maatgevende taludhelling als het gemiddelde in de zone tussen de waterstand en anderhalve golfhoogte eronder: tussen  $h$  en  $h-1,5H_s$ . Daarbij moet de eventuele berm in deze zone weggedacht worden, dus alsof de taluddelen boven en onder de berm direct op elkaar aansluiten.

Vervolgens kan het niveau  $Z_{\text{belast}}$  van de maatgevende belasting bepaald worden:

- Als  $\Lambda > 1,5$  m:

$$a_o = \min(12,9s_{op} + 0,5; 1) \quad (5.4)$$

$$d_m = h - Z_{bodem} + 0,5 \tan \alpha_{bodem} \cdot (1,56T_p^2) \quad (5.5)$$

$$f_{od,front} = \min \left\{ 1; \max \left\{ 1 - \frac{\left(2,8 - \frac{d_m}{H_s}\right)(1 - a_o)}{0,6}; a_o \right\} \right\} \quad (5.6)$$

$$Z_{belast} = \min \left( \max \left[ h - f_{od,front} \cdot H_s \cdot \min \left\{ 0,25 + 0,11 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha}; 2,0 \right\}; Z_o \right]; Z_b \right) \quad (5.7)$$

- Als  $\Lambda \leq 1,5$  m:

$$a_o = \min(17,55s_{op} + 0,22; 1) \quad (5.8)$$

$$d_m = h - Z_{bodem} + 0,5 \tan \alpha_{bodem} \cdot (1,56T_p^2) \quad (5.9)$$

$$f_{od,klap} = \min \left\{ 1; \max \left\{ 1 - \frac{\left(2,8 - \frac{d_m}{H_s}\right)(1 - a_o)}{0,6}; a_o \right\} \right\} \quad (5.10)$$

$$\frac{x_{\phi \max}}{H_s} = \min \left\{ \frac{0,42}{\sqrt{s_{op}}} - 0,9; 6,5 \right\} f_{od,klap} \quad (5.11)$$

$$\frac{B_{klap50\%2\%}}{H_s} = 0,96 - 0,11\xi_{op} \quad (5.12)$$

$$Z_{belast} = \max( \min\{ Z_b; h - (x_{\phi \max} - (B_{klap50\%2\%} \cdot \cos \alpha)/2) \cdot \tan \alpha \}; Z_o ) \quad (5.13)$$

Met:

$B_{klap50\%2\%}$	= breedte van de golfklap halverwege de golfklaphoogte met 2% overschrijdingsfrequentie (langs het talud gemeten) (m)
$x_{\phi \max}$	= horizontale afstand van de snijlijn van de stilwaterlijn en het talud tot de locatie met grootste stijghoogte in de golfklap (m)
$h$	= waterstand uit deze iteratieslag (m)
$d_m$	= maatgevende waterdiepte op een halve diepwatergolflengte van de teen van de dijk (m)
$f_{od,front}$	= invloedsfactor in verband met ondiepe voorlanden (locatie van het front) (m)
$f_{od,klap}$	= invloedsfactor in verband met ondiepe voorlanden (locatie van de klap) (m)
$Z_{belast}$	= niveau waar de maximale belasting optreedt ten opzichte van NAP (m)

De zone waarbinnen de waterstand moet liggen om een grote golfbelasting op de betreffende locatie van de steenzetting te hebben, kan als volgt berekend worden (zie Figuur 5.1):

$$h_L = Z_{belast} + 0,2H_s \cdot \min(\xi_{op}; 4) \quad (5.14)$$

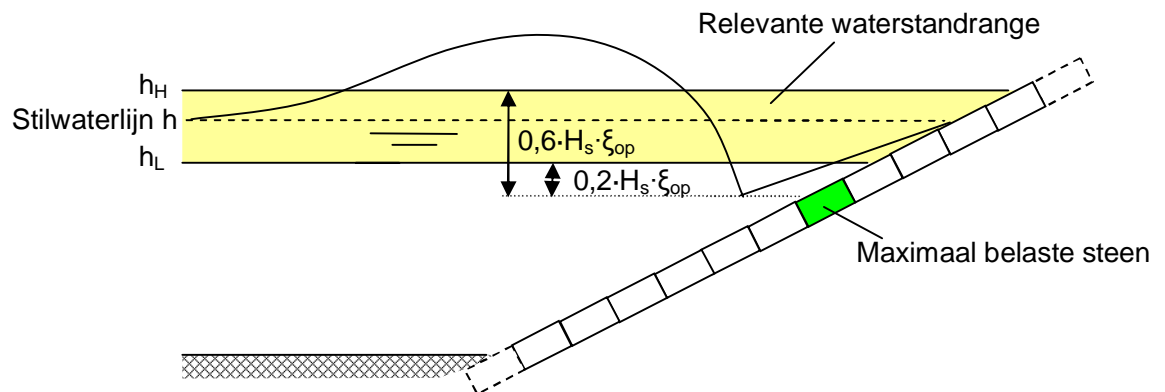
$$h_H = Z_{belast} + 0,6H_s \cdot \min(\xi_{op}; 4) \quad (5.15)$$

Met:

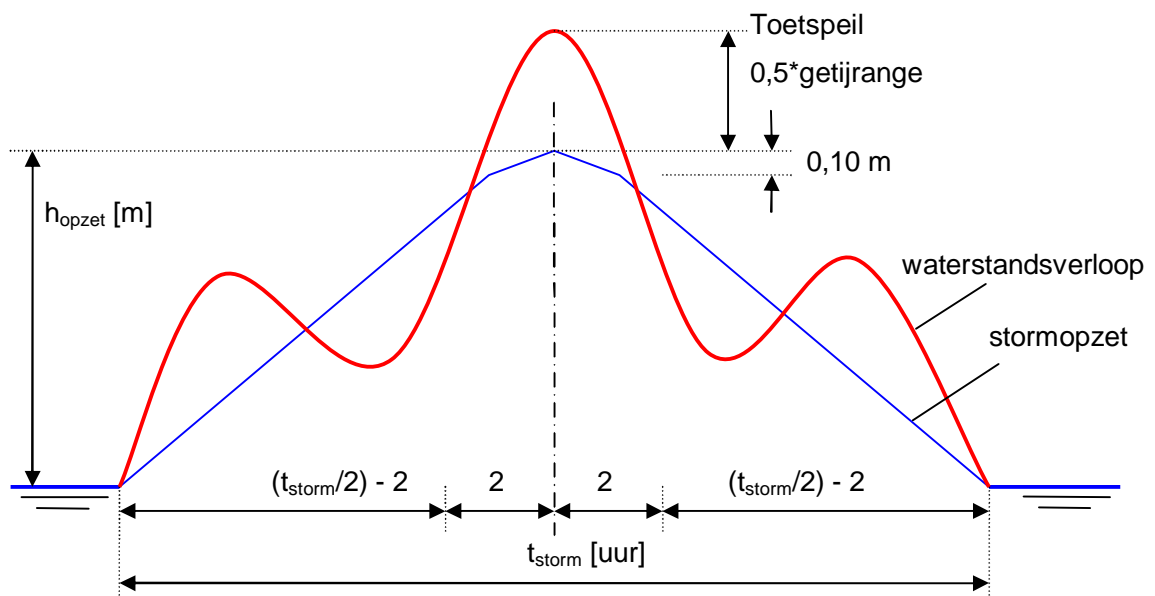
$h_L$  = niveau van de ondergrens van de zone waarbinnen de waterstand moet liggen om een grote golfbelasting te hebben (NAP+m)

$h_H$  = niveau van de bovengrens van de zone waarbinnen de waterstand moet liggen om een grote golfbelasting te hebben (NAP+m)

Deze niveaus kunnen in het waterstandsverloop getekend worden om te bepalen wat de belastingduur is. Het standaard waterstandsverloop is voorgeschreven in de HR2006. Voor de Westerschelde, Noordzee en Waddenzee is het verloop getekend in Figuur 5.2. Voor de Waddenzee geldt  $t_{\text{storm}} = 45$  uur, voor de andere zoute wateren en meren geldt  $t_{\text{storm}} = 35$  uur. In de HR2006 staat het stormopzetverloop gegeven, en is gesteld dat daarop het getij moet worden gesuperponeerd als een sinus met de top van het getij op hetzelfde moment als de top van de stormopzet.

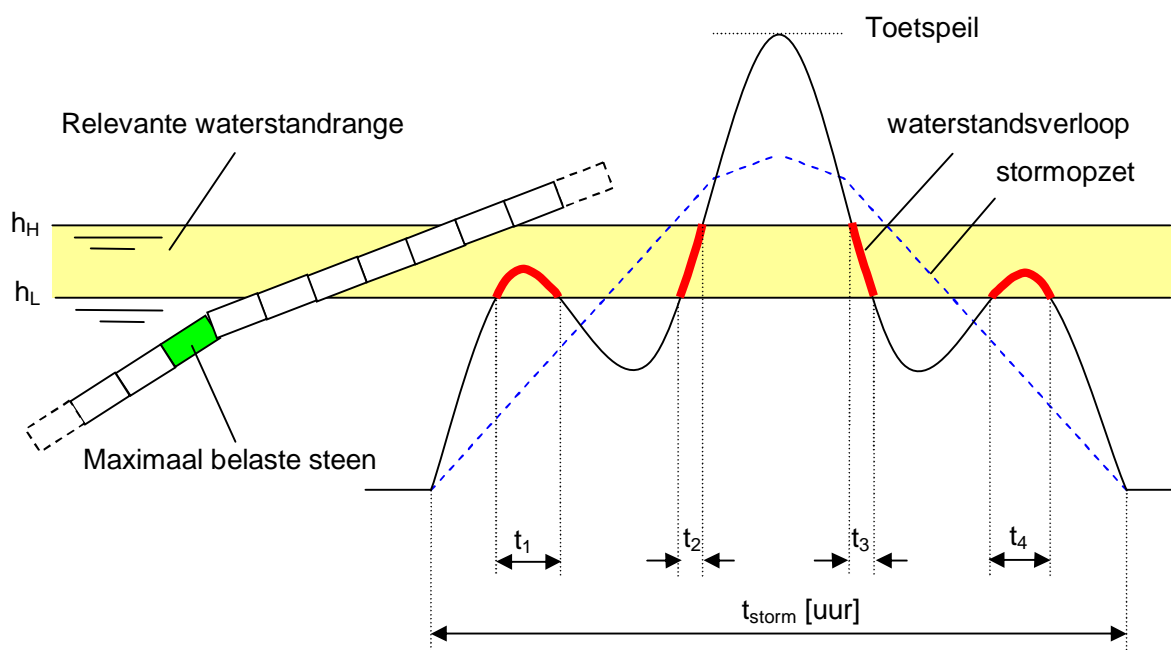


Figuur 5.1 Relevante waterstandrange.



Figuur 5.2 Waterstandsverloop in Nederlandse watersystemen (m.u.v. rivierengebieden en Oosterschelde) (schematisch).

In Figuur 5.3 is aangegeven hoe in het waterstandsverloop de waterstandrange kan worden getekend. De belastingduur is de totale duur dat de waterstand in de range past. In geval van het voorbeeld is dit  $t_{\text{belast}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$ .



Figuur 5.3 Belastingduur tijdintervallen (schematisch).

In de formule moet het aantal golven worden ingevoerd. Dit kan als volgt berekend worden aan de hand van de belastingduur:

$$N = \frac{t_{\text{belast}}}{T_p / 1,1} \quad (5.16)$$

Met:

N = aantal golven tijdens de belasting periode (-)

$t_{\text{belast}}$  = belastingduur (s)

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

### Stap 3: Berekening van stabiliteit bij een bepaalde waterstand

Bij de gekozen waterstand uit stap 2 kan nu met de berekende lek lengte en belastingduur de stabiliteit van de steenzetting berekend worden. Daarbij wordt gebruikgemaakt van de volgende formules die afgeleid zijn in hoofdstuk 3 en 4:

$$f_{\text{sfront}} = \max \left( 1 - c_1 \cdot \log \left( \frac{N}{1000} \right); c_2 \right) \quad (5.17)$$

Met:

- Blokken:  $c_1 = 0,30$        $c_2 = 0,80$
- Zuilen:  $c_1 = 0,15$        $c_2 = 0,85$
- Blokken op hun kant:  $c_1 = 0,35$        $c_2 = 0,80$

$$\left[ \frac{H_s}{\Delta D} \right]_{\text{max}} = \frac{\left( 7 \left( \min(\xi_{\text{op}}; 2) \right)^{\frac{1}{3}} + \max \left( 0,5 \left( \min(\xi_{\text{op}}; 5) - 2 \right); 0 \right) \right)}{\max \left( (\cos \beta)^{2/3}; 0,4 \right)} \cdot f_{\text{sfront}} \quad (5.18)$$

- Geklemde rechthoekige blokken (zoals koperslakblokken):

$$p_{\Delta} = \max(0,54 \cdot \Delta^{-0,79} + 0,6; 0,96) \quad (5.19)$$

$$p_N = \max(6,3 \cdot N^{-0,23}; 0,89) \quad (5.20)$$

$$p_{\tan \alpha} = 0,57 \cdot \tan \alpha^{-0,45} \quad (5.21)$$

$$p_{\beta} = \min(10^{-7} \cdot \beta^{3,83} + 1; 0,69 \cdot D^{-1,15}) \quad (5.22)$$

$$p_{\Lambda} = 0,36 \cdot \left(\frac{\Lambda}{D}\right)^{-2} + 0,85 \quad (5.23)$$

$$p_{Z_b} = \max \left[ \begin{array}{l} 1,03 \cdot \left( \max \left[ \frac{Z_b - h_{MWS}}{H_s}; -0,4 \right] + 0,4 \right)^{0,12}; \\ 5 \cdot \left( \min \left[ \frac{Z_b - h_{MWS}}{H_s}; -0,2 \right] + 0,2 \right)^4 + 0,87 \end{array} \right] \quad (5.24)$$

$$p_D = \frac{1}{0,04 \cdot D^{-1,38} + 0,84} \quad (5.25)$$

$$\frac{H_s}{\Delta D} = \min \left[ 4,39 \cdot p_{Z_b} \cdot p_{\tan \alpha} \cdot p_{\Lambda} \cdot p_{\Delta} \cdot p_N \cdot p_{\beta} \cdot p_D; \left(\frac{H_s}{\Delta D}\right)_{\max} \right] \quad (5.26)$$

- Zuilen (zoals Basalton, Hydroblocks etc.):

$$p_{\Delta} = 0,25 \cdot (\Delta - 1,5)^2 + 0,99 \quad (5.27)$$

$$p_N = 4,52 \cdot N^{-0,19} \quad (5.28)$$

$$p_{\tan \alpha} = 0,53 \cdot \tan \alpha^{-0,49} \quad (5.29)$$

$$p_{\beta} = \min(10^{-6} \cdot \beta^{3,29} + 1; 0,063 \cdot D^{-2,4} + 1) \quad (5.30)$$

$$p_{\Lambda} = 0,42 \cdot \left(\frac{\Lambda}{D}\right)^{-2,4} + 0,65 \quad (5.31)$$

$$p_{Z_b} = \max \left[ \begin{array}{l} 0,99 \cdot \left( \max \left[ \frac{Z_b - h_{MWS}}{H_s}; -0,6 \right] + 0,6 \right)^{0,25}; \\ 5 \cdot \left( \min \left[ \frac{Z_b - h_{MWS}}{H_s}; -0,2 \right] + 0,2 \right)^4 + 0,87 \end{array} \right] \quad (5.32)$$

$$p_{s,op} = \max(0,29 \cdot s_{op}^{-0,29}; 1,73 \cdot s_{op}^{0,17}) \quad (5.33)$$

$$\frac{H_s}{\Delta D} = \min \left[ 6,16 \cdot p_{Z_b} \cdot p_{\tan \alpha} \cdot p_{\Lambda} \cdot p_{\Delta} \cdot p_N \cdot p_{\beta} \cdot p_{s,op}; \left(\frac{H_s}{\Delta D}\right)_{\max} \right] \quad (5.34)$$

#### Stap 4: Iteratie

Vervolgens moet men verdergaan met stap 2 en 3 om de stabiliteit ook bij andere waterstanden te bepalen, op zoek naar de maatgevende waterstand. Bij de maatgevende waterstand is de waarde van  $H_s/(\Delta D)$ , die voortkomt uit formule (5.26) of (5.34), het kleinste.

Dit is de maximaal toelaatbare waarde van  $H_s/(\Delta D)$ . Als de verhouding van de optredende significante golfhoogte,  $H_s$ , en  $\Delta D$  groter is dan deze maximaal toelaatbare waarde, dan is de stabiliteit van de steenzetting niet groot genoeg. Dit leidt tot het toetsresultaat "geavanceerd" of "onvoldoende".

Als de verhouding van de optredende significante golfhoogte,  $H_s$ , en  $\Delta D$  kleiner is dan deze maximaal toelaatbare waarde, dan is de stabiliteit van de steenzetting groot genoeg en is het toetsresultaat "goed".

In het geval van een ontwerp moet een marge van 20% aangehouden worden tussen de maximaal toelaatbare  $H_s/(\Delta D)$  en de actuele waarde.

## 6 Conclusies

In dit rapport is een poging gedaan om een set eenvoudige formules op te stellen waarmee met ongeveer dezelfde nauwkeurigheid een steenzetting kan worden getoetst als met Steentoets. Daartoe zijn duizenden Steentoets-berekeningen gemaakt, en zijn formules gefit op de resultaten.

Het bleek nodig te zijn om aparte formules op te stellen voor geklemde rechthoekige blokken en voor zuilen. De afgeleide formules zijn gegeven in hoofdstuk 5, samen met de procedure voor het gebruik ervan. De procedure blijkt toch nog behoorlijk gecompliceerd te zijn. Er is bijvoorbeeld een iteratie nodig om de maatgevende waterstand te bepalen.

De resulterende formules zijn helaas niet zo nauwkeurig als gewenst. De nauwkeurigheid wordt uitgedrukt als het procentuele verschil tussen de formule en Steentoets ten aanzien van de waarde van  $H_s/(\Delta D)$ . Om goed bruikbaar te zijn, is aan het begin gesteld dat bij ongeveer 99% van de steenzettingen dit verschil kleiner dan 10% moet zijn. Helaas is in 95% van de gevallen het verschil kleiner dan 12%, waardoor geconcludeerd kan worden dat niet voldaan wordt aan de nauwkeurigheidseis.

Op grond van de resultaten wordt geconcludeerd dat de afgeleide formules nog niet gebruikt kunnen worden als vervanging van Steentoets.

Anderzijds kunnen ze wellicht wel gebruikt worden om de rekensnelheid van Steentoets te vergroten, bijvoorbeeld doordat ze de mogelijkheid geven om met minder rekenwerk de maatgevende waterstand vast te stellen.

Verder zou dit een goed begin kunnen zijn van het ontwikkelen van een rekenmethode waarmee steenzettingen probabilistisch doorgerekend kunnen worden. Steentoets is daarvoor niet geschikt, gezien de rekentijd en de vele discontinuïteiten in de trends. Het probabilistisch doorrekenen van steenzettingen is gewenst omdat de gehele toetsmethode van waterkeringen op termijn gericht zal gaan worden op overstromingskansen in plaats van de overschrijdingsfrequentie van een bepaalde waterstand. Aan het probabilistisch rekenen met vereenvoudigde formules kleeft echter wel het nadeel dat de betrouwbaarheid van de modellering van de fysische processen lager is. Daardoor kunnen er soms grote fouten ontstaan.





## 7 Referenties

HR 2006

Hydraulische Randvoorwaarden 2006, voor het toetsen van primaire waterkeringen  
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, september 2007

Klein Breteler, M. (2009)

Validatie Steentoets2008

Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

Deltares, rapport H4846, februari 2009

Klein Breteler, M. (2011)

Documentatie Steentoets2008 en Steentoets2010

Deltares, rapport 1202551.006, 23 februari 2011

VTV 2006

Voorschrift toetsen op veiligheid primaire waterkeringen

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, september 2007



## A Leklengte

De formules voor het berekenen van de leklengte in deze bijlage zijn bedoeld voor steenzettingen met blokken en zuilen zonder gaten in de blokken en zonder geotextiel tussen de toplaag en de uitvullaag. De formules zijn ontleend aan de documentatie van Steentoets (Klein Breteler 2011).

De berekeningen omvatten de volgende stappen:

- Berekening van de equivalente spleetbreedte
- Berekening van de doorlatendheid van de uitvullaag
- Berekening van de doorlatendheid van het inwasmateriaal
- Berekening van de doorlatendheid van de toplaag
- Berekening van de leklengte

### Equivalente spleetbreedte

Als alleen een open oppervlak bekend is, moet met de volgende formule een equivalente spleetbreedte berekend worden:

$$s_s = s_l = -\frac{1}{2}(B + L) + \sqrt{\frac{\Omega BL}{1 - \Omega} + \frac{1}{4}(B + L)^2} \quad (1.1)$$

Met:

- $s_s$  = breedte van de stootvoeg (m)
- $s_l$  = breedte van de langsvoeg (m)
- $\Omega$  = open oppervlak (-)
- $B$  = breedte van de stenen (gebruik voor Basalton  $B = 0,3$  m) (m)
- $L$  = lengte van de stenen (gebruik voor Basalton  $L = 0,3$  m) (m)

### Doorlatendheid van de uitvullaag

Voor de doorlatendheid van het granulaire filter gelden de volgende formules. Deze zijn toepasbaar voor de eerste en tweede filterlaag.

$$a_f = 160 \frac{v(1-n)^2}{gn^3 D_{15}^2} \quad (1.2)$$

$$b_f = \frac{2,2}{gn^2 D_{15}} \quad (1.3)$$

$$k = \frac{-a_f + \sqrt{a_f^2 + 1,2 \cdot b_f}}{0,6 \cdot b_f} \quad (1.4)$$

Met:

- $v$  =  $1,2 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s (kinematische viscositeit van water)
- $n$  = porositeit van het granulair materiaal (-)
- $D_{15}$  = korrelgrootte van het granulair materiaal (m)
- $g$  = versnelling van de zwaartekracht (m/s<sup>2</sup>)
- $a_f$  = lineaire weerstandscoefficiënt van het granulair materiaal (s/m)

$b_f$  = turbulente weerstandscoefficiënt van het granulair materiaal ( $s^2/m^2$ )

## Doorlatendheid van het inwasmateriaal

De doorlatendheid van het inwasmateriaal wordt berekend met volgende formules (let op: formule (1.6) is niet hetzelfde als formule (1.3)):

$$a_i = 160 \frac{v(1-n)^2}{gn^3 D_{15}^2} \quad (1.5)$$

$$b_i = \frac{0,10}{gn^5 D_{15}} \quad (1.6)$$

$a_i$  = lineaire weerstandscoefficiënt van het inwasmateriaal (s/m)  
 $b_i$  = turbulente weerstandscoefficiënt van het inwasmateriaal ( $s^2/m^2$ )

## Doorlatendheid van de toplaag

Eerst wordt de doorlatendheid van het granulaire materiaal direct onder de spleten berekend:

$$a_{f_{top}} = 160 \frac{v(1-n-0,1)^2}{g(n+0,1)^3 D_{15}^2} \quad (1.7)$$

$$b_{f_{top}} = \frac{0,14}{g(n+0,1)^5 D_{15}} \quad (1.8)$$

Met:

$a_{f_{top}}$  = lineaire weerstandscoefficiënt van het granulaire materiaal direct onder de spleten (s/m)

$b_{f_{top}}$  = turbulente weerstandscoefficiënt van het granulaire materiaal direct onder de spleten ( $s^2/m^2$ )

Steeds wordt de doorlatendheid van de stootvoegen en langsvvoegen afzonderlijk berekend. De volgende berekeningen worden uitgevoerd:

- de doorlatendheid van de stootvoegen ( $k'_{stootvoegen}$ ) met  $s = s_s + 0,3 \cdot 10^{-3}$  m en  $A_{ro} = (s_s + 0,3 \cdot 10^{-3}) / (L + s_s + 0,3 \cdot 10^{-3})$  (1.9)

- de doorlatendheid van de langsvvoegen ( $k'_{langsvvoegen}$ ) met  $s = s_l + 0,3 \cdot 10^{-3}$  m en  $A_{ro} = (s_l + 0,3 \cdot 10^{-3}) / (B + s_l + 0,3 \cdot 10^{-3})$  (1.10)

Met:

$A_{ro}$  = deel van de toplaag die bestaat uit respectievelijk stootvoegen en langsvvoegen (-)

Voor de doorlatendheid van de spleten wordt als eerste schatting aangenomen dat de stroming laminair is, dus:

$$a_s = \frac{12v}{gs^2 A_{ro}} \quad (1.11)$$

$$b_s = 0 \quad (1.12)$$

met:

$a_s$  = lineaire weerstandscoefficiënt van de spleten (s/m)

$b_s$  = turbulente weerstandscoefficiënt de spleten ( $s^2/m^2$ )

Hiermee wordt  $k_t$  geschat (eerste schatting van  $k'$  met onderstaande formules voor de doorlatendheid van spleten tussen blokken of zuilen) en de bijbehorende filtersnelheid  $v_f$ :

$$v_t = k_t/A_{ro} \quad (1.13)$$

Als  $v_t \cdot s/v \leq 5000$  dan verandert er niets.

Als  $v_t \cdot s/v > 5000$  dan wordt gesteld:

$$a_s = 0 \quad \text{en} \quad (1.14)$$

$$b_s = \frac{2}{sC^2 A_{ro}^2} \quad (1.15)$$

$$C = 18 \cdot \log\left(\frac{6s}{1 \cdot 10^{-4}}\right) \quad (1.16)$$

Hiermee wordt de waarde voor de toplaagdoorlatendheid  $k'$  berekend.

Er wordt gerekend met de eigenschappen van de eerste (bovenste) filterlaag ( $D_{f151}$  en  $n_{f1}$ ).

$$e = \exp(1) \quad (1.17)$$

$$r_{\min} = \max(0,8D_{f15}; 0,5s) \quad (1.18)$$

$$n_{\text{instroom}} = 0,6 \quad (1.19)$$

Als er inwasmateriaal is:  $n = n_i = 0,7$ , anders:  $n = n_{\text{instroom}}$  (1.20)

$$a_{\text{spleet}} = a_s + \frac{s a_{f\text{top}}}{\pi D A_{ro}} \cdot \ln\left(\frac{s}{\pi e A_{ro} r_{\min}}\right) + \frac{a_i}{2A_{ro}} \quad (1.21)$$

$$b_{\text{spleet}} = b_s + \frac{1}{g D A_{ro}^2} \left(1 - \frac{1}{n} + \frac{1 - A_{ro}^2}{2n_{\text{instroom}}^2}\right) + \frac{1}{g D} \left(1 - \frac{1}{A_{ro}}\right) + \frac{s b_{f\text{top}}}{\pi D A_{ro}} \left(\frac{s}{\pi r_{\min} A_{ro}} - 2\right) + \frac{b_i}{2A_{ro}^2} \quad (1.22)$$

$$k' = \frac{-a_{\text{spleet}} + \sqrt{a_{\text{spleet}}^2 + 4b_{\text{spleet}}}}{2b_{\text{spleet}}} \quad (1.23)$$

Zo wordt de doorlatendheid van de stootvoegen en de langsvoegen apart berekend.

Tenslotte worden de doorlatendheden opgeteld:

$$K' = K'_{\text{stootvoegen}} + K'_{\text{langsvoegen}} \quad (1.24)$$

## Leklengte

De leklengte kan als volgt berekend worden:

$$\Lambda = \max\left(\sqrt{\frac{D(b_1 k_1 + b_2 k_2)}{k'}}; 0,5 \cdot D\right) \quad (1.25)$$

Met:

$b_1$  = Dikte van de bovenste granulaire laag (uitvullaag) (m)

- $b_2$  = Dikte van de tweede filterlaag, indien aanwezig (m)
- $k_1$  = doorlatendheid van de bovenste granulaire laag (uitvullaag) (m/s)
- $k_2$  = doorlatendheid van de tweede filterlaag, indien aanwezig (m/s)
- $k'$  = doorlatendheid van de toplaag (m/s)