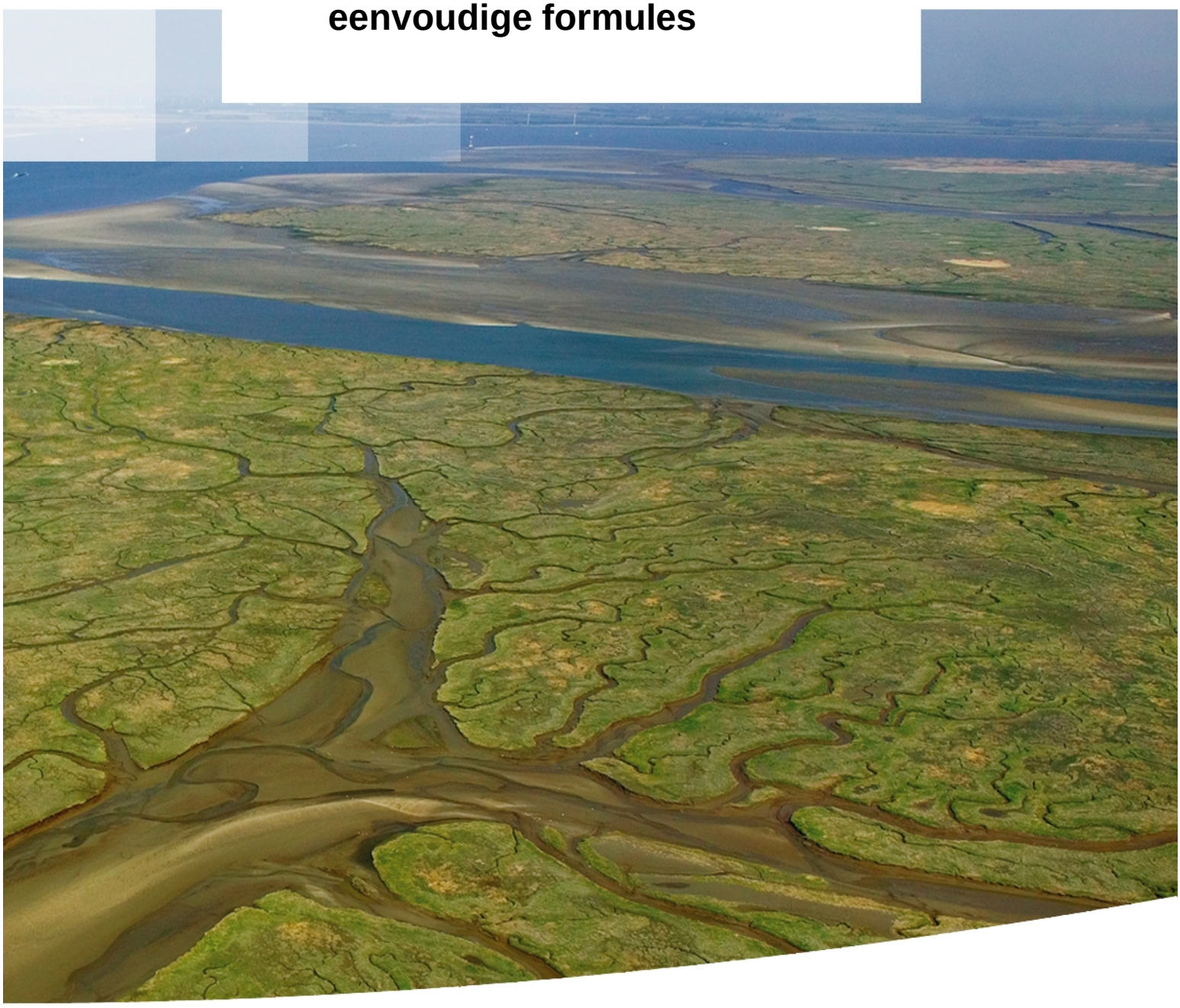
Deltares

Enabling Delta Life

Vereenvoudiging van Steentoets tot enkele eenvoudige formules



Deltares

Vereenvoudiging van Steentoets tot enkele eenvoudige formules

M. Klein Breteler
G.C. Mourik

1204727-009

© Deltares, 2013

Deltares

Titel
Vereenvoudiging van Steentoets tot enkele eenvoudige formules

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Waterdienst en Rijkswaterstaat Zeeland	1204727-009	1204727-009-HYE-0011	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 dijkgeometrieën, 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 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. Vooraf werd gesteld dat in 99% van de doorgerekende steenzettingen de afwijking kleiner moet zijn dan 10%. Echter, de afwijking is kleiner dan 10% in 95% (geklemde rechthoekige blokken) en in 97% (zuilen) van de gevallen. Omgekeerd geldt dat in 99% van de gevallen de afwijking kleiner is dan 16% (geklemde rechthoekige blokken) en 15% (zuilen).

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	
2	mei 2013	M. Klein Breteler G.C. Mourik		R. 't Hart		M.R.A. van Gent	

Status
definitief

Inhoud

Symbolenlijst

1 Inleiding **1**

2 Aanpak **3**
2.1 Inleiding 3
2.2 Belangrijkste variabelen 3
2.3 Vaststellen van de trends 5

3 Geklemde rechthoekige blokken **7**
3.1 Het centrale punt van waaruit de trends zijn gekwantificeerd 7
3.2 Kwantificering van de trends voor geklemde rechthoekige blokken 8
3.2.1 Dimensieloze soortelijke massa 8
3.2.2 Belastingduur 9
3.2.3 Taludhelling 10
3.2.4 Hoek van golfaanval 10
3.2.5 Dimensieloze leklengte 11
3.2.6 Dimensieloze niveau van de bovenste overgangsconstructie 12
3.2.7 Golfsteilheid 13
3.2.8 Dimensieloze waterdiepte 14
3.3 Samenstelling van trends tot integrale formule voor geklemde rechthoekige blokken 14
3.4 Verificatie van de resulterende formule voor geklemde rechthoekige blokken 18

4 Zuilen **23**
4.1 Het centrale punt van waaruit de trends zijn gekwantificeerd 23
4.2 Kwantificering van de trends voor zuilen 24
4.2.1 Dimensieloze soortelijke massa 24
4.2.2 Belastingduur 25
4.2.3 Taludhelling 26
4.2.4 Hoek van golfaanval 26
4.2.5 Dimensieloze leklengte 27
4.2.6 Dimensieloze niveau van de bovenste overgangsconstructie 28
4.2.7 Golfsteilheid 28
4.2.8 Dimensieloze waterdiepte 29
4.3 Samenstelling van trends tot integrale formule voor zuilen 29
4.4 Verificatie van de resulterende formule voor zuilen 32

5 Toepassing van de formules **35**

6 Conclusies **41**

7 Referenties **43**

Bijlage(n)

A Leklengte **A-1**

Symbolenlijst

A_{ro} Deel van de toplaag die bestaat uit respectievelijk stootvoegen en langsvoegen (-)
a_f Lineaire weerstandscoëfficiënt van het granulair materiaal (s/m)
a_{ftop} Lineaire weerstandscoëfficiënt van het granulaire materiaal direct onder de spleten (s/m)
a_s Lineaire weerstandscoëfficiënt van de spleten (s/m)
a_i Lineaire weerstandscoëfficiënt van het inwasmateriaal (s/m)
b_f Turbulente weerstandscoëfficiënt van het granulair materiaal (s^2/m^2)
b_{ftop} Turbulente weerstandscoëfficiënt van het granulaire materiaal direct onder de spleten (s^2/m^2)
b_i Turbulente weerstandscoëfficiënt van het inwasmateriaal (s^2/m^2)
b_s Turbulente weerstandscoëfficiënt 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 Waterdiepte (m)
d_m Maatgevende waterdiepte op halve diepwatergolflengte van de teen van de dijk (m)
D Toplaagdikte (m)
D_{f15} Korrelgrootte van de granulaire filterlaag (uitvullaag) (m)
$D_{f15,1}$ Korrelgrootte van de bovenste granulaire laag (uitvullaag) (m)
$D_{f15,2}$ Korrelgrootte van de tweede filterlaag (m)
D_{i15} Korrelgrootte van het inwasmateriaal in de voegen (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_{MWS} 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 Doorlatendheid van de granulaire filterlaag (uitvullaag) (m/s)
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_f Porositeit van de filterlaag (uitvullaag) (-)
n_i Porositeit van het inwasmateriaal (-)
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_Δ Invloedsfactor van Δ (-)
p_N Invloedsfactor van N (-)
$p_{tan\alpha}$ Invloedsfactor van dimensieloze taludhelling (-)
p_β Invloedsfactor van β (-)
p_Λ Invloedsfactor van dimensieloze leklengte Λ/D (-)
p_{Zb} Invloedsfactor van het dimensieloze niveau van de bovenste overgangsconstructie ten opzichte van de stilwaterlijn, $(Z_b - h_{MWS})/H_s$ (-)
$p_{s,op}$ Invloedsfactor van de golfsteilheid (-)
$p_{Z,bodem}$ Invloedsfactor van de dimensieloze waterdiepte (-)
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)

α Taludhelling (^{o})
α_{bodem} Helling van het voorland (^{o})
β Hoek van golfaanval (0^o = loodrechte golfaanval) (^{o})
Δ $(\rho_s - \rho)/\rho$ = relatieve soortelijke massa van de stenen in de toplaag (-)
μ Gemiddelde waarde
ρ Soortelijke massa van het water (kg/m^3)
ρ_s Soortelijke massa van de stenen in de toplaag (kg/m^3)
σ Standaardafwijking
ξ_{op} $tan\alpha/\sqrt{s_{op}}$ = brekerparameter (-)
ν Kinematische viscositeit van water (= $1{,}2\cdot10^{-6}$ m^2/s)
Ω 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 dijkgeometrieën, 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 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.

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 nauwkeurigheideis 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 van enkele veelvoorkomende typen steenzettingen steeds bepaalde invoervariabelen te variëren en van deze steenzettingen de maximaal toelaatbare $H_s/(\Delta D)$ te berekenen. Op deze manier zijn vele berekeningen uitgevoerd van de maximaal toelaatbare $H_s/(\Delta D)$. Vervolgens zijn formules opgesteld die de resultaten van de berekeningen zo goed mogelijk benaderen. Voor $H_s/(\Delta D)$ geldt:

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

Met:
H_s = significante golfhoogte bij de teen van de dijk (m)
Δ = $(\rho_s - \rho)/\rho$ = relatieve soortelijke massa van de stenen in de toplaag (-)
D = dikte van de toplaag (m)
ρ = soortelijke massa van het water (kg/m^3)
ρ_s = soortelijke massa van de stenen in de toplaag (kg/m^3)

2.2 Belangrijkste variabelen

De stabiliteit van een steenzetting is enerzijds afhankelijk van de golfcondities en de waterstand, en is 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 van belang:

1. Helling van het voorland: $\tan\alpha_{bodem}$ (-)
2. Niveau van de teen van de dijk: z_{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 Ω (%)
10. Soortelijke massa van de stenen: ρ_s (kg/m^3)
11. Korrelgrootte van het inwasmateriaal in de voegen: D_{i15} (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_{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 afzonderlijke 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: β (2.8)
- Belastingduur: $N = \frac{belastingduur}{T_p / 1,1}$ (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 golflengte op diep water, berekend met de piekperiode bij de teen van de dijk (-)
β = hoek van golfaanval (0^o = loodrechte golfaanval) (^{o})

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 (Steentoets2010 versie 1.10, Deltares, maart 2012) 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. De als uitgangspunt gekozen steenzetting wordt in het vervolg het 'centrale punt' genoemd (dit wordt nader toegelicht in paragraaf 3.1).
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:

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

Met:
p = invloedsfactor die de invloed van de gevarieerde parameter weergeeft ten opzichte van het resultaat bij het centrale punt (-)
$[H_s/(\Delta D)]_{Steentoets}$ = 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 (-)

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.

Bij het bepalen van de invloedsfactoren en bij het verifiëren van de resulterende formules zijn alleen de berekeningen gebruikt, waarvoor Steentoets geen waarschuwingen of foutmeldingen geeft. Steentoets waarschuwt bij enkele berekeningen voor een onbetrouwbaar resultaat, bijvoorbeeld wanneer de golfhoogte te groot is vergeleken met de waterdiepte of als er binnen de iteratie geen convergentie bereikt kan worden.

Hoewel Basalton en Hydroblocks de meest toegepaste steenzettingen zijn in renovatie-werken, is dat type toch niet gekozen als eerste uitgangspunt. Bij dat type steenzettingen is het open oppervlak (Ω) 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 bovengrens voor de 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 $\xi_{op} < 2$ is deze maximale belasting $H_s/(\Delta D) = 7\xi_{op}^{-1/3}$. Voor andere belastingduren, golfaanvalshoeken en brekerparameters is de formule gecompliceerder. Deze wordt verder toegelicht in paragraaf 3.3.

In hoofdstuk 3 is daarom eerst gewerkt met een bekleding van geklemde rechthoekige blokken (koperslakblokken). Vervolgens is in hoofdstuk 4 volgens dezelfde werkwijze een formule afgeleid voor zuilen (Basalton). Beide beschouwde typen bekledingen zijn geklemde steenzettingen. De in dit rapport ontwikkelde formules kunnen niet gebruikt worden voor niet-geklemde steenzettingen.

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: $\tan\alpha_{bodem} = 0$
- Niveau van de teen van de dijk: z_{bodem} = -5 m+NAP
- 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: ρ_s = 2500 kg/m^3
- Soortelijke massa van het water: ρ = 1025 kg/m^3
- Korrelgrootte van het inwasmateriaal in de voegen: D_{i15} = 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: 5,2 m+NAP
- Golfsteilheid: s_{op} = 0,04
- Hoek van golfaanval: $\beta = 0^o$
- Belastingduur: N = 3000
- Gemiddeld hoogwater: 1,0 m+NAP
- Gemiddeld laagwater: -1,0 m+NAP
- 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 $H_s/(\Delta D)$ = 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_{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 invoer-parameters. 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 hetzelfde als in bovenstaande lijst, behalve:

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

Voor de 5 centrale punten gelden volgens Steentoets de volgende waarden van $H_s/(\Delta D)$ waarbij nog net geen schade ontstaat:

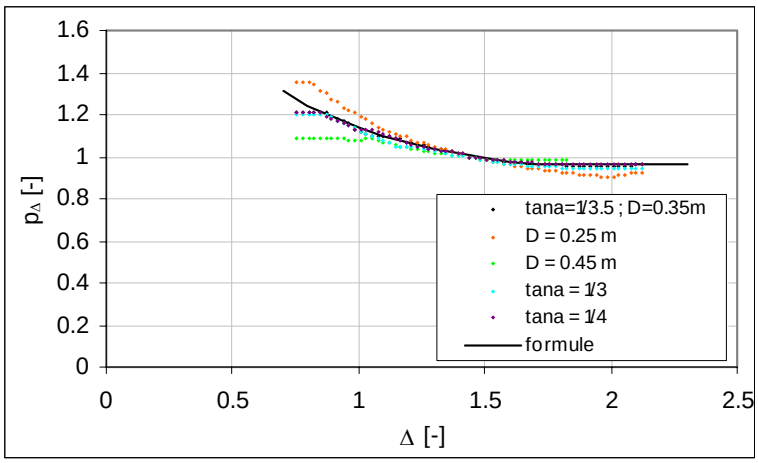
- D = 0,35 m en tanα = 1/3,5: $H_s/(\Delta D)$ = 4,39
- D = 0,25 m en tanα = 1/3,5: $H_s/(\Delta D)$ = 3,91
- D = 0,45 m en tanα = 1/3,5: $H_s/(\Delta D)$ = 4,88
- D = 0,35 m en tanα = 1/4: $H_s/(\Delta D)$ = 4,57
- D = 0,35 m en tanα = 1/3: $H_s/(\Delta D)$ = 4,20

Deze centrale punten zijn bewust zo gekozen dat de stabiliteit lager is dan de bovengrens voor de stabiliteit: $H_s/(\Delta D) < 7\xi_{op}^{-1/3}$.

3.2 Kwantificering van de trends voor geklemde rechthoekige blokken

3.2.1 Dimensieloze soortelijke massa

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 de taludhellingen 1:3, 1:3,5 en 1:4 gegeven een toplaagdikte D = 0,35 m en voor de toplaagdikten D = 0,25 en 0,45 m gegeven de taludhelling 1:3,5.



Figuur 3.1 Invloed van de dimensieloze soortelijke massa van de toplaag (Δ) (geklemde rechthoekige blokken)

Voor elk van de vijf series zijn 60 berekeningen met Steentoets gemaakt, waarbij de Δ in kleine stapjes gevarieerd is van 0,75 tot 2,1. De laatste 13 groene punten (D = 0,45 m) zijn weggelaten vanwege de waarschuwing van Steentoets dat deze punten niet betrouwbaar zijn. In de figuur zijn derhalve 287 Steentoets-berekeningen gepresenteerd.

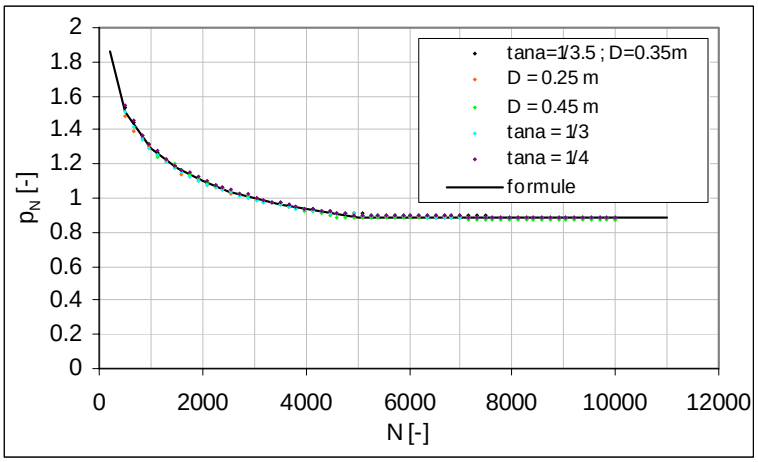
Eigenlijk zou men hier een horizontale trend verwachten, omdat de invloed van Δ al verwerkt zit in de dimensieloze belastingparameter ($H_s/\Delta D$). Als ($H_s/\Delta D$) de perfecte parameter zou zijn om de stabiliteit mee uit te drukken, dan zou Δ omgekeerd evenredig zijn met de golfhoogte en recht evenredig met de toplaagdikte, met een horizontale lijn als resultaat. 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 Δ niet omgekeerd evenredig met de golfhoogte en recht evenredig met de toplaagdikte. De extra invloed wordt onder meer veroorzaakt doordat, als de golfhoogte twee keer groter wordt, het stijghoogteverschil over de toplaag niet twee keer groter wordt, maar iets kleiner blijft.

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 Δ ontstaat er meer spreiding, maar omdat in de praktijk Δ 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:

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

Met:
p_Δ = invloedsfactor van Δ (-)

3.2.2 Belastingduur



Figuur 3.2 Invloed van de dimensieloze belastingduur (aantal golven, N) (geklemde rechthoekige 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. De invloed van de toplaagdikte en taludhelling op de trend is hier gering. In de figuur is de volgende trendlijn getekend die goed aansluit op de rekenresultaten:

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

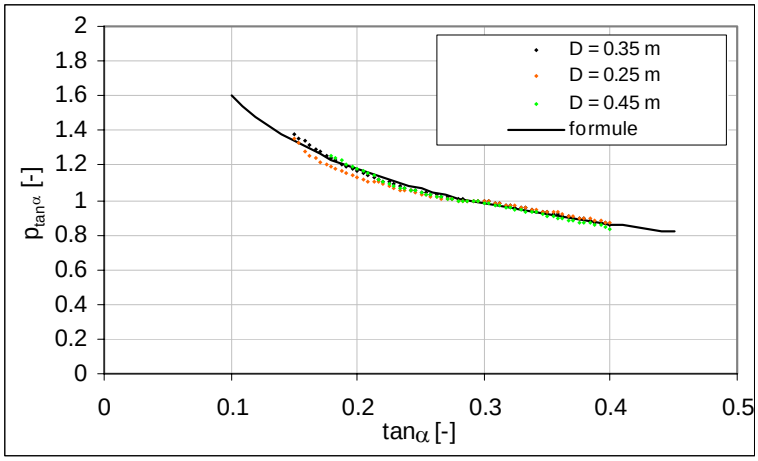
Met:
p_N = invloedsfactor van N (-)

3.2.3 Taludhelling

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 (-)



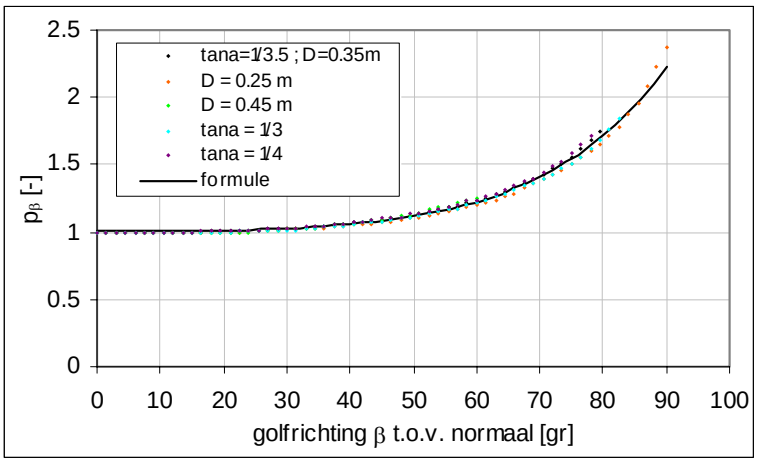
Figuur 3.3 Invloed van taludhelling (geklemde rechthoekige blokken)

3.2.4 Hoek van golfaanval

De invloed van de golfrichting β ten opzichte van de normaal op de dijk is te zien in Figuur 3.4. Zolang $\beta < 60^o$ is de spreiding als gevolg van de verschillende toplaagdiktes en taludhellingen klein. Pas bij grotere hoeken ontstaan iets grotere verschillen. Van de meeste trends zijn de punten bij de grootste hoeken weggelaten vanwege de waarschuwing van Steentoets dat deze berekeningen niet betrouwbaar zijn. De trend wordt weergegeven door de volgende formule:

$$p_\beta = 1,3 \cdot 10^{-21} \cdot \left(\beta + 90\right)^{9,3} + 1 \quad (3.4)$$

Met:
p_β = invloedsfactor van β (-)



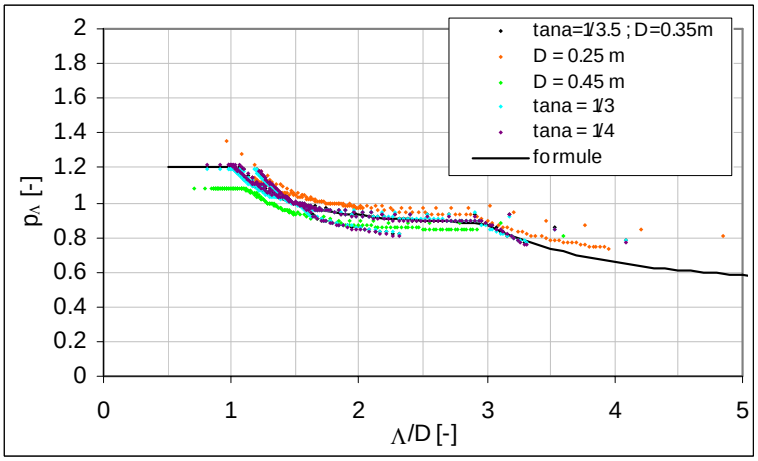
Figuur 3.4 Invloed van de golfrichting β ten opzichte van de normaal op de dijk (geklemde rechthoekige blokken)

3.2.5 Dimensieloze leklengte

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 de parameters s, b en D_{f15} zijn voor alle vijf de series 60 berekeningen gemaakt in de aangegeven range. Voor parameter D zijn 60 berekeningen gemaakt voor uitsluitend de drie series met een verschillende taludhelling ($\tan\alpha$ = 1:3; 1:3,5 en 1:4). De toplaagdikte is daar immers de gevarieerde parameter. In totaal zijn er derhalve meer dan duizend berekeningen gemaakt om de invloed van de leklengte in kaart te brengen. De resultaten van de berekeningen zijn gegeven in Figuur 3.5. In de figuur zijn nauwelijks zwarte punten zichtbaar, doordat deze consequent achter de blauwe en paarse punten vallen.



Figuur 3.5 Invloed van de dimensieloze leklengte Λ/D (geklemde rechthoekige blokken)

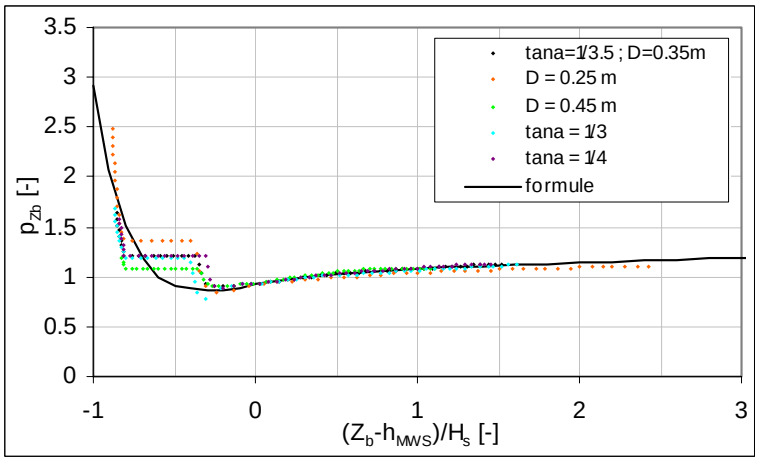
Helaas blijkt de spreiding in de figuur wat groter te zijn dan in de vorige figuren. In een groot deel van de doorgerekende range van waarden van Λ/D liggen de punten van de dunne toplaag (oranje punten) wat aan de hoge kant, en van de dikkere toplaag (groene punten) wat aan de lage kant. De toplaagdikte heeft kennelijk een extra grote invloed.
De extra invloed van de toplaagdikte is ook te zien in de resultaten van de berekeningen waarin D is gevarieerd. Die berekeningen zijn in de figuur herkenbaar als de iets steiler dalende trend van zwarte, blauwe en paarse punten bij 1,2 < Λ/D < 2,4.
De trendlijn in de figuur is gebaseerd op berekeningen met D = 0,35. Voor de extra invloed van D wordt later gecorrigeerd in paragraaf 3.3. De globale trend wordt weergegeven door de volgende formule:

$$p_\Lambda = \min\left(\min\left[0{,}35 \cdot \left(\frac{\Lambda}{D}\right)^{-2{,}2} + 0{,}85\,;\ 1{,}2 \right]\ ;\ 10 \cdot \left(\frac{\Lambda}{D}\right)^{-3} + 0{,}5 \right) \qquad (3.5)$$

Met:
p_Λ = invloedsfactor van dimensieloze leklengte Λ/D (-)

3.2.6 Dimensieloze niveau van de bovenste overgangsconstructie

Voor het berekenen van de invloed van het dimensieloze niveau van de bovenste overgangsconstructie is het niveau Z_b 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)

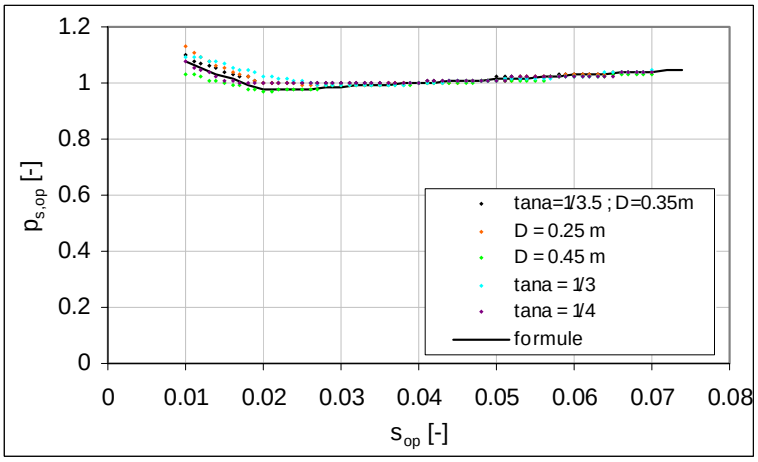
In de figuur is te zien dat de spreiding van de resultaten vanaf $(Z_b - h_{MWS})/H_s$ > -0,2 vrij klein is en goed weergegeven wordt door de trendlijn. Bij kleinere waarden is er duidelijk iets bijzonders aan de hand. Het bijzondere verloop van de rekenresultaten wordt veroorzaakt door de wijze waarop 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 ≈ -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 ≈ -0,8.
Bij 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. In werkelijkheid zijn er niet slechts vijf gedefinieerde belastingsituaties, maar zijn er ook talloze tussenvormen. Daarom is ervoor gekozen een vloeiende trendlijn aan te houden. De resulterende formule, die getekend is in Figuur 3.6, is:

$$p_{Z_b} = \max\left[\begin{array}{l} 1,04\cdot\left(\max\left[\frac{Z_b - h_{MWS}}{H_s}; -0,35\right]+0,35\right)^{0,11}; \\ 5\cdot\left(\min\left[\frac{Z_b - h_{MWS}}{H_s}; -0,2\right]+0,2\right)^{4}+0,87 \end{array}\right] \quad (3.6)$$

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

3.2.7 Golfsteilheid



Figuur 3.7 Invloed van de golfsteilheid (geklemde rechthoekige blokken)

In Figuur 3.7 is de invloed van de golfsteilheid te zien. In Steentoets kan de golfsteilheid worden ingevoerd in kolom IB, nadat deze kolom zichtbaar is gemaakt met de toetsencombinatie Ctrl+Shift+F12. Hoewel de golfsteilheid in vele formules in Steentoets een belangrijke parameter is, is de uiteindelijke invloed ervan vrij beperkt. Kennelijk valt de invloed ervan grotendeels weg. De spreiding van de resultaten is gering voor s_{op} > 0,025. Voor s_{op} < 0,025 is de spreiding iets groter, maar dit is minder belangrijk omdat deze lage golfsteilheden in de praktijk niet zoveel voorkomen. De trend wordt weergegeven door de volgende formule:

$$p_{s_{op}} = \max\left[0,032\cdot\left(s_{op}+0,3\right)^{-3};1,66\cdot\left(s_{op}+0,3\right)^{0,47}\right] \quad (3.7)$$

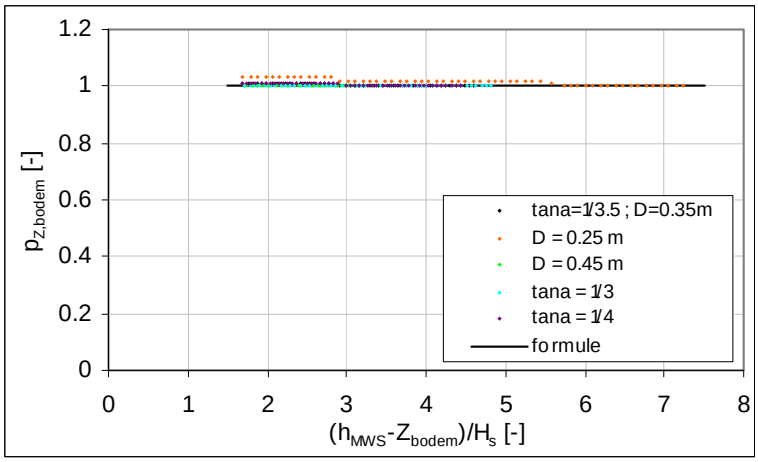
Met:
$p_{s,op}$ = invloedsfactor van de golfsteilheid (-)

3.2.8 Dimensieloze waterdiepte

De invloed van de dimensieloze waterdiepte is te zien in Figuur 3.8. Als ondergrens is H_s/d = 0,6 aangehouden, wat overeenkomt met $(h_{MWS}-Z_{bodem})/H_s$ = 1/0,6 = 1,67. De invloed van de dimensieloze waterdiepte blijkt verwaarloosbaar. De trend wordt daarom weergegeven met de formule:

$$p_{Z_{bodem}} = 1 \quad (3.8)$$

Met:
$p_{Z,bodem}$ = invloedsfactor van de dimensieloze waterdiepte (-)



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:

$$p = \frac{[H_s/(\Delta D)]_{Steentoets}}{[H_s/(\Delta D)]_{centraal\,punt}} = p_{Z_b}\cdot p_{\tan\alpha}\cdot p_{\Lambda}\cdot p_{\Delta}\cdot p_{N}\cdot p_{\beta}\cdot p_{s_{op}} \quad (3.9)$$

Immers, als voor alle variabelen de waarde uit het centrale punt wordt genomen, behalve bijvoorbeeld de Δ, dan zijn $p_{Zb} = p_{tan\alpha} = p_{\Lambda} = p_N = p_{\beta} = p_{s,op}$ = 1 en wijkt alleen p_{Δ} 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 is $p_{Z,bodem}$ achterwege gelaten omdat deze variabele altijd gelijk is aan 1.

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

$$\frac{H_s}{\Delta D} = 4{,}39 \cdot p_{Z_b} \cdot p_{\tan\alpha} \cdot p_{\Lambda} \cdot p_{\Delta} \cdot p_N \cdot p_{\beta} \cdot p_{s_{op}} \tag{3.10}$$

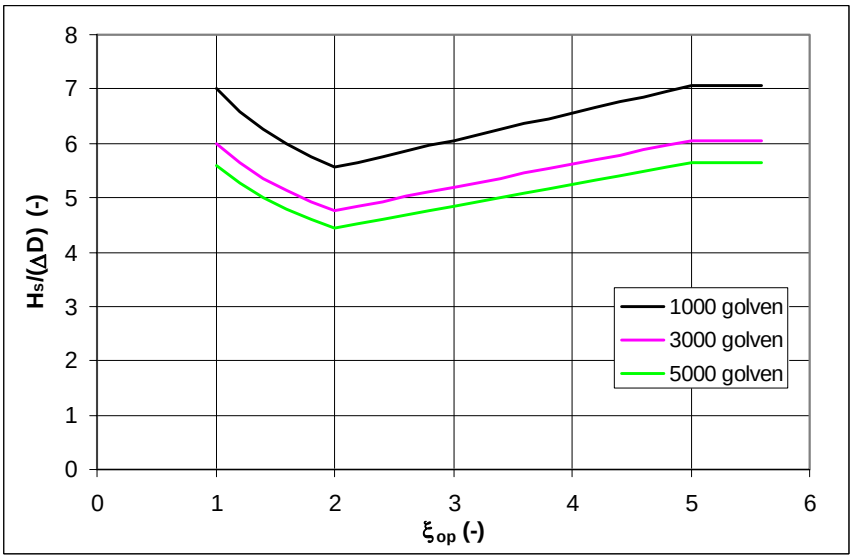
Zoals reeds in paragraaf 2.3 is vermeld, houdt Steentoets een bepaalde maximale stabiliteit aan. Er wordt in feite een bovengrens aangehouden voor de waarde van $H_s/(\Delta D)$ bij het bezwijken van de steenzetting. Het is logisch om deze bovengrens voor de maximaal toelaatbare $H_s/(\Delta D)$ ook 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):

$$\left[\frac{H_s}{\Delta D}\right]_{max} = \frac{\left(7\left(\min\left(\xi_{op}\,;2\right)\right)^{-\frac{1}{3}} + \max\left(0{,}5\left(\min\left(\xi_{op}\,;5\right)-2\right);0\right)\right)}{\max\left((\cos\beta)^{2/3}\,;0{,}4\right)} \cdot f_{sfront} \tag{3.11}$$

$$f_{sfront} = \max\left(1 - c_1 \cdot \log\left(\frac{N}{1000}\right); c_2\right) \tag{3.12}$$

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 (-)
ξ_{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 blokkensteenzettingen volgens Steentoets (loodrechte golfaanval, geen zuilen of blokken op hun kant)

Voor de waarde van de coëfficiënten c_1 en c_2 geldt:

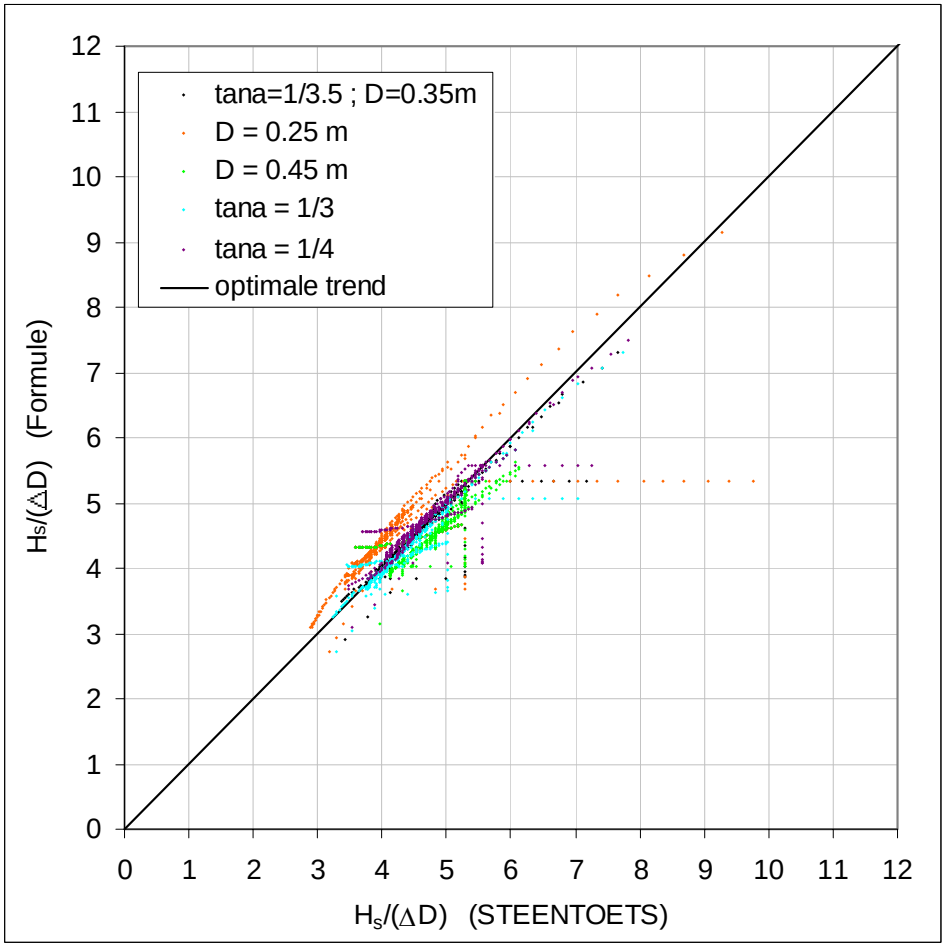
- Zuilen: $c_1 = 0{,}15$ $c_2 = 0{,}85$
- Blokken op hun kant: $c_1 = 0{,}35$ $c_2 = 0{,}80$
- Overige typen (o.a. koperslakblokken): $c_1 = 0{,}30$ $c_2 = 0{,}80$

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

Als deze bovengrens wordt meegenomen in formule (3.10) dan krijgen we:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = \min\left[4{,}39 \cdot p_{Z_b} \cdot p_{\tan\alpha} \cdot p_{\Lambda} \cdot p_{\Delta} \cdot p_N \cdot p_{\beta} \cdot p_{s_{op}} ; \left(\frac{H_s}{\Delta D}\right)_{max} \right] \qquad (3.13)$$

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 (3.13), en op de horizontale as de berekende waarde volgens Steentoets, zie Figuur 3.10.



Figuur 3.10 De waarde van $H_s/(\Delta D)$ volgens formule (3.13) tegen de waarde volgens Steentoets voor geklemde rechthoekige blokken.

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. In enkele gevallen wijken de resultaten echter sterker af van de optimale trend (zwarte lijn). Het blijkt dat de afwijkende punten betrekking hebben op de berekeningen waarvoor geldt dat $(Z_b - h_{MWS})/H_s < -0,2$. Het gaat om de horizontale en verticale rijen punten bij $H_s/(\Delta D) = 4,8; 5,0; 5,3$ en $5,6$.
Zoals in paragraaf 3.2.6 is vermeld, zijn er argumenten om te stellen dat de formule hier wellicht beter is dan Steentoets. Deze punten worden daarom in de volgende stappen buiten beschouwing gelaten

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. Deze spreiding is hoofdzakelijk het gevolg van de spreiding in de figuur van de dimensieloze leklengte Λ/D (Figuur 3.5). Het lijkt zinnig om de formule aan te vullen met een term met de toplaagdikte D. Er is geprobeerd deze term dimensieloos te maken, maar vanwege de nadelen die dat opleverde, is daarvan afgezien. Het blijkt dat de volgende term de spreiding aanzienlijk verkleint:

$$p_D = \frac{1}{0,054 \cdot D^{-1,2} + 0,81} \tag{3.14}$$

Met:
p_D = invloedsfactor van de toplaagdikte (m)

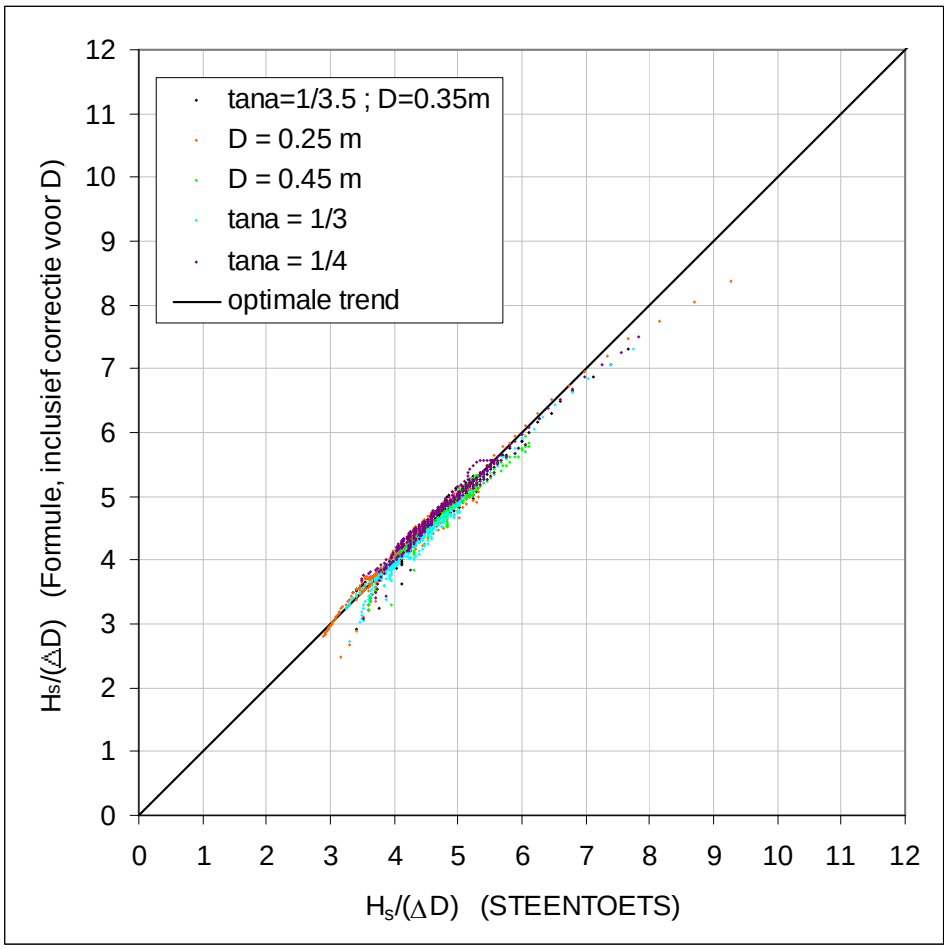
De formule voor het berekenen van de maximaal toelaatbare waarde van $H_s/(\Delta D)$ wordt hiermee voor geklemde rechthoekige blokken:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = \min\left[4,39 \cdot p_{Z_b} \cdot p_{\tan\alpha} \cdot p_\Lambda \cdot p_\Delta \cdot p_N \cdot p_\beta \cdot p_{s_{op}} \cdot p_D \; ; \left(\frac{H_s}{\Delta D}\right)_{max} \right] \tag{3.15}$$

Voor p_{Zb}, $p_{tan\alpha}$, p_Λ, p_Δ, p_N, p_β, $p_{s,op}$ en p_D wordt verwezen naar formule (3.1) tot en met (3.7) en (3.14). Voor $[H_s/(\Delta D)]_{max}$ wordt verwezen naar de formules (3.11) en (3.12).

Figuur 3.10 is nogmaals weergegeven in Figuur 3.11, maar ditmaal zonder de punten waarvoor geldt dat $(Z_b - h_{MWS})/H_s < -0,2$ en inclusief de correctie voor D. In Figuur 3.11 is te zien dat door toevoeging van formule (3.14) de spreiding flink is afgenomen. De punten die iets verder van de optimale trend afwijken, zijn berekend met kleine waarden voor D en s.

In Figuur 3.11 zijn de resultaten van 3145 Steentoets-berekeningen opgenomen. De variatiecoëfficiënt (σ/μ) van de verhouding tussen het resultaat van de formule en Steentoets is 0,023. Dat maakt dat 95% van de berekeningen een kleinere afwijking heeft dan 5%.



Figuur 3.11 De waarde van $H_s/(\Delta D)$ volgens formule (3.15) *tegen de waarde volgens Steentoets voor geklemde rechthoekige blokken (zonder meetpunten waarvoor geldt dat $(Z_b - h_{MWS})/H_s < -0,2$; inclusief correctie voor D).*

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.

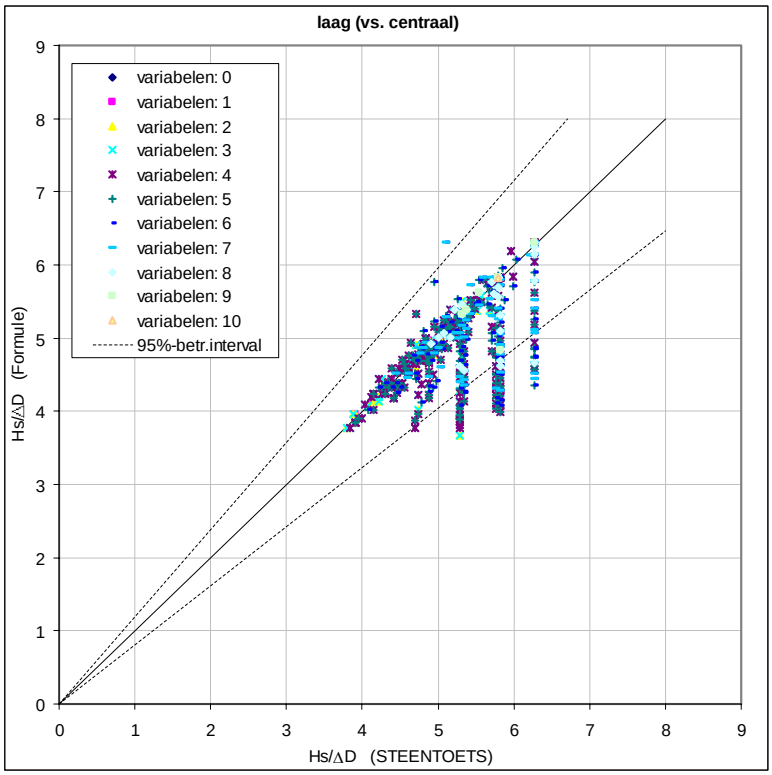
De rekenresultaten zijn gegroepeerd naar het aantal parameters dat een andere waarde heeft gekregen dan in het centrale punt (zie de verschillende symbolen in Figuur 3.12 tot Figuur 3.14). Naar verwachting neemt de nauwkeurigheid af naarmate er meer parameters een andere waarde hebben.
De invoer is wel steeds zo gekozen dat alle parameters binnen de range vallen die doorgerekend is in paragraaf 3.2. 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).

Voor sommige berekeningen bleek 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.
Ook berekeningen waarbij Steentoets een waarschuwing of foutmelding geeft, zijn weggelaten, net zoals in paragraaf 3.2 gedaan is.

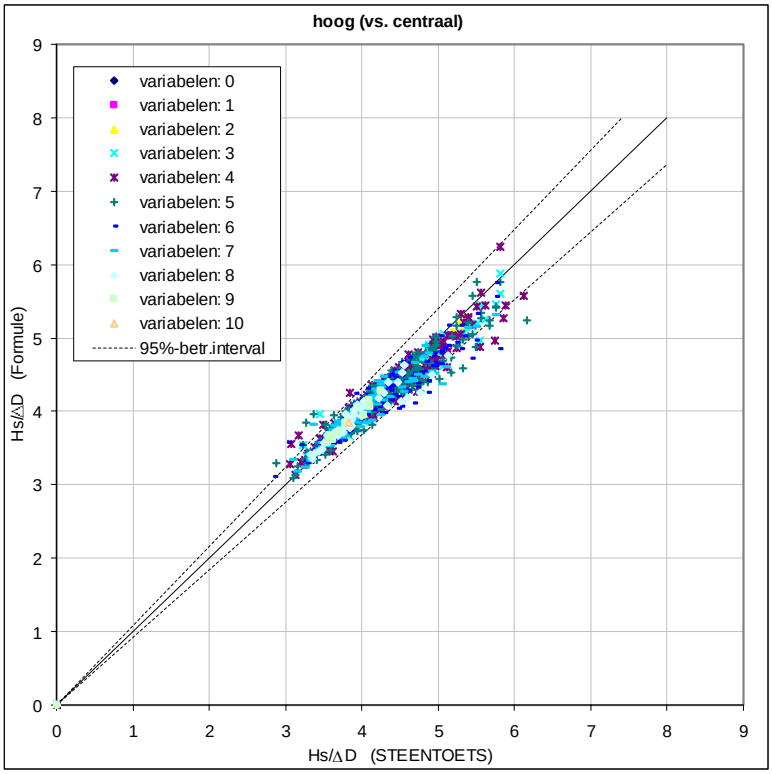
De resultaten zijn gepresenteerd in drie figuren:

- 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: 0,10.
- Alle berekeningen waarin één of meer parameters een waarde boven het centrale punt heeft gekregen: Figuur 3.13. De variatiecoëfficiënt is voor deze berekeningen: 0,04.
- 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: 0,21.

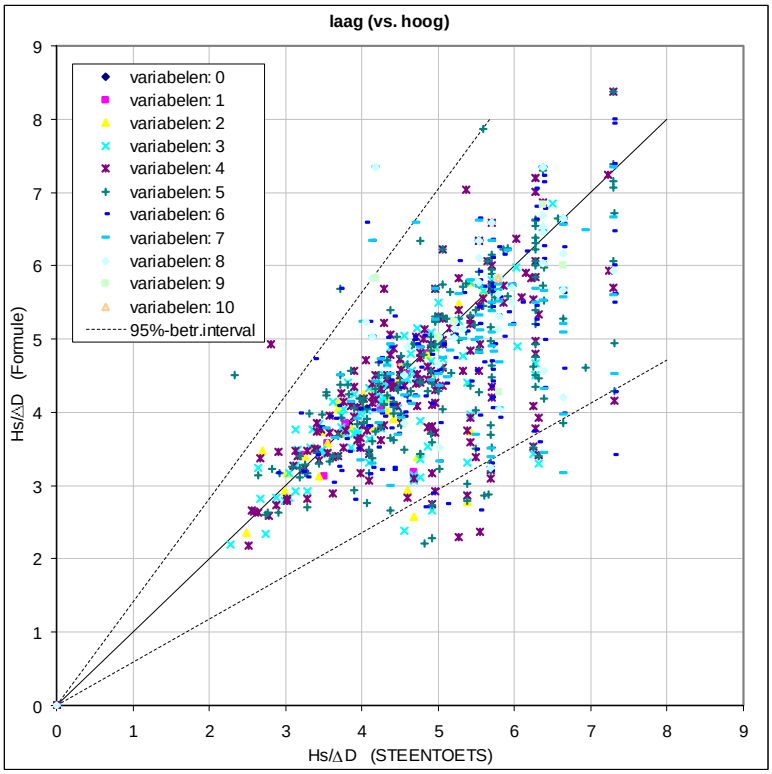
In de figuren zijn stippellijnen getekend waarbinnen 95% van de punten liggen. De variatiecoëfficiënt (σ/μ) van de verhouding tussen het resultaat van de formule en Steentoets is voor alle 2865 berekeningen tezamen 0,13.



Figuur 3.12 De waarde van $H_s/(\Delta D)$ volgens formule (3.15) *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 (3.15) *tegen de waarde volgens Steentoets (968 berekeningen met één of meer parameters boven het centrale punt)*



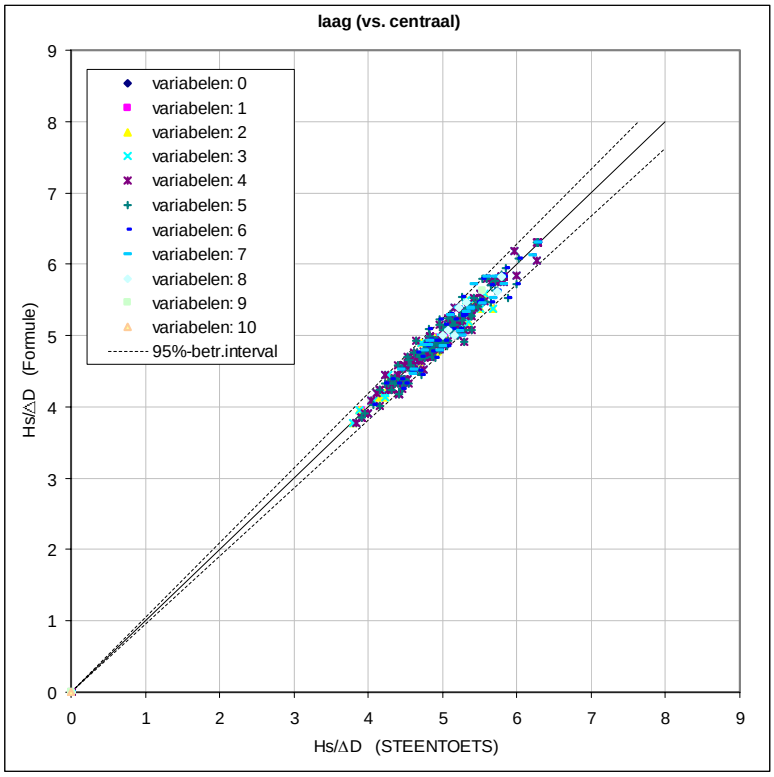
Figuur 3.14 De waarde van $H_s/(\Delta D)$ volgens formule (3.15) *tegen de waarde volgens Steentoets (873 berekeningen met sommigen parameters onder het centrale punt en andere erboven)*

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 overgangs-constructie in Steentoets tot abrupte veranderingen in de stabiliteit. Waarschijnlijk is dit niet realistisch, en is het vloeiender verloop van de formules beter.

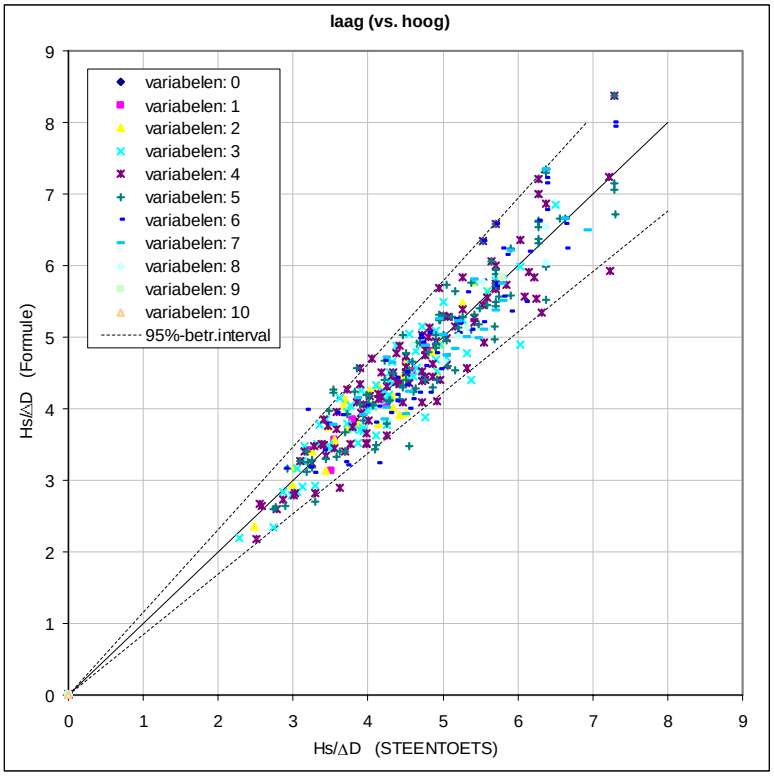
Als de berekeningen met een lage overgangsconstructie worden weggelaten, dan wordt de gemiddelde afwijking een stuk kleiner. Dit is te zien in Figuur 3.15 en Figuur 3.16.

Deze selectie heeft geen invloed op Figuur 3.13. De variatiecoëfficiënt in Figuur 3.15 en Figuur 3.16 is respectievelijk 0,02 en 0,08. Voor alle 1923 rekenresultaten tezamen (zonder die met een lage Z_b) is de variatiecoëfficiënt nu 0,049. Dit betekent dat 95% van de doorgerekende steenzettingen minder dan 10% afwijking geeft. In 99% van de berekeningen is de afwijking kleiner dan 16%.

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



Figuur 3.15 De waarde van $H_s/(\Delta D)$ volgens formule (3.15) *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 (3.15) *tegen de waarde volgens Steentoets (443 berekeningen met sommigen parameters onder het centrale punt en andere erboven, behalve die met een lage Z_b)*

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: $\tan\alpha_{bodem} = 0$
- Niveau van de teen van de dijk: z_{bodem} = -5 m+NAP
- 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: Ω = 12%
- Soortelijke massa van de stenen: ρ_s = 2500 kg/m^3
- Soortelijke massa van het water: ρ = 1025 kg/m^3
- Korrelgrootte van het inwasmateriaal in de openingen: D_{i15} = 7 mm
- De steenzetting is geklemd, maar niet ingegoten met gietasfalt
- Dikte van de uitvullaag: b_1 = 0,20 m
- Korrelgrootte van de uitvullaag: $D_{f15,1}$ = 17 mm
- Porositeit van de uitvullaag: n_1 = 0,40
- Er is geen tweede filterlaag

Het uitgangspunt voor de belasting is gekozen op:

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

Evenals in hoofdstuk 3 is gewerkt met vijf centrale punten. Zuilensteenzettingen hebben volgens de theorie een relatief hoge stabiliteit, waardoor de berekende $H_s/(\Delta D)$ vrij vaak begrensd wordt door de bovengrens van de stabiliteit. Voor een goede analyse is het echter belangrijk dat in de centrale punten de waarden van de maximaal toelaatbare $H_s/(\Delta D)$ niet worden begrensd, zodat de formules daardoor niet beïnvloed worden. De bovengrens wordt pas aan het einde toegevoegd aan de integrale formule, in paragraaf 4.3.
Om begrenzing van de $H_s/(\Delta D)$ in de centrale punten te voorkomen, is de dikte van de filterlaag vergroot van b = 0,10 m in hoofdstuk 3 naar b = 0,20 m in het onderhavige hoofdstuk. Daarnaast is een iets grotere porositeit van de uitvullaag gehanteerd: n_1 = 0,40.

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

- D = 0,35 m en tanα = 1/3,5: $H_s/(\Delta D)$ = 4,93
- D = 0,25 m en tanα = 1/3,5: $H_s/(\Delta D)$ = 4,22
- D = 0,45 m en tanα = 1/3,5: $H_s/(\Delta D)$ = 5,56
- D = 0,35 m en tanα = 1/4: $H_s/(\Delta D)$ = 5,13
- D = 0,35 m en tanα = 1/3: $H_s/(\Delta D)$ = 4,66

Net als in paragraaf 3.2 is weer vanuit deze centrale punten de invloed van elke dimensieloze parameter berekend door steeds één invoerparameter van Steentoets te variëren. Wat betreft de dimensieloze waterdiepte bij de teen is gekozen voor het variëren van z_{bodem} en wat betreft het dimensieloze niveau van de bovenste overgangsconstructie is gevarieerd met Z_b. De invloed van de leklengte is, op vergelijkbare wijze als in paragraaf 3.2, geïnventariseerd door de volgende constructieparameters te variëren:

- Toplaagdikte: D (m)
- Open oppervlak in de toplaag: Ω (%)
- Dikte van de bovenste granulaire laag (uitvullaag): b (m)
- Korrelgrootte van de bovenste granulaire laag (uitvullaag): D_{f15} (mm)

Zo zijn er vele series berekeningen uitgevoerd waarbij steeds één parameter is gevarieerd. Per parameter is een invloedsfactor p bepaald, die de betreffende trend beschrijft. De formules voor de invloedsfactoren zijn in eerste instantie hoofdzakelijk gebaseerd op de berekeningen met D = 0,35 m. Soms liggen de punten met D = 0,25 m boven de geplotte invloedsfactor, en die met D = 0,45 m eronder. Zoals uit paragraaf 3.3 blijkt, kan daarvoor eenvoudig achteraf gecorrigeerd worden, door het toevoegen van een invloedsfactor met de toplaagdikte D.

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:

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

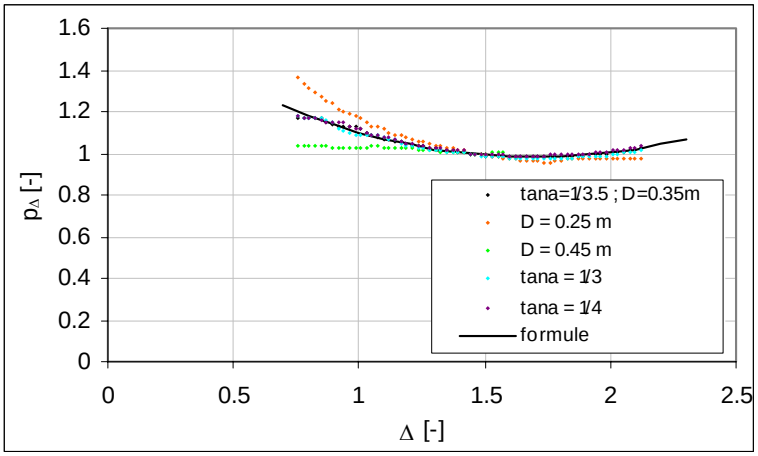
Net als in paragraaf 3.2 is het doel om voor elke parameter een formule te creëren die de relatie geeft tussen p en de gevarieerde parameter. Later kunnen al deze formules samengesteld worden tot een grote formule waarmee het Steentoets-resultaat voorspeld kan worden.

4.2.1 Dimensieloze soortelijke massa

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. In de figuur is te zien dat de trend vrijwel gelijk is voor de verschillende taludhellingen. De rekenresultaten met een grote toplaagdikte wijken af voor Δ < 1,25. Omdat bij deze punten de bovengrens van de stabiliteit maatgevend is (formule (3.11)), zijn ze niet beschouwd bij het vaststellen van de

trend. De berekeningen met de kleine toplaagdikte wijken iets af, maar liggen hoger dan de overige trends, zodat daarvoor achteraf gecorrigeerd kan worden. De trend wordt weergegeven door de volgende formule:

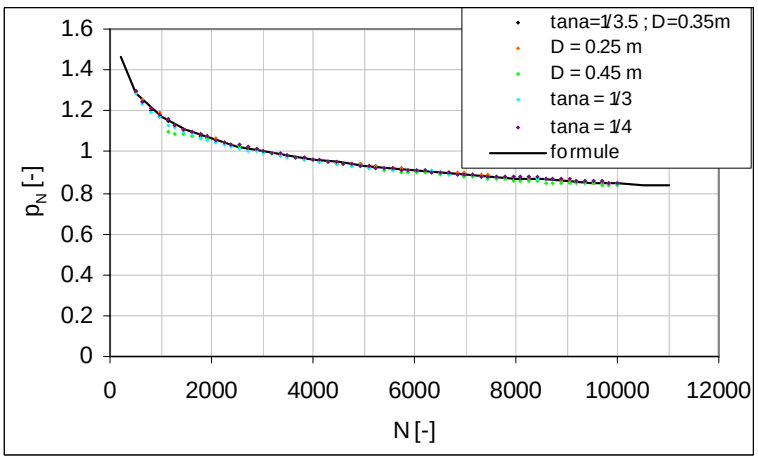
$$p_{\Delta} = 0,25 \cdot (\Delta - 1.7)^2 + 0,98 \qquad (4.2)$$



Figuur 4.1 Invloed van de dimensieloze soortelijke massa van de toplaag (Δ)(zuilen)

4.2.2 Belastingduur

De invloed van de belastingduur (aantal golven, N) is te zien in Figuur 4.2. De invloed van de toplaagdikte en taludhelling is gering. Bij de afwijkende groene punten bij N < 2500 is de bovengrens van de stabiliteit maatgevend. Volgens de formules die in Steentoets zijn geprogrammeerd, neemt de stabiliteit af naarmate de belastingduur toeneemt, totdat vanaf circa 15000 golven de stabiliteit constant blijft.
Het is daarom te verwachten dat de trendlijn bij zeer grote waarden van N beperkt wordt door deze ondergrens van de stabiliteit, net als in Figuur 3.2 (geklemde rechthoekige blokken) het geval is. Uit aanvullende Steentoetsberekeningen volgt dat p_N = 0,81 bij N = 50000 golven, terwijl op basis van het doortrekken van de getekende trendlijn wordt gevonden dat p_N = 0,67 bij N = 50000 golven. Dat duidt op een ondergrens bij circa p_N = 0,8.



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

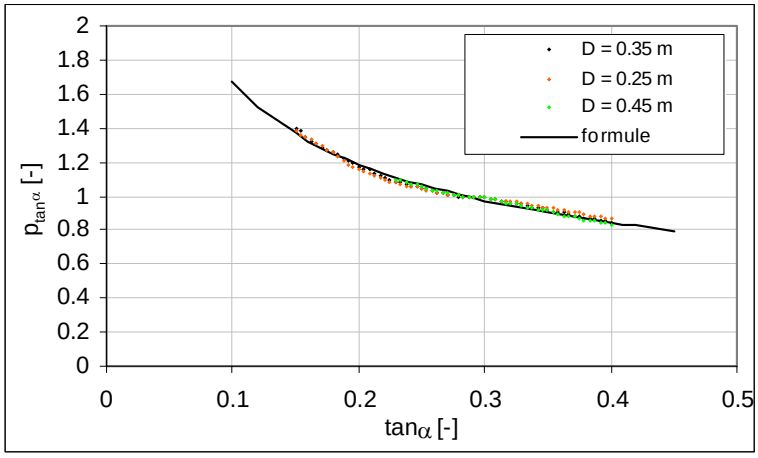
Het voorgaande leidt tot de volgende trendlijn, die ook getekend is in de figuur:

$$p_N = \max(3{,}1 \cdot N^{-0{,}141}\ ;\ 0{,}8) \qquad (4.3)$$

4.2.3 Taludhelling

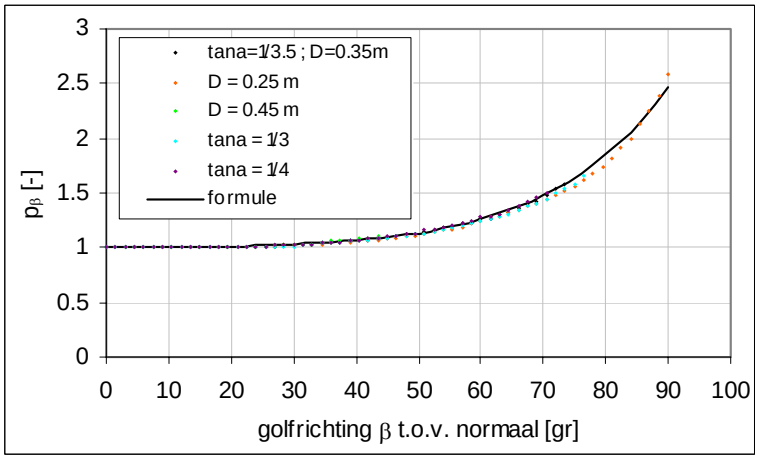
Voor de invloed van de taludhelling wordt verwezen naar Figuur 4.3. De trend blijkt voor de verschillende blokdiktes steeds ongeveer hetzelfde te zijn. Bij de berekeningen met D = 0,45 m geeft Steentoets voor tanα < 0,22 een waarschuwing dat de berekeningen onbetrouwbaar zijn. Deze punten zijn niet in de figuur opgenomen. De volgende trendlijn sluit goed aan op de rekenresultaten:

$$p_{\tan\alpha} = 0{,}54 \cdot \tan\alpha^{-0{,}49} \qquad (4.4)$$



Figuur 4.3 Invloed van taludhelling (zuilen)

4.2.4 Hoek van golfaanval



Figuur 4.4 Invloed van de golfrichting β ten opzichte van de normaal op de dijk (zuilen)

In Figuur 4.4 is de invloed van de golfrichting β ten opzichte van de normaal op de dijk te zien. Zolang β < 60° is de spreiding als gevolg van de verschillende toplaagdiktes en taludhellingen klein. Pas bij grotere hoeken ontstaan iets grotere verschillen. Van de meeste trends zijn de punten bij de grootste hoeken weggelaten vanwege de melding van Steentoets dat deze berekeningen niet betrouwbaar zijn. De trend wordt weergegeven door de volgende formule:

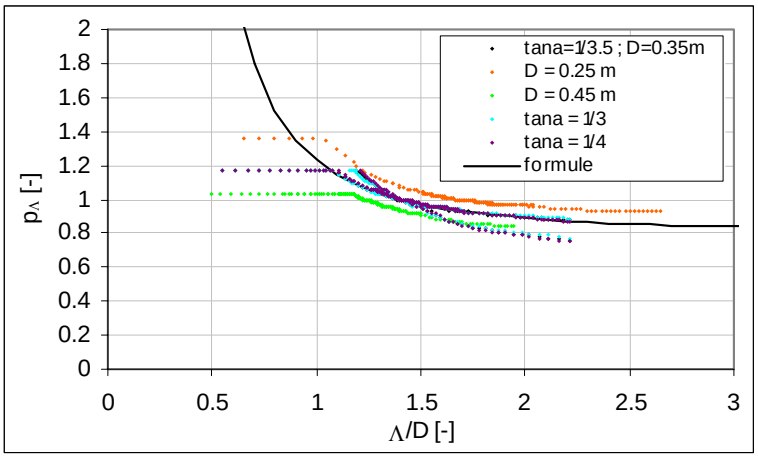
$$p_\beta = 5{,}5 \cdot 10^{-22} \cdot (\beta + 90)^{9{,}5} + 1 \qquad (4.5)$$

4.2.5 Dimensieloze leklengte

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

- Toplaagdikte: 0,15 ≤ D ≤ 0,55 m
- Open oppervlak in de toplaag: 8 ≤ Ω ≤ 15%
- Dikte van de uitvullaag: 0,03 ≤ b ≤ 0,50 m
- Korrelgrootte van de uitvullaag: 5 ≤ D_{f15} ≤ 40 mm

Voor de parameters s, b en D_{f15} zijn voor alle vijf de series 60 berekeningen gemaakt in de aangegeven range. Voor parameter D zijn 60 berekeningen gemaakt voor uitsluitend de drie series met een verschillende taludhelling (tanα = 1:3; 1:3,5 en 1:4). De toplaagdikte is daar immers de gevarieerde parameter. In totaal zijn er derhalve meer dan duizend berekeningen gemaakt om de invloed van de leklengte in kaart te brengen. De resultaten van de berekeningen zijn gegeven in Figuur 4.5. In de figuur zijn nauwelijks zwarte punten zichtbaar, doordat deze consequent achter de blauwe en paarse punten vallen.



Figuur 4.5 Invloed van de dimensieloze leklengte Λ/D (zuilen)

De punten bij Λ/D < 1 à 1,2, die allemaal dezelfde waarde voor p_Λ hebben, worden veroorzaakt door de bovengrens van de stabiliteit in Steentoets. Bij het bepalen van de invloedsfactor zijn deze punten buiten beschouwing gelaten. De bovengrens wordt immers aan het einde toegevoegd in de resulterende integrale formule (formule (4.12)).

Net als bij geklemde rechthoekige blokken (Figuur 3.5) is ook bij zuilen een extra invloed van de toplaagdikte D te zien. De trendlijn in de figuur is net als bij de geklemde rechthoekige

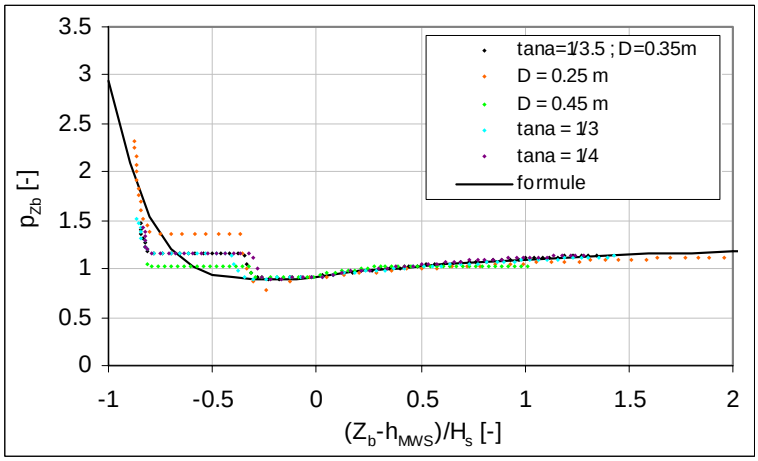
blokken gebaseerd op berekeningen met D = 0,35. Voor de extra invloed van D wordt later gecorrigeerd in paragraaf 4.3. De formule die aansluit op de punten met $\Lambda/D > 1$ à 1,2 is:

$$p_\Lambda = 0,42 \cdot \left(\frac{\Lambda}{D}\right)^{-2,4} + 0,81 \qquad (4.6)$$

4.2.6 Dimensieloze niveau van de bovenste overgangsconstructie

De invloed van de bovenste overgangsconstructie is doorgerekend door het niveau van Z_b 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. Evenals bij de geklemde rechthoekige blokken (zie paragraaf 3.2.6) zijn de sprongen in de stabiliteit bij lage waarden voor $(Z_b - h_{MWS})/H_s$ vervangen door een vloeiende trendlijn. Zoals in paragraaf 3.2.6 is uitgelegd, zijn er argumenten om te stellen dat de formule hier wellicht beter is dan Steentoets. De resulterende formule, die getekend is in Figuur 4.6, is:

$$p_{Z_b} = \max\left[\begin{array}{l} 1,06 \cdot \left(\max\left[\frac{Z_b - h_{MWS}}{H_s} ; -0,3 \right] + 0,3 \right)^{0,125} ; \\ 5 \cdot \left(\min\left[\frac{Z_b - h_{MWS}}{H_s} ; -0,2 \right] + 0,2 \right)^{4} + 0,9 \end{array}\right] \qquad (4.7)$$

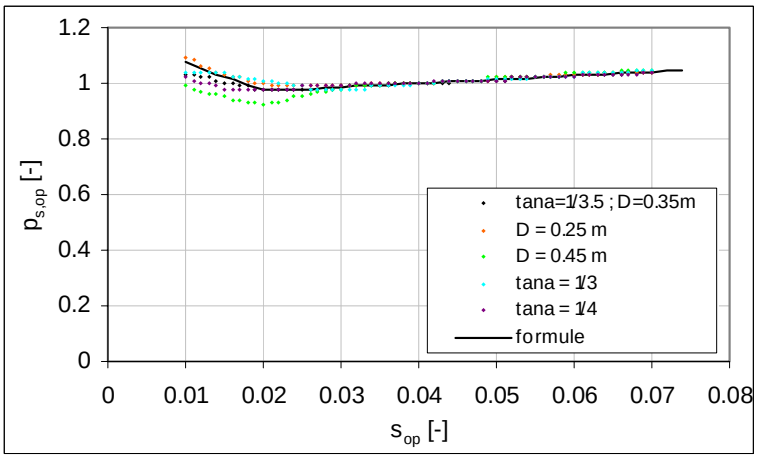


Figuur 4.6 Invloed van het dimensieloze niveau van de bovenste overgangsconstructie (zuilen)

4.2.7 Golfsteilheid

De invloed van de golfsteilheid is te zien in Figuur 4.7. De rekenresultaten met D = 0,45 m zijn begrensd door de bovengrens van de stabiliteit in Steentoets als $s_{op} < 0,24$. Dat geldt ook voor de punten met tanα = 1/4 als $s_{op} < 0,12$. Deze punten zijn niet beschouwd. Het blijkt dat dezelfde invloedsfactor gehanteerd kan worden als bij geklemde rechthoekige blokken:

$$p_{s_{op}} = \max\left[0,032 \cdot \left(s_{op} + 0,3\right)^{-3} ; 1,66 \cdot \left(s_{op} + 0,3\right)^{0,47} \right] \qquad (4.8)$$

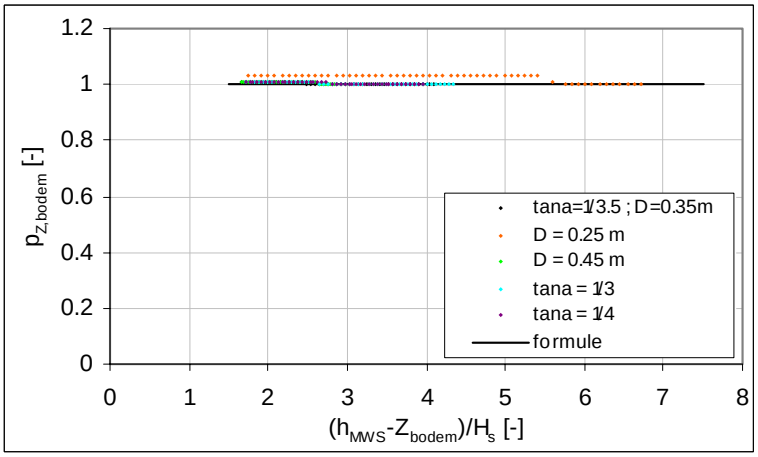


Figuur 4.7 Invloed van de golfsteilheid (zuilen)

4.2.8 Dimensieloze waterdiepte

De invloed van de waterdiepte op het voorland is verwaarloosbaar, zie Figuur 4.8. De trend wordt daarom weergegeven met de formule:

$$p_{Z_{bodem}} = 1 \tag{4.9}$$



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:

$$p = \frac{[H_s / (\Delta D)]_{Steentoets}}{[H_s / (\Delta D)]_{centraal\,punt}} = p_{Z_b} \cdot p_{\tan\alpha} \cdot p_{\Lambda} \cdot p_{\Delta} \cdot p_{N} \cdot p_{\beta} \cdot p_{s_{op}} \tag{4.10}$$

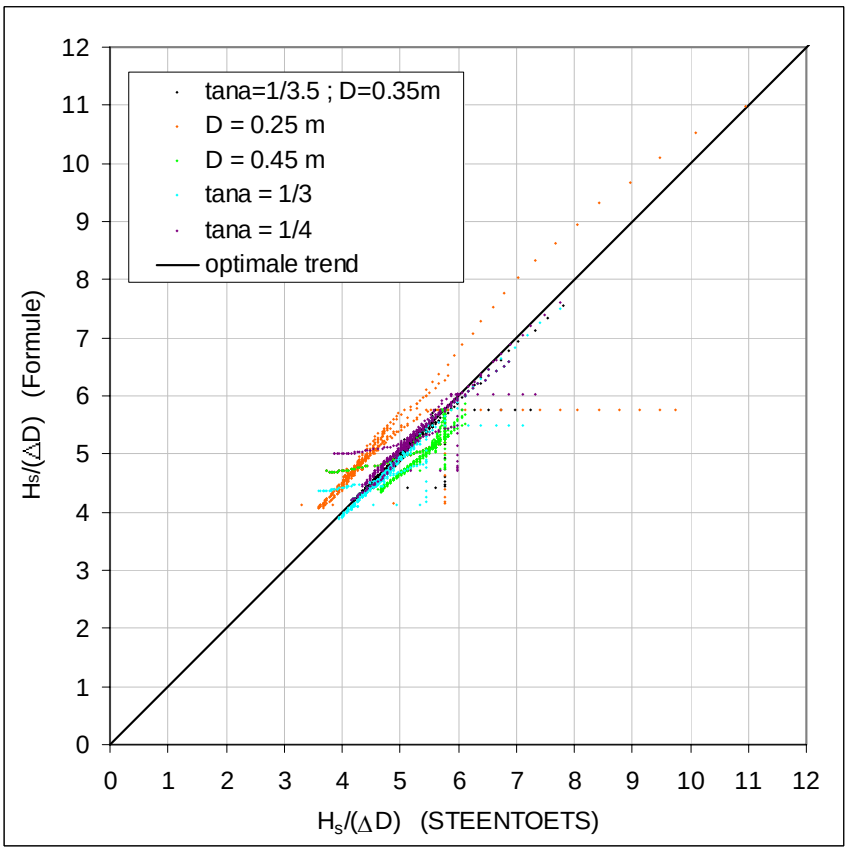
In de formule is $p_{Z,bodem}$ achterwege gelaten, omdat deze variabele altijd gelijk is aan 1. Omdat voor het centrale punt geldt dat $H_s/(\Delta D) = 4{,}93$ wordt de formule voor zuilen als volgt:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = 4{,}93 \cdot p_{Z_b} \cdot p_{\tan\alpha} \cdot p_{\Lambda} \cdot p_{\Delta} \cdot p_N \cdot p_{\beta} \cdot p_{s_{op}} \tag{4.11}$$

Zoals in paragraaf 3.3 is beschreven, houdt Steentoets een bepaalde maximale stabiliteit aan als bovengrens voor $H_s/(\Delta D)$. Net als bij geklemde rechthoekige blokken wordt deze bovengrens voor de stabiliteit (zie formule (3.11)) in de formule verwerkt:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = \min\left[4{,}93 \cdot p_{Z_b} \cdot p_{\tan\alpha} \cdot p_{\Lambda} \cdot p_{\Delta} \cdot p_N \cdot p_{\beta} \cdot p_{s_{op}} ; \left(\frac{H_s}{\Delta D}\right)_{max} \right] \tag{4.12}$$

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 (4.12), 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 (4.12) tegen de waarde volgens Steentoets voor zuilen

In de figuur is over het algemeen een hoge correlatie zichtbaar tussen de resultaten uit de formule en de Steentoetsresultaten. Net als bij geklemde rechthoekige blokken wijken echter de berekeningen af als de bovenste overgangsconstructie diep onder water ligt (zie de horizontale en verticale rijen punten tussen $5 < H_s/(\Delta D) < 6$). Hier geeft de formule een flinke

onderschatting van de stabiliteit. In paragraaf 3.2.6 is uitgelegd dat er argumenten zijn om te stellen dat de formule hier wellicht beter is dan Steentoets. Net als in hoofdstuk 3 blijven deze punten daarom in de volgende stappen buiten beschouwing.

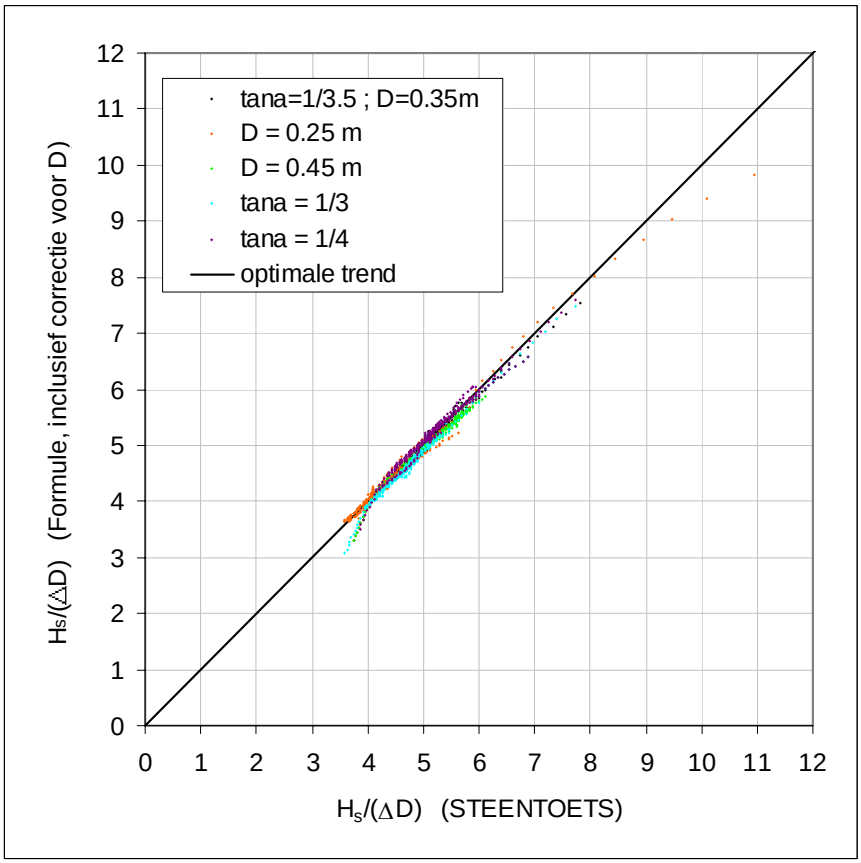
Evenals in hoofdstuk 3 is in de figuur een spreiding zichtbaar die gerelateerd is aan de toplaagdikte D. Hiervoor is gecorrigeerd door het toevoegen van term p_D:

$$p_D = \frac{1}{0,054 \cdot D^{-1,3} + 0,79} \tag{4.13}$$

Er is geprobeerd deze formule dimensieloos te maken, maar dat is helaas niet gelukt.
De formule voor het berekenen van de maximaal toelaatbare waarde van $H_s/(\Delta D)$ wordt nu voor zuilen:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = \min\left[4,93 \cdot p_{Z_b} \cdot p_{\tan\alpha} \cdot p_\Lambda \cdot p_\Delta \cdot p_N \cdot p_\beta \cdot p_{s_{op}} \cdot p_D \; ; \left(\frac{H_s}{\Delta D}\right)_{max} \right] \tag{4.14}$$

Voor p_{Zb}, $p_{tan\alpha}$, p_Λ, p_Δ, p_N, p_β, p_{s_op} en p_D wordt verwezen naar formule (4.2) tot en met (4.8) en (4.13). Voor $[H_s/(\Delta D)]_{max}$ wordt verwezen naar de formules (3.11) en (3.12).



Figuur 4.10 De waarde van $H_s/(\Delta D)$ volgens formule (4.14) *tegen de waarde volgens Steentoets voor zuilen (zonder meetpunten waarvoor geldt dat $(Z_b - h_{MWS})/H_s < -0,2$; inclusief correctie voor D)*

Figuur 4.9 is nogmaals weergegeven in Figuur 4.10, maar ditmaal zonder de punten waarvoor geldt dat $(Z_b - h_{MWS})/H_s < -0,2$ en inclusief de correctie voor D. In Figuur 4.10 is te

zien dat door toevoeging van formule (4.13) de spreiding flink is afgenomen. De punten die iets verder van de optimale trend afwijken, zijn berekend met kleine waarden voor D of zeer grote waarden voor β. In de praktijk komt dit zelden voor.

Uit de figuur blijkt dat de formule het resultaat van Steentoets vrij goed benadert. De variatiecoëfficiënt (σ/μ) van de verhouding tussen de formule en Steentoets is voor de 2844 gepresenteerde berekeningen 0,019. Dat betekent dat 95% van de rekenresultaten een kleinere afwijking heeft dan 4%.

4.4 Verificatie van de resulterende formule voor zuilen

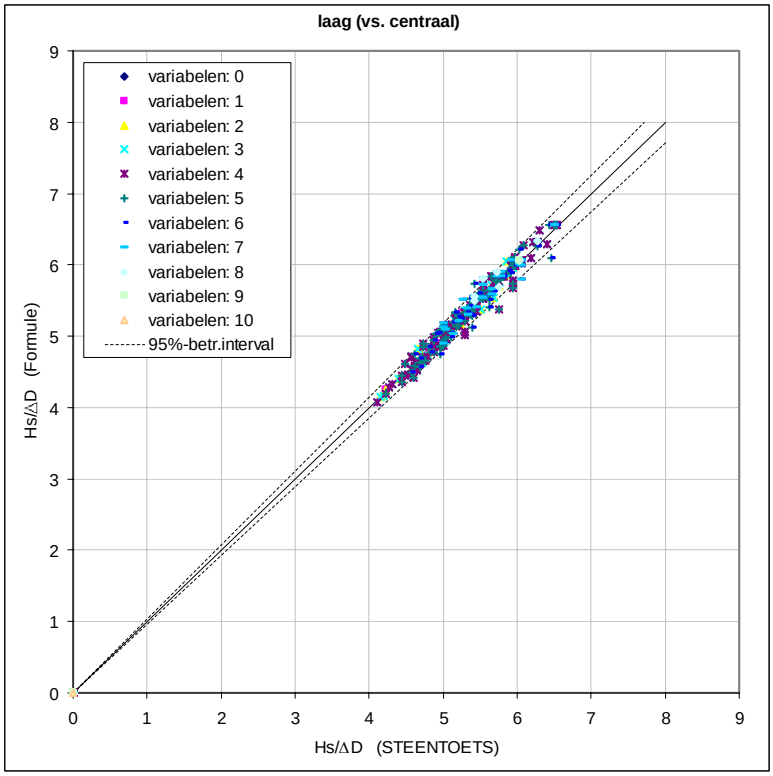
Tot nu toe is nog maar een beperkt aantal variaties in de parameters beschouwd. Er is namelijk steeds maar één parameter gewijzigd vanuit een van de vijf centrale punten. In deze paragraaf is een verificatie van de formule uitgevoerd door meerdere parameters tegelijk te variëren. Waarschijnlijk zal de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

De rekenresultaten zijn gegroepeerd naar het aantal parameters dat een andere waarde heeft gekregen dan in het centrale punt (zie de verschillende symbolen in Figuur 4.11 tot Figuur 4.13). Naar verwachting neemt de nauwkeurigheid af naarmate er meer parameters een andere waarde hebben.
De invoer is wel steeds zo gekozen dat alle parameters binnen de range vallen die doorgerekend is in paragraaf 4.2. 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).

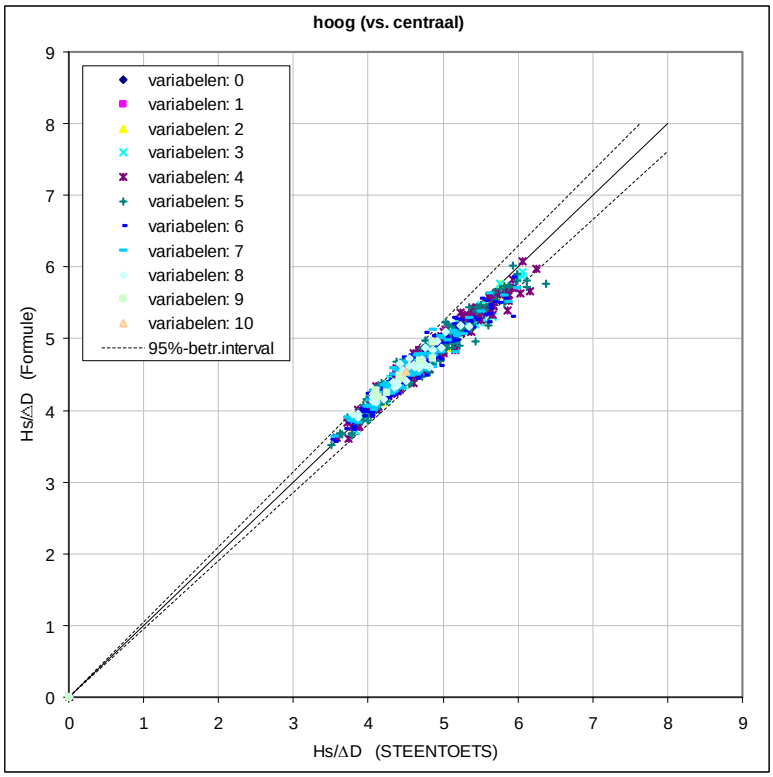
Voor vele berekeningen bleek de golfhoogte groter te worden dan 5 m. Omdat Steentoets begrensd is voor deze golfhoogte, kon daardoor in die gevallen de golfhoogte, die nog net geen bezwijken geeft, niet vastgesteld worden. Deze berekeningen zijn weggelaten.
Verder zijn de rekenresultaten met een zeer lage bovenste overgangsconstructie weggelaten, zoals ook gedaan is bij de koperslakblokken.
Ook berekeningen waarbij Steentoets een waarschuwing of foutmelding geeft, zijn weggelaten. Hierdoor bleven er uiteindelijk 1795 berekeningen over.

De resultaten zijn gepresenteerd in drie figuren:

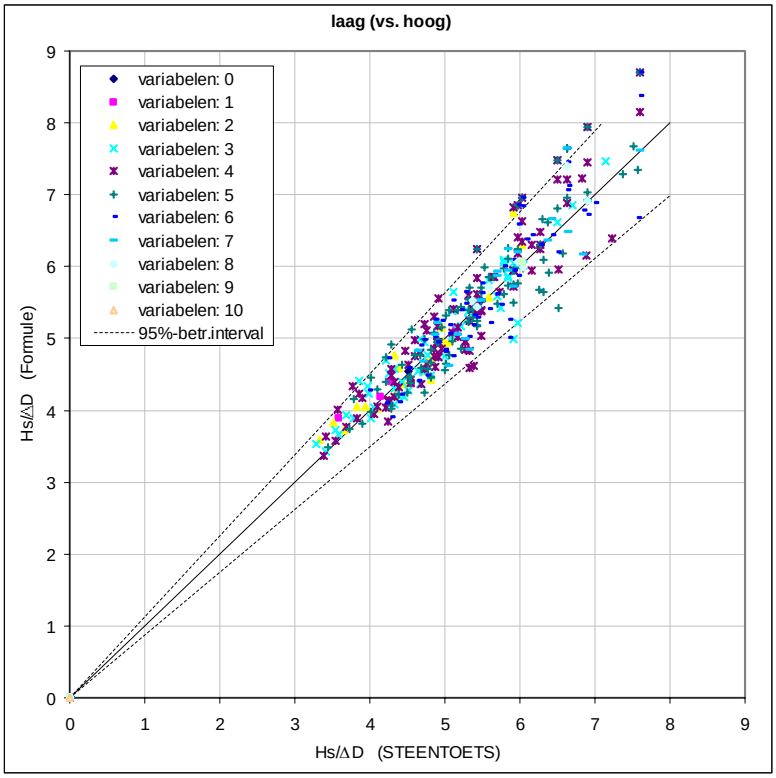
- Alle berekeningen waarin één of meer parameters een waarde onder het centrale punt heeft gekregen: Figuur 4.11. De variatiecoëfficiënt van de verhouding tussen het resultaat van de formule en Steentoets is voor deze 512 berekeningen: 0,018. Circa 30% van de berekeningen is begrensd door de bovengrens van de stabiliteit en ligt daardoor op de optimale trendlijn.
- Alle berekeningen waarin één of meer parameters een waarde boven het centrale punt heeft gekregen: Figuur 4.12. De variatiecoëfficiënt is voor deze 875 berekeningen: 0,024. Ruim 1% van de berekeningen is begrensd door de bovengrens van de stabiliteit en ligt daardoor op de optimale trendlijn.
- Alle berekeningen waarin sommige parameters een waarde onder het centrale punt en andere erboven hebben gekregen: Figuur 4.13. De variatiecoëfficiënt is voor deze 408 berekeningen: 0,063. Circa 20% van de berekeningen is begrensd door de bovengrens van de stabiliteit en ligt daardoor op de optimale trendlijn.



Figuur 4.11 De waarde van $H_s/(\Delta D)$ volgens formule (4.14) *tegen de waarde volgens Steentoets (512 berekeningen met één of meer parameters onder het centrale punt)*



Figuur 4.12 De waarde van $H_s/(\Delta D)$ volgens formule (4.14) *tegen de waarde volgens Steentoets (875 berekeningen met één of meer parameters boven het centrale punt)*



Figuur 4.13 De waarde van $H_s/(\Delta D)$ volgens formule (4.14) *tegen de waarde volgens Steentoets (408 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 (σ/μ) van de verhouding tussen het resultaat van de formule en Steentoets is voor alle 1795 berekeningen tezamen 0,037. Dat betekent dat 95% van de doorgerekende steenzettingen een kleinere afwijking heeft dan 7,5%.
In 99% van de berekeningen is de afwijking kleiner dan 15%. De afwijking is kleiner dan 10% in 96,6% van de getoonde punten.

Helaas lukt het niet om de afwijkingen in de afgeleide formules voor zuilen te verkleinen. Ondanks dat een 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 leklengte, 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: Leklengte

De eerste stap betreft het berekenen van de leklengte Λ. 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:

$$h = \min\left(h_{toets} - \frac{H_s}{4};\ Z_b + 0,7H_s \right) \tag{5.1}$$

Met:
h_{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 β).
De golfsteilheid en brekerparameter kunnen berekend worden met:

- Golfsteilheid: $s_{op} = \frac{H_s}{1,56T_p^2}$ (5.2)
- Brekerparameter: $\xi_{op} = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{s_{op}}}$ (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_{belast} van de maatgevende belasting bepaald worden:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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):

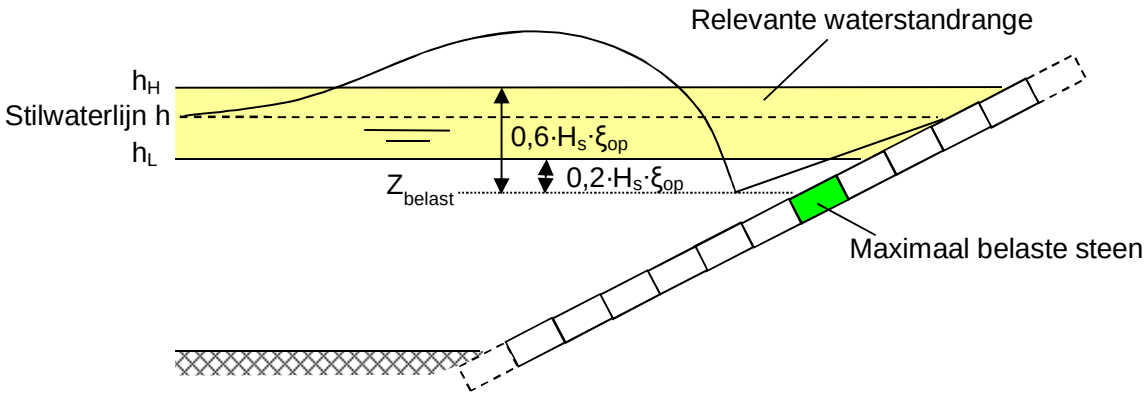
$$h_L = Z_{belast} + 0{,}2H_s \cdot \min(\xi_{op} ; 4) \quad (5.14)$$

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

Met:

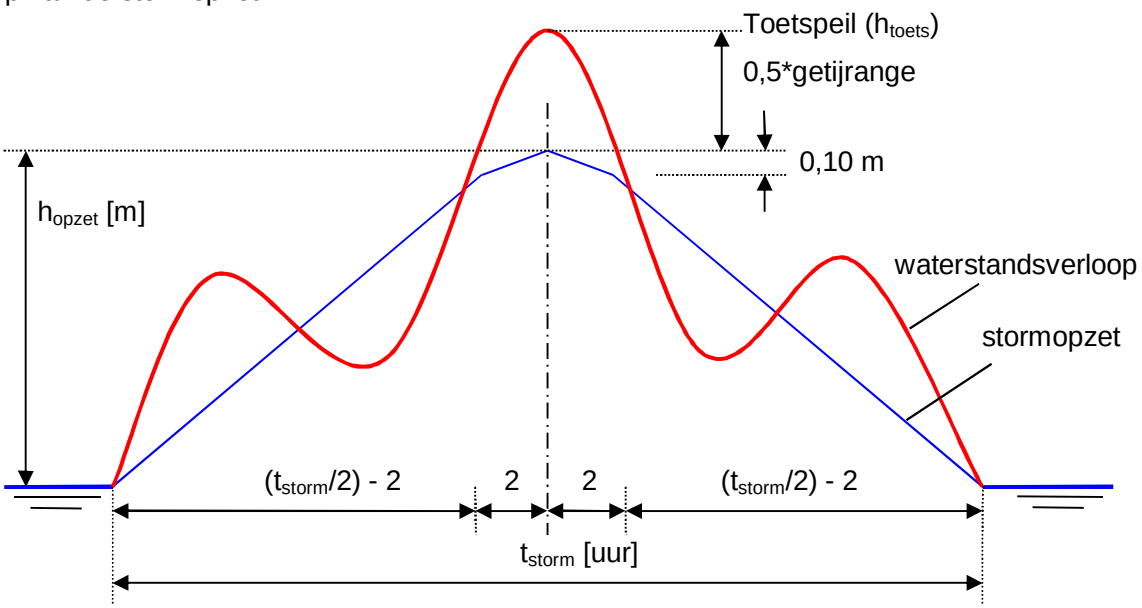
h_L = niveau van de ondergrens van de zone waarbinnen de waterstand moet liggen om een grote golfbelasting te hebben (NAP+m)

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



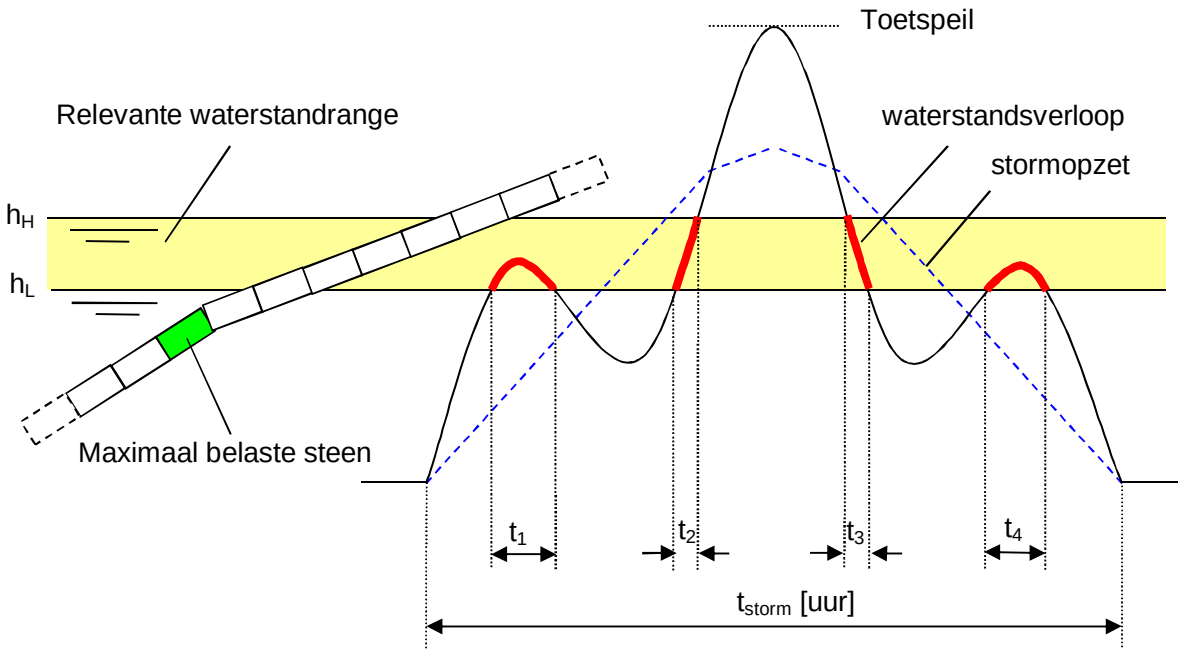
Figuur 5.1 Relevante waterstandrange.

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_{storm} = 45 uur, voor de andere zoute wateren en meren geldt t_{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 5.2 Waterstandsverloop in Nederlandse watersystemen (m.u.v. rivierengebieden en Oosterschelde) (schematisch).

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



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:

$$N = \frac{t_{belast}}{T_p / 1{,}1} \tag{5.16}$$

Met:

N = aantal golven tijdens de belasting periode (-)
t_{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 leklengte en belastingduur de stabiliteit van de steenzetting berekend worden. Daarbij wordt gebruikgemaakt van de volgende formules die afgeleid zijn in hoofdstuk 3 en 4:

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

Met:

- Zuilen: $c_1 = 0{,}15$ $c_2 = 0{,}85$
- Blokken op hun kant: $c_1 = 0{,}35$ $c_2 = 0{,}80$
- Overige typen (o.a. koperslakblokken): $c_1 = 0{,}30$ $c_2 = 0{,}80$

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

- Geklemde rechthoekige blokken (zoals koperslakblokken):

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

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

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

$$p_\beta = 1,3\cdot10^{-21}\cdot\left(\beta+90\right)^{9,3}+1 \tag{5.22}$$

$$p_\Lambda = \min\left(\min\left[0,35\cdot\left(\frac{\Lambda}{D}\right)^{-2,2}+0,85\,;\;1,2\right]\;;\;10\cdot\left(\frac{\Lambda}{D}\right)^{-3}+0,5\right) \tag{5.23}$$

$$p_{Z_b} = \max\begin{bmatrix} 1,04\cdot\left(\max\left[\frac{Z_b-h_{MWS}}{H_s}\,;-0,35\right]+0,35\right)^{0,11}\;; \\ 5\cdot\left(\min\left[\frac{Z_b-h_{MWS}}{H_s}\,;-0,2\right]+0,2\right)^{4}+0,87 \end{bmatrix} \tag{5.24}$$

$$p_{s_{op}} = \max\left[0,032\cdot\left(s_{op}+0,3\right)^{-3}\,;1,66\cdot\left(s_{op}+0,3\right)^{0,47}\right] \tag{5.25}$$

$$p_D = \frac{1}{0,054\cdot D^{-1,2}+0,81} \tag{5.26}$$

$$\frac{H_s}{\Delta D} = \min\left[4,39\cdot p_{Z_b}\cdot p_{\tan\alpha}\cdot p_\Lambda\cdot p_\Delta\cdot p_N\cdot p_\beta\cdot p_{s_{op}}\cdot p_D\,;\left(\frac{H_s}{\Delta D}\right)_{max}\right] \tag{5.27}$$

- Zuilen (zoals Basalton, Hydroblocks etc.):

$$p_\Delta = 0,25\cdot\left(\Delta-1.7\right)^2+0,98 \tag{5.28}$$

$$p_N = \max(3,1\cdot N^{-0,141}\;;\;0,8) \tag{5.29}$$

$$p_{\tan\alpha} = 0,54\cdot\tan\alpha^{-0,49} \tag{5.30}$$

$$p_\beta = 5,5\cdot10^{-22}\cdot\left(\beta+90\right)^{9,5}+1 \tag{5.31}$$

$$p_\Lambda = 0,42\cdot\left(\frac{\Lambda}{D}\right)^{-2,4}+0,81 \tag{5.32}$$

$$p_{Z_b} = \max\begin{bmatrix} 1,06\cdot\left(\max\left[\frac{Z_b-h_{MWS}}{H_s}\,;-0,3\right]+0,3\right)^{0,125}\;; \\ 5\cdot\left(\min\left[\frac{Z_b-h_{MWS}}{H_s}\,;-0,2\right]+0,2\right)^{4}+0,9 \end{bmatrix} \tag{5.33}$$

$$p_{s_{op}} = \max\left[0,032\cdot\left(s_{op}+0,3\right)^{-3};1,66\cdot\left(s_{op}+0,3\right)^{0,47}\right] \quad (5.34)$$

$$p_D = \frac{1}{0,054\cdot D^{-1,3}+0,79} \quad (5.35)$$

$$\frac{H_s}{\Delta D} = \min\left[4,93\cdot p_{Z_b}\cdot p_{\tan\alpha}\cdot p_\Lambda\cdot p_\Delta\cdot p_N\cdot p_\beta\cdot p_{s_{op}}\cdot p_D;\left(\frac{H_s}{\Delta D}\right)_{max}\right] \quad (5.36)$$

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 (5.27) of (5.36), het kleinste. Dit is de maximaal toelaatbare waarde van $H_s/(\Delta D)$. Als de verhouding van de optredende significante golfhoogte, H_s, en ΔD groter is dan, of gelijk aan 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 ΔD 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 veiligheidsfactor van 1,1 (Kaste en Klein Breteler, 2012) 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 geklemde 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.
Echter, de afwijking is kleiner dan 10% in 95% (geklemde rechthoekige blokken) en in 97% (zuilen) van de gevallen. Omgekeerd geldt dat in 99% van de gevallen de afwijking kleiner is dan 16% (geklemde rechthoekige blokken) en 15% (zuilen).
Dit voldoet helaas niet aan de vooraf gestelde 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

Kaste, D., en Klein Breteler, M. (2012), *Veiligheidsfactor voor ontwerpen met Steentoets2010*, Deltares, rapport 1206424-010-HYE-0003, versie 2, november 2012

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:

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

Met:

s_s = breedte van de stootvoeg (m)
s_l = breedte van de langsvoeg (m)
Ω = 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.

$$a_f = 160\frac{\nu\left(1-n_f\right)^2}{g{n_f}^3 D_{f15}^2} \tag{A.2}$$

$$b_f = \frac{2,2}{g n_f^2 D_{f15}} \tag{A.3}$$

$$k = \frac{-a_f + \sqrt{a_f^2 + 1,2 \cdot b_f}}{0,6 \cdot b_f} \tag{A.4}$$

Met:

ν = $1{,}2\cdot10^{-6}$ m^2/s (kinematische viscositeit van water)
n_f = porositeit van het granulair materiaal (-)
D_{f15} = korrelgrootte van het granulair materiaal (m)

g = versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)
a_f = lineaire weerstandscoëfficiënt van het granulair materiaal (s/m)
b_f = turbulente weerstandscoëfficiënt van het granulair materiaal (s^2/m^2)
k = doorlatendheid van het filter (m/s)

Doorlatendheid van het inwasmateriaal

De doorlatendheid van het inwasmateriaal wordt berekend met volgende formules (let op: formule (A.6) is niet hetzelfde als formule (A.3)):

$$a_i = 160 \frac{\nu \left(1-n_i\right)^2}{g n_i^3 D_{i15}^2} \quad \text{(A.5)}$$

$$b_i = \frac{0{,}10}{g n_i^5 D_{i15}} \quad \text{(A.6)}$$

Met:
a_i = lineaire weerstandscoëfficiënt van het inwasmateriaal (s/m)
b_i = turbulente weerstandscoëfficiënt van het inwasmateriaal (s^2/m^2)
n_i = porositeit van het inwasmateriaal (-)
D_{i15} = korrelgrootte van het inwasmateriaal (m)

Doorlatendheid van de toplaag

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

$$a_{ftop} = 160 \frac{\nu \left(1-n_f-0{,}1\right)^2}{g (n_f+0{,}1)^3 D_{f15}^2} \quad \text{(A.7)}$$

$$b_{ftop} = \frac{0{,}14}{g (n_f+0{,}1)^5 D_{f15}} \quad \text{(A.8)}$$

Met:
a_{ftop} = lineaire weerstandscoëfficiënt van het granulaire materiaal direct onder de spleten (s/m)
b_{ftop} = turbulente weerstandscoëfficiënt van het granulaire materiaal direct onder de spleten (s^2/m^2)

Steeds wordt de doorlatendheid van de stootvoegen en langsvoegen afzonderlijk berekend. De volgende berekeningen worden uitgevoerd:
- de doorlatendheid van de stootvoegen ($k'_{stootvoegen}$) met $s = s_s + 0{,}3\cdot10^{-3}$ m en $A_{ro} = (s_s + 0{,}3\cdot10^{-3})/ (L + s_s + 0{,}3\cdot10^{-3})$ (A.9)
- de doorlatendheid van de langsvoegen ($k'_{langsvoegen}$) met $s = s_l + 0{,}3\cdot10^{-3}$ m en $A_{ro} = (s_l + 0{,}3\cdot10^{-3})/(B + s_l + 0{,}3\cdot10^{-3})$ (A.10)

Met:
A_{ro} = deel van de toplaag die bestaat uit respectievelijk stootvoegen en langsvoegen (-)

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

$$a_s = \frac{12\nu}{gs^2 A_{ro}} \quad \text{(A.11)}$$

$$b_s = 0 \quad \text{(A.12)}$$

Met:
a_s = lineaire weerstandscoëfficiënt van de spleten (s/m)
b_s = turbulente weerstandscoëfficiënt de spleten (s^2/m^2)

Hiermee wordt k_t geschat (eerste schatting van $k'_{stootvoegen}$ of $k'_{langsvoegen}$ met onderstaande formules voor de doorlatendheid van spleten tussen blokken of zuilen) en de bijbehorende filtersnelheid v_t:

$$v_t = k_t/A_{ro} \quad \text{(A.13)}$$

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

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

$$a_s = 0 \quad \text{en} \quad \text{(A.14)}$$

$$b_s = \frac{2}{sC^2 A_{ro}^2} \quad \text{(A.15)}$$

$$C = 18 \cdot \log\left(\frac{6s}{1 \cdot 10^{-4}}\right) \quad \text{(A.16)}$$

Hiermee wordt de waarde voor de toplaagdoorlatendheid $k'_{stootvoegen}$ of $k'_{langsvoegen}$ berekend.

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

$$e = \exp(1) \quad \text{(A.17)}$$

$$r_{min} = \max(0{,}8D_{f15};\ 0{,}5s) \quad \text{(A.18)}$$

$$n_{instroom} = 0{,}6 \quad \text{(A.19)}$$

Vervolgens worden a_{spleet} en b_{spleet} berekend. Als er inwasmateriaal is, wordt gerekend met n = n_i =0,7, anders met n = $n_{instroom}$ (A.20)

$$a_{spleet} = a_s + \frac{s\, a_{ftop}}{\pi D A_{ro}} \cdot \ln\left(\frac{s}{\pi\, e A_{ro}\, r_{min}}\right) + \frac{a_i}{2A_{ro}} \quad \text{(A.21)}$$

$$b_{spleet} = b_s + \frac{1}{gDA_{ro}^2}\left(1 - \frac{1}{n} + \frac{1 - A_{ro}^2}{2n_{instroom}^2}\right) + \frac{1}{gD}\left(1 - \frac{1}{A_{ro}}\right) + \frac{s\, b_{ftop}}{\pi D A_{ro}}\left(\frac{s}{\pi\, r_{min} A_{ro}} - 2\right) + \frac{b_i}{2A_{ro}^2} \quad \text{(A.22)}$$

Zo zijn a_{spleet} en b_{spleet} afzonderlijk berekend voor de stoot- en langsvoegen. De doorlatendheid van de stootvoegen wordt nu berekend met formule (A.23). Van de langsvoegen wordt de doorlatendheid berekend met formule (A.24):

- $$k'_{stootvoegen} = \frac{-a_{spleet} + \sqrt{a_{spleet}^{\ 2} + 4b_{spleet}}}{2b_{spleet}}$$ (A.23)
- $$k'_{langsvoegen} = \frac{-a_{spleet} + \sqrt{a_{spleet}^{\ 2} + 4b_{spleet}}}{2b_{spleet}}$$ (A.24)

Tenslotte worden de doorlatendheden opgeteld:

$k' = k'_{stootvoegen} + k'_{langsvoegen}$ (A.25)

Leklengte

De leklengte kan als volgt berekend worden:

$$\Lambda = \max\left(\sqrt{\frac{D(b_1 k_1 + b_2 k_2)}{k'}} \; ; \; 0{,}5 \cdot D \right)$$ (A.26)

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)