

**Analyse van discontinuïteiten
in stabiliteitsformules voor
kruinen van havendammen en
buitenbermen in Steentoets**



**Analyse van discontinuïteiten in
stabiliteitsformules voor kruinen
van havendammen en
buitenbermen in Steentoets**

G.C. Mourik

1209832-011

Titel

Analyse van discontinuïteiten in stabiliteitsformules voor kruinen van havendammen en buitenbermen in Steentoets

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat WVL en Projectbureau Zeeweringen	1209832-011	1209832-011-HYE-0002	18

Trefwoorden

Steenzetting, Steentoets, stabiliteit, kruin, havendam, berm

Samenvatting

In het kader van de toetsing van de waterkeringen, zoals voorgeschreven in de Waterwet, dienen steenzettingen periodiek getoetst te worden. In de VTV2006 is vastgelegd dat dit moet gebeuren met het Excel-programma Steentoets (Klein Breteler, 2014). Daarnaast kan Steentoets gebruikt worden als hulpmiddel voor het ontwerpen van steenzettingen.

In Steentoets onderscheiden kruinen van havendammen en buitenbermen zich van gewone taluds door de helling van het segment. Steentoets rekent pas met de formules voor kruinen of met de formules voor buitenbermen als de helling flauwer is dan of gelijk is aan 1:9 ($\tan\alpha \leq 1:9$). Als het talud steiler is ($\tan\alpha > 1:9$), dan beschouwt Steentoets het segment als onderdeel van een normaal buitentalud.

Bij het opstellen van een advies over strekdammen zijn recent twee opmerkelijke aspecten geconstateerd ten aanzien van de door Steentoets berekende stabiliteit van kruinen en bermen:

- Volgens Steentoets is er soms een onverwacht groot verschil tussen de stabiliteit van de kruin van een havendam en de stabiliteit van een buitenberm, ondanks een gelijke breedte en hetzelfde niveau.
- De stabiliteit van kruinen en bermen met een helling van 1:9 is volgens Steentoets soms duidelijk anders dan wanneer de helling net iets steiler is dan 1:9, doordat het dan als onderdeel van het buitentalud wordt berekend. Deze discontinuïteit in de stabiliteit is niet logisch aangezien de geometrie vrijwel hetzelfde is.

In het onderhavige rapport zijn dit verschil en deze discontinuïteit gevisualiseerd en is onderzocht waardoor deze optreden, met als doel een aanpassing aan Steentoets voor te stellen, op basis van engineering judgement, waardoor een betere aansluiting tussen de formules verkregen wordt.

Ten aanzien van het verschil tussen bermen en kruinen is aanbevolen Steentoets niet aan te passen, omdat is geconstateerd dat het verschil in stabiliteit overeenkomt met de resultaten van grootschalig modelonderzoek.

Ten aanzien van de discontinuïteit bij een taludhelling van 1:9 wordt aanbevolen Steentoets wel aan te passen, zowel voor bermen als kruinen: wanneer de taludhelling tussen 1:6 en 1:12 ligt, wordt aanbevolen lineair te interpoleren (op basis van $\cot\alpha$) tussen de stabiliteit van het gewone buitentalud met een helling van 1:6 en de stabiliteit van de berm of kruin met een helling van 1:12.

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 Rijkswaterstaat WVL de opdrachtgever namens PBZ voor het onderhavige

Titel

Analyse van discontinuïteiten in stabiliteitsformules voor kruinen van havendammen en buitenbermen in Steentoets

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat WVL en Projectbureau Zeeweringen	1209832-011	1209832-011-HYE-0002	18




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

Rijkswaterstaat WVL zaaknr. 31094141 / bestelnr. 45002226348 (opdracht van 2 juni 2014).

Contactpersoon Rijkswaterstaat WVL: dhr. K. Saathof

Contactpersoon Projectbureau Zeeweringen van RWS: dhr. Y. Provoost

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	mei 2015	G.C. Mourik		M. Klein Breteler		M.R.A. van Gent	
2.0	mei 2015	G.C. Mourik		R. 't Hart		M.R.A. van Gent	

Status

definitief

Inhoud

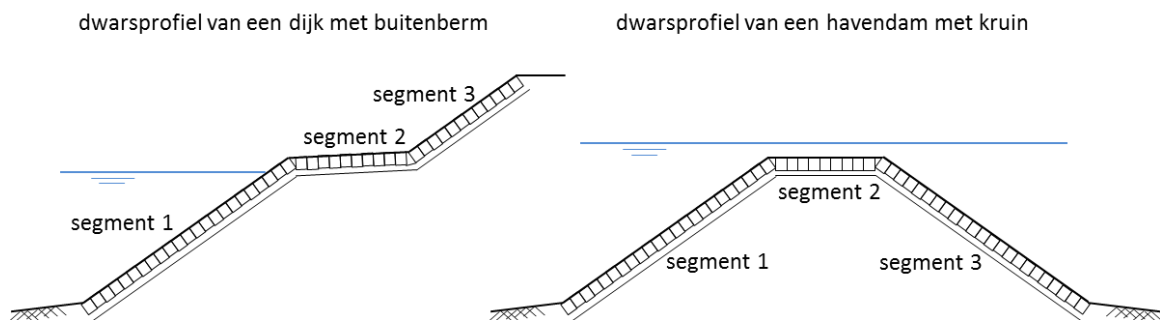
1 Inleiding	1
1.1 Introductie	1
1.2 Problematiek en doel	2
1.3 Opzet van het onderzoek	2
2 Visualisatie van de problematiek	3
2.1 Beschrijving doorgerekende cases	3
2.2 Bijzondere instellingen van Steentoets2014	4
2.3 Resultaten van de berekeningen	5
3 Analyse en aanpassingsvoorstel	9
3.1 Verschil tussen bermen en kruinen	9
3.1.1 Algemeen	9
3.1.2 Veiligheid van de stabiliteitsformules voor kruinen	9
3.1.3 Veiligheid van de stabiliteitsformules voor bermen	11
3.1.4 Vergelijking bermen en kruinen	12
3.2 Discontinuïteit ten aanzien van de taludhelling	13
4 Samenvatting en conclusies	15
5 Referenties	17
Bijlage(n)	
A De in Steentoets doorgerekende dwarsprofielen	A-1

1 Inleiding

1.1 Introductie

In het kader van de toetsing van de waterkeringen, zoals voorgeschreven in de Waterwet, dienen steenzettingen periodiek getoetst te worden. In de VTV2006 is vastgelegd dat dit moet gebeuren met het Excel-programma Steentoets (Klein Breteler, 2014). Daarnaast kan Steentoets gebruikt worden als hulpmiddel voor het ontwerpen van steenzettingen.

Voor een goede stabiliteitsberekening is het belangrijk dat in Steentoets de hele buitenzijde van een dijk, bestaand uit diverse segmenten (zie Figuur 1.1), wordt ingevoerd. Wanneer sprake is van een havendam is het van belang dat ook de kruin en de binnenzijde worden ingevoerd. Steentoets bepaalt vervolgens per bekledingssegment van welk segmenttype sprake is, bijvoorbeeld een buiten- of binnentalud, een buiten- of binnenberm of een kruin. Afhankelijk van het segmenttype gebruikt Steentoets de stabiliteitsformules die daarop van toepassing zijn.



Figuur 1.1 Een dwarsprofiel van een dijk en havendam wordt in Steentoets ingevoerd door middel van diverse bekledingssegmenten.

Dit rapport richt zich op de formules voor kruinen van havendammen en buitenbermen, in het vervolg van dit rapport kortweg aangeduid als kruinen en bermen. In Steentoets onderscheiden kruinen en bermen zich van gewone taluds door de helling van het segment. Steentoets rekent pas met de formules voor kruinen of met de formules voor bermen als de helling flauwer is dan of gelijk is aan 1:9 ($\tan\alpha \leq 1:9$). Als het talud steiler is ($\tan\alpha > 1:9$), dan beschouwt Steentoets het segment als onderdeel van een normaal buitentalud.

Recent zijn enkele opmerkelijke aspecten geconstateerd ten aanzien van de door Steentoets berekende stabiliteit van kruinen en bermen, zie paragraaf 1.2. In het onderhavige rapport worden deze aspecten gevisualiseerd, onderzocht en worden aanpassingen aan Steentoets voorgesteld.

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 Rijkswaterstaat WVL 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.

1.2 Problematiek en doel

Bij het opstellen van een advies over strekdammen zijn recent twee opmerkelijke aspecten geconstateerd ten aanzien van de stabiliteit van kruinen en bermen:

- Volgens Steentoets is er soms een onverwacht groot verschil tussen de stabiliteit van de kruin van een havendam en de stabiliteit van een buitenberm, ondanks een gelijke breedte en hetzelfde niveau.
- De stabiliteit van kruinen en bermen met een helling van 1:9 is volgens Steentoets soms duidelijk anders dan wanneer de helling net iets steiler is dan 1:9, doordat het dan als onderdeel van het buitentalud wordt berekend. Deze discontinuïteit in de stabiliteit is niet logisch aangezien de geometrie vrijwel hetzelfde is.

In het onderhavige rapport zijn dit verschil en deze discontinuïteit gevisualiseerd en is onderzocht waardoor deze optreden, met als doel een aanpassing aan Steentoets voor te stellen, op basis van engineering judgement, waardoor een betere aansluiting tussen de formules verkregen wordt. Daarbij zijn de aansluitingen tussen de formules voor bermen, kruinen en gewone buitentaluds nader beschouwd. Het onderhavige rapport bevat derhalve een analyse van de verschillende formules en een aanbeveling voor aanpassingen.

1.3 Opzet van het onderzoek

Eerst is in hoofdstuk 2 het verschil tussen bermen en kruinen en de discontinuïteit bij een taludhelling van 1:9 gevisualiseerd aan de hand van enkele cases. De resultaten daarvan zijn geanalyseerd in hoofdstuk 3: het verschil tussen bermen en kruinen is beschouwd in paragraaf 3.1, en de discontinuïteit ten aanzien van de taludhelling in paragraaf 3.2. De conclusies zijn gegeven in hoofdstuk 4.

2 Visualisatie van de problematiek

2.1 Beschrijving doorgerekende cases

Zoals is genoemd in paragraaf 1.2, zijn recent twee opmerkelijke aspecten geconstateerd ten aanzien van de stabiliteit van kruinen en bermen:

- Volgens Steentoets is er soms een onverwacht groot verschil tussen de stabiliteit van de kruin van een havendam en de stabiliteit van een buitenberm, ondanks een gelijke breedte en hetzelfde niveau.
- De stabiliteit van kruinen en bermen met een helling van 1:9 is volgens Steentoets soms duidelijk anders dan wanneer de helling net iets steiler is dan 1:9, doordat het dan als onderdeel van het buitentalud wordt berekend. Dit verschil in stabiliteit is niet logisch aangezien de geometrie vrijwel gelijk is.

In het onderhavige rapport worden deze aspecten onderzocht en indien nodig worden aanpassingen aan de rekenstructuur van Steentoets voorgesteld. Hiervoor is het noodzakelijk om eerst in beeld te brengen hoe de stabiliteit van bermen en kruinen zich tot elkaar verhouden, en hoe de stabiliteit van kruinen en bermen (met $\tan\alpha \leq 1:9$) verandert als de helling ervan steiler wordt dan 1:9, waardoor ze net niet meer als een berm of kruin worden berekend, maar als onderdeel van het buitentalud.

Om het bovenstaande verschil en discontinuïteit te visualiseren, is met Steentoets de stabiliteit berekend van diverse bermen en kruinen. Daarbij zijn de volgende eigenschappen gevarieerd:

- Berm-/kruinhelling (1:5 ; 1:6 ; 1:7 ; 1:8,9 ; 1:9 ; 1,9,1 ; 1:10 ; 1:12 ; 1:15 en 1:20).
- Berm-/kruinbreedte (1,8 m en 6,0 m).
- Berm-/kruinniveau (een serie berekeningen met de zéewaartse rand en een serie berekeningen met de lándwaartse rand van de berm/kruin gelijk aan NAP+ 5,0 m. Dat betekent respectievelijk: een serie berekeningen met de onderste overgangsconstructie $Z_o = \text{NAP} + 5,0 \text{ m}$ en een serie met bovenste overgangsconstructie $Z_b = \text{NAP} + 5,0 \text{ m}$. Het niveau van de andere rand van de berm of kruin is berekend, afhankelijk van de helling en breedte van de berm of kruin.
- Waterstand (NAP+ 4,6 m; NAP+ 5,0 m en NAP+ 5,4 m).

De bovenstaande variaties in berm-/kruinbreedte, berm-/kruinniveau en de waterstand zijn grafisch weergegeven in Figuur A.1 in bijlage A. Voor de overzichtelijkheid zijn in die figuur uitsluitend de dwarsprofielen met een berm-/kruinhelling van 1:15 weergegeven.

In Figuur A.1 is in de 1^e en 2^e figuur de buitenkruinlijn of de zeewaartse rand van de berm steeds gelijk gehouden op NAP+ 5,0 m (zie de zwarte ronde stip), terwijl in de 3^e en 4^e figuur de binnenkruinlijn of de landwaartse rand van de berm gelijk is gehouden op NAP+ 5,0 m (zie de zwarte ronde stip). De berm-/kruinbreedte is 1,8 m in de 1^e en 3^e figuur en 6,0 m in de 2^e en 4^e figuur.

In de berekeningen zijn voor de kruinen en bermen verder de volgende constructie-eigenschappen aangehouden:

- helling van het voorland: $\tan\alpha_{\text{bodem}} = 1:100$
- niveau van teen van dijk of havendam: NAP- 1,0 m

- indien kruin: helling van het binnentalud: $\tan\alpha = -1:4$
indien berm: helling van het boventalud: $\tan\alpha = 1:4$
- type steenzetting: Basalton (toplaagtype 27.1) op steenslag op geotextiel op klei
- toplaagdikte: $D = 0,20$ m
- open oppervlakte: $\Omega = 10\%$
- soortelijke massa van de stenen: $\rho_s = 2100$ kg/m³
- steenzetting is ingewassen en goed geklemd en er zijn geen oneffenheden
- karakteristieke korreldiameter van het inwasmateriaal: $D_{i,15} = 5$ mm
- dikte van de filterlaag: $0,15$ m
- karakteristieke korreldiameter van het filtermateriaal: $D_{f,15} = 15$ mm
- porositeit van het filtermateriaal: $0,35$
- type overgangsconstructie: b0

De bovenstaande combinatie van eigenschappen is bewust zodanig gekozen dat de stabiliteit niet te hoog wordt. De stabiliteit van steenzettingen op bermen en kruinen kan namelijk erg hoog zijn, terwijl bij een te hoge stabiliteit er het risico is dat Steentoets de bezwijkgolffhoogte niet goed kan berekenen. Steentoets geeft in dat geval een melding.

Voor het berekenen van de stabiliteit van de hierboven beschreven kruinen en bermen is gebruikgemaakt van Steentoets2014 (versie 14.1.2.1, Deltares, augustus 2014). Er is voor gekozen om van de hierboven beschreven bermen en kruinen de stabiliteit uit te drukken in de maximaal toelaatbare $H_s/(\Delta D)$. Voor $H_s/(\Delta D)$ geldt:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = \text{dimensieloze belastingparameter (-)} \quad (2.1)$$

Met:

- H_s = significante golffhoogte 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/m³)
- ρ_s = soortelijke massa van de stenen in de toplaag (kg/m³)

Voor de significante golffhoogte H_s is gebruikgemaakt van de significante golffhoogte waarbij de steenzetting op de berm of kruin volgens Steentoets nog net niet bezwijkt: $H_{s,\text{bezwijk}}$. Deze bezwijkgolffhoogte kan in Steentoets eenvoudig bepaald worden met de menu-optie "Itereer H_s ".

2.2 Bijzondere instellingen van Steentoets2014

Met de optie "Itereer H_s " bepaalt Steentoets, uitgaand van een vooraf gekozen en ingevoerde golffsteilheid s_{op} , voor een groot aantal golffhoogtes of de bekleding wel of niet stabiel is. Daaruit volgt de grootste golffhoogte waarbij de bekleding nog nét stabiel is: de bezwijkgolffhoogte $H_{s,\text{bezwijk}}$.

De optie "Itereer H_s " kan gebruikt worden voor situaties met zowel vaste waterstanden als variërende waterstanden (zoals getij of stormopzet). In de huidige berekeningen is uitgegaan van vaste waterstanden. Aangezien Steentoets standaard in de achterliggende code is ingesteld voor situaties met variërende waterstanden is de keuze voor vaste waterstanden als volgt in de achterliggende code ingesteld: het statement "*vaste_waterstand = False*" is gewijzigd in "*vaste_waterstand = True*".

Na deze aanpassing is het bij bermen direct al mogelijk om te itereren met een vaste waterstand. Voor havendammen is de genoemde aanpassing echter nog niet voldoende. Om ook bij havendammen te kunnen itereren met een vaste waterstand is nog een extra aanpassing in de code benodigd: het statement “*Havendam_MWS_bu.h_MWS = Havendam_MWS_bu_Val.h_MWS*” is gewijzigd in “*Havendam_MWS_bu.h_MWS = h_toets_i*”. Daardoor berekent Steentoets de stabiliteit van de havendam niet achtereenvolgens voor een groot aantal verschillende waterstanden, waaruit per bekledingssegment de meest ongunstige situatie wordt gekozen, maar beschouwt Steentoets uitsluitend de waterstand die in Steentoets als toetspeil is ingevoerd.

Na de bovenstaande aanpassingen in de code zijn de berekeningen uitgevoerd voor de vaste waterstanden NAP+ 4,6 m; NAP+ 5,0 m en NAP+ 5,4 m. Voor de golfsteilheid is gekozen voor $s_{op} = 0,03$.

2.3 Resultaten van de berekeningen

De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in Figuur 2.1 tot en met Figuur 2.4. De dimensieloze belastingparameter $H_s/(\Delta D)$ is uitgezet op de verticale as. De horizontale as geeft de $cot\alpha$ van de berm/kruin. De blauwe lijnen hebben betrekking op de profielen met een berm en de rode lijnen hebben betrekking op de profielen met een kruin.

Verder hebben de gestippelde lijnen betrekking op berekeningen met een waterstand van NAP+ 4,6 m. De getrokken lijnen hebben betrekking op een waterstand van NAP+ 5,0 m, en de gestreepte lijnen op een waterstand van NAP+ 5,4 m.

De figuren geven achtereenvolgens de stabiliteit van de situaties zoals genoemd in Tabel 2.1.

Figuur	berm-/kruinbreedte [m]	de rand van de berm/kruin met een vast niveau op NAP+ 5,0 m
Figuur 2.1	1,8	zeewaartse rand
Figuur 2.2	6,0	zeewaartse rand
Figuur 2.3	1,8	landwaartse rand
Figuur 2.4	6,0	landwaartse rand

Tabel 2.1 Overzicht van de doorgerekende situaties per figuurnummer.

Opgemerkt wordt dat Steentoets onderscheid maakt tussen drie typen bermen: gewone, smalle en zeer smalle bermen. Van elk type berm wordt de stabiliteit op een iets andere wijze berekend. Van welk type berm sprake is, is afhankelijk van de significante golfhoogte:

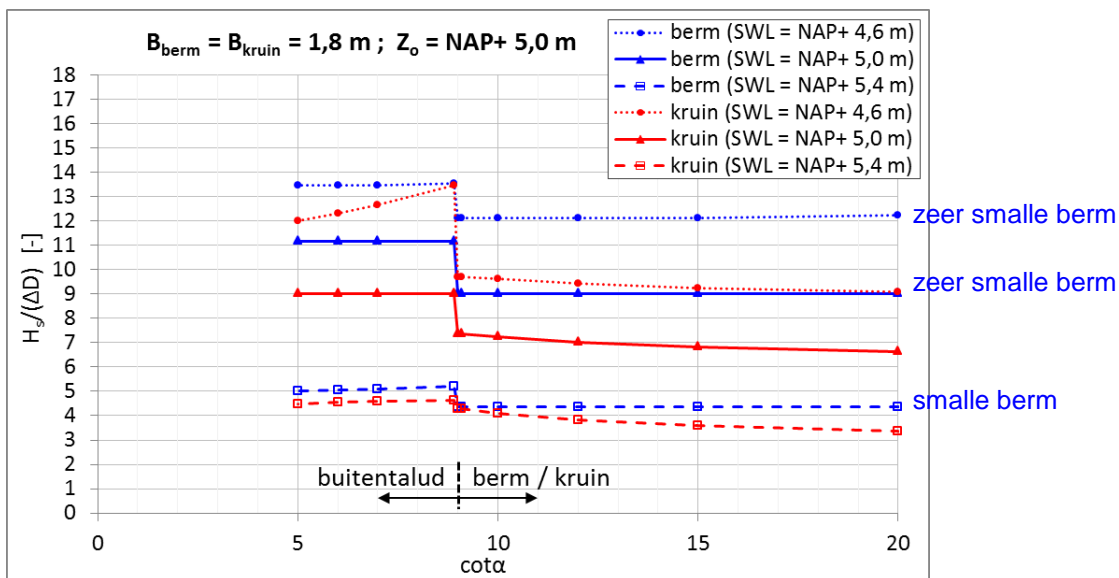
- Gewone berm: $B_{berm} \geq 2 \cdot H_s$
- Smalle berm: $H_s < B_{berm} < 2 \cdot H_s$
- Zeer smalle berm: $B_{berm} \leq H_s$

Doordat per stabiliteitsberekening (een iteratieproces met een groot aantal verschillende golfhoogtes) in elke iteratiestap de golfhoogte anders is, kan in elke iteratiestap sprake zijn van een ander type berm. Per geometrie geeft Steentoets uiteindelijk de resultaten van de iteratiestap met de laagste stabiliteit. Uit deze eindresultaten volgt met welk type berm Steentoets gerekend heeft in de maatgevende iteratiestap.

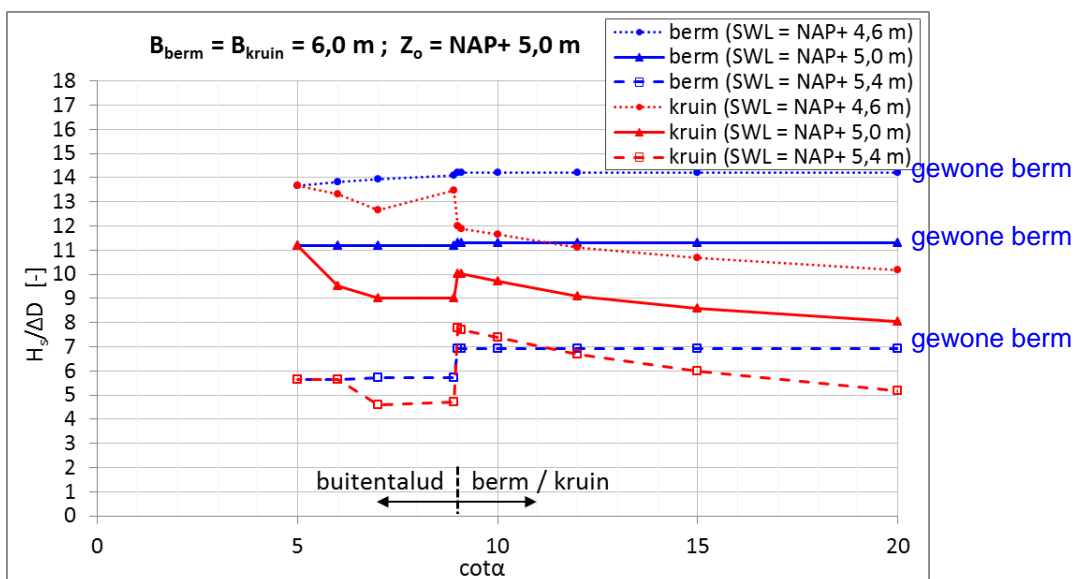
In Figuur 2.1 tot en met Figuur 2.4 is bij de resultaten van bermen (blauwe lijnen) aangegeven van welk type berm sprake is. Bij kruinen (rode lijnen) wordt geen onderscheid gemaakt in verschillende typen.

De stabiliteit van bermen en kruinen kan vrij hoog zijn, bijvoorbeeld als de bekleding (ver) boven SWL ligt. In alle gevallen is er op gelet dat de H_s bij bezwijken niet groter is dan 4 m, om te voorkomen dat Steentoets foutmeldingen gaat geven.

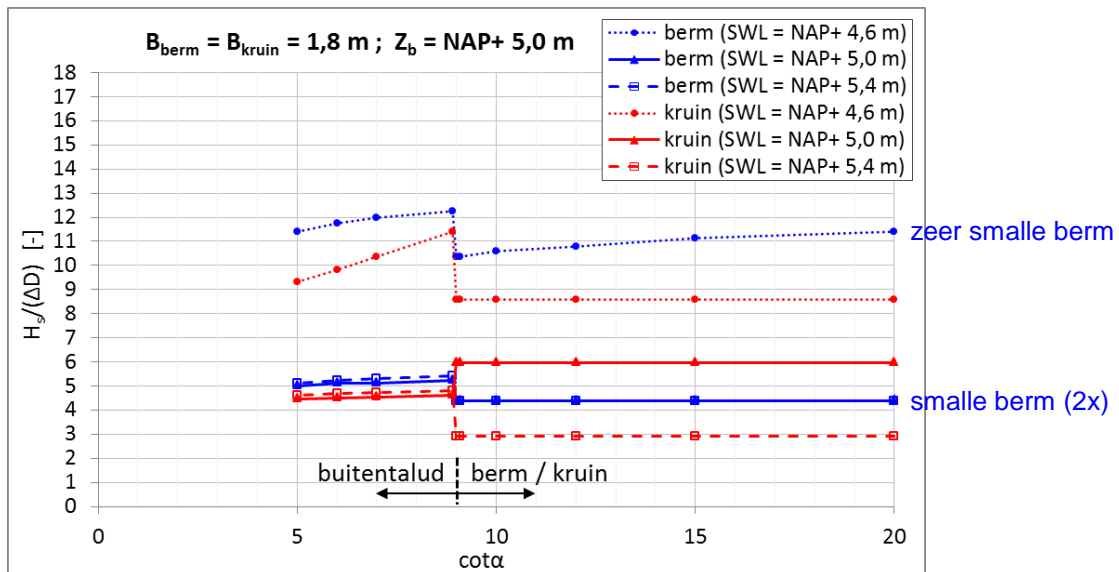
In het ideale geval zou er geen sprong in de stabiliteit moeten zitten bij $\tan\alpha = 1:9$ (overgang naar berekening als buitentalud) en zou het verschil tussen de stabiliteit van een steenzetting op een berm en op een kruin verklaarbaar moeten zijn. In Figuur 2.1 is dit ongeveer het geval voor de gestreepte lijnen, want daar is nauwelijks een discontinuïteit en de blauwe en rode gestreepte lijnen liggen dicht bij elkaar. In de andere gevallen wordt hier niet aan voldaan.



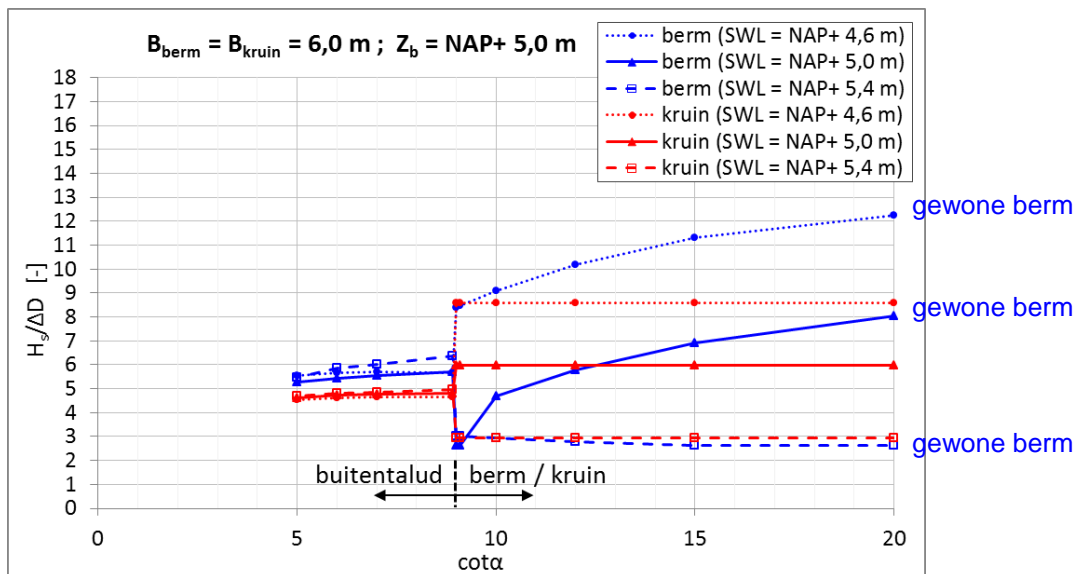
Figuur 2.1 De dimensieloze belastingparameter, uitgezet tegen de berm-/kruinhelling (berm-/kruinbreedte = 1,8 m; van alle bermen/kruinen ligt het niveau van de zééwaartse rand op NAP+ 5,0 m).



Figuur 2.2 De dimensieloze belastingparameter, uitgezet tegen de berm-/kruinhelling (berm-/kruinbreedte = 6,0 m; van alle bermen/kruinen ligt het niveau van de zééwaartse rand op NAP+ 5,0 m).



Figuur 2.3 De dimensieloze belastingparameter, uitgezet tegen de berm-/kruinhelling (berm-/kruinbreedte = 1,8 m; van alle bermen/kruinen ligt het niveau van de landwaartse rand op NAP+ 5,0 m).



Figuur 2.4 De dimensieloze belastingparameter, uitgezet tegen de berm-/kruinhelling (berm-/kruinbreedte = 6,0 m; van alle bermen/kruinen ligt het niveau van de landwaartse rand op NAP+ 5,0 m).

In Figuur 2.1 tot en met Figuur 2.4 zijn beide in paragraaf 1.2 genoemde aspecten duidelijk zichtbaar:

- **Verschil tussen bermen en kruinen:**
De figuren laten doorgaans een onverwacht groot verschil zien tussen de stabiliteit van bermen en kruinen met dezelfde breedte en hetzelfde niveau. Het verschil in $H_s/(\Delta D)$ tussen bermen en kruinen loopt soms op tot enkele tientallen procenten. Zie bijvoorbeeld de blauwe versus de rode stippellijn in Figuur 2.1, bij $\cot\alpha = 20$. Voor de berm geldt $H_s/(\Delta D) = 12,2$ terwijl voor de kruin geldt dat $H_s/(\Delta D) = 9,1$. De stabiliteit van een kruin is in dat geval volgens Steentoets ongeveer 28% lager dan de stabiliteit van een vergelijkbare berm.

In veel gevallen is het verschil in stabiliteit echter minder groot. In enkele gevallen is de stabiliteit van de kruin zelfs iets hoger dan die van de vergelijkbare berm.

- *Discontinuïteit ten aanzien van de taludhelling:*
De figuren laten duidelijk zien dat de stabiliteit van bermen en kruinen volgens Steentoets doorgaans plotseling hoger of lager wordt als de taludhelling toeneemt van 1:9 naar 1:8,9. Dit verschil in stabiliteit is niet logisch aangezien de geometrie vrijwel gelijk is.

Het geconstateerde verschil tussen bermen en kruinen en de discontinuïteit ten aanzien van de taludhelling zijn nader onderzocht in hoofdstuk 3. Op basis van de bevindingen is in dat hoofdstuk tevens een aanpassing aan de formules voorgesteld.

Merk op dat in de figuren de blauwe en rode lijnen bij een steilere helling dan 1:9 doorgaans vrij ver uit elkaar liggen, ondanks dat de 'berm' en 'kruin' voor die taludhellingen beide worden berekend als onderdeel van het buitentalud. Dit verschil wordt veroorzaakt doordat Steentoets bij havendammen op het buitentalud rekent met de stabiliteit van losse blokken (zonder klemming) als het hoogste punt van de havendam lager ligt dan $0,5 \cdot H_s$ boven de beschouwde waterstand, ofwel, als $h_c < (0,5 \cdot H_s)$. Als de constructie geen havendam is (blauwe lijnen), wordt in die gevallen op het buitentalud wel gerekend met klemming.

Als bij zowel de blauwe als rode lijn met klemming wordt gerekend, liggen de lijnen (vrijwel) op elkaar. Een klein verschil tussen de lijnen is wel mogelijk als gevolg van een andere stapgrootte in het iteratieproces in Steentoets.

Ook het opvallende verloop van de rode stippellijn in Figuur 2.2 tussen $\cot\alpha = 5$ en $\cot\alpha = 8,9$ is het gevolg van rekenen met en zonder klemming.

3 Analyse en aanpassingsvoorstel

In het onderhavige hoofdstuk wordt het in hoofdstuk 2 geconstateerde verschil tussen bermen en kruinen en de discontinuïteit ten aanzien van de taludhelling nader onderzocht. Paragraaf 3.1 richt zich op het verschil tussen bermen en kruinen. Paragraaf 3.2 richt zich op de discontinuïteit ten aanzien van de taludhelling.

3.1 Verschil tussen bermen en kruinen

3.1.1 Algemeen

Zoals in Figuur 2.1 tot en met Figuur 2.4 is te zien, is er volgens Steentoets doorgaans een vrij groot verschil tussen de stabiliteit van bermen en kruinen, ondanks een gelijke breedte en hetzelfde niveau.

Hoewel vanwege de vergelijkbare breedte en hetzelfde niveau van de bermen en kruinen een min of meer vergelijkbare stabiliteit verwacht zou worden, is dat volgens Steentoets niet het geval. De stabiliteit van kruinen is volgens Steentoets doorgaans een stuk lager dan de stabiliteit van vergelijkbare bermen. Dat houdt in dat kruinen doorgaans dus strenger worden beoordeeld dan bermen.

Het voorgaande leidt tot de vraag of de stabiliteit van bermen en kruinen ook in werkelijkheid zoveel van elkaar verschillen. Daarnaast leidt het tot de vraag of kruinen niet onterecht te streng worden beoordeeld.

Daarvoor is in paragraaf 3.1.2, aan de hand van de resultaten van Deltagootproeven met een kruin, gekeken naar de veiligheid van de daaruit voortvloeiende stabiliteitsformules. Wanneer bijvoorbeeld blijkt dat de stabiliteitsformules voor kruinen zeer veilig zijn, kan worden overwogen de formules voor kruinen enigszins te versoepelen, om daarmee beter aan te sluiten op de stabiliteitsformules voor bermen.

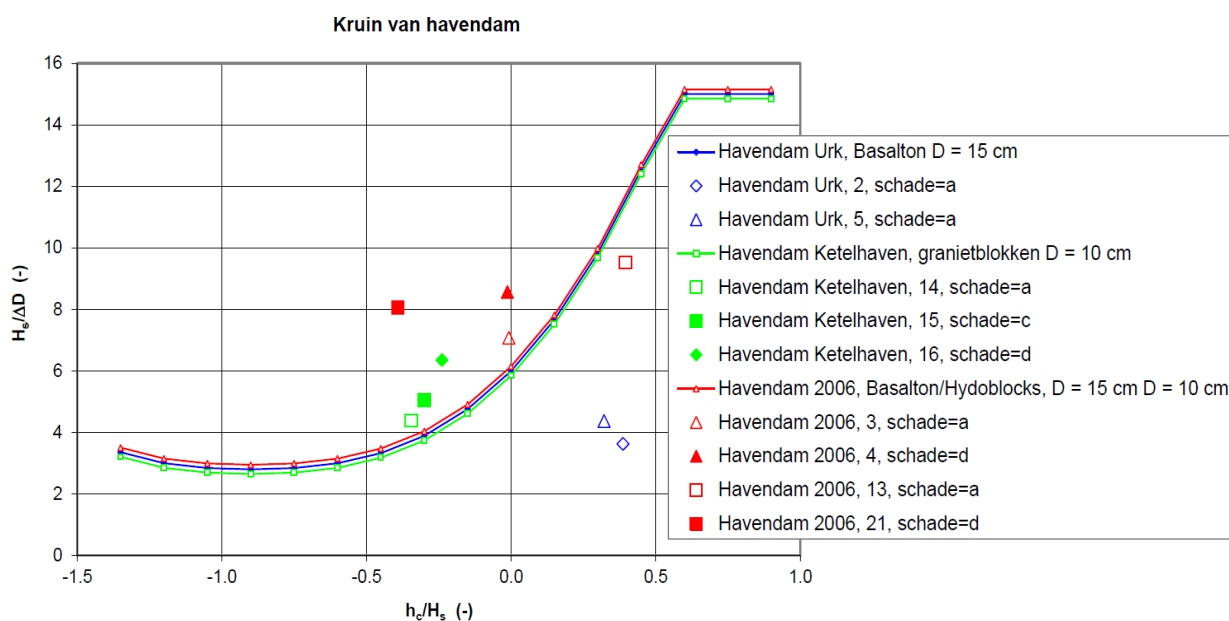
Omgekeerd kan worden overwogen de formules voor bermen aan te passen. Als bijvoorbeeld blijkt dat het voordehand ligt om de formules voor bermen iets strenger te maken, heeft dat als resultaat dat de blauwe lijnen in Figuur 2.1 tot en met Figuur 2.4 iets lager komen te liggen, waardoor ze beter overeenkomen met de formules voor kruinen. De relatie tussen de stabiliteitsformules voor bermen en de resultaten van Deltagootproeven is beschouwd in paragraaf 3.1.3.

3.1.2 Veiligheid van de stabiliteitsformules voor kruinen

De veiligheid van de formules voor kruinen van havendammen is onderzocht aan de hand van Klein Breteler & Mourik (2014). In dat rapport is Steentoets2014 gevalideerd door te onderzoeken in hoeverre de resultaten van Steentoets2014 aansluiten op de beschikbare resultaten van grootschalig modelonderzoek met steenzettingen. De validatie is uitgevoerd door steeds zowel de modelproefresultaten als de Steentoetsresultaten weer te geven in één grafiek en te kijken of de lijn aan de goede kant ligt van de meetpunten die betrekking hebben op proeven met schade.

De figuur uit Klein Breteler & Mourik (2014), die betrekking heeft op de kruin van havendammen, is in het onderhavige rapport weergegeven in Figuur 3.1. Op de verticale as is de dimensieloze stabiliteitsparameter $H_s/(\Delta D)$ uitgezet. Op de horizontale as is de dimensieloze relatieve kruinhoogte h_c/H_s uitgezet. De relatieve kruinhoogte h_c betreft het niveau van de kruin ten opzichte van de stilwaterlijn en is positief als de kruin hoger is dan de stilwaterlijn. Wanneer de kruin niet volledig horizontaal is, maar enigszins hellend, wordt de relatieve kruinhoogte gebaseerd op de hoogste rand van de kruin.

In Figuur 3.1 is gebruikgemaakt van de resultaten van meerdere modelonderzoeken. De blauwe en groene meetpunten hebben betrekking op modelproeven welke uitvoerig zijn beschreven in Klein Breteler (2002). De rode meetpunten hebben betrekking op modelproeven welke zijn beschreven in Kuiper e.a. (2006). Voor uitgebreide informatie over deze modelproeven wordt verwezen naar de genoemde rapportages.



Figuur 3.1 De resultaten van modelproeven met een havendamkruin (meetpunten) in vergelijking met de resultaten van Steentoets2014 (lijnen). Bron: Klein Breteler & Mourik (2014).

De lijnen geven als functie van h_c/H_s de hoogste waarde van $H_s/(\Delta D)$ waar nog net het toetsresultaat 'goed' verkregen wordt. De lijnen in deze figuren zijn steeds berekend met Steentoets2014. De meetpunten in de figuren zijn de meetresultaten uit modelonderzoek. Hierbij is de volgende systematiek gehanteerd:

- open symbolen: schadecategorie a en b (zie onderstaand).
- dichte symbolen: schadecategorie c en d.
- symbolen en lijnen van dezelfde kleur horen bij elkaar.

De genoemde schadecategorieën, bepaald in meetseries met toenemende golfhoogte, zijn als volgt gedefinieerd:

- a) De grootste golfhoogte (H_s) waarbij een verplaatsing van een blok ten opzichte van een naastliggend blok kleiner dan 10% van de dikte van het blok optrad. In de praktijk was bij deze golfhoogte doorgaans nog geen waarneembare schade aanwezig. Vooral wanneer zelfs na afloop van een modelproef nog geen schade was ontstaan, heeft dit meetpunt gewoonlijk betrekking op een verplaatsing van ca. 0% (geen schade).

- b) De kleinste golfhoogte (H_s) waarbij een verplaatsing van een blok ten opzichte van een naastliggend blok tussen 10% en 20% van de dikte van het blok optrad.
- c) De kleinste golfhoogte (H_s) waarbij een verplaatsing van een blok ten opzichte van een naastliggend blok tussen 20% en 50% van de dikte van het blok optrad.
- d) De kleinste golfhoogte (H_s) waarbij een verplaatsing van een blok ten opzichte van een naastliggend blok groter dan 50% van de dikte van het blok optrad (meestal is het blok dan door de golven geheel uit de bekleding gelicht).

De schadecategorieën a en b worden níet beschouwd als schade, terwijl de schadecategorieën c en d wél als schade worden beschouwd. In het ideale geval zouden de berekende lijnen overeen moeten komen met de proefresultaten uit de schadecategorie c.

In Figuur 3.1 is te zien dat de formules voor kruinen goed aansluiten op de metingen. Alle meetpunten met schade liggen boven de lijnen, terwijl de meeste meetpunten zonder schade onder de lijnen liggen.

Het meetpunt met schadecategorie c (dichte groene vierkantje) ligt net boven het resultaat van Steentoets. De meetpunten met schadecategorie d liggen wat verder boven de lijn, maar niet opmerkelijk ver.

Uit Figuur 3.1 blijkt dat de stabiliteitsformules voor kruinen van havendammen niet overdreven veilig zijn ten opzichte van de proefresultaten, en dat er op basis daarvan geen reden is om de formules voor kruinen van havendammen te versoepelen. Deze constatering geldt voor de onderzochte constructies, die een horizontale kruin hadden. Voor afwijkende gevallen (kruinen met een lichte helling) is er wel de vrijheid om de formules eventueel op basis van engineering judgement aan te passen.

3.1.3 Veiligheid van de stabiliteitsformules voor bermen

Ook voor bermen is de veiligheid van de stabiliteitsformules onderzocht aan de hand van Klein Breteler & Mourik (2014). De figuur uit Klein Breteler & Mourik (2014), die betrekking heeft op bermen, is weergegeven in Figuur 3.2. Op de verticale as is de dimensieloze stabiliteitsparameter $H_s/(\Delta D)$ uitgezet. Op de horizontale as staat de brekerparameter ξ_{om} , gebaseerd op de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$. Voor de brekerparameter geldt:

$$\xi_{om} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_s}{\frac{g}{2\pi} \cdot T_{m-1,0}^2}}} \quad (3.1)$$

Met:

ξ_{om} = brekerparameter, op basis van de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ (-)

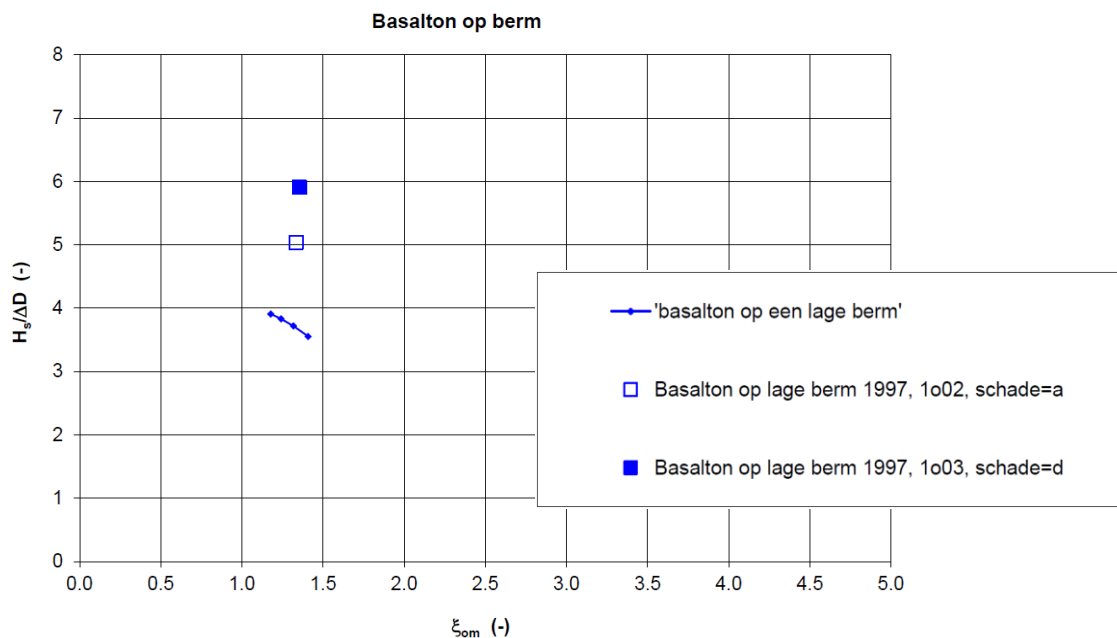
α = taludhelling (°)

g = versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)

$T_{m-1,0}$ = spectrale golfperiode (s)

In Figuur 3.2 is gebruikgemaakt van de resultaten van Deltagootproeven met een berm (Smith e.a., 2000). De berm had een breedte van 5 m en een helling van 1:15. De voorrand van de berm lag circa 1 m onder de stilwaterlijn. Tijdens het onderzoek zijn meerdere proeven uitgevoerd met een stap voor stap grotere significante golfhoogte, totdat schade optrad. De significante golfhoogte van de laatste proef was $H_s = 1,22$ m, waarmee de berm

ruim binnen de categorie 'gewone berm' valt (want $B_{\text{berm}} \geq 2 \cdot H_s$, zie paragraaf 2.3). Ook de blauwe lijn met de resultaten van Steentoets2014 heeft betrekking op een gewone berm. De bezwijkgolffhoogte volgens Steentoets is in dit bereik immers 0,73 m tot 0,81 m.



Figuur 3.2 De resultaten van modelproeven met een berm (meetpunten) in vergelijking met de resultaten van Steentoets2014 (lijnen). Bron: Klein Breteler & Mourik (2014).

In Figuur 3.2 is te zien dat de lijn ruim onder de meetpunten doorgaat en dat er geen reden is om de lijn voor bermen te verlagen. Deze constatering geldt uiteraard alleen voor de onderzochte constructie: een vrij diep onder water liggende gewone berm met een helling van 1:15. Voor afwijkende gevallen (steilere bermen) is er wel de vrijheid om de formules eventueel op basis van engineering judgement aan te passen.

3.1.4 Vergelijking bermen en kruinen

Kennelijk is niet alleen volgens Steentoets, maar ook in werkelijkheid de stabiliteit van kruinen lager dan de stabiliteit die bij bermen verwacht wordt. Het is aannemelijk dat dit verschil in stabiliteit wordt veroorzaakt door enkele belangrijke fysische verschillen:

- **Golfneerloop bij berm:**
Wanneer bermen en kruinen weliswaar overeenkomen qua niveau en breedte, is desondanks de totale geometrie van de waterkering duidelijk anders. Bij een berm is sprake van een talud boven de berm, terwijl dat bij de kruin van een havendam niet het geval is. Wanneer golven over een berm slaan, veroorzaakt het talud erboven vervolgens golfneerloop. Bij een kruin stroomt het water daarentegen aan de achterzijde van de havendam naar beneden en is aan de zeewaartse zijde nauwelijks sprake van golfneerloop. Het ligt voordehand dat de mate van golfneerloop invloed heeft op de hydraulische belasting, en daardoor ook op de stabiliteit.
- **Klemming:**
Het ligt voordehand dat de klemming tussen zetstenen op de kruin van een havendam iets geringer is dan op een berm. Een havendam is aan beide zijden omgeven door water, waardoor het inwasmateriaal dat eenmaal is uitgespoeld, niet meer terugkomt op

het talud. Bij een berm is dat wel het geval, waardoor het uitspoelen van inwasmateriaal naar verwachting veel trager gaat.

Bovendien geldt dat een havendammenkruin aan de havenzijde minder goed is opgesloten dan een berm aan de landzijde. Hierdoor is de steenzetting op een kruin iets gevoeliger voor 'los liggen' dan op een berm, die slechts aan één zijde is omgeven door water en aan één zijde wordt ondersteund door het dijklichaam. De iets grotere gevoeligheid voor uitzakken kan ertoe leiden dat stenen op de kruin iets losser (minder geklemd) komen te liggen dan op een berm.

In Steentoets wordt voor zowel bermen als kruinen gerekend zonder klemming. Hoewel er volgens bovenstaande redenering dus fysisch een verschil in stabiliteit kan zijn door verschil in klemming, is dit niet aanwezig in Steentoets. De stabiliteitsverschillen in Steentoets hebben een andere achtergrond.

In de onderhavige paragraaf is gebleken dat de formules voor kruinen niet overdreven veilig zijn en die voor bermen niet overdreven scherp, waardoor er geen reden is om de formules aan te passen, om daarmee de stabiliteitsformules voor bermen en kruinen beter op elkaar te laten aansluiten. Vanwege enkele belangrijke fysische verschillen tussen bermen en kruinen is het aannemelijk dat de geconstateerde verschillen in de stabiliteit van bermen en kruinen ook in werkelijkheid aanwezig zijn.

Deze constatering geldt voor de range van constructies die onderzocht zijn: horizontale kruinen en bermen met een talud van 1:15 en flauwer. Dit zijn de meest voorkomende constructies in de praktijk. Voor steilere bermen en kruinen is er geen referentie aan Deltagootproeven en is de stabiliteit dus onzekerder. In de volgende paragraaf wordt hier aandacht aan besteed.

3.2 Discontinuïteit ten aanzien van de taludhelling

Zoals in paragraaf 2.3 is geconstateerd, wordt de stabiliteit van bermen en kruinen volgens Steentoets doorgaans plotseling hoger of lager als de taludhelling toeneemt van 1:9 naar 1:8,9. Aangezien de geometrie daarbij nauwelijks verandert, is dat verschil in stabiliteit niet logisch. Het ligt voor de hand om Steentoets zodanig aan te passen dat die sprong wordt vervangen door een geleidelijke overgang.

Zoals in paragraaf 1.1 is uitgelegd, onderscheiden bermen en kruinen zich in Steentoets van gewone taluds door de helling van het segment. Steentoets rekent pas met de formules voor kruinen of met de formules voor bermen als de helling flauwer is dan of gelijk is aan 1:9 ($\tan\alpha \leq 1:9$). Als het talud steiler is ($\tan\alpha > 1:9$), dan beschouwt Steentoets het segment als onderdeel van een gewoon buitentalud.

Er wordt dus óf gerekend met formules voor bermen, óf met de formules voor kruinen, óf met de formules voor buitentaluds. Elk van deze sets formules is gebaseerd op het gemeten stijghoogteverloop op de steenzetting, numerieke berekeningen op basis van de lekentheorie en Deltagootproeven. Er is daarbij gewerkt met taludhellingen binnen het voornaamste bereik van in werkelijkheid voorkomende taludhellingen: horizontale kruinen, bermen met een talud van 1:15 en flauwer, en buitentaluds met een helling van orde 1:3 tot 1:4.

Binnen deze bereiken zijn de ontwikkelde formules goed afgestemd op de meetresultaten, maar daarbuiten is dat niet mogelijk en zijn de formules destijds zo goed mogelijk doorgetrokken, zonder daar heel diep over na te denken.

In Figuur 2.1 tot en met Figuur 2.4 is echter te zien dat deze doorgetrokken formules niet altijd goed op elkaar aansluiten. Omdat het stabiliteitsverloop bij taludhellingen tussen orde 1:4 en 1:15 is gebaseerd op simpele aannames en er geen meetresultaten beschikbaar zijn, is het mogelijk om het rekenmodel daar iets aan te passen op basis van engineering judgement, zodanig dat de formules op elkaar aansluiten zonder discontinuïteit.

In Figuur 2.1 tot en met Figuur 2.4 valt op dat de sprong bij een taludhelling van 1:9 zowel omhoog als omlaag gaat. Dat maakt het zeer gecompliceerd om de achterliggende formules zodanig aan te passen dat ze in alle gevallen precies op elkaar aansluiten. Daarom wordt aanbevolen om in een bepaald bereik rond de overgang tussen buitentalud en berm of kruin te interpoleren tussen de stabiliteit van een gewoon buitentalud aan de ene kant van dat bereik en de stabiliteit van een berm of kruin aan de andere kant van dat bereik. Het wordt aanbevolen om te interpoleren als de taludhelling tussen 1:6 en 1:12 ligt. Dit bereik is groot genoeg om een geleidelijke overgang te realiseren, en klein genoeg om te voorkomen dat de Steentoetsresultaten worden gewijzigd binnen het bereik waarin proefresultaten beschikbaar zijn.

Het voorgaande leidt tot de volgende aanbevolen aanpassing aan Steentoets: wanneer voor de taludhelling geldt dat $1:6 < \tan\alpha < 1:12$, dan wordt eerst de stabiliteit berekend van het gewone buitentalud met een helling van 1:6 en de stabiliteit van de berm of kruin met een helling van 1:12. Door middel van lineaire interpolatie (op basis van $\cot\alpha$) wordt vervolgens de stabiliteit bepaald voor de ingevoerde taludhelling.

De uitwerking van de aanpassing in Steentoets is verschillend voor bermen en kruinen:

- *Kruinen:*
Als $1:6 < \tan\alpha < 1:12$, dan moet in de code van Steentoets eerst de taludhelling worden overruled door $\tan\alpha = 1:6$, zodat eerst de stabiliteit berekend wordt van een gewoon buitentalud met een helling van 1:6. Vervolgens dient een berekening te worden gemaakt met de relatief korte en eenvoudige formules voor de kruin van havendammen, uitgaand van een helling van 1:12. Tussen beide resultaten moet vervolgens lineair worden geïnterpoleerd. De beschreven aanpassing voor de kruin van havendammen is relatief eenvoudig en heeft nauwelijks invloed op de rekentijd van Steentoets. Deze aanpassing wordt zonder meer aanbevolen.
- *Bermen:*
Bij het berekenen van de stabiliteit van een berm wordt in Steentoets grotendeels gedaan alsof sprake is van een gewoon talud. Slechts een kleine aanvullende berekening wordt uitgevoerd voor het bepalen van de bermfactor, die vervolgens de stabiliteit verhoogt of verlaagt (de bermfactor kan zowel groter als kleiner zijn dan 1). Voor bermen wordt dus het gecompliceerde en uitgebreide rekenproces voor gewone buitentaluds doorgerekend.
Als $1:6 < \tan\alpha < 1:12$ en de stabiliteit voor zowel 1:6 als 1:12 doorgerekend moet worden, is het noodzakelijk dit hele rekenproces tweemaal door te rekenen. Dit vraagt om een gecompliceerde aanpassing aan Steentoets. Ook heeft dit een verdubbeling van de rekentijd tot gevolg als $1:6 < \tan\alpha < 1:12$. Gelet op de grootte van de discontinuïteiten wordt desondanks aanbevolen de beschreven aanpassing ook voor bermen door te voeren. De verdubbeling van de rekentijd zal slechts zelden optreden, omdat er weinig steenzettingen zijn met een taludhelling tussen 1:6 en 1:12, waardoor dit nadeel acceptabel wordt gevonden.

4 Samenvatting en conclusies

In het kader van de toetsing van de waterkeringen, zoals voorgeschreven in de Waterwet, dienen steenzettingen periodiek getoetst te worden. In de VTV2006 is vastgelegd dat dit moet gebeuren met het Excel-programma Steentoets (Klein Breteler, 2014). Daarnaast kan Steentoets gebruikt worden als hulpmiddel voor het ontwerpen van steenzettingen.

In Steentoets onderscheiden kruinen van havendammen en buitenbermen zich van gewone taluds door de helling van het segment. Steentoets rekent pas met de formules voor kruinen of met de formules voor buitenbermen als de helling flauwer is dan of gelijk is aan 1:9 ($\tan\alpha \leq 1:9$). Als het talud steiler is ($\tan\alpha > 1:9$), dan beschouwt Steentoets het segment als onderdeel van een normaal buitentalud.

Bij het opstellen van een advies over strekdammen zijn recent twee opmerkelijke aspecten geconstateerd ten aanzien van de door Steentoets berekende stabiliteit van kruinen en bermen:

- Volgens Steentoets is er soms een onverwacht groot verschil tussen de stabiliteit van de kruin van een havendam en de stabiliteit van een buitenberm, ondanks een gelijke breedte en hetzelfde niveau.
- De stabiliteit van kruinen en bermen met een helling van 1:9 is volgens Steentoets soms duidelijk anders dan wanneer de helling net iets steiler is dan 1:9, doordat het dan als onderdeel van het buitentalud wordt berekend. Deze discontinuïteit in de stabiliteit is niet logisch aangezien de geometrie vrijwel hetzelfde is.

In het onderhavige rapport zijn dit verschil en deze discontinuïteit gevisualiseerd aan de hand van enkele cases (zie paragraaf 2.3) en is onderzocht waardoor deze optreden, met als doel een bepaalde aanpassing aan Steentoets voor te stellen, op basis van engineering judgement, waardoor een betere aansluiting tussen de formules verkregen wordt.

Verskil tussen bermen en kruinen:

In paragraaf 3.1 is eerst het geconstateerde verschil tussen bermen en kruinen beschouwd. Steentoets kent doorgaans een hogere stabiliteit toe aan bermen dan aan kruinen met een gelijke breedte en hetzelfde niveau. Omdat dit verschil soms onverwacht groot is, is onderzocht of dit verschil verklaarbaar is, en of er reden is de formules voor kruinen iets soepeler te maken, of de formules voor bermen iets strenger, om daarmee de stabiliteitsformules voor bermen en kruinen beter op elkaar te laten aansluiten.

Op basis van de verhouding tussen Steentoetsresultaten en meetresultaten van Deltagootproeven is gebleken dat er geen reden is om de formules aan te passen. Vanwege enkele belangrijke fysische verschillen tussen bermen en kruinen is het aannemelijk dat de geconstateerde verschillen tussen de stabiliteit van bermen en kruinen ook in werkelijkheid aanwezig zijn.

Deze constatering geldt voor de range van constructies die in de Deltagoot onderzocht zijn: horizontale kruinen en bermen met een talud van 1:15 en flauwer. Dit zijn de meest voorkomende constructies in de praktijk. Voor steilere bermen en kruinen is er geen referentie aan Deltagootproeven en is de stabiliteit dus onzekerder.

Discontinuïteit ten aanzien van de taludhelling:

In paragraaf 3.2 is vervolgens de discontinuïteit in het stabiliteitsverloop bij $\tan\alpha = 1:9$ beschouwd. In die paragraaf is geconcludeerd dat de formules voor bermen, kruinen en gewone buitentaluds goed onderbouwd zijn voor de taludhellingen die in modelonderzoek gehanteerd zijn: horizontale kruinen, bermen met een talud van 1:15 en flauwer, en buitentaluds met een helling van orde 1:3 tot 1:4. Binnen deze bereiken zijn de ontwikkelde formules goed afgestemd op de meetresultaten, maar daarbuiten is dat niet mogelijk en zijn de trends met de formules destijds zo goed mogelijk doorgetrokken, zonder daar heel diep over na te denken. Omdat het stabiliteitsverloop bij taludhellingen tussen orde 1:4 en 1:15 is gebaseerd op simpele aannames en er geen meetresultaten beschikbaar zijn, is het mogelijk om het rekenmodel daar iets aan te passen op basis van engineering judgement, zodanig dat de formules beter op elkaar aansluiten.

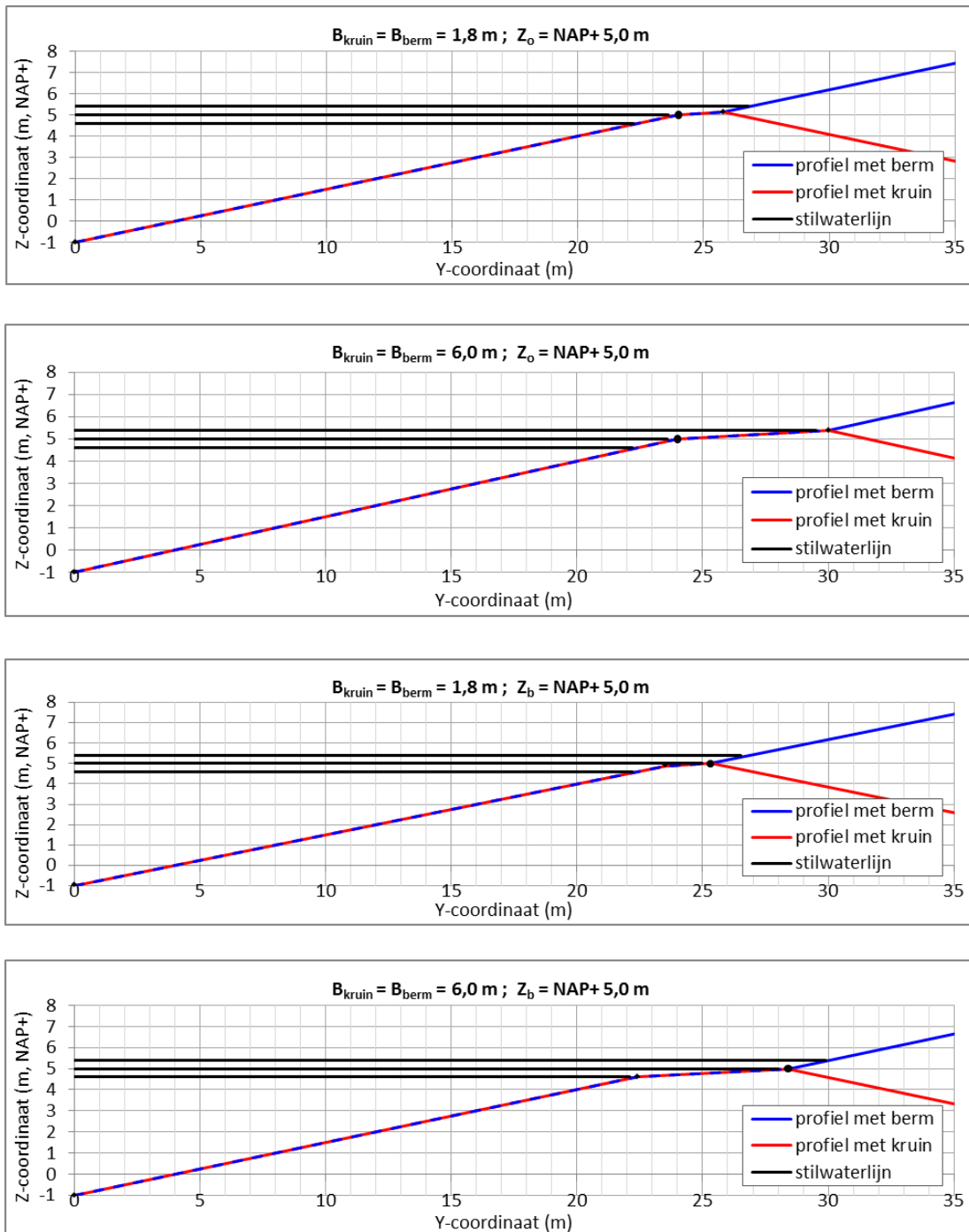
De volgende aanpassing aan Steentoets wordt aanbevolen voor zowel bermen als kruinen: voor taludhelling tussen 1:6 en 1:12 wordt aanbevolen lineair te interpoleren (op basis van $\cot\alpha$) tussen de stabiliteit van het gewone buitentalud met een helling van 1:6 en de stabiliteit van de berm of kruin met een helling van 1:12.

Voor kruinen is deze aanpassing relatief eenvoudig in Steentoets door te voeren. Voor bermen is de aanpassing aan Steentoets gecompliceerd, en ook heeft dit voor bermen een verdubbeling van de rekentijd tot gevolg als $1:6 < \tan\alpha < 1:12$. Gelet op de grootte van de discontinuïteiten wordt desondanks aanbevolen de beschreven aanpassing ook voor bermen door te voeren. De verdubbeling van de rekentijd zal slechts zelden optreden, omdat er weinig steenzettingen zijn met een taludhelling tussen 1:6 en 1:12, waardoor dit nadeel acceptabel wordt gevonden.

5 Referenties

- Klein Breteler, M (2002), *Stabiliteit van westelijke havendammen van Urk en Ketelhaven, Deltagootproeven op kruin en binnentalud*, WL | Delft Hydraulics, verslag H 4083, juli 2002
- Klein Breteler, M. (2014), *Documentatie Steentoets2014, Excel-programma voor het berekenen van de stabiliteit van steenzettingen*, Deltares, rapport 1208045-009-HYE-0008, versie 14.1.1.1, juli 2014
- Klein Breteler, M. en G.C. Mourik (2014), *Validatie van Steentoets2014, Rekenmodel voor het beoordelen van de stabiliteit van steenzettingen*, Deltares, rapport 1208045-009-HYE-0011, versie 3.1, februari 2014
- Kuiper, C., M. Klein Breteler, L.N. Booster en W. Eysink (2006), *Stabiliteit van gezette steenbekledingen op havendammen, Afleiding van een verbeterde toetsmethode voor de toplaag*, WL | Delft Hydraulics, rapport H4432, versie 5, februari 2006
- Smith, G.M., J. Wouters en M. Klein Breteler (2000), *Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen, Meetverslag van Deltagootonderzoek*, WL | Delft Hydraulics, verslag H3272, februari 2000

A De in Steentoets doorgerekende dwarsprofielen



Figuur A.1 De in Steentoets doorgerekende dwarsprofielen. In de 1^e en 2^e figuur is de zééwaartse rand van de kruin of berm steeds gelijk gehouden op NAP+ 5,0 m, terwijl in de 3^e en 4^e figuur de lándwaartse rand van de kruin of berm gelijk is gehouden op NAP+ 5,0 m. Daarnaast verschillen de profielen in berm-/kruinbreedte (1,8 m in de 1^e en 3^e figuur en 6,0 m in de 2^e en 4^e figuur).