

Toetsmethode voor Havendammen

M. Klein Breteler

juli 2002

Inhoud

1	Inleiding	1
2	Typen havendammen.....	3
3	Vergelijking met Leidraad Toetsen op Veiligheid	4
4	Kwantificering bezwijkmechanismen van bekledingen	10
4.1	Steenzettingen.....	10
4.1.1	Kruin ver boven de waterlijn	11
4.1.2	Kruin ruim boven de waterlijn.....	11
4.1.3	Kruin op of boven de waterlijn.....	14
4.1.4	Kruin iets onder de waterlijn	20
4.1.5	Kruin ruim onder de waterlijn	22
4.1.6	Kruin ver onder de waterlijn.....	24
4.1.7	Rekenvoorbeelden	24
4.2	Asfaltbekledingen	25
4.2.1	Hoge havendammen met asfaltbekleding	26
4.2.2	Havendammen met asfaltbekleding met kruin rond SWL.....	29
4.2.3	Havendammen met asfaltbekleding met kruin ruim onder SWL....	30
4.3	Grasbekledingen	31
4.4	Breuksteen	32
4.4.1	Kruin ver boven de waterlijn	32
4.4.2	Kruin net boven of op de waterlijn	34
4.4.3	Kruin onder de waterlijn.....	35
4.5	Categoriën als functie van relatieve kruinhoogte.....	35
5	Toetsmethodiek	37
5.1	Kruinhoogte (HT)	37
5.2	Damlichaam: Afschuiving buitentalud (LB).....	38
5.3	Dijklichaam: Macrostabieliteit binnenwaarts (STM)	38
5.4	Damlichaam: Microstabieliteit (STU)	38
5.5	Voorland: Afschuiving (AF) en zettingsvloeiing (ZV)	38
5.6	Stabiliteit toplaag van bekleding (BKC).....	39

5.6.1	Afschuiving en materiaaltransport.....	39
5.6.2	Steenzettingen.....	39
5.6.3	Asfalt	42
5.6.4	Gras.....	47
5.6.5	Breuksteen	48
5.7	Reststerkte bekleding (BKR).....	50
5.8	Niet waterkerende elementen.....	50
5.9	Verticale havendammen of verticale elementen in havendammen	51
6	Literatuur	52

Bijlagen

A000	Golftransmissie over havendammen	A-1
-------------	---	------------

Symbolenlijst

A_e	=	erosie oppervlak rond de waterlijn (m^2)
A_L	=	het volume lucht (m^3)
A_{tot}	=	het totale volume onder de bekleding, boven de lijn ter hoogte van h_d (m^3)
B	=	kruinbreedte (m)
c	=	constante die afhankelijk is van het type steenzetting en de vorm van de dam (-)
c_1, c_2	=	constanten, afhankelijk van type bekleding (-)
D	=	dikte van de toplaag (m)
D_{n50}	=	nominale diameter van de breuksteen dat door 50% wordt overschreden (m)
g	=	versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)
h	=	waterdiepte voor de dam (m)
h_c	=	kruinhoogte ten opzichte van de stilwaterlijn (m)
h_d	=	het niveau aan de onderzijde van de bekleding waar de dichte bekleding begint (hoogste van binnen- en buitentalud), ten opzichte van de stilwaterlijn (m)
h_L	=	niveau van de freatische lijn ten opzichte van de stilwaterlijn (m)
h_{toets}	=	toetspeil (m)
H_s	=	significante golfhoogte bij de teen van de dam (m)
K_h	=	waterdieptefactor (-)
K_s	=	hellingfactor (-)
K_T	=	turbulentiefactor (-)
N	=	aantal golven (-)
P	=	permeability factor (0.1 - 0.6) (-)
P_i	=	druk in punt i (Pa)
P_L	=	luchtdruk onder de kruin ten opzichte van de atmosferische druk (Pa)
S_{op}	=	golfsteilheid (-) = $H_s/(1,56T_p^2)$
S	=	schade parameter, $S = A_e/D_{n50}$ (-)
T_p	=	golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
u	=	maximale snelheid op de kruin (m/s)
u_{cr}	=	stroomsnelheid bij begin schade (m/s)
u_{max}	=	hoogst gemeten snelheid op de kruin (m/s)
v	=	voortplanting snelheid van de golven (m/s)
$Z_{2\%}$	=	golfploophoogte die door twee procent van de golven overschreden wordt (m)
α	=	taludhelling ($^\circ$)
Δ	=	relatieve dichtheid van beton in steenzetting (-)
ϕ_b	=	hoogte van het grootste stijghoogtefront op de kruin (m)
ϕ_c	=	stabiliteitsfactor (-)
ψ_{cr}	=	kritieke schuifspanningsfactor (-)
ξ_{op}	=	brekerparameter (-) = $\tan\alpha/\sqrt{(H_s/(1,56T_p^2))}$
ξ_m	=	brekerparameter gebaseerd op T_m : $\tan\alpha/\sqrt{(H_s/(1,56T_m^2))}$ (-)
ρ	=	soortelijke massa van het water (kg/m^3)
ρ_s	=	soortelijke massa van breuksteen (kg/m^3)

1 Inleiding

In Nederland zijn er vele havendammen die de primaire waterkeringen plaatselijk beschermen tegen grote golfaanval. Zelfs onder maatgevende omstandigheden zijn vele van deze dammen nog hoog genoeg om een belangrijk reducerende werking te hebben op de inkomende golven. Deze golfreducerende werking is met name zeer welkom als de toetsing van de waterkering alleen tot het resultaat ‘goed’ kan leiden dankzij deze invloed van de havendam, en een ‘onvoldoende’ zou opleveren zonder deze havendam.

Uiteraard kan de invloed van de golfreducerende werking van havendammen alleen in rekening gebracht worden in de veiligheidstoetsing, als de havendam in stand blijft onder de maatgevende omstandigheden voor de toetsing.

Dam G bij Houtribsluizen bij Lelystad, Westelijke havendam van Urk

Voor het toetsen moet onderkend worden dat de waterkering bestaat uit twee constructies die gezamenlijk als één systeem het water keren:

1. een havendam met als primaire functie het reduceren van de golfcondities
2. een dijk of kunstwerk die in de luwte van de havendam het water keert.

Het geheel van havendam en dijk of kunstwerk wordt in de toetsmethodiek het “waterkerings-systeem” genoemd. De dijk of kunstwerk, die feitelijk het water keert, wordt de “waterkering” genoemd, hoewel in feite ook de havendam, als onderdeel van het waterkeringssysteem, hierbij gerekend zou moeten worden.

Het toetsen van het waterkeringssysteem verloopt als volgt:

1. De waterkering achter de havendam moet eerst getoetst worden met de golfrandvoorwaarden zonder havendam volgens de Leidraad Toetsen op Veiligheid (LTV '99). Wanneer deze toetsing het resultaat ‘goed’ oplevert, hoeft de havendam niet getoetst te worden. In geval van een ‘onvoldoende’ of ‘twijfelachtig’ resultaat kan de havendam nader getoetst worden
2. De golfransmissie over, langs en door de havendam moet worden bepaald, teneinde de golfrandvoorwaarden te krijgen bij de waterkering. Men dient hierbij ook alert te zijn op het ontstaan van lange slingeringen in een havenbekken (seiches) die verhogend werken op de waterstand.
3. Om te controleren of de havendam ook onder maatgevende condities een reducerende werking kan hebben op de golfrandvoorwaarden, moet de stabiliteit van de havendam getoetst worden.
4. Vervolgens moet de waterkering achter de havendam volgens de Leidraad Toetsen op Veiligheid (LTV '99) getoetst worden.

In dit verslag wordt de toetsmethode voor havendammen, genoemd in punt 3, nader uitgewerkt

Naast deze meer technische aspecten, is ook het beheersaspect van groot belang. Zodra de havendam een essentiële functie gaat vervullen ten behoeve van de primaire waterkering zal de beheerder van de primaire waterkering ook het beheer van de havendam op zich moeten nemen, of invloed moeten uitoefenen op de wijze waarop anderen het beheer uitoefenen. Deze beheersaspecten vallen buiten het kader van deze studie.

In dit verslag zal vooral ingegaan worden op de toetsingsmethodiek ten aanzien van de stabiliteit van de havendam en de bekledingen daarop. Eerst worden de verschillende typen havendammen en bekledingen behandeld en vervolgens worden alle aspecten betreffende de stabiliteit aan de hand van de LTV '99 benoemd. Daaruit blijkt dat vooral de toetsing van de bekledingen anders verloopt dan in de LTV '99. Daarom wordt dit aspect apart behandeld in hoofdstuk 4. Tenslotte wordt in hoofdstuk 5 de hele toetsmethodiek in het kort weergegeven.

Als de toetsing niet leidt tot een resultaat 'goed', dan zijn er afhankelijk van het toetsresultaat en de overige aspecten die spelen bij het ontwikkelen van een renovatieplan, meerdere mogelijkheden:

- Havendam verhogen of versterken
- Waterkering verhogen of versterken
- Als een deel van de havendam onvoldoende is, kan de golftransmissie berekend worden voor de situatie waarbij de onvoldoende sectie is verwijderd. Wellicht is de golfbelasting op de waterkering achter de havendam dan nog steeds zo laag dat tot goedkeuring overgegaan kan worden.

Gezien het feit dat iedere situatie weer anders is, kan er geen sluitend recept worden gegeven over de te nemen maatregelen na het toetsen van het waterkeringsysteem.

2 Typen havendammen

Er zijn in het verleden zeer vele havendammen in Nederland gebouwd en elk heeft weer zijn specifieke kenmerken, die soms voortvloeien uit de tijd waarin ze gebouwd zijn. Gelet op de vorm van de havendammen wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende hoofdtypen:

1. havendammen met een talud zowel aan de buitenzijde als aan de binnenzijde.
2. havendammen met een talud aan de buitenzijde en een verticale binnenzijde.
3. havendammen met een verticale buitenzijde en een talud aan de binnenzijde.
4. havendammen met een verticale buitenzijde en verticale binnenzijde.

Er zijn echter ook combinaties mogelijk waarbij een deel van de buitenzijde of binnenzijde bestaat uit een talud en een deel uit een verticale wand. Verder kan de kruin heel smal zijn, maar ook tientallen meters breed.

Vervolgens kan binnen deze typen onderscheid gemaakt worden naar het type bekleding op de buitenzijde, de kruin en de binnenzijde. Voor de verticale delen komen de volgende typen constructies het meeste voor:

- stalen damwand
- betonnen damwand
- metselwerk

Maar wellicht zijn er ook houten damwanden toegepast.

De taluds, bermen en kruin kunnen bekleed zijn met:

- gezette steen (zoals basalt, graniet, Doornikse bloksteen, Basalton, Hydroblocks, Haringmanblokken, betonblokken; al dan niet ingegoten met gietasfalt)
- asfalt (waterbouwasfaltbeton, gebitumineerd zand, gepenetreerde breuksteen, etc)
- gras
- klinker bestrating
- breuksteen
- gestorte betonnen elementen (zoals kubussen)

Tenslotte kan onderscheid worden gemaakt in dammen met een hoge kruin (tot boven de golfaanvalzone) en dammen met een lage kruin (bij maatgevende omstandigheden geheel of deels onder water).

De meest voorkomende damvormen en bekledingstypen zullen in dit verslag behandeld worden. Bijzondere combinaties van taluds en verticale wanden, of bijzondere bekledingstypen, zullen echter voorbehouden zijn aan een geavanceerde toetsing (maatwerk).

3 Vergelijking met Leidraad Toetsen op Veiligheid

De Leidraad Toetsen op Veiligheid (LTV '99) geeft een overzicht van alle aspecten die van belang zijn voor waterkeringen. Vele daarvan zijn ook van belang voor het toetsen van havendammen. Daarnaast zijn er aspecten die alleen voor havendammen gelden.

De LTV '99 onderscheidt de volgende aspecten:

- Dijken:
 1. Kruin
 - Hoogte (HT)
 - Toegankelijkheid
 - Overslag
 - Bekleding
 2. Dijklichaam en voorland
 - Piping (STP)
 - Afschuiving voorland (AF)
 - Zettingsvloeiing voorland (ZV)
 - Afschuiving buitentalud (LB)
 - Macrostabieliteit binnenwaarts (STM)
 - Microstabieliteit (STU)
 3. Bekleding (BK)
 - Afschuiving bekleding (BKA)
 - Toplaag bekleding (BKC)
 - Reststerkte bekleding (BKR)
 4. Niet waterkerende elementen

- Waterkerende kunstwerken:
 1. Hoogte (HT)
 2. Piping (STP)
 3. Stabieliteit constructie (STC) en voorland (VL)
 4. Afsluitmiddelen (AM)

Onderstaand wordt voor elk van deze aspecten bekeken of ze relevant zijn voor havendammen en welke speciale aandachtspunten of overwegingen van toepassing zijn. Hoewel havendammen met verticale wanden (kistdammen, kademuren, damwanden, etc) formeel volgens de LTV '99 opgevat moeten worden als 'bijzondere waterkerende constructies', wordt hier toch aansluiting gezocht met de waterkerende kunstwerken omdat de leidraad daarover veel uitvoeriger is.

Kruinhoogte (HT)

Bij dijken bestaat de hoogtetoets van de kruin uit een beoordeling van het golfoverslagdebiet in relatie tot de stabiliteit van de kruin- en binnentaludbekleding en een beoordeling van de toegankelijkheid van de kruin tijdens maatgevende omstandigheden.

Voor havendammen is het debiet door golfoverslag niet relevant, maar wel de eventuele golftransmissie over de dam, of de golfopwekking achter de dam als gevolg van golfoverslag. Er is dus geen toetscriterium voor de hoogte van havendammen, maar de resulterende golftransmissie levert wel de randvoorwaarden op voor de waterkering achter de havendam. In bijlage A is de golftransmissie nader beschouwd.

De stabiliteit van de bekleding op het buitentalud, de kruin en het binnentalud is wel van groot belang in de toetsing, maar dit komt aan bod bij het aspect ‘stabiliteit van bekledingen’.

De toegankelijkheid van een dijk tijdens stormomstandigheden kan belangrijk zijn als er een kleine schade optreedt met mogelijk grote gevolgen, maar die tijdens de storm nog gerepareerd kan worden. In vergelijking tot dijken vervullen de havendammen een andere functie. Het gaat hier om het reduceren van de golven, waardoor het normaal is dat er tijdens de maatgevende omstandigheden zeer veel golfoverslag optreedt of dat de kruin zelfs onder water verdwijnt. Daarom is het niet zinvol om eisen te stellen ten aanzien van de toegankelijkheid tijdens storm.

Dijklichaam en voorland: Piping (STP)

Bij dijken kan het bezwijkmechanisme piping ontstaan omdat er een groot waterstandsverschil is tussen de buitenzijde en de binnenzijde van de dijk. Omdat dit bij havendammen niet het geval is, zal het mechanisme piping niet kunnen optreden en hoeft er dus ook niet op getoetst te worden.

Dijklichaam en voorland: Afschuiving buitentalud (LB)

Er is gevaar voor het afschuiven van het buitentalud als de waterstand snel daalt. Dit bezwijkmechanisme kan bij havendammen net zo goed optreden aan de binnenzijde. Na een periode van zeer hoog water, als de freatische lijn in de havendam nog hoog staat, en er buiten laagwater heerst, zou er een glijcirkel kunnen ontstaan met deformaties als gevolg. Dit kan getoetst worden op dezelfde wijze als voor dijken.

Er kan overwogen worden om ten aanzien van dit aspect alleen hoge eisen te stellen bij havendammen langs zeeën, estuaria en benedenrivieren. Alleen daar kan men zich een scenario voorstellen met afwisselend hoogwater en laagwater. Na een periode van hoog water kan de havendam verzadigd zijn en tijdens een periode van laagwater deformerend, waarna het maatgevend hoogwater met bijbehorende maatgevende golfbelasting optreedt.

Bij meerdijken en bovenrivierdijken is dit scenario buitengewoon uitzonderlijk en zou men deze buiten beschouwing kunnen laten vanwege het feit dat de havendam slechts een ondersteunende rol vervult.

Dijklichaam: Macro stabiliteit binnenwaarts (STM)

De macrostabiliteit binnenwaarts van havendammen moet getoetst worden met dezelfde regels als macrostabiliteit buitenwaarts. De omstandigheden aan de binnenzijde van een havendam zijn immers wezenlijk anders dan aan de polderzijde van een dijk: de waterstand is aan de binnenzijde van de havendam ongeveer gelijk aan die aan de buitenzijde.

Dijklichaam: Microstabiliteit (STU)

De microstabiliteit betreft het uitspoelen van zand uit een dijklichaam ten gevolge van kwel uit het binnentalud van de dijk of het opdrukken van afdekkende kleilagen op het binnentalud door een hoge freatische lijn in de dijk. Als het basismateriaal van de dam uit zand bestaat, dan hoeft dit niet apart getoetst te worden, omdat de bekleding en filterlaag uitspoelen van zand moet voorkomen. Bestaat het basismateriaal uit klei, dan spoelt het materiaal om dezelfde reden niet uit, maar ook omdat klei voldoende cohesief is om bij een klein uittredend verhang niet uit te spoelen. Bestaat de kern van de dam echter uit zand met een (dunne) afdekkende kleilaag, dan is de situatie denkbaar dat na een hoogwater in de dam een hoog freatisch vlak aanwezig is, die na een snelle val van de buitenwaterstand de kleilaag op wil drukken. Hier moet op worden gecontroleerd, voor zowel het binnen- als het buitentalud.

Omdat langs bovenrivieren en meren een extreem hoogwater gevolgd door een snelle waterspiegeldaling en daarna weer een extreme belasting zeer uitzonderlijk is en in acht genomen dat de havendam slechts een ondersteunende functie heeft, worden de havendammen langs de meren en bovenrivieren niet getoetst op dit mechanisme (score is goed).

Afschuiving voorland (AF) en zettingsvloeiing voorland (ZV)

Afschuivingen in het voorland en zettingsvloeiingen in het voorland vormen een bedreiging voor dijken en kunstwerken, en bovendien voor havendammen. De problematiek voor dijken en kunstwerken verschilt in wezen niet van die bij havendammen. Met betrekking tot dit aspect kunnen op globaal niveau dus de normale toetsingsregels uit de LTV '99 (katern 9) gebruikt worden. Op geavanceerd niveau kan worden gekeken of voor havendammen dezelfde veiligheidsmarges als voor primaire waterkeringen moeten worden gehanteerd, omdat aantasting van de havendam minder direct leidt tot inundatie dan aantasting van de primaire waterkering.

Afschuiving bekleding (BKA)

Het toetsen of de bekleding zou kunnen afschuiven tijdens golfbelasting (BKA) vormt in de leidraad een geïntegreerd onderdeel van de toetsing van de stabiliteit van de bekleding (BKC). Voor dit aspect wordt daarom verwezen naar de stabiliteit van de toplaag.

Stabiliteit toplaag van bekleding (BKC)

De Leidraad Toetsen op Veiligheid geeft een uitvoerige procedure voor het toetsen van de volgende type bekledingen:

- steenzettingen
- asfalt
- gras

- betonnen platen

Veel van de rekenregels en procedures uit de leidraad zijn ook van toepassing op havendammen. Vooral als de kruin van de havendam boven het toetspeil ligt, zijn de overeenkomsten van het toetsen van een dijk en van een havendam groot. Hiermee raakt men direct aan een wezenlijk verschil tussen havendammen en dijken: sommige havendammen hebben een kruin die onder het toetspeil ligt. Daardoor zullen er verschillende categorieën van havendammen onderscheiden moeten worden, en zullen er verschillende waterstandscenario's beoordeeld moeten worden. De stabiliteit van de bekleding is namelijk afhankelijk van de waterstand ten opzichte van de kruinhoogte.

Er moeten daardoor categorieën van bekledingen onderscheiden worden, waarbij de grenzen tussen de categorieën gegeven kunnen worden in de vorm van:

$$h_{\text{toets}} + c_1 \cdot H_s < h_c \leq h_{\text{toets}} + c_2 \cdot H_s \quad (1)$$

met: h_c = kruinhoogte (m)
 h_{toets} = toetspeil (m)
 H_s = significante golfhoogte bij de teen van de dam (m)
 c_1, c_2 = constanten, afhankelijk van type bekleding (-)

De bekleding aan de buitenzijde van hoge havendammen (kruin rond de waterlijn of hoger) kan waarschijnlijk getoetst worden met de toetsingsregels uit de Leidraad Toetsen op Veiligheid (LTV '99, katern 8). Dit levert een toetsingscriterium waar de havendam in ieder geval aan moet voldoen om het toetsresultaat 'goed' te kunnen verkrijgen.

Verder kan de ervaring benut worden van de toetsing en het ontwerp van de havendammen bij Walsoorden (Klein Breteler 2000). In dat kader is in detail gekeken naar de stabiliteit van een kruin en binnentalud van een lage tot zeer lage havendam. Daarbij is zowel de verschilddruk over de bekleding als gevolg van brekende golven beschouwd, alsmede de daarmee samenhangende hoge stroomsnelheden over de kruin van de havendam.

Een andere ervaring betreft de bekleding van basalt op de havendam van Roptazijl. Volgens de schaarse gegevens die hierover beschikbaar zijn was hier in de jaren tachtig een bekleding van basalt op aanwezig, die af en toe stormschade gaf. De dikte van de bekleding wordt door de beheerder geschat op ongeveer 40 cm. Volgens de berekeningen van de relatief frequent voorkomende golfbrandvoorwaarden kunnen bij het nabijgelegen Harlingen elke 10 jaar golven optreden van ongeveer $H_s = 1,5$ m. Aangenomen wordt dat deze golfcondities ook toepasbaar zijn voor Roptazijl. Later is de bekleding op de kruin vol en zat ingegoten met gietasfalt en is er sindsdien geen schade meer opgetreden.

De combinatie van bekledingsdikte en golfhoogte is zodanig dat het niet te verklaren is waarom er in de jaren tachtig schade is opgetreden. De relatieve belasting $H_s/\Delta D$ is zo klein dat er getwijfeld moet worden aan de juistheid van de gegevens. Daarom wordt deze ervaring niet gebruikt om de toetsingsregels te ijken of te verbeteren.

In het verleden is er relatief veel onderzoek verricht naar de stabiliteit van zeer lage dammen van breuksteen. Hoewel breuksteen niet in de LTV '99 uitvoerig behandeld wordt als mogelijke bekleding, is er daarom echter wel voldoende informatie beschikbaar om toetsingsregels mee op te stellen.

Sommige bekledingen, zoals asfalt en ingegoten steenzettingen, zijn water- en luchtdicht en kunnen daarom bezwijken volgens een mechanisme dat niet behandeld wordt in de LTV '99, namelijk het opbarsten als gevolg van de druk door ingesloten lucht onder de kruin. De stijgende freatische lijn tijdens maatgevende omstandigheden kan ervoor zorgen dat er een luchtbel onder de kruin ingesloten raakt en door de waterdruk gecompriëerd wordt. De hiermee samenhangende opwaartse druk is zodanig groot dat de kruinbekleding kan openbarsten. Dit aspect moet derhalve opgenomen worden in de toetsregels. Mocht dit volgens de toetsing mogelijk een probleem vormen, dan is dit veelal eenvoudig op te lossen door luchtpijpjes in de kruin te plaatsen.

Reststerkte bekleding (BKR)

Als de bekleding op een havendam tijdens de maatgevende omstandigheden beschadigd is geraakt, kan hij wellicht nog steeds zijn functie vervullen: de golfbelasting reduceren. Het probleem is echter dat na initiële schade er vermoedelijk geleidelijk aan steeds meer schade optreedt en de kruin van de havendam (plaatselijk) lager wordt. Zodra dit het geval is zullen er hogere golven achter de dam optreden.

Hieruit blijkt dat reststerkte in de praktijk alleen meegeteld kan worden als de havendam een groter volume heeft, dan nodig zou zijn als hij niet zou bezwijken. Dit is bijvoorbeeld het geval als de kruinhoogte veel groter is dan nodig is, of als de breedte van de havendam zeer groot is. Het is echter momenteel met de huidige technische middelen moeilijk te voorspellen hoeveel erosie er tijdens de storm (na de initiële schade) zal optreden. Daarom is het ook nog erg moeilijk om te kunnen beoordelen of het volume inderdaad voldoende is om enige schade aan de bekleding toe te mogen staan. Alleen bij zeer hoge of zeer brede dammen is het wellicht mogelijk om met het duinafslagprogramma Durosta aan te tonen dat het volume voldoende is. Dan wordt in feite aangenomen dat de hele dam uit zand bestaat (zeer conservatieve aanname).

Als voorbeeld is een havendam ten zuiden van de Houtribsluizen bij Lelystad doorgerekend (zie figuur 1). Hoewel de dam een kruinbreedte heeft van 18 m, geeft een berekening met Durosta aan dat na ongeveer 1 à 2 uur met golven van $H_s = 2,3$ m en $T_p = 6,2$ s bij een maatgevende waterstand van NAP+1,19 m de dam al volledig doorgebroken is. De berekening is uitgevoerd met een stabiele bekleding onder NAP en onbeschermd zand daarboven.

Vooraf het feit dat de kruinhoogte ten opzichte van duinen relatief klein is, is het volume van de dam relatief klein en kunnen de golven er vrij gemakkelijk doorheen breken. Bij een golfhoogte van 1,5 m en vergelijkbare golfsteilheid breekt de dam volgens Durosta na 3 à 4 uur door.

Doorgaans zal reststerkte als gevolg van een gebrek aan kennis van het erosieproces en het bezwijkgedrag nog niet gebruikt kunnen worden om een havendam goed te keuren, omdat reststerkte op dit moment niet goed genoeg kwantificeerbaar is.

Niet waterkerende elementen

Ook havendammen hebben soms niet waterkerende elementen, zoals monumenten, trappen, bankjes, muurtjes etcetera. Al deze niet waterkerende elementen kunnen getoetst worden op dezelfde wijze als in de LTV '99 (katern 7).

Waterkerende kunstwerken: stabiliteit constructie (STC)

Sommige havendammen kunnen beschouwd worden als een waterbouwkundig kunstwerk, vooral als zij grotendeels uit verticale elementen zijn opgebouwd. Deze constructies kunnen getoetst worden zoals omschreven staat in de LTV '99 (katern 7). Enkele aspecten van kunstwerken zijn reeds aan bod geweest:

- kruinhoogte
- stabiliteit van het voorland
- piping

Het aspect piping en het aspect afsluitmiddelen hoeft in het geval van havendammen niet getoetst te worden.

Samenvatting

Voor de meeste aspecten is het niet nodig om de methodiek uitvoerig uit te schrijven, omdat het (vrijwel) gelijk is aan de toetsingsmethodiek uit de Leidraad Toetsen op Veiligheid (LTV '99). De toetsingsaspecten die niet of nauwelijks aanpassing behoeven zijn:

- Afschuiving voorland (AF)
- Zettingsvloeiing voorland (ZV)
- Afschuiving buitentalud (LB)
- Macrostabieliteit binnenwaarts (STM)
- Microstabieliteit binnenwaarts (STU)
- Niet waterkerende elementen
- Stabiliteit constructie (STC) en voorland (VL) in geval van Waterkerende kunstwerken (kistdammen, damwanden, kademuren etc.)

Voor de verschillende aspecten zijn in dit hoofdstuk de aandachtspunten aangegeven.

De hoogtetoets (HT) van een havendam verloopt wel heel anders dan in de Leidraad Toetsen op Veiligheid, maar zal in de methodiek slechts summier behandeld worden, omdat de eis ten aanzien van de hoogte vooral voortvloeit uit de toetsing van de waterkering achter de havendam. Wel zal de beschikbare informatie betreffende golftransmissie kort samengevat worden.

De grootste veranderingen zullen betrekking hebben op de toetsing van de bekleding van de kruin en de taluds. Deze zullen daarom apart behandeld worden in hoofdstuk 4.

4 Kwantificering bezwijkmechanismen van bekledingen

4.1 Steenzettingen

Voor de belasting op steenzettingen op havendammen wordt onderscheid gemaakt tussen de belasting op het buitentalud, de kruin en het binnentalud (havenzijde). De grootte van de belasting wordt bepaald door de relatieve hoogte van de kruin t.o.v. de waterlijn. Er zijn zes situaties te onderscheiden:

1. De kruin ligt ver boven de waterlijn op een hoogte die gelijk aan of boven $z_{2\%}$ ligt, met $z_{2\%}$ = golfploophoogte die door twee procent van de golven overschreden wordt. In dit geval wordt de kruin en het binnentalud vrijwel niet belast en is de belasting op het buitentalud gelijk aan die op normale dijken met een steenzetting.
2. De kruin ligt ruim boven de waterlijn ($h_c/H_s > 1$). De hoogte van de kruin is zodanig dat er veel golfoverslag is, maar met relatief grote tussenpozen waardoor de bekleding en het filter tussen de golfoverslagen de gelegenheid krijgt om geheel of gedeeltelijk weer leeg te lopen.
3. De kruin ligt boven de waterlijn. In dit geval is er veel tot zeer veel golfoverslag en bestaat de belasting op de kruin en het binnentalud vooral uit water dat met hoge snelheid over de kruin raast. Het buitentalud wordt net zo zwaar belast als een normale dijk met een steenzetting.
4. De kruin ligt iets onder de waterlijn. In dit geval is er zeer veel golfoverslag en bestaat de belasting op de kruin uit golfklappen en hoge watersnelheden. Ook het binnentalud wordt belast door hoge watersnelheden.
5. De kruin ligt ruim onder de waterlijn. In dit geval breken er slechts enkele hoge golven boven de dam en wordt de kruin slechts licht belast door drukfluctuaties en stroming. Ook het buitentalud wordt slechts licht belast en het binnentalud wordt nauwelijks belast.
6. De kruin ligt ver onder de waterlijn. In dit geval breken er geen golven meer boven de dam en wordt deze nauwelijks meer belast.

Voor elk van deze zes situaties wordt in deze paragraaf een afbakening gegeven en wordt de stabiliteit gekwantificeerd. Op basis van deze kwantificering wordt vervolgens een toetsmethode afgeleid. Hoewel er in dit hoofdstuk steeds uitgegaan wordt van een bekende waterstand, moet er in de praktijk rekening mee gehouden kan worden dat er een heel scala aan waterstanden (met bijbehorende golfcondities) kunnen optreden.

Bij het afleiden van de formules voor de stabiliteit van steenzettingen wordt aangenomen dat de significante golfhoogte aan de buitenzijde van de havendam ongeveer tussen $H_s = 1$ m en $H_s = 4$ m ligt, met een brekerparameter van $1 < \xi_{op} < 2,5$. De brekerparameter is als volgt gedefinieerd:

$$\xi_{op} = \tan\alpha / \sqrt{(H_s / (1,56T_p^2))} \quad (2)$$

met: H_s = significante golfhoogte bij de teen van het buitentalud (m)
 T_p = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

$\alpha =$ taludhelling van het buitentalud ($^{\circ}$)

Doorgaans is de waterstand variabel en kan het zijn dat een havendam beoordeeld moet worden voor meer dan één situatie uit bovenstaande lijst van zes. Het is van belang dat voor elke mogelijke waterstand de maatgevende golfcondities worden bepaald en wordt bekeken of de bekleding op het buitentalud, de kruin en het binnentalud voldoende stabiel zijn.

Hoewel in het onderstaande met enige stelligheid uitspraken worden gedaan over de belasting, de sterkte en de stabiliteit, moet in gedachten gehouden worden dat het slechts veronderstellingen en schattingen betreft die gebaseerd zijn op ervaring met vergelijkbare fysische processen die spelen bij de bezwijkmechanismen. Helaas is er veelal weinig harde informatie beschikbaar om de veronderstellingen te onderbouwen. Daar waar een onderbouwing met bijvoorbeeld modelonderzoekresultaten mogelijk is, is dat steeds uitdrukkelijk vermeld. Vanwege de smalle basis voor deze toetsmethodiek is enerzijds gestreefd naar een voldoende breed twijfelachtig gebied, maar moet anderzijds aanbevolen worden met nader onderzoek meer informatie beschikbaar te krijgen.

De gestrate klinkers kunnen opgevat worden als een bijzonder type steenzetting en daarom verloopt de toetsing ervan op dezelfde wijze als die van steenzettingen. Voor het toetsen van ingegoten bekledingen op de kruin moet ook de toetsing volgens paragraaf 4.2 (asfalt) uitgevoerd worden.

In paragraaf 4.1.7 worden de toetscriteria in beeld gebracht met behulp van rekenvoorbeelden.

4.1.1 Kruin ver boven de waterlijn

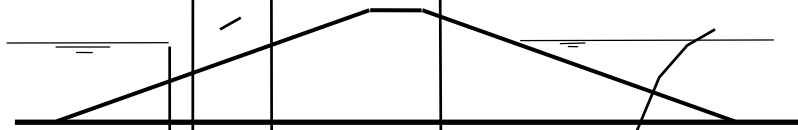
Met de kruin ver boven de waterlijn lijkt een havendam erg veel op een gewone dijk met een steenzetting. Als de kruin van de havendam hoger is dan de 2%-golfoploop ($h_c > z_{2\%}$), mag verwacht worden dat de belasting van de kruin en het binnentalud zo gering is dat elke steenzetting (of tegelwerk) stabiel is.

Het buitentalud kan getoetst worden met de normale toetsregels voor dijken.

In het geval dat de havendam iets lager is dan de 2%-golfoploop ($h_c/z_{2\%} \approx 0,9$ à $0,95$) kan de belasting op de kruin en het binnentalud onder extreme omstandigheden toch nog aanzienlijk zijn. Hoewel dit uitzonderingsgevallen zijn met golven van bijvoorbeeld 3 à 4 m hoogte, kan in de toetsingsmethodiek niet zonder meer gesteld worden dat de kruinbekleding goed is als $h_c/z_{2\%} \approx 0,9$ à $0,95$. Dit wordt duidelijk aan de hand van de volgende categorie (met kruin ruim boven de waterlijn).

4.1.2 Kruin ruim boven de waterlijn

De kruin en het binnentalud worden in belangrijke mate belast door golfoverslag als de kruinhoogte lager ligt dan het 2%-golfoplooppniveau.



De havendam is zodanig hoog dat alle golven breken op het buitentalud alvorens ze golfoverslag geven. Daardoor moet het buitentalud getoetst worden met de gewone toetsregels voor dijkbekledingen.

Voor deze situatie kan voor de kruin en het binnentalud gebruik gemaakt worden van de ervaring tijdens het modelonderzoek van Van Kruiningen (1989). Het onderzoek betrof een steenzetting op de kruin en het binnentalud van de Afsluitdijk en is uitgevoerd op kleine schaal in de Scheldegoet van WL.

Het bovenste deel van het buitentalud had een taludhelling van 1:5 en het binnentalud was 1:2,4. De breedte van de kruin was in het model 20 cm, hetgeen overeenkomt met de gemiddelde golfhoogte. De belangrijkste golfoverslagproeven zijn uitgevoerd met een kruinhoogte die ongeveer $0,7H_s$ à $1,5H_s$ boven de stilwaterlijn ligt.

De meeste proeven zijn uitgevoerd met een steenzetting waarin de afzonderlijke blokken erg los ten opzichte van elkaar lagen, waardoor er al bij een relatief lage golfbelasting schade ontstond. Alleen tijdens de proeven 151 tot en met 163 is een geklemde zetting toegepast. Tijdens de proeven met een zeer losse zetting bleek er schade op te treden als:

$$\frac{z_{2\%} - h_c}{\Delta D} > 5 \quad (3)$$

met: $z_{2\%}$ = Golfoploophoogte die door twee procent van de golven overschreden wordt (m)

h_c = kruinhoogte ten opzichte van de stilwaterlijn (m)

Δ = relatieve dichtheid van beton in steenzetting (-)

D = dikte van de toplaag (m)

De geklemde zetting was echter veel stabielier en bleek zelfs nog geen schade te geven bij:

$$\frac{z_{2\%} - h_c}{\Delta D} = 13 \quad (4)$$

Er waren echter wel enkele blokjes die een kleine beweging lieten zien.

Het is niet bekend of de klemming bij deze proeven goed of zeer goed was. Gezien het feit dat de goot relatief breed was, is het minder waarschijnlijk dat de blokjes onwrikbaar tussen de gootwanden geklemd lagen.

De proeven zijn uitgevoerd met een relatief lage waterstand. Dit heeft enerzijds als consequentie dat de belasting van de golven klein is, en anderzijds is het te verwachten dat tijdens de proeven het filter steeds leegstroomde na het passeren van een golf. Dit wordt door Van Kruiningen, met betrekking tot de proeven met los geplaatste stenen, als volgt omschreven: "De schade ontstaat als gevolg van uitschieters in het golfspectrum, meestal bij enkele snel op elkaar volgende hoge golven. Het water is dan nog niet tussen de steenzetting en filter weggestroomd. Als gevolg van de stootbelasting van het langsstromende water

worden er vervolgens een of meer blokjes uit de constructie gelicht.” Tijdens de proeven met een goed in verband gezette steenzetting is het beeld anders: “Bij deze proeven stroomt zeer veel water over de dijk en door en onder de steenzetting. De grote hoeveelheden water kunnen niet meer snel genoeg onder de steenzetting wegstromen. Behalve aan de kruin worden daardoor nu ook aan de teen van het talud regelmatig blokjes opgelicht.” Gedurende de proef bleven echter alle blokjes op hun plaats.

De gemeten verschildrukken tijdens de proeven met los geplaatste steenzettingen zijn tijdens de golfoverslag ongeveer gelijk aan het eigen gewicht van de blokjes. Steeds is de grootste verschildruk opgetreden net nadat de top van de golfoverslag is gepasseerd. Als er een golf aankwam moest eerst het filter gevuld raken voordat er belangrijke verschildrukken konden ontstaan.

Van Kruiningen trekt uiteindelijk de conclusie dat de schade ontstaan is doordat de golfoverslag een grote stromingsdruk tegen de zijkanten van los gezette blokjes geeft. Deze stromingsdruk is op een gegeven moment in staat om eerst de blokjes te verschuiven (er waren immers opzettelijk brede spleten zonder afstandhouders aangebracht) en later de blokjes uit de zetting te sleuren. De gemeten verschildrukken waren onvoldoende om de schade te kunnen verklaren.

Gezien het verschil in resultaat van de proeven met los gezette blokjes en goed in verband gezette blokjes, wordt voorgesteld om dit onderscheid ook in de toetsingsregels naar voren te laten komen.

Verder wordt de tijdens de proeven opgelegde maximale belasting, $(z_{2\%} - h_c)/(\Delta D) = 13$, gezien als de grens waarbij er een aanzienlijke kans op instabiliteit is, omdat er tijdens die proeven op meerdere plaatsen blokjes gingen bewegen. Daarom wordt de grens tussen twijfelachtig en onvoldoende gelegd bij een iets lagere waarde: $(z_{2\%} - h_c)/(\Delta D) = 12$.

De geringe kennis en ervaring over de stabiliteit van steenzettingen op een kruin en binnentalud maakt het noodzakelijk om de grens tussen goed en twijfelachtig veel lager te leggen dan de grens tussen twijfelachtig en onvoldoende. Deze grens kan echter voor goed geklemde steenzettingen wel iets hoger gelegd worden dan die geconstateerd was tijdens de proeven met een zeer los gezette steenzetting: $(z_{2\%} - h_c)/(\Delta D) = 6$. Voor de overige steenzettingen wordt voor de veiligheid een iets lagere grens voorgesteld: $(z_{2\%} - h_c)/(\Delta D) = 4$.

De meeste proeven zijn uitgevoerd met $h_c/H_s > 1$. Daarom wordt de toetsingsregel die voortvloeit uit deze proeven slechts toepasbaar verondersteld voor havendammen met een kruin die hoger is dan de maatgevende golfhoogte boven SWL.

Met deze overwegingen wordt de volgende toetsingsregel voor de kruin en het binnentalud van deze categorie havendammen voorgesteld:

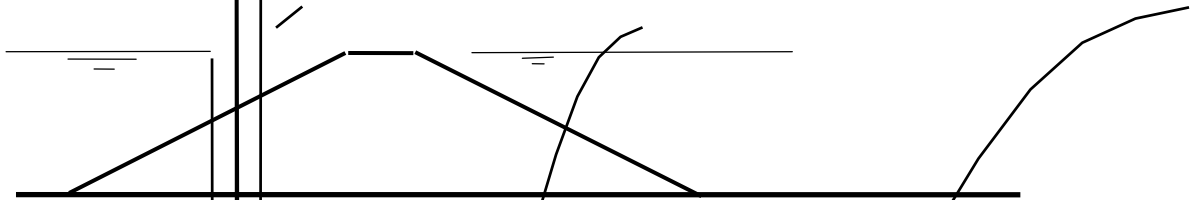
- Als $h_c/H_s > 1$: (5)
 1. Voor goed geklemde steenzettingen van zuilen of ingewassen en/of dichtgeslibde natuursteen, waarbij de kruinrand is afgerond of ingegoten met gietasfalt:
 - Goed: $(z_{2\%} - h_c)/(\Delta D) < 6$ (6)
 - Twijfelachtig: $6 \leq (z_{2\%} - h_c)/(\Delta D) \leq 12$ (7)
 - Onvoldoende: $(z_{2\%} - h_c)/(\Delta D) > 12$ (8)
 2. Overige steenzettingen:
 - Goed: $(z_{2\%} - h_c)/(\Delta D) < 4$ (9)
 - Twijfelachtig: $4 \leq (z_{2\%} - h_c)/(\Delta D) \leq 12$ (10)

- Onvoldoende: $(z_{2\%} - h_c)/(\Delta D) > 12$ (11)

Als het resultaat 'twijfelachtig' is, dan kan er een geavanceerde toetsing uitgevoerd worden. De nadere bestudering van het specifieke geval kan soms tot een wat scherpere beoordeling leiden, en in andere gevallen kan er uitsluitsel verkregen worden door middel van modelonderzoek.

4.1.3 Kruin op of boven de waterlijn

Ook als de kruin op of boven de waterlijn ligt, zal de belasting op de kruin nog alleen bestaan uit golfoverslag en niet uit golfklappen. De golven breken op het buitentalud en veroorzaken daar een belasting die vergelijkbaar is met de belasting op steenzettingen op normale dijken. Het verschil met een havendam met een kruin die ruim boven de waterlijn ligt, is dat er nu zeer veel golfoverslag plaatsvindt en dat veel golven de kruin bereiken zodat het denkbaar is dat gedurende langere tijd het filter en de steenzetting geheel gevuld blijven met water. Hierdoor zal de belasting op de kruin en het binnentalud zwaarder zijn dan wanneer de kruin ruim boven de waterlijn ligt.



Voor steenzettingen op een dijktaalud dat tot ver boven water doorloopt, bestaat de maatgevende belasting uit een stijghoogteverschil over de toplaag veroorzaakt door brekende golven. Met name tijdens maximale golfneerloop en tijdens de golfklap treden er grote drukgradiënten op die leiden tot deze stijghoogteverschillen. Ook tijdens golfoverslag zullen er op de kruin van de havendam grote drukgradiënten optreden. Vooral als de waterstand rond de kruinhoogte ligt, zal er tijdens golfoverslag een grote translatiegolf over de kruin gaan trekken. Als het filter onder de steenzetting verzadigd is met water dan zal er een druktransmissie optreden die zich sneller voortplant dan de voortplantingssnelheid van de golf. Daardoor zal er een stijghoogteverschil over de toplaag ontstaan, zie onderstaande figuur:

figie

Behalve dat de translatiegolf door een druktransmissie een grote verschildruk kan veroorzaken, is er tevens sprake van een grote stroomsnelheid in de translatiegolf. Ook deze stromingbelasting kan schade veroorzaken.

Onderstaand worden beide schademechanismen nader beschreven en gekwantificeerd.

Stijghoogteverschil door druktransmissie

Tijdens het onderzoek van Van der Meer en de Waal (1993) zijn de golfdrukken op het oppervlak van een lage dam gemeten. De helling van het talud aan de voorzijde en aan de achterzijde was 1:3. De kruinbreedte was 40 cm, hetgeen overeenkomt met ongeveer $2,7H_s$ voor de nader uitgewerkte proeven. Er zijn drie proevenseries uitgevoerd, waarbij de waterlijn in de eerste serie ter hoogte van de kruin stond en in de andere series $0,3H_s$ en $0,7H_s$ eronder. In dit proevenprogramma treedt de zwaarste belasting op als de waterlijn ter hoogte van de kruin staat.

Van drie proeven zijn de golfdrukken op de kruin en het achtertalud nader uitgewerkt (Bezuijen '94). Steeds is gezocht naar de golf waarin de waterlaag op de kruin maximaal was. Deze proeven zijn gegeven in onderstaande tabel:

proef	H_s (m)	T_p (s)	h (m)	ξ_{op} (-)	h_c/H_s (-)	ϕ_b/H_s (-)	u_{max} (m/s)
3901	0.152	1.63	0.90	1.74	0.0	0.54	ca 2
3905	0.147	2.24	0.75	2.43	1.0	0.41	ca 2
3908	0.146	2.24	0.60	2.44	2.0	0.11	–

met: ϕ_b = hoogte van het grootste stijghoogtefront op de kruin (m)
 u_{max} = hoogst gemeten snelheid op de kruin (m/s)
 h = waterdiepte voor de dam (m)
 ξ_{op} = brekerparameter (-) = $\tan\alpha/\sqrt{s_{op}}$
 s_{op} = golfsteilheid (-) = $H_s/(1,56T_p^2)$
 T_p = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
 α = taludhelling buitentalud ($^\circ$)

In figuur 2 is een voorbeeld van het stijghoogteverloop tijdens één van de golven in proef 3901 in detail uitgewerkt. In deze figuur is in tijdstapjes van 0,04 s de overtrekkende golf te zien. De hier getekende golf geeft de dikste waterlaag op de kruin die tijdens deze proef is gemeten. In de figuur is af te lezen dat de fronthoogte van het stijghoogteverloop op de kruin maximaal ongeveer 8 cm is bij een golfhoogte van 15,2 cm. De fronthoogte is dus ruim de helft van de significante golfhoogte.

De hoogte van het stijghoogtefront blijkt maar weinig af te nemen als de kruinhoogte toeneemt, want in proef 3905 is gemeten dat $\phi_b/H_s = 0,41$.

Gezien het geringe aantal proeven wordt voorlopig aangenomen dat in deze categorie havendammen voor de hoogte van het stijghoogtefront ongeveer geldt dat $0,4 < \phi_b/H_s < 0,6$.

Achter de kruin van de dam ontstaan nog hogere stijghoogtefronten, omdat daar nog steeds de top van het stijghoogtefront op dezelfde hoogte zit, maar het talud al naar beneden neigt. De optredende fronthoogte is daardoor weliswaar groter, maar leidt niet tot een groter stijghoogteverschil, omdat de waterlaagdikte aan de voet van het stijghoogtefront daar zo groot is dat de optredende verschildrukken hoogst waarschijnlijk toch kleiner zijn dan op de kruin.

Met de lekentheorie kan vervolgens het optredende stijghoogteverschil berekend worden (belasting). Als veilige bovengrens geldt dat het stijghoogteverschil (bij een grote lekengte en verticaal stijghoogtefront) gelijk is aan de helft van de hoogte van het stijghoogtefront: $\phi = \phi_b/2$. Voor de in de praktijk voorkomende lekengten en voor niet geheel verticale

stijghoogtefronten geldt dat het stijghoogteverschil kleiner blijft. Berekeningen van Bezuijn (1994) geven aan dat bij $\Lambda/H_s = 0,9$ het stijghoogteverschil $\phi = 0,3\phi_b$ en bij kleinere leklengten een kleiner stijghoogteverschil.

Op grond hiervan wordt voor de praktijk gesteld dat het stijghoogteverschil bepaald kan worden met: $\phi/\phi_b \approx 0,2$ à $0,35$.

Ten behoeve van de stabiliteit van de bekleding mag dit stijghoogteverschil niet groter worden dan het eigen gewicht van de bekleding per m^2 (sterkte): $\phi < \Delta D$. Met het bovenstaande resulteert dit in de volgende stabiliteitsrelatie:

$$5 < H_s/(\Delta D) < 12 \quad (12)$$

Als wordt voldaan aan $H_s/(\Delta D) < 5$, dan zal het stijghoogteverschil als gevolg van het golfhoogtefront dat over de kruin trekt niet in staat zijn schade te veroorzaken. Daarentegen moet ook voldaan worden aan de voorwaarde die volgt uit de analyse van de stromingsbelasting (zie volgende paragraaf), die meestal maatgevend is.

Sterkte onder stromingsbelasting

Golven, die over een lage kruin lopen, zullen op die kruin en het binnentalud hoge stroomsnelheden veroorzaken. Vooral als de waterstand ongeveer overeenkomt met de kruin is het te verwachten dat de stroomsnelheden zeer hoog worden.

Ook de stabiliteit tijdens een belasting door hoge stroomsnelheden is onderzocht door Van Kruiningen (1989). Hij heeft een aantal proeven gedaan waarbij de waterstand net iets boven de kruin stond en er water over de kruin stroomde, terwijl de waterstand aan de benedenstroomse zijde laag werd gehouden. Hoewel deze omstandigheden bij havendammen niet voorkomen, is het de verwachting dat de belasting wel zeer vergelijkbaar is met die bij grote golfoverslag.

Bij de eerste paar series was de steenzetting vrij los gezet, waardoor tijdens de proeven de blokjes eerst gingen schuiven en daarna konden wegspoelen omdat er lokaal veel ruimte tussen de blokken was ontstaan.

De meest relevante proef, namelijk proef 5, is uitgevoerd met blokjes met kleine afstandhouders die in een goed verband waren aangelegd. Tijdens deze proef was er bij de grootste belasting nog geen schade ontstaan (model: 53 l/s). Dit goede resultaat was waarschijnlijk een gevolg van de goede klemming en de relatief gunstige leklengte. Gezien het feit dat de goot relatief breed was, is het minder waarschijnlijk dat de blokjes onwrikbaar tussen de gootwanden geklemd lagen.

De stroomsnelheid op de kruin was tijdens deze proef ongeveer 0,8 m/s en vlak achter de kruin (bovenaan het binnentalud) was dit ongeveer 1,2 m/s. Helemaal onderaan het binnentalud (29 cm onder de kruin) was de snelheid opgelopen tot 2,1 m/s.

De stabiliteit onder stromingsbelasting kan weergegeven worden met het volgende algemene criterium:

$$u_{cr} = c \cdot \sqrt{g\Delta D} \quad (13)$$

met: u_{cr} = stroomsnelheid bij begin schade (m/s)

c = constante die afhankelijk is van het type steenzetting en de vorm van de dam (-)

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

Aangenomen wordt dat de zwakste plek van de constructie net achter de binnenkruinlijn ligt, aangezien de steenzetting daar waarschijnlijk het minste geklemd ligt, en de gebogen stroomlijnen een onderdruk kunnen creëren. Op die plaats was de stroomsnelheid tijdens de proef ongeveer 1,2 m/s. Met de waarde van $\Delta D = 0,020$ m kan hierbij de grootte van c in de stabiliteitformule geschat worden: $c = u/\sqrt{(g\Delta D)} = 1,2/\sqrt{(9,8 \cdot 0,020)} = 2,7$. De waarde van c is derhalve minstens 2,7 voor goed ingeklemde blokken, omdat er tijdens deze proef nog geen schade ontstond:

$$u_{cr} > 2,7 \cdot \sqrt{(g\Delta D)} \quad (14)$$

In de buitenlandse literatuur worden vooral proeven beschreven van overstromende dammen die bekleed zijn met blokkenmatten. In het overzicht van Akkerman (1998) zijn proefresultaten gegeven waaruit de waarde van c berekend kan worden. Voor de goed functionerende blokkenmatten blijkt de waarde van c te variëren tussen 2,9 en 6,1, hetgeen beduidend hoger is dan wat resulteert uit de proeven van Van Kruiningen (1989). Op grond van deze onderlinge vergelijking wordt voorzichtig geconcludeerd dat het stabiliteitscriterium met $c = 2,7$ geen onveilige resultaten zal geven. Hoewel verondersteld kan worden dat een blokkenmat wat stabiel is dan een gewone steenzetting, wordt de waarde van c toch niet veel lager dan 2,7 gesteld, namelijk 2,5, omdat er tijdens de proef nog geen schade was ontstaan en voorkomen moet worden dat veiligheid op veiligheid gestapeld wordt.

Tenslotte heeft Pilarczyk een formule opgesteld voor het ontwerpen van diverse constructietypen onder stromingsbelasting (Pilarczyk, 1990). De formule is primair bedoeld voor een stroming langs een taludverdediging of over een bodembescherming. Hoewel het niet toepasbaar is voor golfoverslagcondities is hier toch gekeken hoe zijn formule zich verhoudt tot de resultaten van Van Kruiningen (1989). De algemene formule luidt:

$$\Delta D = \phi_c K_T \frac{0,035 K_h u^2}{\Psi_{cr} K_s 2g} \quad (15)$$

Met: $\phi_c =$ Stabiliteitsfactor (-)
 $K_T =$ Turbulentiefactor (-)
 $\Psi_{cr} =$ Kritieke schuifspanningsfactor (-)
 $K_h =$ Waterdieptefactor (-)
 $K_s =$ hellingfactor (-)
 $u =$ stroomsnelheid op de kruin (m/s)

Voor al de factoren in de formule zijn voor diverse omstandigheden aanbevolen waarden gegeven, maar omdat de formule niet afgeleid is voor een golfoverslagsituatie is het bij sommige factoren lastig om de juiste waarde te schatten.

De stabiliteitsfactor ϕ_c is afhankelijk van de mate waarin de stroming vat kan krijgen op de bekleding, waarbij $\phi_c = 1,0$ à $1,5$ voor kwetsbare randen en $\phi_c = 0,5$ à $0,75$ voor een doorgaande bekleding. Als de kruinrand mooi rond is afgewerkt en de steenzetting in goede staat verkeert (geen verzwakkingen), kan $\phi_c = 0,7$ à $0,9$ als redelijke schatting gehanteerd worden. In overige gevallen geldt als schatting $\phi_c = 1,0$ à $1,4$. De turbulentiefactor kan variëren tussen $1 < K_T < 3$, waarbij de lagere waarden gelden voor een normale stroming

van een rivier, terwijl de hoogste waarden van toepassing zijn voor bijvoorbeeld een schroefstraal. Voor een kruin van een havendam wordt geschat dat $K_T = 1,5$ à $2,0$.

De grootte van K_h is afhankelijk van de verhouding tussen de waterdiepte in de golfoverslagtoning (d) en de steengrootte (D): $K_h = (d/D)^{-0,2}$. Bij lage havendammen zal deze waterdiepte op de kruin ongeveer $H_s/5$ à $H_s/2$ zijn (geschat op basis van de proeven van Van der Meer en de Waal (1993)). Met $D/H_s \approx 0,1$ à $0,3$ wordt $K_h \approx 0,7$ à $1,0$.

De hellingfactor K_s heeft betrekking op het feit dat losse stenen op een talud minder stabiel liggen dan op een horizontale bodem. Deze factor is voor steenzettingen op havendammen niet van toepassing ($K_s = 1$). De ψ_{cr} is afhankelijk van het type bekleding en is voor gezette steen $0,05$.

Met deze schattingen van de factoren wordt de formule: $u/\sqrt{(g\Delta D)} \approx 1$ à 2 .

In vergelijking tot de metingen van Van Kruiningen (1989) geeft deze formule dus een lagere stabiliteit. Gezien het feit dat de formule eigenlijk niet bedoeld is voor deze toepassing, wordt hij hier niet gebruikt om de toetsmethode te verbeteren.

Gezien het feit dat er nog niet zoveel bekend is over de stabiliteit van steenzettingen tijdens een stromingsbelasting door golfoverslag worden de volgende toetscriteria met een vrij breed twijfelachtig gebied voorgesteld (voor de bovengrens van het twijfelachtige gebied is wegens gebrek aan kennis een ruwe schatting gemaakt):

- goed als: $u < 2,5 \cdot \sqrt{(g\Delta D)}$ (16)

- twijfelachtig als: $2,5 \cdot \sqrt{(g\Delta D)} < u < 4 \cdot \sqrt{(g\Delta D)}$ (17)

- onvoldoende als: $u > 4 \cdot \sqrt{(g\Delta D)}$ (18)

met: $u =$ maximale snelheid op de kruin (m/s)

Belasting door stroming bij golfoverslag

De optredende stroomsnelheden op een lage kruin zouden gerelateerd kunnen zijn aan de voortplantingsnelheid van de inkomende golven. Deze voortplantingsnelheid kan als volgt berekend worden:

$$v = L_p/T_p = gT_p/(2\pi) \cdot \tanh(2\pi h/(vT_p)) \quad (19)$$

met: $v =$ voortplanting snelheid van de golven (m/s)

$h =$ waterdiepte (m)

$L_p =$ golflengte (m)

Deze formule geeft een bruikbare schatting van de snelheid van het water in de richting van de golven (tijdens het passeren van een golftop), die door de asymmetrie van de golven meestal wat groter is dan de snelheid tegen de golfrichting in (tijdens een golfdal).

Deze formule kan benaderd worden met het volgende:

$$v = \frac{gT_p}{2\pi} \sqrt{\tanh\left(\frac{2\pi h}{gT_p^2}\right)} \quad (20)$$

Toepassing van deze formule op de proeven 3901 en 3905 uit het onderzoek van Van der Meer en de Waal (1993) levert een stroomsnelheid op van $2,2$ m/s voor proef 3901 en $1,9$ m/s voor proef 3905. Tijdens deze proeven is de snelheid ook gemeten, hoewel dit met de beschikbare meetinstrumenten vrij moeizaam bleek te zijn. De gemeten snelheid was

ongeveer 2 m/s, hetgeen overeenkomt met deze rekenresultaten. Op grond hiervan is er vertrouwen in de juistheid van de formule.

Metingen van de stroomsnelheid op de kruin van lage dammen (met de kruin boven de waterlijn, Klein Breteler 1995) geven: $u_{2\%} \approx (1,3 \text{ à } 2,3) \cdot \sqrt{(gH_s)}$, hetgeen voor deze proeven neerkomt op 1,6 à 2,8 m/s. Dit is globaal in overeenstemming met de watersnelheid die berekend is op basis van de voortplantingssnelheid van de golven.

Het is opmerkelijk dat in deze formule alleen de golfhoogte zit, terwijl in de formule, die voortkomt uit de voortplantingssnelheid van de golven, de golfperiode en waterdiepte zit.

Verder wordt in de leidraad Toetsen op Veiligheid ('99) voor het toetsen van gras een formule gegeven voor de rekensnelheid, die de helft is van de maximale stroomsnelheid in de oploopzone, die bij twee procent van de inkomende golven wordt overschreden. Hiermee kan de volgende formule voor de maximale snelheid rond de waterlijn worden afgeleid:

$$u_{2\%} = 220 \cdot g T_p s_{op} \cdot (0.085 - s_{op}) \tan \alpha \quad (21)$$

$$\text{met: } s_{op} = \text{golfsteilheid op diepwater} = H_s / (1,56 T_p^2) \quad (22)$$

Voor steenzettingen gaat de interesse uit naar de maximale stroomsnelheid tijdens het passeren van een hoge golf (met 2% overschrijdingsfrequentie), omdat verwacht mag worden dat een enkele hoge golf al onacceptabele schade kan veroorzaken. Voor gras is juist gekozen voor de gemiddelde snelheid (die ongeveer gelijk is aan de helft van de maximale snelheid) van de relatief hoge golven, omdat voor de erosie van gras veel meer ook de belastingduur een belangrijke rol speelt.

De formule in de Leidraad Toetsen op Veiligheid geeft aan dat voor locaties boven de stilwaterlijn de snelheid gereduceerd mag worden met een factor $\sqrt{(1 - z/z_q)}$, waarin z = hoogte boven de stilwaterlijn (m), en z_q = de hoogte waar een overslagdebiet van 0,1 l/s/m zou worden gevonden (komt ongeveer overeen met $z_{2\%}$). Deze reductie is echter voor deze categorie havendammen slechts gering en valt weg in de grote onnauwkeurigheid waarmee de sterkte kan worden gekwantificeerd. Daarom wordt deze reductie ten behoeve van de eenvoud van de formules weggelaten.

De formule is oorspronkelijk bedoeld voor de snelheid op het buitentalud, maar wordt hier ook van toepassing geacht op de snelheid op de kruin en het binnentalud. Als de kruin relatief laag is, dan mag verwacht worden dat hiermee acceptabele waarden verkregen worden.

Toepassing van deze formule op de proeven 3901 en 3905 uit het onderzoek van Van der Meer en de Waal (1993) levert een stroomsnelheid op van 2,0 m/s, hetgeen goed overeenkomt met de metingen.

Deze formule heeft als voordeel dat zowel de golfhoogte als de golfperiode erin opgenomen is. Daarom heeft deze formule de voorkeur om te gebruiken in relatie tot het toetscriterium voor stromingsbelasting door golfoverslag.

Samenvatting toetscriteria

In het bovenstaande is aandacht gegeven aan twee belangrijke belastingscomponenten:

- het stijghoogteverschil als gevolg van drukgradiënten op de bekleding op een zeker moment tijdens het overtrekken van een golf,
- hoge stroomsnelheden die samenhangen met golfoverslag.

Het is niet te verwachten dat deze twee belastingscomponenten tegelijk optreden en elkaar versterken. Tijdens de golfoverslag is er eerst sprake van een grote verschildruk, en pas daarna zijn er grote stroomsnelheden. Een groot stijghoogteverschil kan slechts optreden als de stijghoogte onder de toplaag groot is en op de bekleding zeer laag is. Juist dan staat er vrijwel geen water op de toplaag. De dunne waterlaag die er eventueel nog is, stroomt niet snel vanwege de relatief hoge stromingweerstand met de bekleding.

Zolang de grote verschildrukken de blokken niet omhoog kunnen lichten, zijn beide belastingscomponenten onafhankelijk en is slechts één van beide maatgevend.

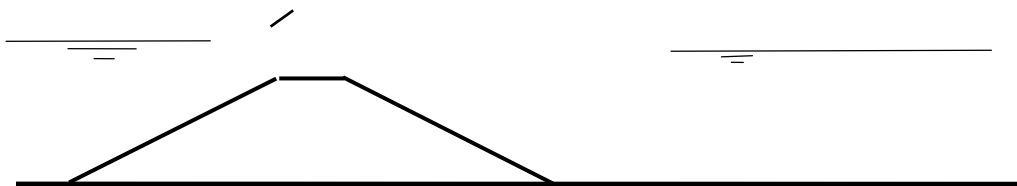
De aanbevolen toetscriteria voor havendammen met een kruin op- of boven de waterlijn, maar niet meer dan een significante golfhoogte boven de waterlijn ($0 < h_c < H_s$) zijn de volgende toetscriteria voorgesteld:

- buitentalud
als steenzetting op normale dijk
 - kruin en binnentalud
 - goed als: $u < 2,5 \cdot \sqrt{g\Delta D}$ EN $H_s/(\Delta D) < 5$ (23)
 - twijfelachtig als: $2,5 \cdot \sqrt{g\Delta D} < u < 4 \cdot \sqrt{g\Delta D}$ of $5 < H_s/(\Delta D) < 12$ (24)
 - onvoldoende als: $u > 4 \cdot \sqrt{g\Delta D}$ of $H_s/(\Delta D) > 12$ (25)
- met: $u = 220 \cdot g T_{p s_{op}} \cdot (0.085 - s_{op}) \tan \alpha$ (26)

Als het resultaat ‘twijfelachtig’ is, dan kan er een geavanceerde toetsing uitgevoerd worden. De nadere bestudering van het specifieke geval kan soms tot een wat scherpere beoordeling leiden, en in andere gevallen kan er uitsluitsel verkregen worden door middel van modelonderzoek.

4.1.4 Kruin iets onder de waterlijn

Met de kruin iets onder de waterlijn wordt niet alleen het buitentalud zwaar belast door brekende golven met golfklappen, maar kunnen er ook golfklappen plaatsvinden op de kruin van de havendam. Daarnaast zijn er de hoge stroomsnelheden te verwachten zoals die beschreven zijn in de vorige paragraaf.



De belasting op de kruin van de havendam is ten aanzien van de belasting tijdens steile en hoge golffronten en door golfklappen te vergelijken met de belasting op een lage berm op

een normale dijk. Hoewel de waterbeweging op een lage berm niet helemaal hetzelfde is als de waterbeweging op een lage havendam, is de rekenmethode voor bermen waarschijnlijk de best bruikbare methode die thans beschikbaar is.

Voor de belasting als gevolg van de hoge stroomsnelheden, die door de brekende golven worden veroorzaakt, kan gebruik gemaakt worden van dezelfde criteria als bij de havendammen die net boven de stilwaterlijn uitkomen:

- toetsing kruin en binnentalud ten aanzien van stromingsbelasting:

- goed als: $u < 2,5 \cdot \sqrt{(g\Delta D)}$ (27)

- twijfelachtig als: $2,5 \cdot \sqrt{(g\Delta D)} < u < 4 \cdot \sqrt{(g\Delta D)}$ (28)

- onvoldoende als: $u > 4 \cdot \sqrt{(g\Delta D)}$ (29)

- met: $u = 220 \cdot g T_{p, s_{op}} \cdot (0.085 - s_{op}) \tan \alpha$ (30)

Het is denkbaar dat bij dieper liggende havendammen ($h_c/H_s < -0,5$) de belasting op de kruin wat begint af te nemen. Anderzijds zou de stroming tegen de golfrichting in, tijdens het golfdal, een iets hogere stroomsnelheid kunnen geven dan volgens bovenstaande formule. Gezien het feit dat deze bijzondere aspecten nog niet kwantificeerbaar zijn, is gekozen voor een simpel toetscriterium zonder deze mogelijke invloeden. Eventueel zou gekozen kunnen worden voor een iets breder twijfelachtig gebied, bijvoorbeeld $2,5 \cdot \sqrt{(g\Delta D)} < u < 5 \cdot \sqrt{(g\Delta D)}$, maar ook daar is omwille van de eenvoud nog van afgezien.

Bij een gegeven waterstand wordt de toetsprocedure als volgt:

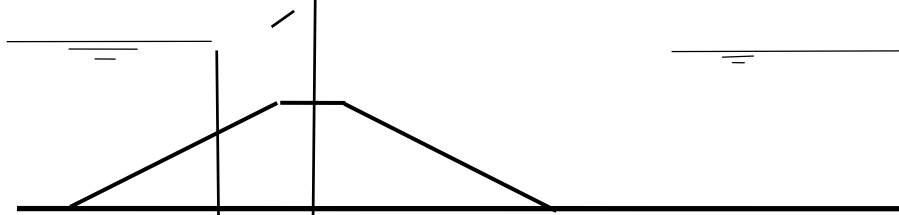
- buitentalud:
 - voer de toetsing uit alsof het een steenzetting op een gewone dijk is.
- kruin:
 1. steile en hoge golffronten en golfklappen
 - bepaal de waarde van de bermfactor met figuur 3 en 4 (de figuren voor de invloedsfactor van bermen zijn gespiegeld om de verticale as ten behoeve van de toepassing voor kruinen, omdat $-h_c = d_B = \text{bermdiepte}$).
 - bepaal de rekenwaarde van de dikte van de toplaag door de aanwezige dikte te delen door de bermfactor.
 - voer de toetsing uit met de grafieken uit de eenvoudige methode of met ANAMOS (gedetailleerde methode), maar reken steeds met de rekenwaarde van de dikte van toplaag.
 2. voer de toetsing uit ten aanzien van stromingsbelasting
 3. de laagste score van de twee toetsingen is de eindscore
- achtertalud van de havendam:
 - voer de toetsing uit ten aanzien van stromingsbelasting (er zijn geen eisen ten aanzien van steile en hoge golffronten en golfklappen)

Naarmate de kruin van de havendam verder onder water ligt, zal ook de belasting van het buitentalud afnemen. Dit is ten aanzien van golffronten onderzocht met behulp van modelonderzoek waarbij er sprake was van een normale dijk met een berm. De metingen waren erop gericht te beoordelen hoe groot de belasting was op het talud onder de berm. De resultaten zijn gerapporteerd door de Waal et al (1995). Uit de metingen blijkt dat vanaf $h_c \approx -H_s$ de belasting op het onder talud duidelijk begint af te nemen met het lager worden van de berm. Daarom wordt voorgesteld om deze categorie havendammen te begrenzen met:

$$-1 < h_c/H_s < 0.$$

4.1.5 Kruin ruim onder de waterlijn

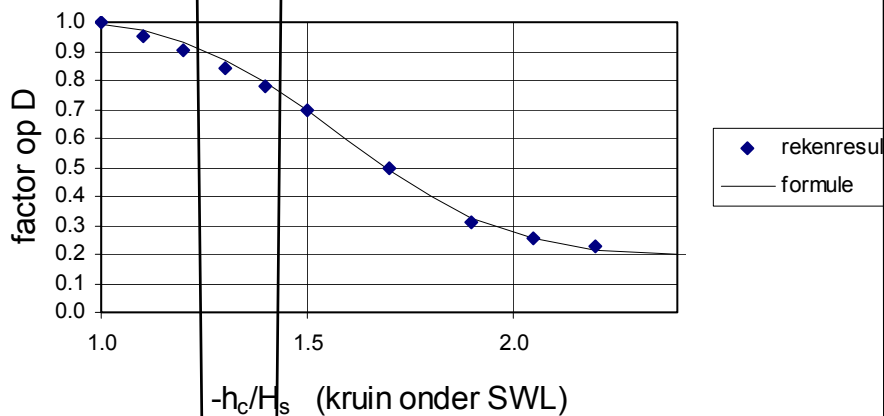
Als de kruin ruim een golfhoogte onder de stilwaterlijn ligt, is het de verwa maximaal belast wordt door golfklappen en golffronten. Deze verwachting i de constatering dat dit ook bij bermen het geval is. De belasting op het buite $h_c/H_s < -1$ steeds verder afnemen met afnemende kruinhoogte. Overige golfreducerende werking van de havendam steeds verder afnemen.



Buitentalud

De belasting op het buitentalud is waarschijnlijk goed vergelijkbaar met di onder bermen, waarbij de berm ruim onder water ligt. Op basis van m afmetingen van golffronten is de invloed van de bermdiepte op stijghoogteverschil ter plaatse van het talud onder de berm gekwantificeerd (1995). Deze invloed kan bij benadering ook gebruikt worden om de be buitentalud te kwantificeren. De formules uit (de Waal et al 1995) zij onderstaande figuur te maken.

invloedsfactor bekleding buitentalud



In bovenstaande figuur is te zien dat de benodigde toplaagdikte op het buite bij afnemende kruinhoogte van de havendam, want op de verticale as is toplaagdikte uitgezet, genormeerd op de toplaagdikte bij $h_c/H_s = -1$. De get beschreven worden met de volgende formule:

$$f = 0,2 + 0,8 \cdot e^{1,4(0,8 + h_c/H_s)^3} \quad (31)$$

Voorgesteld wordt om deze figuur of formule te gebruiken bij het toetsen van het buitentalud. Daartoe moet een rekenwaarde van de toplaagdikte bepaald worden door de aanwezige toplaagdikte te delen door de factor f uit de figuur. Vervolgens kan de toetsing plaatsvinden met deze rekenwaarde van de toplaagdikte met de figuren uit de eenvoudige toetsing of met ANAMOS (gedetailleerde toetsing).

kruin en binnentalud

De waterdiepte boven de kruin is al vrij groot in deze categorie havendammen, waardoor de stroomsnelheden over de kruin door de brekende golven afnemen. In combinatie met het feit dat de belasting door golfklappen en golffronten op de kruin tussen $-2 < h_c/H_s < -1$ een maximum bereikt, wordt aangenomen dat de belasting door stroming niet meer maatgevend is voor de kruin. Daardoor vervalt in deze categorie de toetsing op stromingsbelasting.

De steenzetting op de kruin hoeft daardoor slechts nog te worden getoetst met een belasting door golfklappen en golffronten, conform de kruinbekledingen in de vorige paragraaf.

De belasting op het binnentalud van de havendam is waarschijnlijk gering. Daarom wordt voorgesteld deze niet te toetsen (altijd goed).

Uit figuur 3 en 4 blijkt dat de invloedsfactor bij toenemende diepte van de kruin steeds verder afneemt, maar bij $h_c/H_s = -3$ nog steeds een waarde heeft van ongeveer 0,4 à 0,5. De afnemende takken in deze figuren ($h_c/H_s < -1,5$) zijn niet gebaseerd op metingen, omdat er voor deze situaties geen metingen beschikbaar zijn. Het verloop van de lijnen is geschat op een zodanige manier dat het resultaat van de berekeningen zeker conservatief is. Dit heeft er echter toe geleid dat de invloedsfactor voor kruinen dieper dan $h_c/H_s \approx -2$ wat te hoog is uitgekomen. Als de bodem drie golfhogtes onder de waterlijn ligt, is het de ervaring dat de golven niets van de bodem 'voelen' (er breken vrijwel geen golven), en zullen er geen drukfluctuaties op de bodem zijn die de stabiliteit van een steenzetting kunnen bedreigen. Op grond van deze ervaring wordt gesteld dat bij $h_c/H_s = -3$ de invloedsfactor 0 zou moeten zijn.

Met dit in gedachten zijn de figuren voor de invloedsfactor voor kruinbekledingen aangepast, zie figuur 5 en 6. Deze figuren moeten toegepast worden bij het toetsen van de kruin van een havendam:

- kruin:
 - bepaal de waarde van de kruinfactor met figuur 5 en 6.
 - bepaal de rekenwaarde van de dikte van de toplaag door de aanwezige dikte te delen door de kruinfactor.
 - voer de toetsing uit met de grafieken uit de eenvoudige methode of met ANAMOS (gedetailleerde methode), maar reken steeds met de rekenwaarde van de dikte van de toplaag.

Deze toetsingsmethode is te gebruiken voor havendammen met $-3 < h_c/H_s < -1$. (32)

4.1.6 Kruin ver onder de waterlijn

Als de kruin van de havendam ver onder water ligt ($h_c/H_s < -3$) wordt de steenzetting nauwelijks belast en is het toetsresultaat dus in alle gevallen ‘goed’. Er is echter ook geen golfreducerende werking te verwachten.

4.1.7 Rekenvoorbeelden

Met de veelheid aan categorieën havendammen en de diverse formules die gebruikt moeten worden voor het toetsen van de steenzettingen, is het moeilijk om een goed overzicht te houden over de toetsmethode. In deze paragraaf is de toetsmethode in beeld gebracht door een aantal rekenvoorbeelden uit te werken en de resultaten te presenteren in de vorm van grafieken met op de horizontale as de dimensieloze kruinhoogte, h_c/H_s , en op de verticale as de ΔD (onder water gewicht per vierkante meter van de toplaag). Steeds is de toplaag op de kruin doorgerekend.

Het eerste voorbeeld betreft een gunstige steenzetting (zoals Basalton en Hydroblocks op een dun filter). Als deze steenzetting op een talud zou worden toegepast, zou een berekening met ANAMOS leiden tot het volgende resultaat ten aanzien van de stabiliteit:

$$H_s/(\Delta D) = F \cdot \xi_{op}^{-2/3}, \text{ met } F = 6. \quad (33)$$

De golfbelasting bestaat uit golven met $H_s = 2,0$ m, $T_p = 6,0$ s ($H_s/L_{op} = 0,036$) en de taludhelling van het buitentalud is 1:4.

Het resultaat is te zien in onderstaande figuur:

Uit de figuur blijkt dat de aansluiting tussen de verschillende categorieën havendammen, met hun eigen toetscriteria, vrij goed is. Er wordt overgestapt op andere toetscriteria bij $h_c/H_s = -3, -1, 0$ en $+1$. Er is in de figuur geen sprong te zien in het verloop van de lijnen bij deze waarden van h_c/H_s .

goed

Het tweede voorbeeld betreft een niet al te gunstige steenzetting, vergelijkbaar met blokken met vrij smalle spleten. Deze constructie heeft volgens ANAMOS een stabiliteitsparameter van $F = 4$.

Het resultaat is te zien in onderstaande figuur twijfel

Ook in dit rekenvoorbeeld blijkt dat de verschillende criteria goed op elkaar aansluiten. Het feit dat dit volgens ANAMOS een zwakkere steenzetting is, komt alleen tot uiting in de toetsing als de kruin onder water ligt onvoldoende

Het derde rekenvoorbeeld betreft een steenzetting die belast wordt door wat langere golven dan het eerste rekenvoorbeeld: $T_p = 8$ s. Het resultaat is te zien in onderstaande figuur: goed

De aansluiting tussen de toetscriteria is ook nu weer vrij goed, behalve bij $h_c/H_s = 1$ is de aansluiting minder fraai.

Het vierde voorbeeld heeft weer een twijfel T_p goed, maar heeft ten opzichte van het eerste voorbeeld een steilere taludhelling: $\tan \alpha = 0,33$. Het resultaat is gegeven in onderstaande figuur:

onvoldoende

twijfel

onvoldoende

Uit de figuur blijkt dat er nu een minder mooie aansluiting is bij $h_c/H_s = -1$ en 1 voor wat betreft de grens tussen ‘goed’ en ‘twijfelachtig’. Er is een sprong zichtbaar in het verloop van de lijn van $\Delta D \approx 0,65$ naar $\Delta D \approx 0,93$ bij $h_c/H_s = -1$.

In het vijfde voorbeeld is ten opzichte van het vierde voorbeeld de golfperiode vergroot: $T_p = 8$ s (vergelijkbaar met het derde voorbeeld, met $\tan\alpha = 0,33$). Het resultaat is gegeven in onderstaande figuur:

Ten opzichte van het vierde voorbeeld is nu te zien dat de aansluitingen bij $h_c/H_s = -1$ en 1 veel beter zijn.

4.2 Asfaltbekledingen

Er zijn verschillende soorten bekledingen die bij het toetsen vallen onder de verzamelnaam ‘asfaltbekledingen’, namelijk:

- waterbouwasfaltbeton
- met asfalt gepenetreerde steenzettingen
- zandasfalt (bijvoorbeeld in onderlaag, of als tijdelijke bekleding)
- vol en zat met asfalt gepenetreerde breuksteen
- open steenasfalt
- asfalt mastiek
- dicht steenasfalt
- geprefabriceerde open steenasfaltmatten (evt.) met wapening

Al deze bekledingen hebben gemeen dat zij functioneren als een samenhangende plaatbekleding met enige flexibiliteit ten aanzien van langzame vervormingen. Verder zijn zij zeer goed bestand tegen een belasting door stroming. De meeste zijn waterondoorlatend en daardoor gevoelig voor statische wateroverdruk.

Ten aanzien van havendammen met een asfaltbekleding wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende drie typen:

1. Hoge dammen

Als de kruin van de dam ver boven water uitsteekt is de belasting op de bekleding zeer vergelijkbaar met die van een asfaltbekleding op een gewone dijk.

2. Dammen met een kruin rond de waterlijn

Bij dit type is er zeer veel golfoverslag of verdwijnt de kruin zelfs vrijwel permanent onder water. De belasting bestaat dan uit golfklappen en de wateroverdrukken, zoals behandeld in de LTV '99. Daarnaast kan de kruin zo water- en luchtdicht zijn, dat tijdens het stijgen van de waterstand er lucht opgesloten raakt onder de kruin.

3. Lage dammen

Naarmate de kruin van de dam verder onder water verdwijnt zal de belasting door golfklappen afnemen. De belasting door wateroverdruk en opgesloten lucht onder de kruin kan nog wel een zware belasting geven.

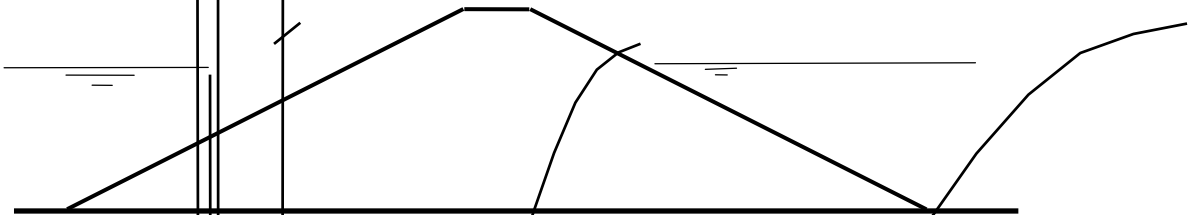
Voor elk van deze typen wordt in dit hoofdstuk een concrete afbakening gegeven en wordt een toetsmethode voorgesteld op basis van een beschouwing van de optredende belastingen en de sterkte. Gezien het feit dat er nog weinig kennis is over de stabiliteit van

havendammen met een asfaltbekleding, is de gegeven kwantificering voornamelijk gebaseerd op ervaring met vergelijkbare bekledingen en bezwijkmechanismen. Vanwege de smalle basis voor deze toetsmethodiek is enerzijds gestreefd naar een voldoende breed twijfelachtig gebied, maar moet anderzijds aanbevolen worden met nader onderzoek meer informatie beschikbaar te krijgen.

4.2.1 Hoge havendammen met asfaltbekleding

Hoge havendammen hebben een kruin die ver boven water uitsteekt, maar waar wel een aanzienlijke hoeveelheid golfoverslag kan plaatsvinden. De dammen die gerekend worden onder dit type voldoen aan het volgende criterium:

$$h_c/H_s > 0,5$$



De toetsing van het buitentalud kan op dezelfde wijze uitgevoerd worden als in de Leidraad Toetsen op Veiligheid (LTV '99), echter rekening houdend met het volgende:

- Wateroverdrukken zijn pas een probleem als de waterstand daalt na een hoge waterstand. Omdat het langs meren en bovenrivieren buitengewoon zeldzaam is dat er na een hoge waterstand eerst een lage waterstand optreedt en daarna nog eens de maatgevende toetsomstandigheden, gecombineerd met het feit dat de havendam slechts een ondersteunende functie heeft binnen het waterkeringsysteem, wordt voorgesteld om alleen op wateroverdrukken te toetsen langs de estuaria en zeeën en in het benedenrivierengebied.
- Ten aanzien van wateroverdrukken moet er rekening gehouden worden met een vrij hoge freatische lijn, omdat het water langs de binnenzijde en de buitenzijde in de dam kan binnendringen. Voor de grens tussen 'goed' en 'twijfelachtig' kan gerekend worden met een freatische lijn gelijk aan de maximale buitenwaterstand. Voor de grens tussen 'twijfelachtig' en 'onvoldoende' kan gerekend worden met een niveau van de freatische lijn halverwege tussen het maximale toetspeil en de gemiddelde waterstand onder normale omstandigheden.
- Als niet alleen de kruin van asfalt is, maar ook de aansluitende taluds aan binnen- en buitenzijde een dichte bekleding hebben (lucht en water ondoorlatend) moet rekening gehouden worden met het mechanisme 'opbarsten door ingesloten lucht' (zie verderop in dit hoofdstuk).
- In de LTV ('99) staat aangegeven dat boven een niveau van $SWL + H_s/2$ alleen een visuele toetsing nodig is. Hieraan kan toegevoegd worden dat boven een niveau van $SWL + z_{2\%}/2$ de toetsingscriteria nog verder versoepeld kunnen worden (met $z_{2\%}$ = golfoplooppniveau dat door 2 procent van de golven overschreden wordt). De havendam heeft immers slechts een ondersteunende functie in het waterkeringsysteem en bovendien kan enige schade op een niveau ruim boven de waterlijn nauwelijks uitgroeien tot iets waarbij er beduidend meer golfoverslag plaatsvindt over de havendam. Daarom wordt voorgesteld om bij de visuele inspectie boven een niveau van $SWL + z_{2\%}/2$ de

eindscore ‘twijfelachtig’ te vervangen door ‘goed’ en de eindscore ‘onvoldoende’ te vervangen door ‘twijfelachtig’. Als er dan gaten en scheuren zijn geconstateerd in het asfalt, die op een dijk nog net een score ‘onvoldoende’ zouden geven, dan kan het op een havendam nog net acceptabel zijn en toch in een score ‘goed’ kunnen resulteren als ingeschat wordt dat de mogelijke kruinverlaging niet tot onacceptabele golftransmissie leidt.

- Uiteraard geldt dat de bekleding boven $SWL+z_{2\%}$ in alle gevallen ‘goed’ is.
- De toetsing van de kruin en het binnentalud van de havendam kan verder plaatsvinden op dezelfde wijze als de bovenrand van het buitentalud.

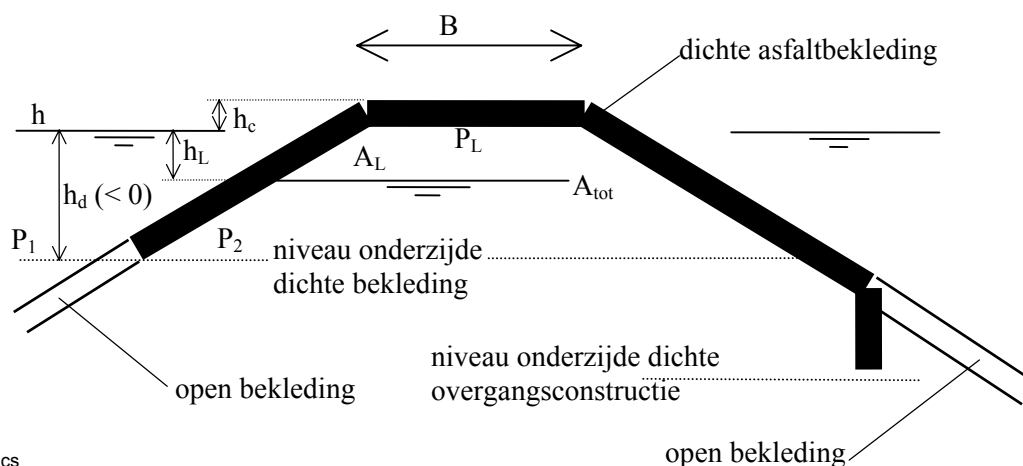
opbarsten door ingesloten lucht

Als de kruin van de havendam volledig lucht- en waterdicht is, inclusief de aansluitende bekledingen op het binnen- en buitentalud, kan er een mechanisme optreden dat bij dijken is uitgesloten en niet in de Leidraad Toetsen op Veiligheid wordt behandeld. De stijgende freatische lijn tijdens maatgevende omstandigheden kan ervoor zorgen dat er een luchtbel onder de kruin ingesloten raakt en door de waterdruk gecompriëerd wordt. De hiermee samenhangende opwaartse druk is zodanig groot dat de kruinbekleding kan openbarsten. Dit aspect moet derhalve opgenomen worden in de toetsregels. Mocht dit volgens de toetsing mogelijk een probleem vormen, dan is dit veelal eenvoudig op te lossen door luchtpijpjes in de kruin te plaatsen.

Er zijn gevallen waarbij dit bezwijkmechanisme niet te verwachten is:

- Als alleen de kruin van dicht asfalt is, en de aansluitende taluds een open bekleding hebben (lucht en water doorlatend)
- Als alleen de kruin en het binnentalud van dicht asfalt zijn en het buitentalud een open bekleding heeft
- Als alleen de kruin en het buitentalud van dicht asfalt zijn en het binnentalud een open bekleding heeft
- Als er in de kruin een voldoende aantal goed werkende luchtpijpje zijn geplaatst.
- Als de kruin van opensteenafsluit is gemaakt.

In het geval dat de dichte asfaltbekleding de kruin en binnen- en buitentalud beschermen, moet op zowel het binnentalud als het buitentalud worden vastgesteld tot welk niveau de dichte bekleding doorloopt. Daarbij geldt het niveau van de onderzijde van de bekleding, of de onderzijde van een daarop aansluitende overgangsconstructie. Dit is toegelicht in onderstaande figuur.



Van deze niveaus op het binnentalud en het buitentalud is de hoogste maatgevend. Dit niveau wordt h_d genoemd. Omdat dit gerelateerd wordt aan de buitenwaterstand is dit doorgaans een negatief getal. Dit geldt ook voor h_L .

Om de druk P_L in de opgesloten luchtbel onder de kruin te kunnen berekenen, beginnen we met de constatering dat op een lijn ter hoogte van h_d de druk in de constructie gelijk is aan de druk buiten (zie figuur). Als aangenomen wordt dat het water in de dijk niet stroomt, levert dit de volgende formules:

$$\begin{aligned} P_1 = P_2 &= \rho g(h_L - h_d) + P_L \\ P_1 = -\rho g h_d & \Rightarrow P_L = -\rho g h_L \end{aligned} \quad (34)$$

met: P_i = druk in punt i ten opzichte van de atmosferische druk (Pa)
 ρ = soortelijke massa van het water (kg/m^3)
 g = versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)
 P_L = luchtdruk onder de kruin ten opzichte van de atmosferische druk (Pa)
 h_d = het niveau aan de onderzijde van de bekleding waar de dichte bekleding begint (hoogste van binnen- en buitentalud) t.o.v. de buitenwaterstand (m)
 h_L = niveau van de freatische lijn t.o.v. de buitenwaterstand (m)

De luchtdruk onder de kruin is afhankelijk van de mate waarin de lucht gecompriemd is. Als het volume lucht onder de kruin (A_L) gehalveerd wordt, neemt de druk met een factor twee toe, waarbij 1 atm overeenkomt met 10 m waterkolom. Dit levert de volgende formule voor de luchtdruk op:

$$P_L = 10 \rho g \frac{A_{\text{tot}}}{A_L} - 1 \quad (35)$$

met: A_{tot} = het totale volume onder de bekleding, boven de lijn ter hoogte van h_d (m^2)
 A_L = het volume lucht (m^2)

Voor een eenvoudige geometrie van een dam met binnen- en buitentaludhelling α en kruinbreedte B, geldt:

$$A_{\text{tot}} = B + \frac{h_c - D - h_d}{\tan \alpha} (h_c - D - h_d) \quad (36)$$

$$A_L = B + \frac{h_c - D - h_L}{\tan \alpha} (h_c - D - h_L) \quad (37)$$

met: B = kruinbreedte (m)
 h_c = kruinhoogte ten opzichte van de stilwaterlijn (m)
D = dikte van de bekleding op de kruin (m)

$$\alpha = \text{taludhelling (}^\circ\text{)}$$

Substitutie van bovenstaande formules levert het volgende op:

$$-\frac{1}{10} h_L + 1 = \frac{A_{tot}}{A_L} = \frac{(B + (h_c - D - h_d) / \tan \alpha)(h_c - D - h_d)}{(B + (h_c - D - h_L) / \tan \alpha)(h_c - D - h_L)} \quad (38)$$

als $h_c \leq 0$, reken dan met $h_c = 0$.

In deze formule is alleen h_L een onbekende en kan dus berekend worden (derde graads vergelijking). In de formule hoeft nooit met een waterstand boven de kruin gerekend te worden, omdat een hogere waterstand weliswaar een hogere druk onder de kruin oplevert, maar dat wordt gecompenseerd door de druk op de kruin.

Vervolgens kan met de berekende h_L de grootte van P_L berekend worden ($P_L = -\rho g h_L$). In onderstaande figuur zijn enkele resultaten van berekeningen gegeven. Het blijkt dat wanneer $h_d < -1$ m de opwaartse druk als gevolg van de gecompriëerde lucht al vrij grote waarden aanneemt, namelijk $P_L > 7$ kPa, ofwel meer dan 70 cm waterkolom.

Voor het beoordelen van de stabiliteit geldt dat de bekleding zeker stabiel blijft als de luchtdruk niet groter wordt dan het overeenkomstige eigen gewicht van de toplaag. Is de luchtdruk groter, dan hoeft de bekleding nog niet direct te bezwijken. De toplaag zou immers toch enigszins lek kunnen zijn (of worden na een geringe beweging), waardoor een deel van druk wegvloeit, maar de toplaag zou ook buigende momenten kunnen opnemen. Verder is het denkbaar dat als $h_c \gg z_{2\%}/2$ en bovendien de aanwezigheid van scheuren in de kruin acceptabel is, dat dan ook het opbarsten van de kruinbekleding acceptabel zou kunnen zijn.

Deze bijzondere aspecten zouden in een geavanceerde toetsing nader bekeken kunnen worden, eventueel ondersteund met metingen.

Daarom wordt voorgesteld om de bekleding pas een onvoldoende te geven als de luchtdruk aanzienlijk groter is dan het eigen gewicht:

- goed als: $P_L < \rho_t g D$ (39)

- twijfelachtig als: $\rho_t g D \leq P_L \leq 2\rho_t g D$ of (40)

als $h_c \gg z_{2\%}/2$ en bovendien de aanwezigheid van scheuren in de kruin acceptabel is

- onvoldoende als: $P_L > 2\rho_t g D$ (41)

Gezien het feit dat een asfaltbekleding van ongeveer 35 cm in evenwicht is met een opwaartse druk van 7 kPa en asfaltbekledingen zelden dikker zijn, is het met bovenstaande figuur duidelijk dat bij $h_d < -1$ m er doorgaans geen score 'goed' resulteert.

Als het resultaat twijfelachtig is, dan kan er een geavanceerde toetsing uitgevoerd worden. De nadere bestudering van het specifieke geval kan soms tot een wat scherpere beoordeling leiden, en in andere gevallen kan er uitsluitel verkregen worden door middel van modelonderzoek.

4.2.2 Havendammen met asfaltbekleding met kruin rond SWL

Ten opzichte van een hoge havendam, zal er bij havendammen met een kruin rond de stilwaterlijn ook een aanzienlijke belasting van golfklappen op de kruin kunnen

plaatsvinden. Daardoor zijn er enkele extra eisen ten aanzien van de kruin als deze onder de waterlijn ligt.

Het asfalt kan getoetst worden volgens de normale methode uit de Leidraad Toetsen op Veiligheid, echter rekening houdend met het volgende:

- Wateroverdrukken zijn pas een probleem als de waterstand daalt na een hoge waterstand. Omdat het langs meren en bovenrivieren buitengewoon zeldzaam is dat er na een hoge waterstand eerst een lage waterstand optreedt en daarna nog eens de maatgevende toetsomstandigheden, gecombineerd met het feit dat de havendam slechts een ondersteunende functie heeft binnen het waterkeringsysteem, wordt voorgesteld om alleen op wateroverdrukken te toetsen langs de estuaria en zeeën en in het benedenrivierengebied.
- Ten aanzien van wateroverdrukken moet er rekening gehouden worden met een vrij hoge freatische lijn, omdat het water langs de binnenzijde en de buitenzijde in de dam kan binnendringen. Voor de grens tussen ‘goed’ en ‘twijfelachtig’ kan gerekend worden met een freatische lijn gelijk aan de maximale buitenwaterstand (maar niet hoger dan de kruin). Voor de grens tussen ‘twijfelachtig’ en ‘onvoldoende’ kan gerekend worden met een niveau van de freatische lijn halverwege tussen het maximale toetspeil en de gemiddelde waterstand onder normale omstandigheden.
- Als niet alleen de kruin van asfalt is, maar ook de aansluitende taluds aan binnen- en buitenzijde een dichte bekleding hebben (lucht en water ondoorlatend) moet rekening gehouden worden met het mechanisme ‘opbarsten door ingesloten lucht’ (zie vorige paragraaf).
- De kruin moet op golfklappen getoetst te worden als $h_c/H_s < 0$.
- Het binnentalud hoeft niet op golfklappen getoetst te worden.

Naarmate de kruin van de havendam dieper onder de waterlijn ligt zal de belasting door golfklappen geleidelijk aan afnemen. Deze afname zal echter zeker niet optreden boven $h_c/H_s = -0,5$. Daarom wordt deze categorie havendammen begrensd met het volgende criterium: $-0,5 < h_c/H_s < 0,5$

4.2.3 Havendammen met asfaltbekleding met kruin ruim onder SWL

De golfbelasting op een havendam met kruin ruim onder de stilwaterlijn zal gekenmerkt worden door brekende golven die soms ook golfklappen veroorzaken op het buitentalud en de kruin. Naarmate de kruin dieper ligt zullen de golfklappen steeds vaker in een dikke waterlaag gesmoord worden en zullen er steeds minder een zware belasting op een vrijwel droge bekleding geven. Gezien de plaats waar golfklappen op een doorlopend talud (dijk) plaatsvinden is het te verwachten dat de afname van de kracht van de golfklappen begint als de kruin meer dan ongeveer $0,5H_s$ à $1,0H_s$ onder de stilwaterlijn ligt.

Hoewel hierover geen informatie beschikbaar is, wordt voorgesteld om in de toetsing rekening te houden met het feit dat de golfklappen zullen afnemen naarmate de kruin dieper onder water ligt. Uit ervaring met andere constructies is gebleken dat de golfbelasting vrijwel verdwenen is als de kruin ongeveer $2H_s$ onder water ligt. Met dit gegeven, gecombineerd met de constatering dat de golfklappen beginnen af te nemen als de kruin meer dan ongeveer $0,5H_s$ à $1,0H_s$ onder de stilwaterlijn ligt, is de volgende reductiefactor bedacht:

- Grens tussen ‘goed’ en ‘twijfelachtig’:
 - als $h_c/H_s < -1$: $f = e^{1-(h_c/H_s)^2}$ (42)
 - als $h_c/H_s > -1$: $f = 1$ (43)
- Grens tussen ‘twijfelachtig’ en ‘onvoldoende’:
 - als $h_c/H_s < -0,5$: $f = e^{0,25-(h_c/H_s)^2}$ (44)
 - als $h_c/H_s > -0,5$: $f = 1$ (45)

Voorgesteld wordt om het asfalt te toetsen volgens de normale methode uit de Leidraad Toetsen op Veiligheid, echter rekening houdend met het volgende:

- Voor de beoordeling op golfklappen mag de aanwezige dikte van het asfalt gedeeld worden door bovenstaande invloedsfactor.
- Het binnentalud hoeft niet op golfklappen getoetst te worden.
- Wateroverdrukken zijn pas een probleem als de waterstand daalt na een hoge waterstand. Omdat het langs meren en bovenrivieren buitengewoon zeldzaam is dat er na een hoge waterstand eerst een lage waterstand optreedt en daarna nog eens de maatgevende toetsomstandigheden, gecombineerd met het feit dat de havendam slechts een ondersteunende functie heeft binnen het waterkeringsysteem, wordt voorgesteld om alleen op wateroverdrukken te toetsen langs de estuaria en zeeën en in het benedenrivierengebied.
- Ten aanzien van wateroverdrukken moet er rekening gehouden worden met een vrij hoge freatische lijn, omdat het water langs de binnenzijde en de buitenzijde in de dam kan binnendringen. Voor de grens tussen ‘goed’ en ‘twijfelachtig’ kan gerekend worden met een freatische lijn gelijk aan de maximale buitenwaterstand (maar niet hoger dan de kruin). Voor de grens tussen ‘twijfelachtig’ en ‘onvoldoende’ kan gerekend worden met een niveau van de freatische lijn halverwege tussen het maximale toetspeil en de gemiddelde waterstand onder normale omstandigheden.
- Als de kruin en de aansluitende taluds water- en luchtdicht zijn, moet er getoetst worden op het ontstaan van overdruk door opgesloten lucht (zie paragraaf 4.2.1).

4.3 Grasbekledingen

Voor de toetsing van grasbekledingen kan gebruik gemaakt worden van de Leidraad Toetsen op Veiligheid, waarbij er rekening gehouden moet worden met enkele kleine wijzigingen die onderstaand behandeld worden.

Met het schema in figuur 4.7.2.1 in de Leidraad Toetsen op Veiligheid komt men voor havendammen al gauw uit op de toetsing op golfklappen (onder de waterlijn) en de toetsing op stroming (boven de waterlijn). Voor dit aspect van de toetsing moet rekening gehouden worden met het volgende:

- Het binnentalud moet getoetst worden op stroming zolang de kruin hoger ligt dan een halve golfhoogte onder de waterlijn ($h_c/H_s > -0,5$). Deze toetsing moet worden uitgevoerd voor dat deel van het binnentalud dat niet meer dan een halve golfhoogte onder water ligt ($z > h - H_s/2$). Als de kruin boven water ligt ($h_c > 0$), kan volstaan worden met een toetsing op stroming op dat deel van het binnentalud dat niet meer dan een kwart golfhoogte onder water ligt ($z > h - H_s/4$). De golfoverslag veroorzaakt een stroming op het binnentalud die als een waterstraal tot onder de waterlijn tot een

aanzienlijke belasting leidt. Als de kruin erg laag ligt, moet tevens rekening gehouden worden met het feit dat er een golfdal aanwezig kan zijn op het moment dat de waterstraal het binnentalud belast.

- Het binnentalud hoeft niet op stroming beoordeeld te worden als de kruin meer dan een halve golfhoogte onder de waterlijn ligt ($h_c/H_s < -0,5$). Er zal dan nog wel enige stroming door de brekende golven op het binnentalud plaatsvinden, maar dat is zo gering dat elke grasmat dit kan weerstaan.
- Het binnentalud hoeft niet op golfklappen beoordeeld worden.
- Als de kruin onder water ligt, maar niet meer dan een golfhoogte eronder ($-1 < h_c/H_s < -0$), moeten kruin en buitentalud getoetst worden op golfklappen.
- Als de kruin meer dan een golfhoogte onder de waterlijn ligt ($h_c/H_s < -1$), is een toetsing op golfklappen niet meer nodig, maar moet de kruin wel getoetst worden op stroming. Onder deze omstandigheden zullen de golven nog wel breken boven de havendam, maar de golfklappen zullen neerkomen in een dikke waterlaag waardoor hun kracht niet direct op het gras kan aangrijpen. Het gras op het buitentalud moet getoetst worden op stroming tot een halve golfhoogte onder de kruin, maar nooit lager dan $2H_s$ onder de waterlijn ($z > \max(h - 2H_s ; h_c - H_s/2)$).
- Als de kruin meer dan twee golfhoogten onder de waterlijn ligt ($h_c/H_s < -2$), dan is een toetsing van de grasmat niet meer noodzakelijk. Het resultaat is dan 'goed'. Uit ervaring met andere constructies is gebleken dat de golfbelasting vrijwel verdwenen is als de kruin ongeveer $2H_s$ onder water ligt.

4.4 Breuksteen

De toetsing van constructies met breuksteen wordt tot nu toe niet beschouwd in de Leidraad Toetsen op Veiligheid (1999). Wel zijn er veel proefresultaten beschikbaar van proeven die zijn uitgevoerd met veel verschillende typen golfbrekers met breuksteen. Deze zijn gebruikt bij de beschrijving van de toetsing voor havendammen met breuksteen.

4.4.1 Kruin ver boven de waterlijn

Wanneer de kruin ver boven de waterlijn ligt ($h_c/H_s > 0.8$) zal de grootste schade optreden op het buitentalud onder invloed van golfaanval. De kruin en het binnentalud worden in deze situatie nauwelijks belast en zullen daarom als stabiel worden beschouwd. Als gevolg van de golfaanval zal een profiel ontstaan waarvan het talud minder steil wordt, waardoor een S-profiel ontstaat. Voor het toetsen van de stabiliteit van de breuksteen op het buitentalud zijn onderstaande formules (Van der Meer, 1988) beschikbaar:

$$\text{Voor plunging waves, als } \xi_m < \left[6.2 P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha}\right]^{\frac{1}{p+0.5}} : \quad (46)$$

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 6.2 P^{0.18} \frac{g}{\sqrt{N}} k^{0.2} \xi_m^{-0.5} \quad (47)$$

$$\text{Voor surging waves, als } \xi_m > \left[6.2 P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha}\right]^{\frac{1}{p+0.5}} :$$

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1.0 P^{-0.13} \frac{H_s}{\sqrt{N}} k^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} \xi_m^p \quad (48)$$

Het overgangspunt van tussen Formule 47 en Formule 48 wordt beschreven door Formule 49. Afhankelijk van de permeabiliteit en de taludhelling ligt dit snijpunt tussen $\xi_m = 2.5$ en $\xi_m = 4$. Wanneer de optredende ξ_m kleiner is dan de grenswaarde ξ_{mg} in Formule 49 moet Formule 47 worden toegepast. In alle andere gevallen moet Formule 48 worden toegepast.

$$\xi_{mg} = \left[6.2 P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha} \right]^{\frac{1}{p+0.5}} \quad (49)$$

Waarin:

H_s : significante golfhoogte (m)

$$\Delta : \text{relatieve dichtheid } \Delta = \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \quad (-) \quad (50)$$

D_{n50} : nominale diameter van de breuksteen dat door 50% wordt overschreden (m)

ρ_s : soortelijke massa van breuksteen (kg/m^3)

ρ_w : soortelijke massa van water (kg/m^3)

P : permeability factor (0.1 - 0.6) (-)

$$S : \text{schade parameter } S = \frac{A_e}{D_{n50}^2} \quad (-) \quad (51)$$

A_e : erosie oppervlak rond de waterlijn (m^2)

N : aantal golven (-)

ξ_m : golfbreker parameter gebaseerd op T_m (-)

α : taludhelling van het buitentalud (-)

Met bovenstaande formules kan de te verwachten schade S onder de toetsomstandigheden berekend worden. Gezien het feit dat de havendam slechts een ondersteunende functie heeft in het waterkeringsysteem, kan er vrij veel schade toegestaan worden. Als echter de toplaag op sommige plaatsen is weggeslagen en het filter zichtbaar wordt, mag verwacht worden dat de schade snel gaat toenemen en de golfbreker zal instorten.

Met deze overwegingen is de volgende tabel gemaakt waaruit de conclusie voor de toetsing getrokken kan worden op basis van de berekende schade S :

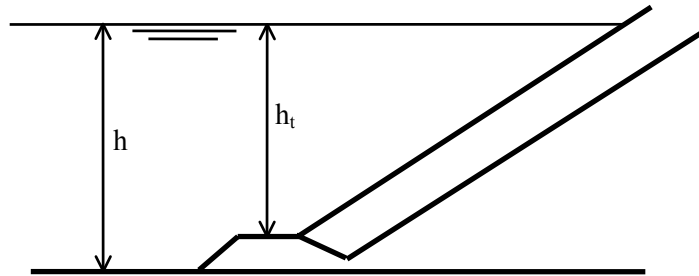
Taludhelling	goed	twijfel	onvoldoende
$1,5 < \cot \alpha < 2,5$	$S < 4$	$4 \leq S \leq 8$	$S > 8$
$2,5 \leq \cot \alpha < 4$	$S < 8$	$8 \leq S \leq 12$	$S > 12$
$4 \leq \cot \alpha < 6$	$S < 10$	$10 \leq S \leq 17$	$S > 17$

Opgemerkt moet worden dat de schadewaarden op de grens van 'goed' en 'twijfelachtig' meestal niet geschikt zijn voor ontwerpdoeleinden.

Als het resultaat 'twijfelachtig' is, dan kan er een geavanceerde toetsing uitgevoerd worden. De nadere bestudering van het specifieke geval kan soms tot een wat scherpere beoordeling

leiden, en in andere gevallen kan er uitsluitsel verkregen worden door middel van modelonderzoek.

Een voorwaarde voor een stabiele constructie is dat geen afschuiving van het buitentalud optreedt. Hiervoor is het nodig dat de teen van de constructie voldoende zwaar is uitgevoerd. Voor het bepalen van de teenstabiliteit is de waterdiepte op de teen (h_t) een belangrijke parameter.



Wanneer $h_t/h > 0.5$ dan mag onderstaande formule (Van der Meer, 1993b) gebruikt worden voor het toetsen van de steenstabiliteit.

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 8.7 \frac{h_t^{1.4}}{h} K \quad (52)$$

In gevallen waarin de waterdiepte kleiner is ($h_t/h < 0.5$) moet gebruik gemaakt worden van de vergelijkingen 47 tot en met 49 voor de toetsing van de steenstabiliteit.

4.4.2 Kruin net boven of op de waterlijn

Voor deze havendammen met kruin net boven of op de waterlijn ($0 < h_c/H_s < 0.8$) geldt dat onder maatgevende omstandigheden er aanzienlijke golfoverslag plaatsvindt. Dit heeft twee effecten. De breuksteen op het buitentalud kan minder zwaar worden uitgevoerd, omdat een deel van de golfenergie wordt doorgegeven over de havendam (lagere run-down golfkrachten). Het tweede effect dat een rol speelt bij een kruin rond de waterlijn is dat ook de breuksteen op de kruin en het binnentalud als gevolg van de golfoverslag stabiel moet zijn onder maatgevende omstandigheden. Voor de toetsing van de kruin, het binnen- en het buitentalud kunnen de formules uit de vorige paragraaf toegepast worden met een invloedsfactor.

De oorspronkelijke reductiefactor voor de ontwerpberekening van de benodigde D_{n50} als gevolg van de twee effecten wordt beschreven door onderstaande formule (Van der Meer, 1990):

$$\gamma_{D_{n50}} = \frac{1}{1.25 - 4.8R_p^*} \quad (53)$$

met

$$R_p^* = \frac{h_c}{H_s} \sqrt{\frac{s_{op}}{2\pi}} \quad (54)$$

Deze formule is geldig voor $0 < R_p^* < 0.052$

waarin

h_c : hoogte van de kruin t.o.v. de waterlijn (m)

s_{op} : golfsteilheid voor de piekperiode (-)

Op basis van deze formules kan de volgende invloedsfactor $f = 1/\gamma_{D_{n50}}$ afgeleid worden waarmee de steendiameter vergroot mag worden tijdens de toetsing als $0 < h_c/H_s < 0,8$:

$$f = 1,25 - 1,9 (h_c/H_s) \sqrt{s_{op}} \quad (55)$$

met: f = invloedsfactor waarmee de D_{n50} vergroot mag worden tijdens de toetsing (-)

Vervolgens kunnen de formules uit de vorige paragraaf (47 t/m 49) gebruikt worden.

Opgemerkt moet worden dat bij $h_c/H_s = 0,8$ de berekende S een discontinuïteit vertoont als $s_{op} \neq 0,027$.

4.4.3 Kruin onder de waterlijn

Voor een havendam die onder maatgevende condities geheel onder de waterlijn ligt ($h_c/H_s < 0$), blijkt de stabiliteit van de breuksteen voornamelijk af te hangen van de relatieve kruinhoogte h_c , schadeniveau S , golfhoogte H_s en golfperiode. De stabiliteit van de breuksteen is te toetsen aan de hand van de volgende formule (Van der Meer, 1993b):

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = -7.14 \ln \left(\frac{h + h_c}{h} \right) \frac{1}{1 + 0.1S} \quad (56)$$

waarin

h : waterdiepte voor de constructie (m)

h_c : relatieve kruinhoogte t.o.v. SWL (m)

Met bovenstaande formules kan de te verwachten schade S onder de toetsomstandigheden berekend worden. Vervolgens kan het toetsresultaat afgelezen worden in de tabel van paragraaf 4.4.1.

Er is helaas een discontinuïteit in S bij $h_c/H_s = 0$. Op dit moment vind de analyse van proeven plaats in de Scheldebak van WL | Delft Hydraulics, waar de schade van breuksteenconstructies met de kruin rond de waterlijn nader bekeken is. De resultaten zijn op moment van gereed komen van dit rapport echter nog niet beschikbaar.

4.5 Categoriën als functie van relatieve kruinhoogte

Bij elk van de bekledingstypen is vastgesteld dat de belasting op de kruin afhankelijk is van de relatieve kruinhoogte ten opzichte van de waterstand: h_c/H_s . Het blijkt dat als voor een bepaald bekledingstype er categorieën opgesteld worden (waarbinnen een bepaald type belasting maatgevend is op de kruin), de categoriegrenzen voor steenzettingen, asfalt, gras

en breuksteen niet gelijk zijn. In onderstaande tabel zijn alle categoriegrenzen nog eens opgesomd.

Bekledingstype	Categorie-grenzen	Belasting op kruin a.g.v.:
Steenzetting	$h_c > z_{2\%}$	geen belasting
	$1 < h_c/H_s < z_{2\%}/H_s$	golfoverslag
	$0 < h_c/H_s < 1$	stroming en golffronten
	$-1 < h_c/H_s < 0$	stroming, golfklappen en -fronten
	$-3 < h_c/H_s < -1$	drukfluctuaties
	$h_c/H_s < -3$	geen belasting
Asfalt	$h_c/H_s > 0,5$	geringe belasting (visuele inspectie)
	$0 < h_c/H_s < 0,5$	geringe belasting (visuele inspectie)
	$-0,5 < h_c/H_s < 0$	golfklappen
	$h_c/H_s < -0,5$	met diepte afnemende golfklappen
Gras	$h_c/H_s > 0$	stroming
	$-1 < h_c/H_s < 0$	golfklappen
	$-2 < h_c/H_s < -1$	stroming
	$h_c/H_s < -2$	geen belasting
Breuksteen	$h_c/H_s > 0,8$	stroming bij weinig golftransmissie
	$0 < h_c/H_s < 0,8$	stroming bij veel golftransmissie
	$h_c/H_s < 0$	met diepte afnemende belasting

De verschillen worden veroorzaakt doordat elk type bekleding gevoelig is voor een ander aspect van de hydraulische belasting. Zo is een steenzetting gevoelig voor hoge stroomsnelheden, vooral als deze van richting veranderen, golffronten (drukgradiënten als functie van de plaats), golfklappen en drukfluctuaties. Een bekleding van asfalt daarentegen is helemaal niet gevoelig voor stromingsbelasting, terwijl een bekleding van gras weer wel gevoelig is voor stroming en vooral ook golfklappen. Gras is verder gevoelig voor langdurige belasting, terwijl bij steenzettingen juist de onacceptabele schade wordt geïnitieerd tijdens één of enkele zeer grote golven. Bij de stabiliteit van breuksteen is ook de mate van golftransmissie belangrijk gebleken, waardoor de belasting afneemt als de kruinhoogte afneemt.

Maar verder speelt bij de afbakening van de categorieën ook mee dat er weinig kennis beschikbaar was en veelal de beschikbare kennis van vergelijkbare constructie-onderdelen geleend moest worden. Bij de belasting van steenzettingen op een kruin onder de waterlijn is bijvoorbeeld gebruik gemaakt van de kennis omtrent steenzettingen op bermen onder de waterlijn. Ook dit draagt ertoe bij dat de consistentie van de categoriegrenzen over de verschillende bekledingstypen niet perfect is.

5 Toetsmethodiek

In dit hoofdstuk wordt een samenvatting gegeven van de toetsmethodiek voor havendammen, waarvoor de achtergronden en overwegingen in de vorige twee hoofdstukken zijn gegeven.

In de toetsing wordt onderscheid gemaakt tussen:

1. De normale havendammen bestaande uit een buitentalud (met eventueel bermen), een ongeveer horizontale kruin, en een binnentalud (met eventuele bermen)

2. Havendammen met verticale voorzijde (meestal een damwand of kademuur)

Ook de normale havendammen kunnen verticale elementen in het profiel hebben. Die elementen moeten getoetst worden met de toetsmethode voor havendammen met verticale voorzijde.

De toetsmethodiek kent de volgende elementen:

- Havendammen met taluds:
 1. Kruinhoogte (HT)
 2. Damlichaam en voorland
 - Afschuiving voorland (AF)
 - Zettingsvloeiing voorland (ZV)
 - Afschuiving buitentalud (LB)
 - Macrostabieliteit binnenwaarts (STM)
 - Microstabieliteit (STU)
 3. Bekleding (BK)
 - Afschuiving bekleding (BKA)
 - Toplaag bekleding (BKC)
 - Reststerkte bekleding (BKR)
 4. Niet waterkerende elementen

- Verticale havendammen of verticale elementen in havendammen:
 1. Hoogte (HT)
 2. Stabieliteit constructie (STC) en voorland (VL)

In onderstaande paragrafen zullen deze aspecten van de toetsing nader toegelicht worden.

5.1 Kruinhoogte (HT)

Er is geen toetscriterium voor de hoogte van havendammen, maar de resulterende golftransmissie levert wel de randvoorwaarden op voor de waterkering achter de havendam. Voor het gehele waterkeringssysteem geldt dat de gezamenlijke hoogte van de havendam en de primaire waterkering samen hoog genoeg moeten zijn om een overstroming te voorkomen. Als daarvoor de kruinhoogte van de primaire waterkering, met de aanwezigheid van de havendam, onvoldoende is, kan overwogen worden om of de havendam te verhogen, of de primaire waterkering, of beide. Door deze keuzemogelijkheid is er geen eenvoudig

recept te geven wat leidt tot een score voor de havendam en een score voor de primaire waterkering.

5.2 Damlichaam: Afschuiving buitentalud (LB)

Er is gevaar voor het afschuiven van het buitentalud als de waterstand snel daalt. Dit bezwijkmechanisme kan bij havendammen net zo goed optreden aan de binnenzijde. Na een periode van zeer hoogwater, als de freatische lijn in de havendam nog hoog staat, en er buiten laagwater heerst, zou er een glijcirkel kunnen ontstaan met deformaties als gevolg.

Voor de toetsing wordt onderscheid gemaakt voor de locatie van de havendam:

- Langs de estuaria en zeeën (en benedenrivieren): de toetsing van havendammen loopt op dezelfde wijze als voor dijken.
- Langs de meren en bovenrivieren: Omdat een extreem hoogwater gevolgd door een snelle waterspiegeldaling en daarna weer een extreme belasting zeer uitzonderlijk is en de havendam slechts een ondersteunende functie heeft, worden de havendammen langs de meren en rivieren niet getoetst op dit mechanisme (score is goed)

5.3 Dijklichaam: Macrostabieleit binnenwaarts (STM)

De macrostabieleit binnenwaarts van havendammen moet getoetst worden met dezelfde regels als macrostabieleit buitenwaarts (zie paragraaf 5.2, LB). Een havendam heeft immers een binnenzijde die vergelijkbaar met de buitenzijde belast wordt.

5.4 Damlichaam: Microstabieleit (STU)

De microstabieleit betreft het uitspoelen van zand uit een dijklichaam ten gevolge van kwel uit het binnentalud van de dijk of het opdrukken van afdekkende kleilagen op het binnentalud door een hoge freatische lijn in de dijk.

Er worden voor havendammen drie situaties onderscheiden:

1. De dam bestaat uit zand met daarop een bekleding (zonder kleilaag): er is er geen toetsing op dit mechanisme noodzakelijk (de score is goed)
2. De dam bestaat uit klei (zonder zand) met daarop een bekleding: er is er geen toetsing op dit mechanisme noodzakelijk (de score is goed)
3. Bestaat de kern van de dam echter uit zand met een (dunne) afdekkende kleilaag, dan is de situatie denkbaar dat na een hoogwater in de dam een hoog freatisch vlak aanwezig is, die na een snelle val van de buitenwaterstand de kleilaag op wil drukken. Hier moet op worden gecontroleerd, voor zowel het binnen- als het buitentalud, conform de regels voor dijken. Omdat langs bovenrivieren en meren een extreem hoogwater gevolgd door een snelle waterspiegeldaling en daarna weer een extreme belasting zeer uitzonderlijk is en de havendam slechts een ondersteunende functie heeft, worden de havendammen langs de meren en bovenrivieren niet getoetst op dit mechanisme (score is goed).

5.5 Voorland: Afschuiving (AF) en zettingsvloeiing (ZV)

Afschuivingen in het voorland en zettingsvloeiingen in het voorland vormen een bedreiging voor dijken en kunstwerken, en bovendien voor havendammen. De problematiek voor

dijken en kunstwerken verschilt in wezen niet van die bij havendammen. Met betrekking tot dit aspect kunnen op globaal niveau dus de normale toetsingsregels uit de LTV '99 (katern 9) gebruikt worden.

Op geavanceerd niveau kan worden gekeken of voor havendammen dezelfde veiligheidsmarges als voor primaire waterkeringen moeten worden gehanteerd, omdat aantasting van de havendam minder direct leidt tot inundatie dan aantasting van de primaire waterkering.

5.6 Stabiliteit top laag van bekleding (BKC)

Het is van belang dat voor elke mogelijke waterstand de maatgevende golfcondities worden bepaald en wordt bekeken of de bekleding op het buitentalud, de kruin en het binnentalud voldoende stabiel zijn.

5.6.1 Afschuiving en materiaaltransport

De toetsing van de stabiliteit van de bekledingen start in de Leidraad Toetsen op Veiligheid (1999) met een toetsing op materiaaltransport (migratie van de ondergrond door het filter naar buiten) en afschuiving (lokale grondmechanische instabiliteit).

De toetsing op materiaaltransport moet uitgevoerd worden voor het buitentalud, de kruin en het binnentalud. Hiervoor kunnen de toetsregels gehanteerd worden uit de LTV ('99), voor zover de kruin van de havendam niet te ver onder het toetspeil ligt: $h_c/H_s > -2$. Als $h_c/H_s < -2$ is een toetsing op materiaaltransport niet noodzakelijk (altijd goed).

De toetsing op afschuiving is alleen noodzakelijk voor het buitentalud waarvoor geldt dat $h_c/H_s > -2$. Ook hiervoor kunnen de toetsregels gehanteerd worden uit de LTV ('99). Als $h_c/H_s < -2$ is een toetsing op afschuiving niet noodzakelijk (altijd goed).

5.6.2 Steenzettingen

Voor de belasting op steenzettingen op havendammen wordt onderscheid gemaakt tussen de belasting op het buitentalud, de kruin en het binnentalud (havenzijde). De grootte van de belasting wordt bepaald door de relatieve hoogte van de kruin t.o.v. de waterlijn. Er zijn zes situaties te onderscheiden:

1. $h_c > z_{2\%}$

In dit geval wordt de kruin en het binnentalud vrijwel niet belast en is de belasting op het buitentalud gelijk aan die op normale dijken met een steenzetting.

2. $1 < h_c/H_s < z_{2\%}/H_s$

De hoogte van de kruin is zodanig dat er veel golfoverslag is, maar met relatief grote tussenpozen waardoor de bekleding en het filter tussen de golfoverslagen de gelegenheid krijgt om geheel of gedeeltelijk weer leeg te lopen.

3. $0 < h_c/H_s < 1$

Met de kruin net boven de waterlijn is er veel tot zeer veel golfoverslag en bestaat de belasting op de kruin en het binnentalud vooral uit water dat met hoge snelheid over de kruin raast. Het buitentalud wordt net zo zwaar belast als een normale dijk met een steenzetting.

4. $-1 < h_c/H_s < 0$

In dit geval is er zeer veel golfoverslag en bestaat de belasting op de kruin uit golfklappen en hoge watersnelheden. Ook het binnentalud wordt belast door hoge watersnelheden.

5. $-3 < h_c/H_s < -1$

Met de kruin ruim onder de waterlijn breken er slechts enkele hoge golven boven de dam en wordt de kruin slechts licht belast door drukfluctuaties en stroming. Ook het buitentalud wordt slechts licht belast en het binnentalud wordt nauwelijks belast.

6. $h_c/H_s < -3$

In dit geval breken er geen golven meer boven de dam en wordt deze nauwelijks meer belast.

Voor elk voor van deze categorieën worden onderstaand de toetscriteria gegeven.

Doorgaans is de waterstand variabel en kan het zijn dat een havendam beoordeeld moet worden voor meer dan één situatie uit bovenstaande lijst van zes. Het is van belang dat voor elke mogelijke waterstand de maatgevende golfcondities worden bepaald en wordt bekeken of de bekleding op het buitentalud, de kruin en het binnentalud voldoende stabiel zijn.

Steeds geldt dat als het resultaat ‘twijfelachtig’ is, dan kan er een geavanceerde toetsing uitgevoerd worden. De nadere bestudering van het specifieke geval kan soms tot een wat scherpere beoordeling leiden, en in andere gevallen kan er uitsluitel verkregen worden door middel van modelonderzoek.

Categorie 1: $h_c > z_{2\%}$

De kruin en het binnentalud zijn in deze categorie altijd ‘goed’.

Het buitentalud kan getoetst worden met de normale toetsregels voor dijken.

Categorie 2: $1 < h_c/H_s < z_{2\%}/H_s$

Het buitentalud kan getoetst worden met de normale toetsregels voor dijken.

De volgende toetsingsregel zijn van toepassing voor de kruin en het binnentalud van deze categorie havendammen:

1. Voor goed geklemde steenzettingen van zuilen of ingewassen en/of dichtgeslibde natuursteen, waarbij de kruinrand is afgerond of ingegoten met gietasfalt:
 - Goed: $(z_{2\%} - h_c)/(\Delta D) < 6$ (63)
 - Twijfelachtig: $6 \leq (z_{2\%} - h_c)/(\Delta D) \leq 12$ (64)
 - Onvoldoende: $(z_{2\%} - h_c)/(\Delta D) > 12$ (65)
2. Overige steenzettingen:
 - Goed: $(z_{2\%} - h_c)/(\Delta D) < 4$ (66)
 - Twijfelachtig: $4 \leq (z_{2\%} - h_c)/(\Delta D) \leq 12$ (67)
 - Onvoldoende: $(z_{2\%} - h_c)/(\Delta D) > 12$ (68)

Categorie 3: $0 < h_c/H_s < 1$

Het buitentalud kan getoetst worden met de normale toetsregels voor dijken.

De volgende toetsingsregel zijn van toepassing voor de kruin en het binnentalud van deze categorie havendammen:

- goed als: $u < 2,5 \cdot \sqrt{g\Delta D}$ EN $H_s/(\Delta D) < 5$ (69)

- twijfelachtig als: $2,5 \cdot \sqrt{g\Delta D} < u < 4 \cdot \sqrt{g\Delta D}$ of $5 < H_s/(\Delta D) < 12$ (70)

- onvoldoende als: $u > 4 \cdot \sqrt{g\Delta D}$ of $H_s/(\Delta D) > 12$ (71)

met: $u = 220 \cdot g T_p s_{op} \cdot (0.085 - s_{op}) \tan \alpha$ (72)

Categorie 4: $-1 < h_c/H_s < 0$

Bij een gegeven waterstand is de toetsprocedure als volgt:

- buitentalud:
 - voer de toetsing uit alsof het een steenzetting op een gewone dijk is.
- kruin:
 1. steile en hoge golffronten en golfklappen
 - bepaal de waarde van de bermfactor met figuur 5 en 6.
 - bepaal de rekenwaarde van de dikte van de toplaag door de aanwezige dikte te delen door de bermfactor.
 - voer de toetsing uit met de grafieken uit de eenvoudige methode of met ANAMOS (gedetailleerde methode), maar reken steeds met de rekenwaarde van de dikte van toplaag.
 2. voer de toetsing uit ten aanzien van stromingsbelasting:
 - goed als: $u < 2,5 \cdot \sqrt{g\Delta D}$ (73)
 - twijfelachtig als: $2,5 \cdot \sqrt{g\Delta D} < u < 4 \cdot \sqrt{g\Delta D}$ (74)
 - onvoldoende als: $u > 4 \cdot \sqrt{g\Delta D}$ (75)

met: $u = 220 \cdot g T_p s_{op} \cdot (0.085 - s_{op}) \tan \alpha$ (76)

 1. de laagste score van de twee toetsingen is de eindscore
- achtertaluud van de havendam:
 - voer de toetsing uit ten aanzien van stromingsbelasting (er zijn geen eisen ten aanzien van steile en hoge golffronten en golfklappen):
 - goed als: $u < 2,5 \cdot \sqrt{g\Delta D}$ (77)
 - twijfelachtig als: $2,5 \cdot \sqrt{g\Delta D} < u < 4 \cdot \sqrt{g\Delta D}$ (78)
 - onvoldoende als: $u > 4 \cdot \sqrt{g\Delta D}$ (79)

met: $u = 220 \cdot g T_p s_{op} \cdot (0.085 - s_{op}) \tan \alpha$ (80)

Categorie 5: $-3 < h_c/H_s < -1$

De volgende toetsingsregel zijn van toepassing voor deze categorie havendammen:

- buitentalud:

Bepaal een rekenwaarde van de toplaagdikte door de aanwezige toplaagdikte te delen door de factor uit de volgende formule:

$$f = 0,2 + 0,8 \cdot e^{1,4(0,8 + h_c/H_s)^3} \quad (81)$$

Vervolgens kan de toetsing plaatsvinden met deze rekenwaarde van de toplaagdikte met de figuren uit de eenvoudige toetsing of met ANAMOS (gedetailleerde toetsing).

- kruin:
 - bepaal de waarde van de kruinfactor met figuur 5 en 6.
 - bepaal de rekenwaarde van de dikte van de toplaag door de aanwezige dikte te delen door de kruinfactor.
 - voer de toetsing uit met de grafieken uit de eenvoudige methode of met ANAMOS (gedetailleerde methode), maar reken steeds met de rekenwaarde van de dikte van de toplaag.
- binnentalud:
 - Het binnen talud hoeft niet getoetst te worden (altijd goed).

Categorie 6: $h_c/H_s < -3$

Als de kruin van de havendam ver onder water ligt ($h_c/H_s < -3$) wordt de steenzetting nauwelijks belast en is het toetsresultaat dus in alle gevallen 'goed'. Er is echter ook geen golfreducerende werking te verwachten.

5.6.3 Asfalt

Er zijn verschillende soorten bekledingen die bij het toetsen vallen onder de verzamelnaam 'asfaltbekledingen', namelijk:

- waterbouwasfaltbeton
- met asfalt gepenetreerde steenzettingen
- zandasfalt (bijvoorbeeld in onderlaag, of als tijdelijke bekleding)
- vol en zat met asfalt gepenetreerde breuksteen
- open steenasfalt
- asfalt mastiek
- dicht steenasfalt
- geprefabriceerde open steenasfaltmatten (evt.) met wapening

Al deze bekledingen hebben gemeen dat zij functioneren als een samenhangende plaatbekleding met enige flexibiliteit ten aanzien van langzame vervormingen. Verder zijn zij zeer goed bestand tegen een belasting door stroming. De meeste zijn waterondoorlatend en daardoor gevoelig voor statische wateroverdruk.

Ten aanzien van havendammen met een asfaltbekleding wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende drie typen:

1. Hoge dammen: $h_c/H_s > 0,5$

Als de kruin van de dam ver boven water uitsteekt is de belasting op de bekleding zeer vergelijkbaar met die van een asfaltbekleding op een gewone dijk.

2. Dammen met een kruin rond de waterlijn: $-0,5 < h_c/H_s < 0,5$

Bij dit type is er zeer veel golfoverslag of verdwijnt de kruin zelfs vrijwel permanent onder water. De belasting bestaat dan uit golfklappen en de wateroverdrukken, zoals behandeld in de LTV '99.

3. Lage dammen

Naarmate de kruin van de dam verder onder water verdwijnt zal de belasting door golfklappen afnemen.

Daarnaast kan de kruin zo water- en luchtdicht zijn, dat tijdens het stijgen van de waterstand er lucht opgesloten raakt onder de kruin.

Voor elk voor van deze categorieën worden onderstaand de toetscriteria gegeven, nadat eerst de toetscriteria voor opgesloten lucht zijn behandeld.

Doorgaans is de waterstand variabel en kan het zijn dat een havendam beoordeeld moet worden voor meer dan één situatie uit bovenstaande lijst. Het is van belang dat voor elke mogelijke waterstand de maatgevende golfcondities worden bepaald en wordt bekeken of de bekleding op het buitentalud, de kruin en het binnentalud voldoende stabiel zijn.

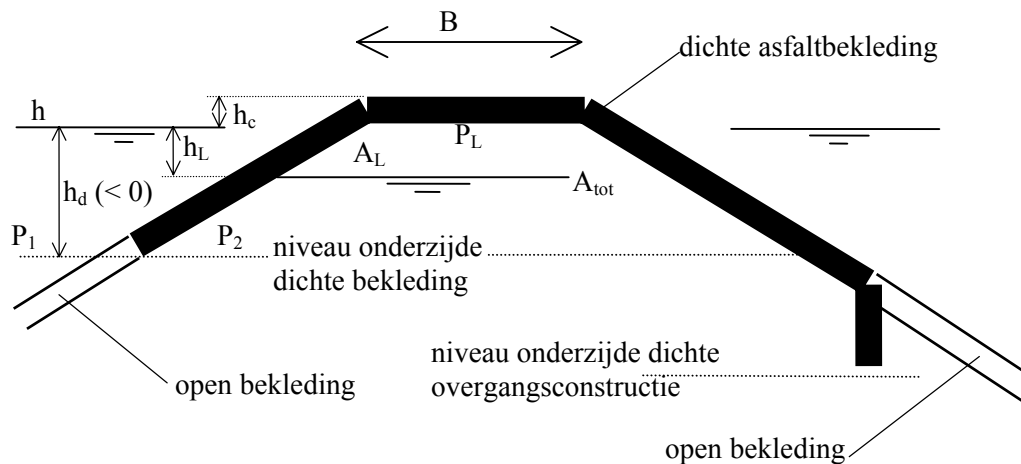
opbarsten door ingesloten lucht

Als de kruin van de havendam volledig lucht- en waterdicht is, inclusief de aansluitende bekledingen op het binnen- en buitentalud, kan er een mechanisme optreden dat bij dijken is uitgesloten en niet in de Leidraad Toetsen op Veiligheid wordt behandeld. De stijgende freatische lijn tijdens maatgevende omstandigheden kan ervoor zorgen dat er een luchtbel onder de kruin ingesloten raakt en door de waterdruk gecompriëerd wordt. De hiermee samenhangende opwaartse druk is zodanig groot dat de kruinbekleding kan openbarsten. Dit aspect moet derhalve ook getoets worden. Mocht dit volgens de toetsing mogelijk een probleem vormen, dan is dit veelal eenvoudig op te lossen door luchtpijpjes in de kruin te plaatsen.

Er zijn een aantal gevallen waarbij dit bezwijkmechanisme niet te verwachten is:

- Als alleen de kruin van dicht asfalt is, en de aansluitende taluds een open bekleding hebben (lucht en water doorlatend)
- Als alleen de kruin en het binnentalud van dicht asfalt zijn en het buitentalud een open bekleding heeft
- Als alleen de kruin en het buitentalud van dicht asfalt zijn en het binnentalud een open bekleding heeft
- Als er in de kruin een voldoende aantal goed werkende luchtpijpje zijn geplaatst.
- Als de kruin van opensteenafalt is gemaakt.

In het geval dat de dichte asfaltbekleding de kruin en binnen- en buitentalud beschermen, moet op zowel het binnentalud als het buitentalud worden vastgesteld tot welk niveau de dichte bekleding doorloopt. Daarbij geldt het niveau van de onderzijde van de bekleding, of de onderzijde van een daarop aansluitende overgangsconstructie, ten opzichte van de stilwaterlijn. Dit is toegelicht in onderstaande figuur.



Van deze niveaus op het binnentalud en het buitentalud is de hoogste maatgevend. Dit niveau wordt h_d genoemd. Omdat dit gerelateerd wordt aan de buitenwaterstand is dit doorgaans een negatief getal. Dit geldt ook voor h_L .

Voor een eenvoudige geometrie van een dam met binnen- en buitentaludhelling α en kruinbreedte B , geldt:

$$-\frac{1}{10} h_L + 1 = \frac{A_{tot}}{A_L} = \frac{(B + (h_c - D - h_d) / \tan \alpha)(h_c - D - h_d)}{(B + (h_c - D - h_L) / \tan \alpha)(h_c - D - h_L)} \quad (82)$$

als $h_c \leq 0$, reken dan met $h_c = 0$.

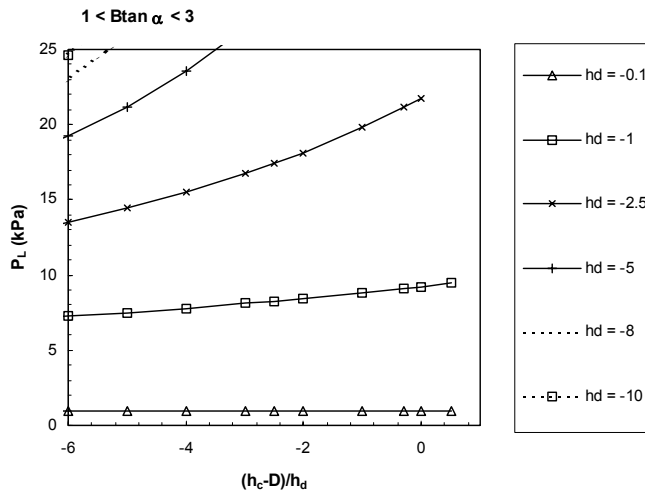
- met:
- B = kruinbreedte (m)
 - P_L = luchtdruk onder de kruin ten opzichte van de atmosferische druk (Pa)
 - h_d = het niveau aan de onderzijde van de bekleding waar de dichte bekleding begint (hoogste van binnen- en buitentalud) t.o.v. de buitenwaterstand (m)
 - h_L = niveau van de freatische lijn t.o.v. de buitenwaterstand (m)
 - h_c = kruinhoogte ten opzichte van de stilwaterlijn (m)
 - D = dikte van de bekleding op de kruin (m)
 - α = taludhelling ($^\circ$)

In deze formule is alleen h_L een onbekende en kan dus berekend worden (derde graads vergelijking). In de formule hoeft nooit met een waterstand boven de kruin gerekend te worden, omdat een hogere waterstand weliswaar een hogere druk onder de kruin oplevert, maar dat wordt gecompenseerd door de druk op de kruin.

Vervolgens kan met de berekende h_L de grootte van P_L berekend worden:

$$P_L = -\rho g h_L$$

In onderstaande figuur zijn enkele resultaten van berekeningen gegeven.



Het toetsresultaat kan voor dit aspect vervolgens bepaald worden met:

- goed als: $P_L < \rho_t g D$ (83)

- twijfelachtig als: $\rho_t g D \leq P_L \leq 2\rho_t g D$ of (84)

als $h_c \gg z_{2\%}/2$ en bovendien de aanwezigheid van scheuren in de kruin acceptabel is

- onvoldoende als: $P_L > 2\rho_t g D$ (85)

Hoge dammen: $h_c/H_s > 0,5$

De toetsing van het buitentalud kan op dezelfde wijze uitgevoerd worden als in de Leidraad Toetsen op Veiligheid (LTV '99), echter rekening houdend met het volgende:

- Wateroverdrukken zijn pas een probleem als de waterstand daalt na een hoge waterstand. Omdat het langs meren en bovenrivieren buitengewoon zeldzaam is dat er na een hoge waterstand eerst een lage waterstand optreedt en daarna nog eens de maatgevende toetsomstandigheden, gecombineerd met het feit dat de havendam slechts een ondersteunende functie heeft binnen het waterkeringsysteem, wordt voorgesteld om alleen op wateroverdrukken te toetsen langs de estuaria en zeeën en in het benedenrivierengebied.
- Ten aanzien van wateroverdrukken moet er rekening gehouden worden met een vrij hoge freatische lijn, omdat het water langs de binnenzijde en de buitenzijde in de dam kan binnendringen. Voor de grens tussen 'goed' en 'twijfelachtig' kan gerekend worden met een freatische lijn gelijk aan de maximale buitenwaterstand. Voor de grens tussen 'twijfelachtig' en 'onvoldoende' kan gerekend worden met een niveau van de freatische lijn halverwege tussen het maximale toetspeil en de gemiddelde waterstand onder normale omstandigheden.
- Als niet alleen de kruin van asphalt is, maar ook de aansluitende taluds aan binnen- en buitenzijde een dichte bekleding hebben (lucht en water ondoorlatend) moet rekening gehouden worden met het mechanisme 'opbarsten door ingesloten lucht' (zie boven).
- In de LTV ('99) staat aangegeven dat boven een niveau van $SWL + H_s/2$ alleen een visuele toetsing nodig is. Hieraan kan toegevoegd worden dat boven een niveau van $SWL + z_{2\%}/2$ de toetsingscriteria nog verder versoepeld kunnen worden (met $z_{2\%}$ = golfoploophoogte dat door 2 procent van de golven overschreden wordt). De havendam heeft immers slechts een ondersteunende functie in het waterkeringsysteem en bovendien kan enige schade op een niveau ruim boven de waterlijn nauwelijks uitgroeien tot iets waarbij er beduidend meer golfoverslag plaatsvindt over de havendam. Daarom

wordt voorgesteld om bij de visuele inspectie boven een niveau van $SWL + z_{2\%}/2$ de eindscore ‘twijfelachtig’ te vervangen door ‘goed’ en de eindscore ‘onvoldoende’ te vervangen door ‘twijfelachtig’. Als er dan gaten en scheuren zijn geconstateerd in het asfalt, die op een dijk nog net een score ‘onvoldoende’ zouden geven, dan kan het op een havendam nog net acceptabel zijn en toch in een score ‘goed’ kunnen resulteren als ingeschat wordt dat de mogelijke kruinverlaging niet tot onacceptabele golftransmissie leidt.

- Uiteraard geldt dat de bekleding boven $SWL + z_{2\%}$ in alle gevallen ‘goed’ is.
- De toetsing van de kruin en het binnentalud van de havendam kan verder plaatsvinden op dezelfde wijze als de bovenrand van het buitentalud.

Dammen met een kruin rond de waterlijn: $-0,5 < h_c/H_s < 0,5$

De toetsing kan op dezelfde wijze uitgevoerd worden als in de Leidraad Toetsen op Veiligheid (LTV '99), echter rekening houdend met het volgende:

- Wateroverdrukken zijn pas een probleem als de waterstand daalt na een hoge waterstand. Omdat het langs meren en bovenrivieren buitengewoon zeldzaam is dat er na een hoge waterstand eerst een lage waterstand optreedt en daarna nog eens de maatgevende toetsomstandigheden, gecombineerd met het feit dat de havendam slechts een ondersteunende functie heeft binnen het waterkeringsysteem, moet alleen op wateroverdrukken getoetst te worden langs de estuaria en zeeën en in het benedenrivierengebied.
- Ten aanzien van wateroverdrukken moet er rekening gehouden worden met een vrij hoge freatische lijn, omdat het water langs de binnenzijde en de buitenzijde in de dam kan binnendringen. Voor de grens tussen ‘goed’ en ‘twijfelachtig’ kan gerekend worden met een freatische lijn gelijk aan de maximale buitenwaterstand (maar niet hoger dan de kruin). Voor de grens tussen ‘twijfelachtig’ en ‘onvoldoende’ kan gerekend worden met een niveau van de freatische lijn halverwege tussen het maximale toetspeil en de gemiddelde waterstand onder normale omstandigheden.
- Als niet alleen de kruin van asfalt is, maar ook de aansluitende taluds aan binnen- en buitenzijde een dichte bekleding hebben (lucht en water ondoorlatend) moet rekening gehouden worden met het mechanisme ‘opbarsten door ingesloten lucht’ (zie boven).
- De kruin moet op golfklappen getoetst te worden als $h_c/H_s < 0$.
- Het binnentalud hoeft niet op golfklappen getoetst te worden.

Lage dammen: $h_c/H_s < -0,5$

Het asfalt kan getoetst worden volgens de normale methode uit de Leidraad Toetsen op Veiligheid, echter rekening houdend met het volgende:

- Voor de beoordeling op golfklappen mag de aanwezige dikte van het asfalt gedeeld worden door de invloedsfactor:
 - Grens tussen ‘goed’ en ‘twijfelachtig’:
 - als $h_c/H_s < -1$: $f = e^{1-(h_c/H_s)^2}$ (86)
 - als $h_c/H_s > -1$: $f = 1$ (87)
 - Grens tussen ‘twijfelachtig’ en ‘onvoldoende’:
 - als $h_c/H_s < -0,5$: $f = e^{0,25-(h_c/H_s)^2}$ (88)

- als $h_c/H_s > -0,5$: $f = 1$ (89)
- Het binnentalud hoeft niet op golfklappen getoetst te worden.
- Wateroverdrukken zijn pas een probleem als de waterstand daalt na een hoge waterstand. Omdat het langs meren en bovenrivieren buitengewoon zeldzaam is dat er na een hoge waterstand eerst een lage waterstand optreedt en daarna nog eens de maatgevende toetsomstandigheden, gecombineerd met het feit dat de havendam slechts een ondersteunende functie heeft binnen het waterkeringsysteem, wordt voorgesteld om alleen op wateroverdrukken te toetsen langs de estuaria en zeeën en in het benedenrivierengebied.
- Ten aanzien van wateroverdrukken moet er rekening gehouden worden met een vrij hoge freatische lijn, omdat het water langs de binnenzijde en de buitenzijde in de dam kan binnendringen. Voor de grens tussen 'goed' en 'twijfelachtig' kan gerekend worden met een freatische lijn gelijk aan de maximale buitenwaterstand (maar niet hoger dan de kruin). Voor de grens tussen 'twijfelachtig' en 'onvoldoende' kan gerekend worden met een niveau van de freatische lijn halverwege tussen het maximale toetspeil en de gemiddelde waterstand onder normale omstandigheden.
- Als de kruin en de aansluitende taluds water- en luchtdicht zijn, moet er getoetst worden op het ontstaan van overdruk door opgesloten lucht (zie de boven).

5.6.4 Gras

Voor de toetsing van grasbekledingen kan gebruik gemaakt worden van de Leidraad Toetsen op Veiligheid, waarbij er rekening gehouden moet worden met enkele kleine wijzigingen:

- Het binnentalud moet getoetst worden op stroming zolang de kruin hoger ligt dan een halve golfhoogte onder de waterlijn ($h_c/H_s > -0,5$). Deze toetsing moet worden uitgevoerd voor dat deel van het binnentalud dat niet meer dan een halve golfhoogte onder water ligt ($z > h - H_s/2$). Als de kruin boven water ligt ($h_c > 0$), kan volstaan worden met een toetsing op stroming op dat deel van het binnentalud dat niet meer dan een kwart golfhoogte onder water ligt ($z > h - H_s/4$). De golfoverslag veroorzaakt een stroming op het binnentalud die als een waterstraal tot onder de waterlijn tot een aanzienlijke belasting leidt. Als de kruin erg laag ligt, moet tevens rekening gehouden worden met het feit dat er een golfdal aanwezig kan zijn op het moment dat de waterstraal het binnentalud belast.
- Het binnentalud hoeft niet op stroming beoordeeld te worden als de kruin meer dan een halve golfhoogte onder de waterlijn ligt ($h_c/H_s < -0,5$). Er zal dan nog wel enige stroming door de brekende golven op het binnentalud plaatsvinden, maar dat is zo gering dat elke grasmat dit kan weerstaan.
- Het binnentalud hoeft niet op golfklappen beoordeeld worden.
- Als de kruin onder water ligt, maar niet meer dan een golfhoogte eronder ($-1 < h_c/H_s < -0$), moeten kruin en buitentalud getoetst worden op golfklappen.
- Als de kruin meer dan een golfhoogte onder de waterlijn ligt ($h_c/H_s < -1$), is een toetsing op golfklappen niet meer nodig, maar moet de kruin wel getoetst worden op stroming. Onder deze omstandigheden zullen de golven nog wel breken boven de havendam, maar de golfklappen zullen neerkomen in een dikke waterlaag waardoor hun kracht niet direct op het gras kan aangrijpen. Het gras op het buitentalud moet getoetst worden op stroming tot een halve golfhoogte onder de kruin, maar nooit lager dan $2H_s$ onder de waterlijn ($z > \max(h - 2H_s ; h_c - H_s/2)$).

- Als de kruin meer dan twee golfhoogten onder de waterlijn ligt ($h_c/H_s < -2$), dan is een toetsing van de grasmat niet meer noodzakelijk. Het resultaat is dan 'goed'. Uit ervaring met andere constructies is gebleken dat de golfbelasting vrijwel verdwenen is als de kruin ongeveer $2H_s$ onder water ligt.

5.6.5 Breuksteen

Voor de toetsing van havendammen met een toplaag van breuksteen moet de schade berekend worden die te verwachten is onder toetsomstandigheden. De schade wordt weergegeven met de schade parameter S . Er worden drie situaties onderscheiden:

1. De kruin van de havendam ligt ver boven de waterlijn ($h_c/H_s > 0.8$);

Er moet onderscheidt gemaakt worden tussen plunging 'waves' en 'surging' golven. De overgang ligt, afhankelijk van de permeabiliteit en taludhelling tussen $\xi_m = 2.5$ en $\xi_m = 4$.

- Toetsing op basis van plunging waves (als $\xi_m < \left[6.2P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha}\right]^{\frac{1}{p+0.5}}$): (90)

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 6.2P^{0.18} \frac{S}{\sqrt{N}} k^{0.2} \xi_m^{-0.5} \quad (91)$$

$$\xi_m = \tan \alpha / \sqrt{(H_s / (1.56T_m^2))} \quad (92)$$

- Toetsing op basis van surging waves (als $\xi_m > \left[6.2P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha}\right]^{\frac{1}{p+0.5}}$): (93)

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1.0P^{-0.13} \frac{S}{\sqrt{N}} k^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} \xi_m^p \quad (94)$$

met:

H_s : significante golfhoogte (m)

$$\Delta : \text{relatieve dichtheid } \Delta = \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \quad (-) \quad (95)$$

D_{n50} : nominale diameter van de breuksteen dat door 50% wordt overschreden (m)

ρ_s : soortelijke massa van breuksteen (kg/m^3)

ρ_w : soortelijke massa van water (kg/m^3)

P : permeability factor (0.1 - 0.6) (-)

$$S : \text{schade parameter } S = \frac{A_e}{D_{n50}^2} \quad (-) \quad (96)$$

A_e : erosie oppervlak rond de waterlijn (m^2)

N : aantal golven (-)

ξ_m : golfbreker parameter gebaseerd op T_m (-)

α : taludhelling van het buitentalud (-)

2. De kruin van de havendam ligt net boven de waterlijn ($0 < h_c/H_s < 0.8$);

Met de volgende factor moet de steendiameter vergroot worden tijdens de toetsing als $0 < h_c/H_s < 0,8$:

$$f = 1,25 - 1,9 (h_c/H_s)^{1/3} s_{op} \quad (97)$$

Vervolgens kunnen de bovenstaande formules van situatie 1 gebruikt worden om de schade S te berekenen.

3. De kruin van de havendam ligt onder de waterlijn ($h_c/H_s < 0$);

De schade kan berekend worden met de volgende formule:

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = -7,14 \ln \left(\frac{h + h_c}{h} \right) \frac{1}{2 + 0,1S} \quad (98)$$

waarin:

h : waterdiepte voor de constructie (m)

h_c : relatieve kruinhoogte (m)

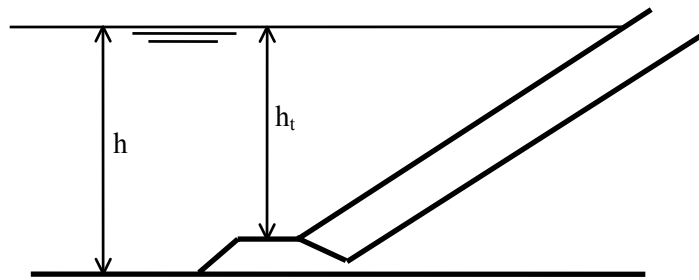
Met bovenstaande formules kan de te verwachten schade S onder de toetsomstandigheden berekend worden. Vervolgens kan het toetsen resultaat afgelezen worden in de volgende tabel:

Taludhelling	goed	twijfel	onvoldoende
$1,5 < \cot\alpha < 2,5$	$S < 4$	$4 \leq S \leq 8$	$S > 8$
$2,5 \leq \cot\alpha < 4$	$S < 8$	$8 \leq S \leq 12$	$S > 12$
$4 \leq \cot\alpha < 6$	$S < 10$	$10 \leq S \leq 17$	$S > 17$

Opgemerkt moet worden dat de schadewaarden op de grens van goed en twijfelachtig meestal niet geschikt zijn voor ontwerpdoeleinden.

Als het resultaat 'twijfelachtig' is, dan kan er een geavanceerde toetsing uitgevoerd worden. De nadere bestudering van het specifieke geval kan soms tot een wat scherpere beoordeling leiden, en in andere gevallen kan er uitsluitel verkregen worden door middel van modelonderzoek.

Een voorwaarde voor een stabiele constructie is dat geen afschuiving van het buitentalud optreedt. Hiervoor is het nodig dat de teen van de constructie voldoende zwaar is uitgevoerd. Voor het bepalen van de teenstabiliteit is de waterdiepte op de teen (h_t) een belangrijke parameter.



Wanneer $h_t/h > 0.5$ dan mag onderstaande formule (Van der Meer, 1993b) gebruikt worden voor het toetsen van de steenstabiliteit.

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 8.7 \frac{h_t}{h} K^{1.4} \quad (99)$$

In gevallen waarin de waterdiepte kleiner is ($h_t/h < 0.5$) moet gebruik gemaakt worden van de formules voor het buiten talud van een relatief hoger dan (zie situatie 1).

5.7 Reststerkte bekleding (BKR)

De reststerkte van een havendam kent drie onderdelen:

1. de reststerkte van de toplaag en het filter
2. de reststerkte van de kleilaag
3. de reststerkte van de kern van de havendam

De reststerkte van de toplaag en het filter en de damkern is onvoldoende als de kruin van de havendam lager ligt dan een halve golfhoogte boven het toetspeil (onvoldoende als $h_c < H_s/2$). Schade aan de bekleding zal dan vrijwel direct resulteren in een verlaging van de kruin en dus een grotere golftransmissie geven. Een uitzondering hierop vormt een havendam waarbij de kruin hoger is dan noodzakelijk voor het goed toetsen van het waterkeringsysteem, maar dan wordt een geavanceerde toetsing aanbevolen.

Conform de Leidraad Toetsen op Veiligheid (1999) kan, in geval de toplaag onvoldoende is, met de reststerkte een score voldoende behaald worden als $h_c > H_s/2$. De toetsing van de reststerkte van de toplaag en het filter en de reststerkte van de kleilaag verloopt op dezelfde wijze als voor dijken (Zie Leidraad Toetsen op Veiligheid '99).

De reststerkte van de kern van de havendam kan slechts meegewogen worden in een geavanceerde toetsing.

5.8 Niet waterkerende elementen

Ook havendammen hebben soms niet waterkerende elementen, zoals monumenten, trappen, bankjes, muurtjes etcetera. Al deze niet waterkerende elementen kunnen getoetst worden op dezelfde wijze als in de LTV '99 (katern 7).

5.9 Verticale havendammen of verticale elementen in havendammen

Sommige havendammen kunnen beschouwd worden als een waterbouwkundig kunstwerk, vooral als zij grotendeels uit verticale elementen zijn opgebouwd. Deze constructies kunnen getoetst worden zoals omschreven staat in de LTV '99 (katern 7), maar daarbij hoeft slechts het volgende beoordeeld te worden:

1. hoogte (HT)
2. stabiliteit constructie (STC) en voorland (VL)

6 Literatuur

Akkerman, G.J.

Stabiliteit van open bekledingen bij hoge stroomsnelheden

Annex 1 uit Klein Breteler (1998)

WL | Delft Hydraulics

Bezuijen, A.

Open taludbekledingen

Belasting op zetsteen kruin

GeoDelft, mei 1994

CUR 1992

Handboek voor dimensionering van gezette taludbekledingen

CUR / TAW rapport 155, 1992

Infram/Alkyon (1998)

Golfrandvoorwaarden voor dijkontwerp in door dammen afgeschermd gebied.

Band B: Beschrijving golfransmissie en dubbeltoppige spectra

Infram en Alkyon rapport A314/i181, november 1998

Klein Breteler, M. (1995)

Handboek belastingen op waterbouwkundige constructies

WL | Delft Hydraulics, concept hoofdstuk 5, 15 december 1995

Klein Breteler, M. (1998)

Alternatieve open talud bekledingen

WL | Delft Hydraulics, verslag H1930, juni 1998

Klein Breteler, M. (2000)

Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen

Analyse van resultaten van Deltagootproeven

WL | Delft Hydraulics, verslag H3272, mei 2000

Klein Breteler, M. (2000)

Bekleding op havendam van Walsoorden

WL | Delft Hydraulics, verslag H3807, dec 2000

Kruiningen, F. van

Afsluitdijk

Stabiliteit onderzoek dijkbekleding kruin en binnentalud,

WL | Delft Hydraulics, verslag modelonderzoek H993, juli 1989

Meer, J.W. van der (1988)

Rock slopes and gravel beaches under wave attack
Doctoral thesis Delft University of Technology, 1988

Meer, J.W. van der (1990)

Data on wave transmission due to wave overtopping
WL| Delft Hydraulics Report, H986-b, 1990

Meer, J.W. van der, en J.P. de Waal (1993)

Waterbeweging op taluds
WL | Delft Hydraulics, verslag modelonderzoek H1256, april 1993

Meer, J.W. van der (1993b)

Conceptual design of rubble mound breakwaters
WL| Delft Hydraulics Publication, number 483, december 1993

Pilarczyk, K.W., 1990

Coastal Protection
Balkema 1990

Seabrook, S.R. and Hall, K.R. (1998)

Wave transmission at submerged rubble mound breakwaters,
Proceedings of 26th Conf. on Coastal Engineering, Copenhagen.

Technische Adviescommissie Waterkeringen (TAW)

Leidraad Toetsen op Veiligheid
TAW, augustus 1999

A000 Golftransmissie over havendammen

Inleiding

Wanneer een deel van de golfenergie die aanwezig is voor de golfbreker wordt verplaatst over of door een golfbreker wordt gesproken over golftransmissie. Het verschil tussen de golfenergie voor een havendam en achter een havendam wordt weergegeven door de transmissie coëfficiënt K_t .

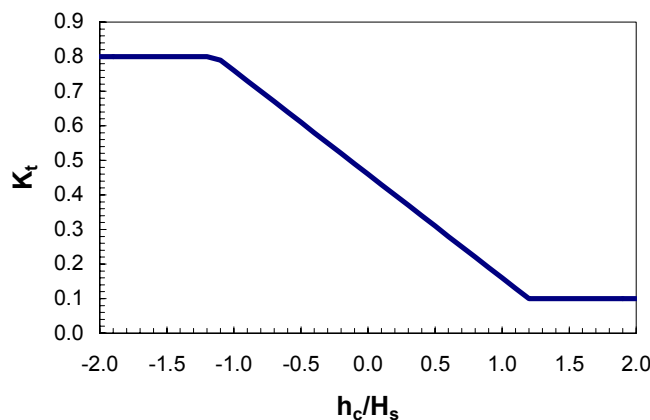
$$K_t = \frac{H_{s;achter}}{H_{s;voor}} \quad (100)$$

Naast een verandering in golfhoogte zal ook een verandering kunnen optreden in de golfperiode, de golfrichting en de spectrumvorm.

Een eerste voorspelling van de golftransmissie is gedaan door (Van der Meer, 1990). Hierin zijn de modelresultaten verwerkt die zijn uitgevoerd door (Seelig, 1980), (Powell en Allsop, 1985), (Daemrich en Kahle, 1985), (Ahrens, 1987) en (Van der Meer, 1988). De voorspelling van de golftransmissie kan als volgt beschreven worden.

$$\begin{aligned} -2.00 < \frac{h_c}{H_s} < -1.13 & \quad K_t = 0.80 \\ -1.13 < \frac{h_c}{H_s} < 1.2 & \quad K_t = 0.46 - 0.3 \frac{h_c}{H_s} \\ 1.20 < \frac{h_c}{H_s} < 2.0 & \quad K_t = 0.10 \end{aligned} \quad (101)$$

Dit resulteert in het onderstaande figuur.



Figuur 6.1 Golftransmissie over en door een havendam

Onderstaand worden latere verbeteringen van deze formule beschreven.

Verandering van de golfhoogte

Afhankelijk van de vorm van de golfbreker zal een deel van de golfenergie door of over de havendam worden getransmitteerd. De basis regel voor golftransmissie wordt beschreven met onderstaande verbeterde formulering (d'Angremond et al., 1996).

$$K_t = a - 0.4 \frac{h_c}{H_i}$$

$$a = \left(\frac{B}{H_i} \right)^{-0.31} * (1 - e^{-0.5\xi}) * A_{dam} \quad (102)$$

voor $0.075 < K_t < 0.80$

met:

- B : breedte van de kruin (m)
 ξ : brekerparameter (-)
 H_i : inkomende golfhoogte (m)
 h_k : hoogte van de kruin t.o.v. de waterlijn (m)
 A_{dam} : factor voor het type havendam (-)

Breuksteen en betonnen elementen	$A_{dam} = 0.64$
Gladde dichte dam(asfalt)	$A_{dam} = 0.80$
Gezette dichte steen	$A_{dam} = 0.80$
Blokkenmatten	$A_{dam} = 0.75$
Schanskorven	$A_{dam} = 0.70$

In het onderzoek (Alkyon/Infram, 1998) wordt op basis van modelproeven in de Scheldegoot aangegeven dat de factor -0.4 vervangen zou moeten worden door -0.3 voor een betere fit. Tevens bleek dat de kruinbreedte nauwelijks invloed had op de golftransmissie, mits de kruinbreedte vrij klein is. Daarom werd aangegeven dat voor een eenvoudige benadering de term $(B/H_i)^{-0.31}$ een vaste waarde zou moeten hebben. Uit de metingen bleek dat toepassen van 0.9 een goede benadering vormde voor de gemeten punten. De aangepaste formule wordt dan als volgt.

$$K_t = a - 0.3 \frac{h_c}{H_i}$$

$$a = 0.9 * (1 - e^{-0.5\xi}) * A_{dam} \quad (103)$$

Een alternatieve formule voor breuksteen dammen met $h_c < 0$, waarin wel de breedte van de kruin is opgenomen, is de formule van Seabrook en Hall (1998):

$$K_t = 1 - \left(e^{0.65(h_c/H_s) + 1.09(h_c/B)} - 0.047 \left(\frac{Bh_c}{L_{gp} D_{n50}} \right) + 0.067 \left(\frac{H_s h_c}{B D_{n50}} \right) \right) \quad (104)$$

met: L_{gp} = Golflengte op de waterdiepte vlak voor de havendam (m)

Deze de formule is toepasbaar voor breuksteen dammen waarvoor geldt:

$$-2,14 \leq \frac{h_c H_s}{BD_{n50}} \leq 0 \quad (105)$$

$$-7,08 \leq \frac{h_c B}{L_{gp} D_{n50}} \leq 0 \quad (106)$$

Verandering van de golfperiode

Over de verandering van de periode bij transmissie over een havendam is relatief weinig bekend. In (Van der Meer 1990) is gekeken naar transmissie over lage stortsteendammen. Hieruit bleek dat de piekperiode van de getransmitteerde golf vrijwel constant bleef. De gemiddelde periode werd in de meeste gevallen kleiner. De grootste reductie bedroeg 50%.

Ook in het onderzoek (Infram/Alkyon, 1998) wordt beschreven dat de piekperiode bij transmissie nagenoeg gelijk blijft. Bij een lage transmissiecoëfficiënt wordt de piekperiode zelfs iets langer. Bij een transmissiecoëfficiënt $K_t > 0.2$ blijft de verandering van de piekperiode beperkt tot hooguit 10%. Voor de gemiddelde periode T_{m02} ligt de periodereductie tussen de 30% en 40%. Voor $K_t > 0.15$ is de reductie vrijwel constant en bedraagt circa 35% van de inkomende gemiddelde periode.

Verandering van de spectrum vorm

Door transmissie wordt de golfenergie gereduceerd en hierdoor verandert het spectrum achter de havendam. De spectrumvorm wordt door drie karakteristieke maten bepaald; een golfhoogte, een golfperiode en een maat voor de spectrumvorm of -breedte.

In het algemeen kan gezegd worden dat na transmissie in de meeste gevallen een veel breder spectrum ontstaat in vergelijking met het spectrum dat voor de dam aanwezig was en vaak verschuift energie naar de tweede en derde harmonische. In (Infram/Alkyon, 1998) is een methode beschreven om het getransmitteerde spectrum te beschrijven. Deze beschrijving is alleen geldig in het onderzochte gebied van $K_t < 0.4$.

$$m_{0,t} = K_t^2 m_{0,i} = (0.25 K_t H_{m0,i})^2 \quad (107)$$

Dit getransmitteerde spectrum bestaat uit twee delen.

1. deel met frequenties kleiner dan $1.5f_p$ is gelijkvormig aan het inkomende spectrum voor de dam en heeft een totale energie van $0.6m_{0,i}$.
2. deel met frequenties groter dan $1.5f_p$ is blokvormig van $1.5f_p$ tot $3.5f_p$ met een totale energie van $0.4m_{0,i}$.