

**Toetsing en ontwerp van  
teenbestortingen voor dijken**

**concept**





# **Toetsing en ontwerp van teenbestortingen voor dijken**

ir M.C.J Bosters (Bosters Waterbouw & Hydrologie)

1209832-016



**Titel**

Toetsing en ontwerp van teenbestortingen voor dijken

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Rijkswaterstaat-WVL	1209832-016	1209832-016-HYE-0003	28

**Trefwoorden**

Breksteen, stabiliteit, golven, teenconstructie

**Samenvatting**

De toetsing en het ontwerp van teenbestortingen bij dijken in Nederland worden momenteel uitgevoerd met de rekenregel uit het Technisch Rapport Steenzettingen of de hiervan afgeleide, verbeterde rekenregel van Projectbureau Zeeweringen (PBZ).

Er is echter vastgesteld dat er nog veel onduidelijkheid is omtrent de stabiliteit van de teenbestorting aan de onderzijde van een dijk met steenzetting. Het feit dat boven de breuksteen van de teen een glad talud aanwezig is, heeft invloed op de stabiliteit van de teen. De huidige methode van PBZ is voor diverse omstandigheden slecht onderbouwd en geeft niet altijd een logisch resultaat. Niet alle thans beschikbare resultaten van modelonderzoek zijn gebruikt voor het opstellen van de PBZ-methode. Daarom is nu getracht zoveel mogelijk beschikbare modelonderzoeken uit het verleden mee te nemen bij het opstellen van een nieuwe rekenregel.

De huidige rekenregels veronderstellen dat er één maatgevende waterstand is op basis waarvan direct de benodigde steensortering berekend kan worden. Bij het gebruik van deze rekenregels is echter gebleken dat er bij meerdere waterstanden een significante schade kan optreden. Daarom is er bij een storm met een variërende waterstand niet één maatgevende waterstand, maar moet de schade voor alle relevante waterstanden gesommeerd worden. Verder maken de rekenregels gebruik van meerdere ontwerpformules, die specifiek van toepassing zijn op hoge of op lage waterstanden. Deze formules hebben wel een overlap, maar sluiten niet op elkaar aan.

E.e.a. maakt dat de huidige rekenregels niet nauwkeurig zijn en gemakkelijk kunnen leiden tot over- of onderdimensionering.

In het onderhavige rapport is daarom één overkoepelende ontwerpformule afgeleid waarmee voor alle waterstanden in een storm de schade aan een teenbestorting berekend kan worden. Deze 'koepelformule' heeft een continu resultaat en is zo goed mogelijk aangesloten op oude en nieuwe ontwerpformules en de meetdata waarop deze gebaseerd zijn. Vervolgens is op basis van de koepelformule een verbeterde rekenregel opgesteld die de schades voor alle relevante waterstanden sommeert en de totale schade toetst aan de norm. Deze rekenregel kan direct ingepast worden in de toetsmethodiek uit het VTV2006 en opgenomen worden in Steentoets2014.

Aanbevolen wordt om een aantal testcases door te rekenen met de nieuwe methode om te zien of de methode goed werkt in de praktijk en om te controleren of er vertrouwenwekkende resultaten uitkomen.

Deze rapportage is bedoeld als startpunt voor een discussie met deskundigen.

Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van het meerjarige project 'Advisering steenbekledingen Zeeland' voor het Projectbureau Zeeweringen (PBZ). Dit projectbureau is opgericht ten behoeve van de renovatie van de steenzettingen in Zeeland en is een samenwerking van Rijkswaterstaat en het Waterschap Scheldestromen.

Contractueel is Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving de opdrachtgever namens PBZ voor het onderhavige onderzoek. Het deel van het project dat gericht is op kennis-

**Titel**

Toetsing en ontwerp van teenbestortingen voor dijken

<b>Opdrachtgever</b> Rijkswaterstaat-WVL	<b>Project</b> 1209832-016	<b>Kenmerk</b> 1209832-016-HYE-0003	<b>Pagina's</b> 28
---	-------------------------------	--	-----------------------

ontwikkeling sluit aan op het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen dat uitgevoerd is in de periode van 2003-2009 in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat namens PBZ.

**Referenties**

Waterdienst zaaknummer 31094141 / 45002226348 van 2 juni 2014

Contactpersoon Waterdienst: dhr. K. Saathof

Contactpersoon Projectbureau Zeeweringen van RWS: dhr. Y. Provoost

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	dec. 2014	ir M.C.J Bosters (Bosters Waterbouw & Hydrologie)	<i>R. Bosters</i>	M. Klein Breteler	<i>WKB</i>	M.R.A. van Gent	<i>(handwritten signature)</i>

**Status**

concept

Dit document is een concept en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.

## Inhoud

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2 Probleemanalyse en eisen</b>	<b>3</b>
2.1 Definitie constructie	3
2.2 Belasting en bezwijkmechanisme	3
2.3 Probleemanalyse	4
2.4 Eisen toets- en ontwerpmethodiek	5
<b>3 Literatuuronderzoek</b>	<b>7</b>
3.1 Overzicht onderzoeken	7
3.2 Evaluatie onderzoeken	7
3.3 Selectie modelonderzoeken	8
<b>4 Afleiding koepelformule</b>	<b>9</b>
4.1 Werkwijze	9
4.2 Huidige ontwerpformules	9
4.3 Evaluatie huidige ontwerpformules	10
4.4 Parameters	11
4.5 Lage en hoge waterstanden	12
4.6 Uitgangspunten	12
4.7 Koepelformule	13
4.8 Geldigheidsgebied koepelformule	14
4.9 Grafieken	14
4.10 Verificatie met meetdata	18
<b>5 Toets- en ontwerpmethodiek</b>	<b>23</b>
5.1 Toetsing teenbestorting VTV2006	23
5.2 Belastingduur	23
5.2.1 Eenvoudige methode	23
5.2.2 Gedetailleerde methode	24
5.3 Toepassingsvoorwaarden	26
5.4 Teenbestorting met knik (IJsselmeerconstructie)	26
5.5 Toetscriteria en ontwerpveiligheid	26
<b>6 Implementatie in Steentoets2014</b>	<b>27</b>
6.1 Hydraulische randvoorwaarden	27
6.2 Belastingduur en aanbevelingen voor implementatie	27
<b>7 Vervolg</b>	<b>29</b>
<b>8 Referenties</b>	<b>31</b>





## Lijst met Symbolen

Symbol	Betekenis
B	Constante van Ebbens [-]
$B_t$	Breedte teenbestorting [m]
$C_{HWS}$	Algemene constante bij hoge waterstanden [-]
$C_{KPL}$	Algemene constante in koepelformule [-]
$C_{LWS}$	Algemene constante bij lage waterstanden [-]
$c_{pl}$	Constante voor overstortende golven [-]
$D_{15}$	Steendiameter die door 15 massaprocent van de sortering wordt onderschreden [m]
$D_{85}$	Steendiameter die door 85 massaprocent van de sortering wordt onderschreden [m]
$D_{n50}$	Nominale mediane steendiameter (ribbe van een kubus met massa $M_{50}$ ) [m]
$D_{n50;VDM}$	Benodigde $D_{n50}$ volgens diepwaterformule van Van der Meer [m]
$D_t$	Dikte teenbestorting [m]
$f_i$	Reductiefactor [-]
G	Gradering van een steensortering ( $G = D_{85}/D_{15}$ ) [-]
g	Zwaartekrachtsversnelling [ $m/s^2$ ]
$H_s$	Significante golfhoogte [m]
$H_{s(i)}$	Significante golfhoogte een belastingperiode i [m]
$h_m$	Waterdiepte direct vóór teenbestorting [m]
$h_t$	Waterdiepte boven teenbestorting [m]
$h_t/H_s$	Relatieve waterdiepte boven teenbestorting [m]
k	Factor voor berekening orbitaalstroomsnelheid [1/m]
$L_{m-1,0}$	Golflengte [m]
$M_{50}$	Steenmassa die door 50 massaprocent van de sortering wordt onderschreden [kg]
$M_{KPL}$	Algemene macht voor koepelformule [-]
$M_T$	Macht voor golfperiode [-]
$M_\alpha$	Macht voor taludhelling [-]
N	Aantal golven [-]
$N_i$	Aantal golven in belastingperiode i [-]
$N_{fict}$	fictieve aantal golven dat net zoveel schade geeft als aan het eind van de vorige belastingperiode is opgetreden met de golfcondities uit de huidige belasting periode [-]
$N_{od}$	Schade ( $\approx$ aantal verplaatste stenen) [-]
$N_{od;max}$	Maximaal opgetreden schade in onderzoek [-]
$N_{stap}$	Aantal golven in de huidige belastingperiode i [-]
$N_{totaal}$	Totaal aantal golven [-]
n	Porositeit [-]
P	Doorlatendheidsfactor voor ondergrond [-]

$S$	Schade (~ aantal verplaatste stenen) [-]
$S_{HWS}$	Schade bij hoge waterstanden [-]
$S_{i-1}$	Schade aan het eind van de vorige belastingperiode i-1 [-]
$S_i$	Schade aan het eind van de huidige belastingperiode i [-]
$S_{1000i}$	Schade na 1000 golven met golfcondities uit de huidige belastingperiode [-]
$S_{KPL}$	Schade bij 1000 golven volgens koepelformule [-]
$S_{KPL,i}$	Schade volgens koepelformule in waterstandsinterval i [-]
$S_{LWS}$	Schade bij lage waterstanden [-]
$S_{max}$	Maximaal opgetreden schade in onderzoek [-]
$S_{0p}$	Golfsteilheid [-]
$T_m$	Gemiddelde golfperiode [s]
$T_{m-1,0}$	Golfperiode [s]
$T_{m-1,0(i)}$	Golfperiode bij een belastingperiode i [s]
$T_p$	Golfperiode bij de piek van het golfspectrum [s]
$\hat{u}_\delta$	Orbitaalstroomsnelheid [m/s]
$\alpha$	Taludhelling teenbestorting [°]
$\alpha_{mtg}$	Maatgevende taludhelling voor stabiliteit teenbestorting [°]
$\alpha_{vrl}$	Taludhelling voorland [°]
$\Delta$	Relatieve dichtheid steen ( $\Delta = \rho_s / (\rho_s - \rho_w)$ ) [-]
$\Delta D_{n50}$	Opdrijfgewicht van de mediane steen in een sortering [mwk]
$\xi_{0p}$	Brekerparameter op basis van $T_p$ [-]
$\xi_{0p,vrl}$	Brekerparameter voor het voorland [-]
$\xi_m$	Brekerparameter op basis van $T_m$ [-]
$\rho_s$	Dichtheid steen [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	Dichtheid (zee)water [kg/m <sup>3</sup> ]

---

## 1 Inleiding

De toetsing en het ontwerp van teenbestortingen bij dijken worden beschreven in het Technisch Rapport Steenzettingen. Toetsing en ontwerp worden uitgevoerd met een rekenregel, waarmee de benodigde steensortering kan worden berekend. Deze rekenregel is opgesteld door Infram [14] en ook opgenomen in de Rock Manual. Omdat de rekenregel bij toepassing in de praktijk vragen oproept is ze door het Projectbureau Zeeweringen (PBZ) in 2010 nader uitgewerkt. Daar de ervaringen hiermee positief waren is in 2013 besloten om de verbeterde rekenregel van PBZ op te nemen in de Handreiking Dijkbekledingen, dat begin 2015 gaat worden uitgebracht. Verder is de verbeterde rekenregel reeds ingeprogrammeerd in een experimentele versie van Steentoets2014.



*Figuur 1.1 Breuksteen op de waterlijn en op 1:3 talud daaronder (Wieringermeerdijk langs het IJsselmeer)*

Bij het opstellen van de Handreiking Dijkbekledingen kwam een aantal nieuwe onderzoeken naar teenbestortingen naar voren, waarmee de rekenregel mogelijk verder verbeterd kan worden. Bovendien bleek bij het inprogrammeren in Steentoets2014 dat de rekenregel nog verder uitgewerkt moet worden om te komen tot consistente resultaten in Steentoets2014. Dit betreft vooral de belastingduur, d.w.z. het sommeren van de schade die optreedt bij verschillende waterstanden in een storm.

Vanwege het bovenstaande heeft Rijkswaterstaat aan Deltares opdracht gegeven om de rekenregel verder te verbeteren. Dit omvat het volgende:

- 1 Verzamelen van de relevante kennis, meetdata en ontwerpformules uit zowel de oude als nieuwe onderzoeken naar teenbestortingen;
- 2 Op basis hiervan één overkoepelende ontwerpformule opstellen waarmee voor alle voorkomende waterstanden in een storm de schade aan een teenbestorting berekend kan worden;
- 3 Op basis van deze 'koepelformule' uitwerken van (een rekenregel voor) een toets- en ontwerpmethodiek voor teenbestortingen die opgenomen kan worden in Steentoets2014.

Het uitvoeren van aanvullend experimenteel onderzoek, numerieke berekeningen, of fundamenteel onderzoek naar de fysische processen valt buiten het kader van dit onderzoek.

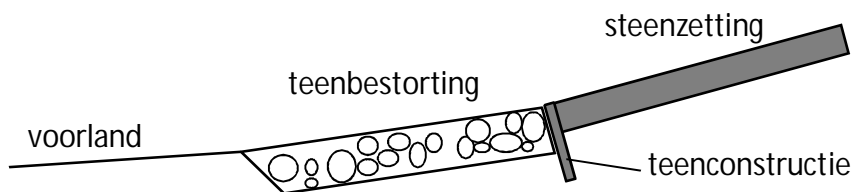
Deze rapportage is bedoeld als startpunt voor een discussie met deskundigen.

## 2 Probleemanalyse en eisen

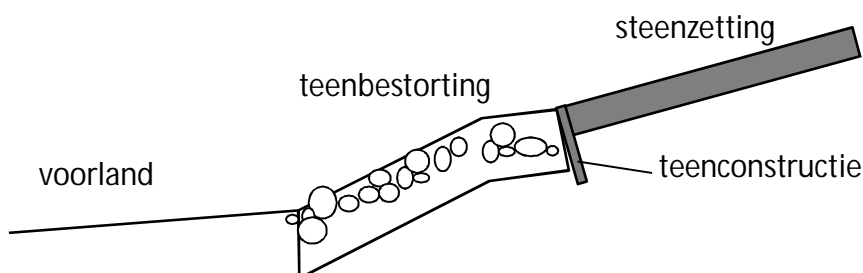
### 2.1 Definitie constructie

Voorliggend rapport heeft betrekking op teenbestortingen bij dijken, d.w.z. waterkeringen met een slecht doorlatende kern en buitentalud, waardoor er sprake is van een grote golfoploop en golfterugloop. Daarbij zijn er de volgende varianten:

- 1 De teenbestorting heeft een breedte van 5 à 15 m en gaat vervolgens over in het (onverharde) voorland (zie ook Figuur 2.1). De helling varieert tussen horizontaal en ca. 1:5. Deze constructie is gebruikelijk in Zuidwest-Nederland en wordt in Zeeland aangeduid als kreukelberm;
- 2 De teenbestorting bestaat uit een (vrijwel) horizontaal deel wat aansluit op het buitentalud van de dijk en overgaat in een steiler deel wat aan de onderzijde op de vooroever aansluit (Figuur 2.2). Het horizontale deel heeft een breedte van 2 à 5 m en wordt ook wel aangeduid als plasberm. Het steile deel heeft een breedte van 5 à 10 m, waarbij de helling varieert tussen ca. 1:5 en 1:3. Deze constructie is gebruikelijk in het IJsselmeergebied.



Figuur 2.1 Typische teenbestorting bij dijken in Zeeland



Figuur 2.2 Definitie teenbestortingen bij dijken langs Flevopolders en Wieringermeerpolder

Een belangrijk verschil tussen teenbestortingen bij dijken en bij golfbrekers van losse breuksteen is dat golfterugloop bij dijken minder geremd wordt door het gladdere talud en dus de teenbestorting zwaarder belast wordt, waardoor (bij verder gelijke omstandigheden) een zwaardere steensortering nodig is dan bij een golfbreker.

### 2.2 Belasting en bezwijkmechanisme

Bij waterstanden ter hoogte van de teenbestorting (lage waterstanden) wordt deze belast door brekende golven en door golfterugloop. Bij waterstanden ruim boven de teenbestorting

(hoge waterstanden) wordt deze belast door de orbitaalstroming onder de inkomende golven. Bij tussenliggende waterstanden is sprake van een mengvorm.

Als de belasting te groot is, worden stenen meegevoerd door de stroming. Het verplaatsen of verdwijnen van enkele stenen wordt in het algemeen toelaatbaar geacht, maar als er teveel stenen verdwijnen, dan wordt de bekleding op het boventalud niet voldoende meer ondersteund. Hierdoor zal op den duur ook schade ontstaan aan de bekleding en kan ook de waterkering in gevaar komen.



*Figuur 2.3 Teenbestorting van dijk bij Waarde (Westerschelde)*

## 2.3 Probleemanalyse

Het onderscheid in de belasting bij lage waterstanden (door brekende golven) en bij hoge waterstanden (door orbitaalstroming) komt nadrukkelijk naar voren in de beschikbare onderzoeken en ontwerpformules. De meeste onderzoeken en formules hebben alleen betrekking op hoge of alleen op lage waterstanden. Hoewel de diverse onderzoeken bij tussenliggende waterstanden elkaar goed overlappen, is er geen enkele formule die het hele waterstandsbereik afdekt. Om alle waterstanden in een storm te beschouwen moeten daarom meerdere ontwerpformules gebruikt worden. De resultaten hiervan kunnen sterk verschillen en de thans beschikbare formules sluiten meestal niet goed op elkaar aan.

In de praktijk van toetsing en ontwerp is gebleken dat, op grond van de formules, binnen één storm zowel bij hoge als lage waterstanden significante schade kan optreden, in een groot bereik van waterstanden. Dit betekent dat voor een correcte toetsing of ontwerp de storm opgeknipt moet worden in relevante waterstandsintervallen en dat de schade, die tijdens die intervallen wordt berekend, gesommeerd moet worden.

Zowel de oorspronkelijke rekenregel uit het TR Steenzettingen als de verbeterde rekenregel van PBZ veronderstellen dat er één maatgevende waterstand is op basis waarvan direct de benodigde steensortering berekend kan worden. Daarmee houden ze geen of onvoldoende rekening met het bovenstaande. Dit kan zowel leiden tot overdimensionering als onderdimensionering.



## 2.4 Eisen toets- en ontwerpmethodiek

Het voorgaande resulteert in de volgende eisen voor de op te stellen rekenregel voor toetsing en ontwerp van teenbestortingen bij dijken:

- 1 Er moet een overkoepelende ontwerpformule opgesteld worden die voor alle waterstanden in een storm de schade kan berekenen;
- 2 De resultaten van deze 'koepelformule' moeten een continu verloop hebben en zo goed mogelijk aansluiten op de meetdata uit de beschikbare onderzoeken en op de hieruit afgeleide ontwerpformules;
- 3 De rekenregel moet de storm opknippen in relevante waterstandsintervallen en de schade die tijdens die intervallen wordt berekend (met de koepelformule) moet gesommeerd worden;
- 4 De rekenregel moet geschikt zijn voor de meest gebruikelijke teenconstructies in Nederland, zijnde de Zeeuwse en de IJsselmeerconstructie.



*Figuur 2.4 Dijk aan de westzijde van Terneuzen met breuksteen aan de teen*





### 3 Literatuuronderzoek

#### 3.1 Overzicht onderzoeken

Om de beschikbare kennis over teenbestortingen te verzamelen is een literatuuronderzoek gedaan. De onderzoeken naar teenbestortingen die het meest relevant worden geacht zijn weergegeven in Tabel 3.1. Behalve deze onderzoeken zijn er ook nog een aantal studies die hier op voortgeborduurd hebben. Omdat deze studies gebaseerd zijn op dezelfde gegevens zijn de resultaten hiervan meestal niet heel anders. Voor een compleet overzicht wordt verwezen naar de referenties.

Tabel 3.1 Overzicht onderzoeken naar teenbestortingen

Onderzoek	Constructie	Waterstanden	Type onderzoek	Ontwerpformule
Van der Meer (1990)	Dijk	LWS & HWS	Modelonderzoek	Ja
Gerding (1993)	Golfbreker	HWS	Modelonderzoek	Ja
Docters van Leeuwen (1996)	Golfbreker	HWS	Modelonderzoek	Nee
Van der Meer (1998)	Golfbreker	HWS	Bureaustudie	Ja*
Baart (2008)	Golfbreker	HWS	Bureaustudie	Nee
Ebbens (2009)	Golfbreker	LWS	Modelonderzoek	Ja
Nammuni-Krohn (2009)	Golfbreker	HWS	Modelonderzoek	Nee
Arets (2013)	Golfbreker	HWS	Bureaustudie	Nee
Van Gent & Van der Werf (2014)	Golfbreker	HWS	Modelonderzoek	Ja
LWS: Lage waterstanden (belasting door brekende golven)				
HWS: Hoge waterstanden (belasting door orbitaalstroming)				
* Gebaseerd op het modelonderzoek van Gerding (1993)				

#### 3.2 Evaluatie onderzoeken

Het onderzoek van Van der Meer (1990) biedt de meeste aanknopingspunten: De onderzochte constructie lijkt het meest op een dijk en bovendien is een vrij groot bereik aan waterstanden onderzocht. Hierdoor werd zowel de belasting door brekende golven (waterstand bij de teen) als door orbitaalstroming onderzocht (waterstand hoog boven de teen).

Alle overige onderzoeken hadden betrekking op goed doorlatende breuksteenconstructies (golfbrekers) en richtten zich in hoofdzaak op één van de twee belastingvormen, meestal de orbitaalbelasting.

Een deel van de onderzoeken zijn modelonderzoeken in een stroomgoot. Daarbij werden door Nammuni-Krohn (2009) de stroomsnelheden aan de teen gemeten. Bij alle andere modelonderzoeken werd de schade aan de constructie gemeten.

Tenslotte resulteerde maar een deel van de onderzoeken in een ontwerpformule. Geen enkele van de ontwerpformules is bruikbaar voor alle waterstanden. Het gros richt zich vooral op hoge of vooral op lage waterstanden.

## 3.3 Selectie modelonderzoeken

De af te leiden koepelformule en de hierop te baseren toets- en ontwerpmethodiek moeten zo goed mogelijk aansluiten op de beschikbare meetdata uit modelonderzoeken en op de hieruit afgeleide ontwerpformules. Dit impliceert dat voor de koepelformule alleen de modelonderzoeken relevant zijn waarbij de schade aan de constructie gemeten is. Deze modelonderzoeken en nadere details hiervan zijn weergegeven in Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Nadere details modelonderzoeken

Onderzoek	Van der Meer	Gerding	Docters van Leeuwen	Ebbens	Van Gent & Van der Werf
Jaar	1990	1993	1996	2009	2014
Constructie	Dijk	Golfbreker	Golfbreker	Golfbreker	Golfbreker
Waterstanden	LWS en HWS	HWS	HWS	LWS en HWS	HWS
Ontwerpformule	Ja	Ja (2 stuks)	Nee	Ja*	Ja
<b>Constructiegegevens</b>					
Type boventalud	Ruw en glad	Ruw	Ruw	Ruw	Ruw en glad
Helling boventalud	1:3	1:1,5	1:1,5	1:1,5	1:2
Helling bestorting	1:6	Horizontaal	Horizontaal	Horizontaal	Horizontaal
Helling voorland	Horizontaal	1:20	1:50	1:10, 1:20, 1:50	1:30
Dikte bestorting [m]	0,07	0,06 - 0,20	0,08 - 0,15	0,06	0,03 - 0,06
Breedte bestorting [m]	4,20	0,12 - 0,30	0,12	0,10	0,044 - 0,21
$D_{n50}$ [m]	0,0344	0,017 - 0,040	0,0098 - 0,0231	0,0188 - 0,0268	0,0146 - 0,0233
$D_{85}/D_{15}$	Onbekend	1,15 - 1,3	1,2 - 1,45	1,5	1,17
$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2604	2680	1900 - 2850	2650 - 2750	2700
<b>Gegevens modelproeven</b>					
Golftype	Ongebroken	Ongebroken	Ongebroken	Gebroken en ongebroken	Ongebroken
Aantal golven	3000	1000	2000	1100	1000
$s_{0p}$	0,02 - 0,04	0,02 - 0,04	0,04	0,02 - 0,04	0,012 - 0,042
$h_t/H_s$	0 - 1,6	0,8 - 2,8	0,9 - 3,8	0 - 5,1 (0 - 0,8)*	0,9 - 3,8
$H_s/\Delta D_{n50}$	0,9 - 4,0	2,1 - 8,4	2,9 - 14,0	1,0 - 4,1	1,2 - 10,5
Schade	$S_{max} = 5,1$	$N_{od,max} = 9,2$	$N_{od,max} = 4,7$	$N_{od,max} = 4,4$	$N_{od,max} = 7,3$
LWS: Lage waterstanden (belasting door brekende golven)					
HWS: Hoge waterstanden (belasting door orbitaalstroming)					
* De formule heeft alleen betrekking op de metingen bij lage waterstanden ( $h_t/H_s < 0,8$ )					

Hierin zijn de volgende symbolen gebruikt:

- $s_{0p}$  = golfsteilheid (-)
- $h_t$  = waterdiepte boven de teen (m)
- $H_s$  = significante golfhoogte (m)
- $\Delta$  =  $(\rho_s - \rho)/\rho$  = relatieve soortelijke massa (-)
- $D_{n50}$  = nominale steen diameter (m)
- $D_{85}$  = korrelgrootte die door 85% op basis van gewicht wordt onderschreden (m)
- $D_{15}$  = korrelgrootte die door 15% op basis van gewicht wordt onderschreden (m)
- $\rho_s$  = soortelijke massa van de steen (kg/m<sup>3</sup>)
- $\rho$  = soortelijke massa van water (kg/m<sup>3</sup>)
- $S_{max}$  = schadegetal (-)
- $N_{od,max}$  = schadegetal (-)

## 4 Afleiding koepelformule

### 4.1 Werkwijze

Daar de gezochte koepelformule moet aansluiten op de beschikbare ontwerpformules is eerst een analyse gemaakt van deze ontwerpformules. Daarbij is nagegaan welke parameters hierin voorkomen en welk gewicht deze hebben. Op basis hiervan is een koepelformule opgesteld met dezelfde parameters. Deze is voor zowel lage, hoge als tussenliggende waterstanden gefit op de resultaten van de huidige ontwerpformules. Hierna is geverifieerd of de resulterende koepelformule voldoende aansluit op de beschikbare meetdata.

### 4.2 Huidige ontwerpformules

Uit de geselecteerde modelonderzoeken zijn door de onderzoekers in totaal 5 ontwerpformules afgeleid: 2 voor lage waterstanden en 3 voor hoge waterstanden.

Om deze ontwerpformules goed met elkaar te kunnen vergelijken zijn ze in Tabel 4.1 en Tabel 4.2 nader uitgeschreven (als functie van  $\Delta D_{n50}$  en als functie van de schade S). Voor de gebruikte symbolen wordt verwezen naar de symbolenlijst.

Andere, latere onderzoekers hebben uit dezelfde data nog andere formules afgeleid. Muttray [15] geeft hiervan een goed overzicht. Omdat deze formules minder courant zijn en bovendien sterk op de oorspronkelijke formules lijken zijn deze niet nader beschouwd.

Tabel 4.1 Ontwerpformules voor **lage waterstanden** (belasting door brekende golven)

Van der Meer (1990, geknikt talud met glad boventalud)
<p>Basisformules:</p> $D_{n50} = D_{n50;VDM}/f_i \quad (\text{zie [18]})$ $D_{n50;VDM} = H_s/(\Delta \cdot c_{pl} \cdot P^{0,18} \cdot S^{0,2} \cdot N^{-0,1} \cdot \xi_m^{-0,5}) \quad (\text{zie [18]})$ $f_i = 0,86 + 0,09 \cdot h_t/D_{n50} \quad (\text{zie [5]})$ <p>Hieruit volgt:</p> $D_{n50} = (D_{n50;VDM} - 0,09 \cdot h_t)/0,86$ $D_{n50} = (H_s/(\Delta \cdot c_{pl} \cdot P^{0,18} \cdot S^{0,2} \cdot N^{-0,1} \cdot \xi_m^{-0,5}) - 0,09 \cdot h_t)/0,86$ $\Delta D_{n50} = (H_s/(c_{pl} \cdot P^{0,18} \cdot S^{0,2} \cdot N^{-0,1} \cdot \xi_m^{-0,5}) - 0,09 \cdot \Delta \cdot h_t)/0,86$ $\Delta D_{n50} = (H_s^{0,75} \cdot T_m^{0,5} \cdot S^{-0,2} \cdot N^{0,1} \cdot \cot \alpha_{vrl}^{-0,5} \cdot (g/2\pi)^{0,25} / c_{pl} \cdot P^{0,18} - 0,09 \cdot \Delta \cdot h_t)/0,86$ $S = \{H_s/(c_{pl} \cdot P^{0,18} \cdot N^{-0,1} \cdot \xi_m^{-0,5}) / (0,86 \cdot \Delta D_{n50} + 0,09 \cdot \Delta \cdot h_t)\}^5$ $S = \{H_s^{0,75} \cdot T_m^{0,5} \cdot N^{0,1} \cdot \cot \alpha_{vrl}^{-0,5} \cdot (g/2\pi)^{0,25} / c_{pl} \cdot P^{0,18} / \Delta / (0,86 \cdot D_{n50} + 0,09 \cdot h_t)\}^5$
Ebbens (2009)
<p>Basisformules:</p> $N_{od} = B \cdot (H_s/\Delta D_{n50} \cdot \xi_{0p;vrl}^{0,5})^3 \quad (\text{zie [7]})$ $S = N_{od}/(G \cdot (1-n)) \quad (\text{zie [18]})$ <p>Hieruit volgt:</p> $H_s/\Delta D_{n50} = (N_{od}/B)^{1/3} \cdot \xi_{0p;vrl}^{-0,5}$ $\Delta D_{n50} = H_s / (N_{od}/B)^{1/3} \cdot \xi_{0p;vrl}^{0,5}$ $\Delta D_{n50} = H_s^{0,75} \cdot T_p^{0,5} \cdot N_{od}^{-1/3} \cdot \cot \alpha_{vrl}^{-0,5} \cdot (g/2\pi)^{0,25} \cdot B^{1/3}$ $N_{od} = (H_s^{0,75} \cdot T_p^{0,5} \cdot \cot \alpha_{vrl}^{-0,5} \cdot (g/2\pi)^{0,25} \cdot B^{1/3} / \Delta D_{n50})^3$ $S = (H_s^{0,75} \cdot T_p^{0,5} \cdot \cot \alpha_{vrl}^{-0,5} \cdot (g/2\pi)^{0,25} \cdot B^{1/3} / \Delta D_{n50})^3 / G / (1-n)$

Tabel 4.2 Ontwerpformules voor **hoge waterstanden** (belasting door brekende golven)

Gerding (1993)
<p>Basisformules:  <math>H_s/\Delta D_{n50} = (1,6 + 0,24 \cdot (h_t/D_{n50})) \cdot N_{od}^{0,15}</math> (zie [10])  <math>S = N_{od}/(G \cdot (1-n))</math> (zie [18])</p> <p>Hieruit volgt:  <math>H_s = (1,6 \cdot \Delta D_{n50} + 0,24 \cdot \Delta \cdot h_t) \cdot N_{od}^{0,15}</math>  <math>\Delta D_{n50} = (H_s \cdot N_{od}^{-0,15} - 0,24 \cdot \Delta \cdot h_t)/1,6</math>  <math>N_{od} = \{H_s/\Delta / (1,6 \cdot D_{n50} + 0,24 \cdot h_t)\}^{1/0,15}</math>  <math>S = \{H_s/\Delta / (1,6 \cdot D_{n50} + 0,24 \cdot h_t)\}^{1/0,15} / G / (1-n)</math></p>
Van der Meer (1998) (gebaseerd op het modelonderzoek van Gerding (1993))
<p>Basisformules:  <math>H_s/\Delta D_{n50} = (2 + 6,2 \cdot (h_t/h_m)^{2,7}) \cdot N_{od}^{0,15}</math> (zie [11])  <math>S = N_{od}/(G \cdot (1-n))</math> (zie [18])</p> <p>Hieruit volgt:  <math>\Delta D_{n50} = H_s \cdot N_{od}^{-0,15} / (2 + 6,2 \cdot (h_t/h_m)^{2,7})</math>  <math>N_{od} = \{H_s/\Delta D_{n50} / (2 + 6,2 \cdot (h_t/h_m)^{2,7})\}^{1/0,15}</math>  <math>S = \{H_s/\Delta D_{n50} / (2 + 6,2 \cdot (h_t/h_m)^{2,7})\}^{1/0,15} / G / (1-n)</math></p>
Van Gent & Van der Werf (2014, glad boventalud)
<p>Basisformules:  <math>N_{od} = 0,032 \cdot (D_t/H_s) \cdot (B_t/H_s)^{0,3} \cdot (1,15 \cdot H_s/\Delta D_{n50})^3 \cdot \hat{u}_\delta / (g \cdot H_s)^{0,5}</math> (zie [8 en 9])  <math>\hat{u}_\delta = \pi \cdot H_s / T_{m-1,0} / \sinh(k \cdot h_t)</math> (zie [8])  <math>k = 2\pi/L_{m-1,0} = 4\pi^2/g/T_{m-1,0}^2</math> (zie [8])  <math>S = N_{od}/(G \cdot (1-n))</math> (zie [18])</p> <p>Hieruit volgt:  <math>\Delta D_{n50} = 1,15 \cdot \{0,032 \cdot (D_t/H_s) \cdot (B_t/H_s)^{0,3} \cdot H_s^3 \cdot \hat{u}_\delta / (g \cdot H_s)^{0,5}\}^{1/3}</math>  <math>\Delta D_{n50} = 1,15 \cdot \{0,032 \cdot (D_t/H_s) \cdot (B_t/H_s)^{0,3} \cdot H_s^3 \cdot \pi \cdot H_s / T_{m-1,0} / \sinh(4\pi^2/g/T_{m-1,0}^2 \cdot h_t) / (g \cdot H_s)^{0,5}\}^{1/3}</math>  <math>\Delta D_{n50} = H_s^{2,2/3} \cdot T_{m-1,0}^{-1/3} \cdot N_{od}^{-1/3} \cdot 1,15 \cdot (0,032 \cdot D_t \cdot B_t^{0,3} \cdot \pi / g^{0,5} / \sinh(4\pi^2/g/T_{m-1,0}^2 \cdot h_t))^{1/3}</math>  <math>N_{od} = 0,032 \cdot (D_t/H_s) \cdot (B_t/H_s)^{0,3} \cdot (1,15 \cdot H_s/\Delta D_{n50})^3 \cdot \pi \cdot H_s / T_{m-1,0} / \sinh(4\pi^2/g/T_{m-1,0}^2 \cdot h_t) / (g \cdot H_s)^{0,5}</math>  <math>N_{od} = H_s^{2,2} \cdot T_{m-1,0}^{-1} / \Delta D_{n50}^3 \cdot 0,032 \cdot D_t \cdot B_t^{0,3} \cdot 1,15^3 \cdot \pi / g^{0,5} / \sinh(4\pi^2/g/T_{m-1,0}^2 \cdot h_t)</math>  <math>S = H_s^{2,2} \cdot T_{m-1,0}^{-1} / \Delta D_{n50}^3 \cdot 0,032 \cdot D_t \cdot B_t^{0,3} \cdot 1,15^3 \cdot \pi / g^{0,5} / \sinh(4\pi^2/g/T_{m-1,0}^2 \cdot h_t) / G / (1-n)</math></p> <p>Meestal is <math>kh_t &lt; 1</math>, zodat <math>\sinh(kh_t) \approx kh_t</math> en  <math>\Delta D_{n50} \approx H_s^{2,2/3} \cdot T_{m-1,0}^{1/3} \cdot N_{od}^{-1/3} \cdot h_t^{-1/3} \cdot 1,15 \cdot (0,032 \cdot D_t \cdot B_t^{0,3} \cdot g^{0,5} / 4\pi)^{1/3}</math>  <math>N_{od} \approx H_s^{2,2} \cdot T_{m-1,0} / \Delta D_{n50}^3 / h_t \cdot 0,032 \cdot D_t \cdot B_t^{0,3} \cdot 1,15^3 \cdot g^{0,5} / 4\pi</math>  <math>S \approx H_s^{2,2} \cdot T_{m-1,0} / \Delta D_{n50}^3 / h_t \cdot 0,032 \cdot D_t \cdot B_t^{0,3} \cdot 1,15^3 \cdot g^{0,5} / 4\pi / G / (1-n)</math></p>

De verklaring van de symbolen is gegeven in de symbolenlijst.

### 4.3 Evaluatie huidige ontwerpformules

Met betrekking tot Tabel 4.1 en Tabel 4.2 zijn er de volgende opmerkingen en conclusies:

- 1 In de formule van Ebbens (2009) ontbreekt de waterdiepte. Ebbens geeft aan dat de formule alleen geldig is voor  $h_m/H_s < 2$  en  $h_t/h_m < 0,4$ , ofwel voor  $h_t/H_s < 0,8$ ;

- 2 Alleen de formule van Van der Meer (1990) houdt rekening met de belastingduur, in de vorm van het aantal golven;
- 3 De 2 formules voor lage waterstanden (Ebbens en Van der Meer (1990)) hebben een grote mate van overeenkomst. De taludhelling komt in beide formules op dezelfde manier tot uiting, met dit verschil dat Ebbens de taludhelling van het voorland gebruikt en Van der Meer de helling van de bestorting;
- 4 De 2 formules die gebaseerd zijn op het onderzoek van Gerding (Gerding en van der Meer (1998)) lijken (logischerwijs) eveneens op elkaar. Belangrijkste verschil is dat de formule van Van der Meer (1998) niet alleen de waterdiepte boven de bestorting ( $h_t$ ), maar ook de waterdiepte juist vóór de bestorting ( $h_m$ ) gebruikt;
- 5 Bij de formules voor hoge waterstanden komt de taludhelling niet voor en wordt de golfperiode alleen gebruikt in de formule van Van Gent & Van der Werf (2014).

#### 4.4 Parameters

Bij de huidige ontwerpformules kan onderscheid gemaakt worden tussen parameters die in vrijwel alle formules gebruikt worden en parameters die slechts incidenteel gebruikt worden. De algemeen gebruikte parameters zijn:

- 1 Schadegetal ( $S$  of  $N_{od}$ );
- 2 Onderwatergewicht van de stenen ( $\Delta D_{n50}$ );
- 3 Waterdiepte boven de teenbestorting ( $h_t$ );
- 4 Golfhoogte ( $H_s$ );
- 5 Brekerparameter ( $\xi$ ), c.q. de golfperiode ( $T_p$ ,  $T_m$  of  $T_{m-1,0}$ );
- 6 Taludhelling van de bestorting ( $\tan\alpha$ ) of het voorland ( $\tan\alpha_{vri}$ ) (alleen bij formules voor lage waterstanden).

De incidentele parameters zijn:

- 1 Waterdiepte juist vóór de teenbestorting ( $h_m$ );
- 2 Belastingduur ( $N$  - aantal golven);
- 3 Dikte van de teenbestorting ( $D_t$ );
- 4 Breedte van de teenbestorting ( $B_t$ );
- 5 Doorlatendheid van de ondergrond ( $P$ );
- 6 Golfsterugloop bij een glad boventalud (weergegeven door correctiefactoren).

Verder zijn er nog parameters, waarvan de invloed niet bekend is, maar wel impliciet in de formule zitten. Te denken valt o.a. aan de doorlatendheid en de vorm van de achterliggende constructie (dijk of golfbreker), het golfspectrum en de gradering van de steen.

Gekozen is om de volgende parameters op te nemen in de koepelformule:

- 1 Schadegetal ( $S$ ): Gekozen is voor het schadegetal  $S$ , omdat dit het beste aansluit op de gangbare praktijk bij stortsteen;
- 2 Onderwatergewicht van de stenen ( $\Delta D_{n50}$ );
- 3 Waterdiepte boven de teenbestorting ( $h_t$ );
- 4 Golfhoogte ( $H_s$ ): In [10] en [18] wordt aangegeven dat  $H_{2\%}$  mogelijk een meer nauwkeurige parameter is, maar dit is niet bevestigd en de extra nauwkeurigheid is waarschijnlijk klein in verhouding tot de nog aanwezige onzekerheden;
- 5 Golfperiode ( $T_{m-1,0}$ ): Gekozen is voor de periodemaat  $T_{m-1,0}$ , omdat dit het beste aansluit bij de laatste ontwikkelingen;
- 6 Taludhelling ( $\tan\alpha_{mtg}$ ): Om aan te sluiten op zowel Van der Meer (1990) als Ebbens (2009) is gekozen om bij een verschil tussen de bestortingshelling en de voorlandhelling de steilste te gebruiken.

Bij de overige parameters is er te weinig informatie om ze expliciet in de koepelformule op te nemen. De invloed van deze parameters wordt als volgt verdisconteerd:

- 1 Belastingduur (N): De koepelformule wordt afgeleid voor  $N = 1000$  golven en de werkelijke belastingduur wordt pas verdisconteerd na sommatie van de schade voor de diverse waterstanden in de storm;
- 2 Waterdiepte juist vóór de bestorting ( $h_m$ ) en afmetingen van de bestorting ( $D_t$ ,  $B_t$ ): De koepelformule en de rekenregel worden afgeleid voor vaste (gebruikelijke) afmetingen voor teenbestortingen in Nederland. Bij afwijkende afmetingen wordt doorverwezen naar een toets of ontwerp op maat. Er is gewerkt met  $h_t = h_m + 2D_{n50}$ ;
- 3 Overige parameters: De invloed wordt impliciet meegenomen door aan te sluiten op de bestaande ontwerpformules.

#### 4.5 Lage en hoge waterstanden

De koepelformule moet bij lage waterstanden aansluiten op de ontwerpformules voor lage waterstanden en bij hoge waterstanden op de ontwerpformules voor hoge waterstanden. De koepelformule kan echter niet bij alle waterstanden goed aansluiten omdat de huidige ontwerpformules ook niet goed op elkaar aansluiten. In het overgangsgebied tussen lage en hoge waterstanden zal de koepelformule daarom ergens tussen de huidige formules in komen te liggen.

Of sprake is van een hoge of lage waterstand wordt bepaald door de hydraulische belasting. Hoe groter de golf bij een bepaalde waterstand, hoe meer de nadruk ligt op een belasting door brekende golven en hoe minder op een belasting door orbitaalstroming. Als maat voor de waterstand is daarom de relatieve waterdiepte gekozen:  $h_t/H_s$ . Op grond van de onderzochte waterstanden, c.q. het geldigheidsgebied van de huidige ontwerpformules (zie Tabel 3.2), worden de waterstanden als volgt gedefinieerd:

- Lage waterstanden:  $0 < h_t/H_s < 0,8$
- Hoge waterstanden:  $h_t/H_s > 0,8$

De focus van de onderzoeken met lage waterstanden lag op  $h_t/H_s = 0$  (een waterstand op de bovenkant van de teenbestorting). Bij de onderzoeken met hoge waterstanden lag de gemiddelde waterstand op  $h_t/H_s = 2$ . Op grond hiervan wordt verondersteld dat de ontwerpformules bij deze waarden het meest nauwkeurig zijn.

Al dan niet toevallig komen deze waterdieptes ook goed overeen met op het voorland of bestorting brekende golven ( $h_t/H_s = 0$ ) en golven die nog net niet gaan breken ( $h_t/H_s = 2$ ), ofwel golven die alleen een orbitaalbelasting geven.

Op grond hiervan is er voor gekozen om de koepelformule zodanig te fitten dat de aansluiting op de formules voor lage waterstanden het best is bij  $h_t/H_s = 0$  en dat de aansluiting op de formules voor hoge waterstanden het best is bij  $h_t/H_s = 2$ . Daar tussenin is er een verloop.

#### 4.6 Uitgangspunten

Bij het fitten van de koepelformule op de huidige ontwerpformules zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- 1 In de huidige ontwerpformules komen als maat voor de golfperiode  $T_p$ ,  $T_m$  en  $T_{m-1,0}$  voor. Deze zijn als volgt omgerekend:
  - $T_p = 1,1 \cdot T_m$
  - $T_{m-1,0} = T_p/1,1$

- $T_{m-1,0} = T_m$
- 2 Aantal golven: Voor de vergelijking van de formules is gekozen voor  $N = 1000$ , omdat in de meeste modelonderzoeken de proeven bestonden uit (ca.) 1000 golven. Als er meer golven waren, dan is de schade die berekend wordt met de betreffende ontwerpformule gereduceerd met een factor  $(1000/N)^{0,5}$ . Dit is de invloed van de belastingduur volgens Van der Meer (1990), die als enige de belastingduur in zijn formule heeft opgenomen;
- 3 Voor de berekening van de waterdiepte juist vóór de teenbestorting ( $h_m$ ) in de formule van Van der Meer (1998) is er van uitgegaan dat het niveauverschil tussen de bovenkant van de bestorting en het voorland gelijk is aan  $D_t (= 2D_{n50})$ , ofwel dat de bestorting op het voorland ligt. In de praktijk ligt de teenbestorting vaak wat verzonken in het voorland, maar bij enige erosie komt de bestorting echter al snel in zijn geheel boven het voorland te liggen;
- 4 Doorlatendheid ondergrond:  $P = 0,1$ ;
- 5 Dikte en breedte bestorting: Bij het gebruik van de formule van Van Gent & Van der Werf is hier gekozen voor  $D_t = 2D_{n50}$  en  $B_t = 15D_{n50}$ , omdat deze afmetingen een goede weergave zijn voor teenbestortingen in Nederland. Bij afwijkende maten moet een toets of ontwerp op maat gedaan worden;
- 6 Omdat de  $\Delta D_{n50}$  met verschillende machten in de formules zit, was het nodig voor het onderling vergelijken om een waarde daarvoor te kiezen. Er is gekozen voor  $\Delta D_{n50} = 0,38$  m, wat overeenkomt met een steensortering van 10-60 kg. Deze wordt het meest gebruikt in teenbestortingen;
- 7 Porositeit teenbestorting:  $n = 0,4$ ;
- 8 Constante voor overstortende golven:  $c_{pl} = 6,2$ ;
- 9 In de formule van Ebbens komt de constante B voor. Ebbens geeft niet aan welk getal hiervoor ingevuld moet worden. Er is uitgegaan van  $B = 0,4$  omdat dit een goede match geeft met zijn meetdata.

#### 4.7 Koepelformule

De gezochte rekenregel moet de schade die optreedt bij verschillende waterstanden in een storm kunnen sommeren. Dit betekent dat gezocht wordt naar een koepelformule die als output de schade (S) heeft. Gezien het voorgaande wordt dus gezocht naar de schade als functie van de volgende parameters:

$$S = f(\Delta D_{n50}, h_t, H_s, T_{m-1,0}, \tan \alpha_{mtg}) \quad (1)$$

De huidige ontwerpformules hebben m.b.t. deze parameters de volgende structuur:

- Lage waterstanden:  $S_{LWS} = (C_{LWS} \cdot H_s^{0,75} \cdot T_{m-1,0}^{0,5} \cdot \cot \alpha_{mtg}^{-0,5} \cdot (\Delta D_{n50})^{-1})^{(3 \text{ à } 5)}$  (2)
- Hoge waterstanden:  $S_{HWS} = (C_{HWS} \cdot H_s^{(0,73 \text{ à } 1)} \cdot T_{m-1,0}^{(0 \text{ à } 0,33)} \cdot (\Delta D_{n50})^{-1})^{(3 \text{ à } 7)}$  (3)

Op grond hiervan is gekozen voor een koepelformule met de volgende structuur:

- Koepelformule: 
$$S_{KPL} = \left( C_{KPL} \frac{H_s^{0,75} T_{m-1,0}^{M_T} (\cot \alpha_{mtg})^{M_\alpha}}{\Delta D_{n50}} \right)^{M_{KPL}} \quad (4)$$

De factoren  $C_{KPL}$ ,  $M_T$ ,  $M_\alpha$  en  $M_{KPL}$  zijn daarbij afhankelijk van de waterstand. Het fitten van de koepelformule op de bestaande ontwerpformules komt neer op het optimaal invullen van deze variabelen. Dit is een iteratief proces waarbij de volgende keuzes zijn gemaakt:

- 1 Bij lage waterstanden wordt een teenbestorting voor een dijk het best benaderd door het onderzoek van Van der Meer (1990). Daarom is gekozen om de koepelformule voor  $h_t/H_s = 0$  gelijk te maken aan zijn ontwerpformule. Hieruit volgt voor  $h_t/H_s = 0$ :  $C_{KPL} = 0,628$  (zie Tabel 4.4) en  $M_{KPL} = 5$ ;

- 2 Tijdens het fitten is gebleken dat bij hoge waterstanden de formule van Van Gent & Van der Werf (2014) de beste overeenkomst vertoont met de onderliggende meetdata. Bovendien lijkt deze formule ook de beste theoretische onderbouwing te hebben. Daarom is bij  $h_t/H_s = 2$  in overeenkomst met de formule van Van Gent & Van der Werf gekozen voor  $M_T = 0,333$  en  $M_{KPL} = 3$ ;
- 3 Bij de formules voor hoge waterstanden komt de taludhelling niet voor. Daarom is bij  $h_t/H_s = 2$  gekozen voor  $M_\alpha = 0$ .

Per saldo zijn voor  $C_{KPL}$ ,  $M_T$ ,  $M_\alpha$  en  $M_{KPL}$  de waardes bepaald bij  $h_t/H_s = 0$  en  $h_t/H_s = 2$ . Daartussen is (al dan niet lineair) geïnterpoleerd. Het gevonden eindresultaat is weergegeven in Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Variabelen in koepelformule

$C_{KPL}$	$h_t/H_s = 0$	$C_{KPL} = 1000^{0,1} \cdot (g/2\pi)^{0,25} / c_{pl} / P^{0,18} / 0,86 = 0,633$
	$h_t/H_s = 2$	$C_{KPL} = 0,13$
	Algemeen	$C_{KPL} = 0,633 + (h_t/H_s/2)^{0,75} \cdot (0,13 - 0,633)$ , met als minimum 0,13
	Resultaat	$C_{KPL}$ loopt van 0,628 bij $h_t/H_s = 0$ naar 0,13 bij $h_t/H_s \geq 2$
$M_T$	$h_t/H_s = 0$	$M_T = 0,5$
	$h_t/H_s = 2$	$M_T = 0,333$
	Algemeen	$M_T = 0,5 + h_t/H_s/2 \cdot (0,333 - 0,5)$ , met als minimum 0,333
	Resultaat	$M_T$ loopt van 0,5 bij $h_t/H_s = 0$ naar 0,333 bij $h_t/H_s \geq 2$
$M_\alpha$	$h_t/H_s = 0$	$M_\alpha = -0,5$
	$h_t/H_s = 2$	$M_\alpha = 0$
	Algemeen	$M_\alpha = -0,5 + h_t/H_s \cdot 0,25$ , met als maximum 0
	Resultaat	$M_\alpha$ loopt van -0,5 bij $h_t/H_s = 0$ naar 0 bij $h_t/H_s \geq 2$
$M_{KPL}$	$h_t/H_s = 0$	$M_{KPL} = 5$
	$h_t/H_s = 2$	$M_{KPL} = 3$
	Algemeen	$M_{KPL} = 5 + h_t/H_s/2 \cdot (3 - 5)$ , met als minimum 3
	Resultaat	$M_{KPL}$ loopt van 5 bij $h_t/H_s = 0$ naar 3 bij $h_t/H_s \geq 2$

## 4.8 Geldigheidsgebied koepelformule

Het geldigheidsgebied van de koepelformule is als volgt:

- 1 Geldig voor teenbestortingen met een glad boventalud (bij een ruw boventalud is het resultaat conservatief);
- 2 Doorlatendheid ondergrond: Slecht doorlatend ( $P = 0,1$ );
- 3 Dikte teenbestorting:  $D_t \geq 2D_{n50}$ ;
- 4 Breedte teenbestorting:  $B_t \geq 15D_{n50}$ ;
- 5 Hoogte bovenkant bestorting boven voorland:  $\leq 2D_{n50}$ ;
- 6 Taludhelling:  $1:50 \leq \tan\alpha_{mtg} \leq 1:6$ .

## 4.9 Grafieken

De koepelformule is gefit op de huidige ontwerpformules met behulp van grafieken die de relatie geven tussen de belasting en de schade bij 1000 golven, bij verschillende waterstanden en bij verschillende waardes voor de brekerparameter  $\xi_{0p}$ . Daarbij wordt de belasting weergegeven door de parameter  $H_s/(\Delta D_{n50})$ , de schade door het schadegetal  $S$  en de waterstand door de parameter  $h_t/H_s$ .



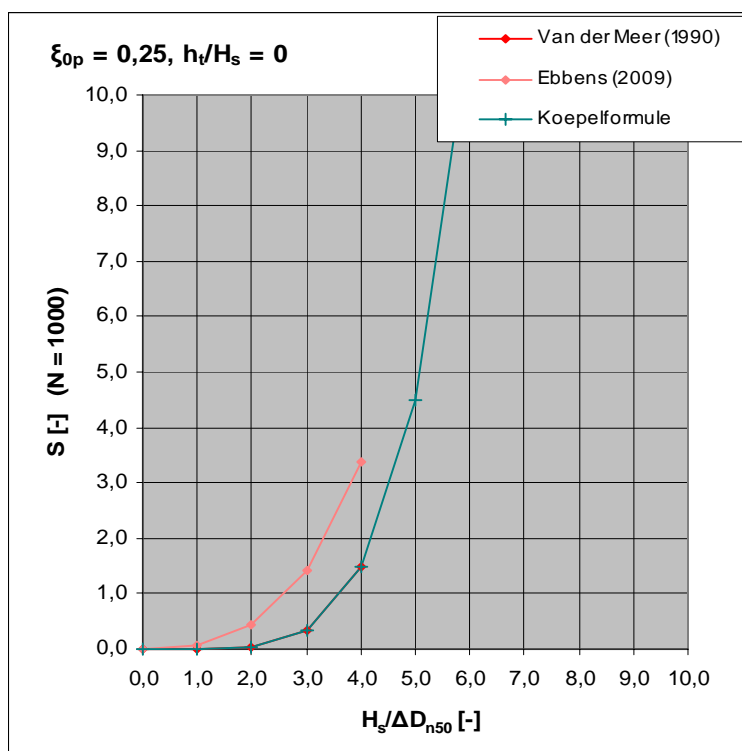
Voor het maken van de fit is vooral gekeken naar de waterstanden  $h_t/H_s = 0$  en 2 (zie boven) en  $h_t/H_s = 0,8$ . Deze laatste vormt het overgangspunt tussen de formules voor lage en hoge waterstanden (zie Tabel 3.2). Bovendien blijkt bij ca.  $h_t/H_s = 0,8$  in Zeeland, bij deterministisch bepaalde golfhoogtes (die toenemen met de waterstand), vaak de grootste belasting op te treden. Verwacht wordt dat dit bij andere watersystemen ook het geval zal zijn.

De waarden voor de brekerparameter  $\xi_{0p}$  zijn gekozen op basis van de taludhellingen ( $\tan\alpha_{mtg}$ ) en golfsteilheden ( $s_{0p}$ ) uit de modelonderzoeken die de basis hebben gevormd voor de huidige ontwerpformules. Deze zijn weergegeven in Tabel 4.4.

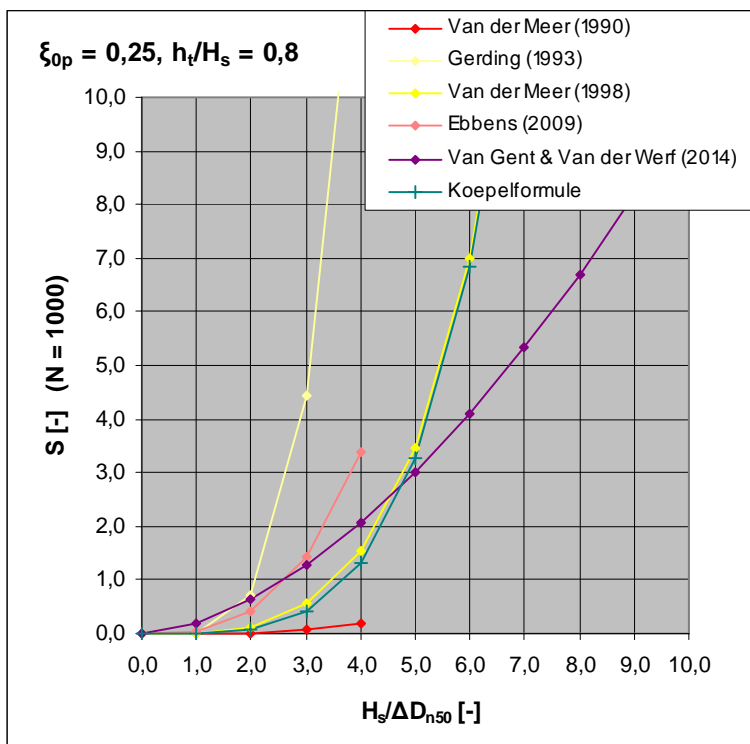
Tabel 4.4 Beschouwde waarden voor  $\xi_{0p}$

Brekerparameter $\xi_{0p}$ [-]	0,25	0,58	1,18
Bijbehorende taludhelling $\tan\alpha_{mtg}$ [-]	1:20	1:10	1:6
Bijbehorende golfsteilheid $s_{0p}$ [-]	0,04	0,03	0,02

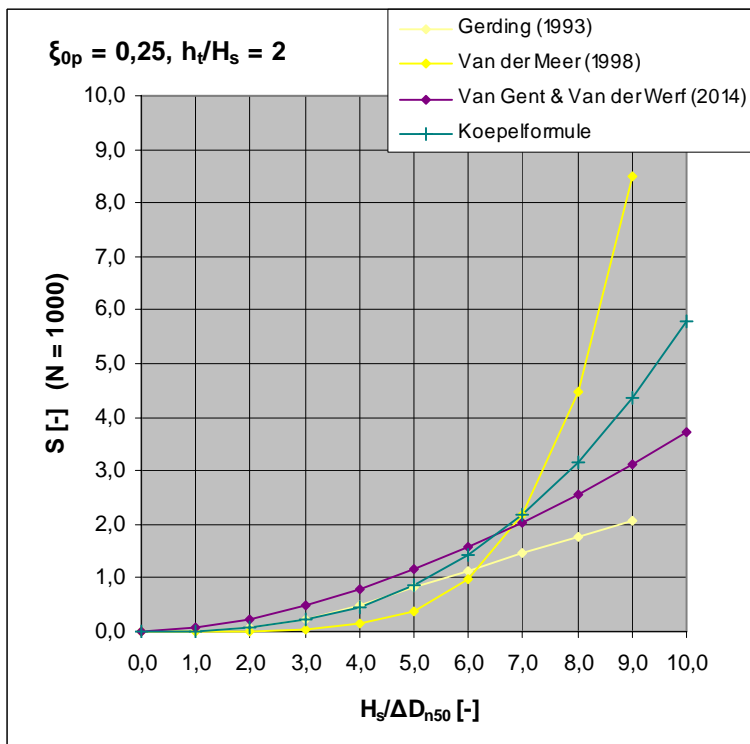
De grafieken met de berekende schades bij 1000 golven volgens de huidige ontwerpformules en de gevonden koepelformule (voor 3 waterstanden en 2  $\xi$ -waarden) zijn weergegeven in Figuur 4.1 t/m Figuur 4.6. Daarbij zijn alleen de resultaten weergegeven die (min of meer) binnen het geldigheidsgebied van de formules liggen. De resultaten voor andere waterstanden en  $\xi$ -waarden komen hier sterk mee overeen.



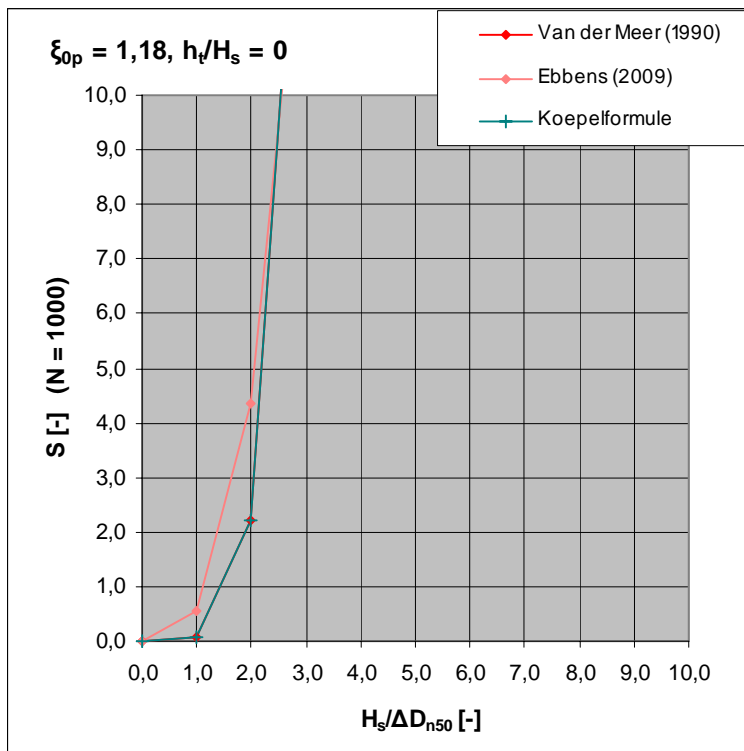
Figuur 4.1 Berekende schade bij  $\xi_{0p} = 0,25$  en  $h_t/H_s = 0$



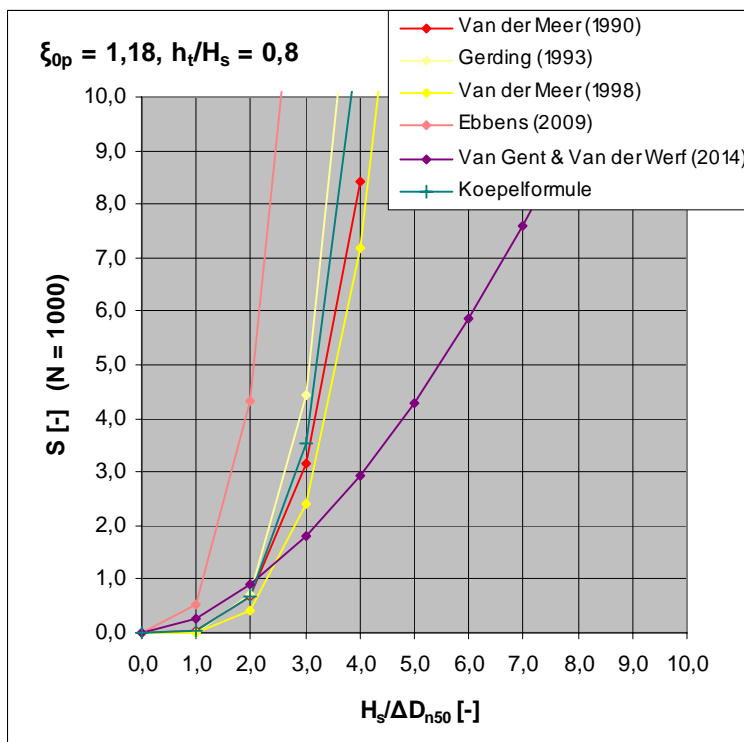
Figuur 4.2 Berekende schade bij  $\xi_{op} = 0,25$  en  $h_I/H_s = 0,8$



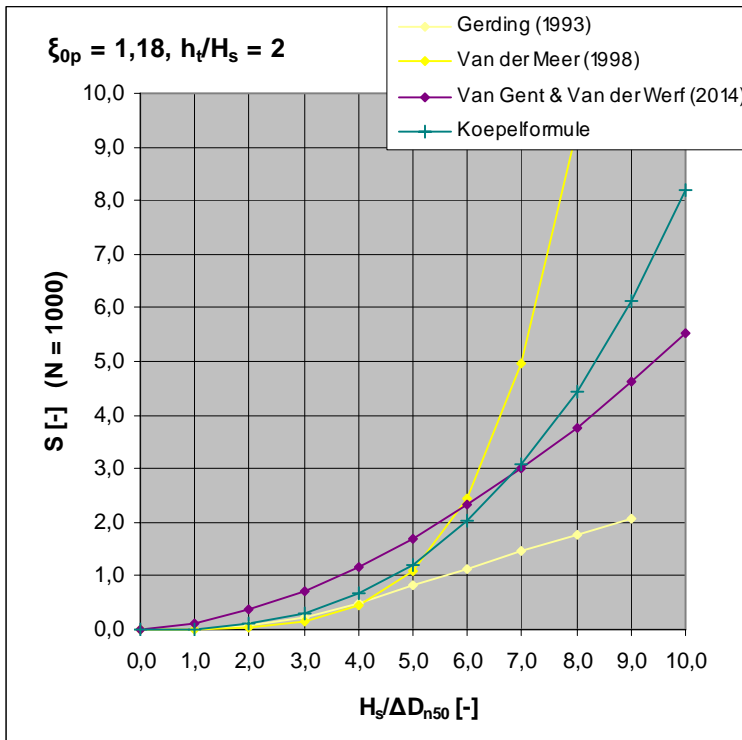
Figuur 4.3 Berekende schade bij  $\xi_{op} = 0,25$  en  $h_I/H_s = 2$



Figuur 4.4 Berekende schade bij  $\xi_{0p} = 1,18$  en  $h_t/H_s = 0$



Figuur 4.5 Berekende schade bij  $\xi_{0p} = 1,18$  en  $h_t/H_s = 0,8$



Figuur 4.6 Berekende schade bij  $\xi_{0p} = 1,18$  en  $h_f/H_s = 2$

#### 4.10 Verificatie met meetdata

Op grond van Figuur 4.1 t/m Figuur 4.6 wordt geconcludeerd dat de gevonden koepelformule redelijk tot goed aansluit op de huidige ontwerpformules. In bepaalde situaties zijn er weliswaar grote verschillen, maar dit is onvermijdelijk omdat de verschillen tussen de huidige ontwerpformules nu eenmaal groot zijn en daardoor niet op alle formules een goede aansluiting mogelijk is.

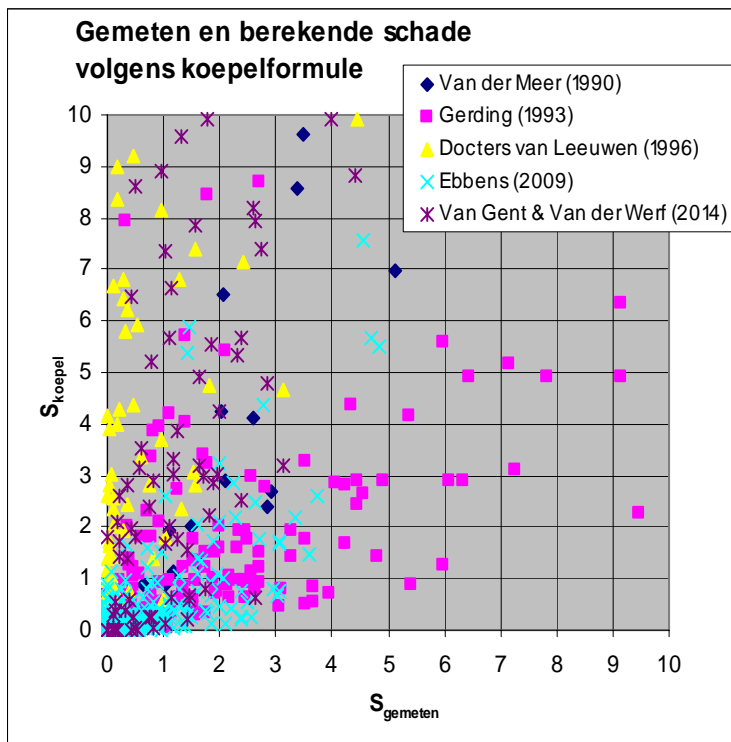
Om de koepelformule te verifiëren zijn de resultaten vergeleken met de onderliggende meetdata. In Figuur 4.7 is de berekende schade met de koepelformule uitgezet tegen de gemeten schade in de modelonderzoeken.

In deze figuur valt op dat er een enorme spreiding is. Hoewel de koepelformule redelijk overeenkomt met de afzonderlijke formules van de onderzoekers, is er een groot verschil tussen de koepelformule en de afzonderlijke proeven van de onderzoekers.

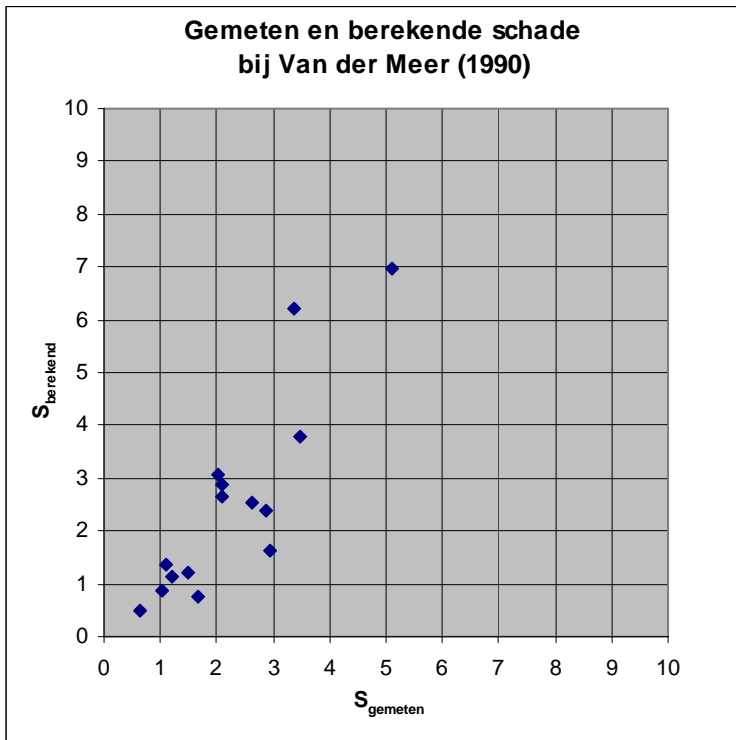
Wel liggen de meetdata per onderzoek redelijk gegroepeerd. Hieruit kan worden afgeleid dat de correlatie tussen de koepelformule en de afzonderlijke onderzoeken redelijk goed is, maar dat de onderlinge verschillen tussen de onderzoeken erg groot zijn.

Ter controle is nagegaan in hoeverre de huidige ontwerpformules aansluiten bij de onderliggende meetdata. Dit is weergegeven in Figuur 4.8 t/m Figuur 4.11. Hieruit blijkt dat de formules van Van der Meer (1990), Ebbens (2009) en Van Gent & Van der Werf (2014) de meetdata goed tot zeer goed weergeven. Bij Gerding (1993) worden de data gemiddeld goed weergegeven, maar is er een aanzienlijke spreiding. Omdat er (gemiddeld) geen grote discrepanties zijn tussen de gemeten en berekende schade wordt geconcludeerd:

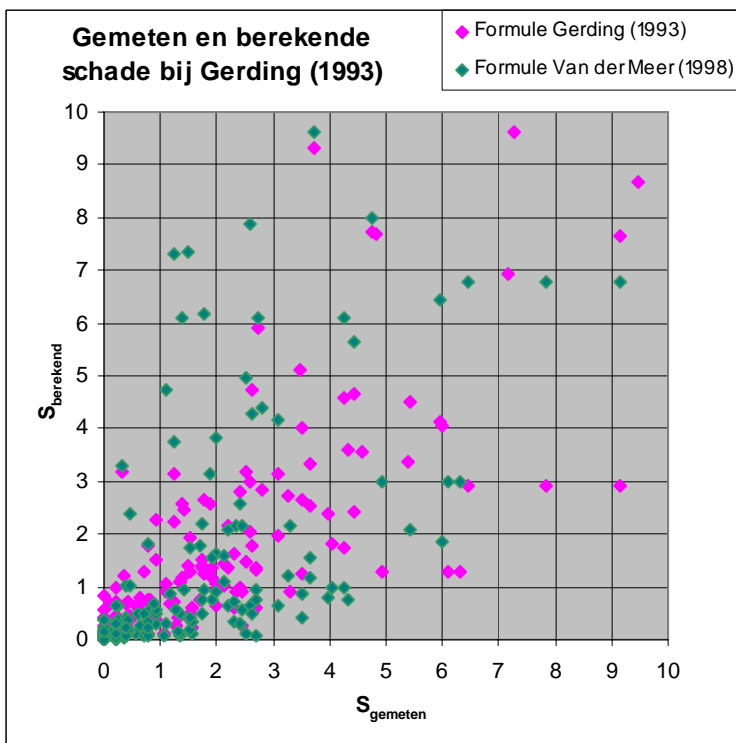
- 1 De spreiding in Figuur 4.7 wordt vooral veroorzaakt door de grote verschillen tussen de resultaten van de diverse modelonderzoeken;
- 2 Een koepelformule met een betere fit is binnen de scope van dit project niet haalbaar. Een betere fit is alleen mogelijk door de (nu niet aanwezige) parameters te identificeren die de verschillen veroorzaken. Zonder verder modelonderzoek is dit vrijwel onmogelijk.



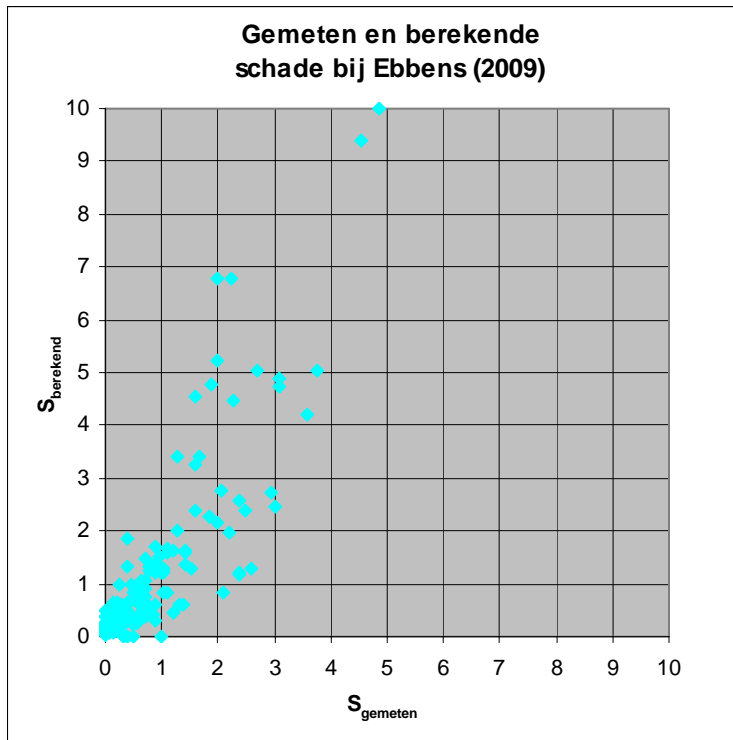
Figuur 4.7 Schade volgens koepelformule versus meetdata



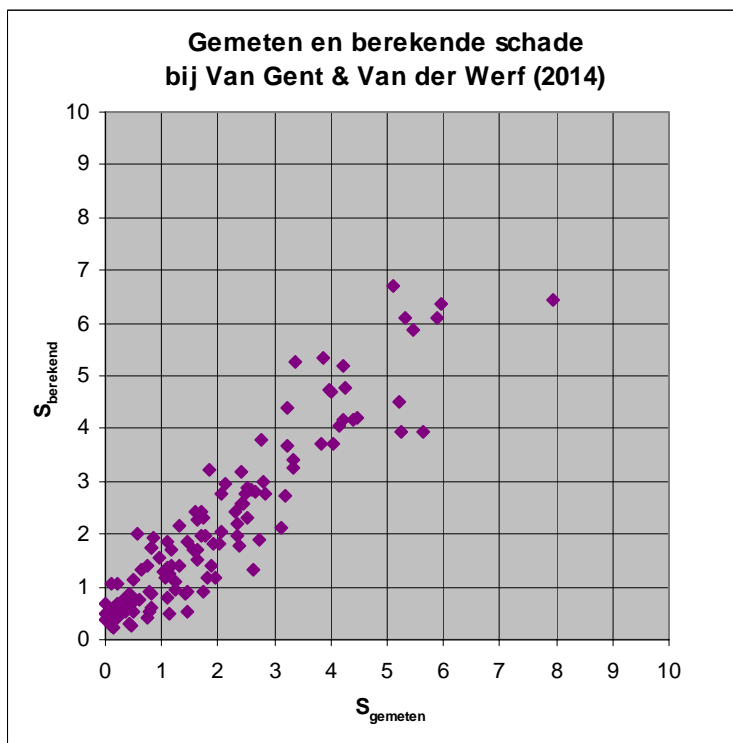
Figuur 4.8 Gemeten en berekende schade bij Van der Meer (1990)



Figuur 4.9 Gemeten en berekende schade bij Gerding (1993)



Figuur 4.10 Gemeten en berekende schade bij Ebbens (2009)



Figuur 4.11 Gemeten en berekende schade bij Van Gent & Van der Werf (2014)





## 5 Toets- en ontwerpmethodiek

### 5.1 Toetsing teenbestorting VTV2006

Binnen het VTV2006 wordt de teenbestorting niet apart getoetst, maar vormt dit onderdeel van de toetsing van de teenconstructie bij steenzettingen. Als de teenconstructie niet in goede staat is of als er sprake is van bijzondere situaties waardoor de teenconstructie mogelijk niet voldoet, volgt een gedetailleerde toetsing. Deze bestaat uit het toetsen van de teenbestorting met de rekenregel van Infram [14]. Hierbij gelden de volgende toepassingsvoorwaarden:

- 1 De dikte van de teenbestorting is minimaal  $2D_{n50}$ ;
- 2 De breedte van de teenbestorting is minimaal 5 m;
- 3 De steensortering is minimaal 10-60 kg.

Als niet voldaan wordt aan de toepassingsvoorwaarden is een geavanceerde toetsing nodig.



Figuur 5.1 Dijk bij Pampushaven langs Markermeer

### 5.2 Belastingduur

#### 5.2.1 Eenvoudige methode

Met de afgeleide koepelformule kan voor een gegeven waterstand de schade berekend worden bij een belastingduur van 1000 golven. Dit dient nog nader uitgewerkt te worden om te komen tot een rekenregel die geschikt is voor de evaluatie van een hele storm.

De eenvoudigste manier om de invloed van de belastingduur te verdisconteren is door te rekenen met het maximum aantal golven dat volgens Van der Meer (1990) in de formule mag worden aangehouden, namelijk 7500 golven. Er wordt dan een veilig resultaat verkregen. Gezien de relatie tussen schade en het aantal golven, namelijk  $S \sim \sqrt{N}$ , moet formule (4) vermenigvuldigd worden met  $\sqrt{7,5} = 2,7$ .

## 5.2.2 Gedetailleerde methode

De cumulatieve schade aan de teenstorting kan nauwkeuriger berekend worden als de storm in stukjes wordt opgeknipt, met constante waterstand en golfcondities in elk stukje. Op deze manier kan met een variërende waterstand en variërende golfcondities op een redelijk nauwkeurige wijze omgegaan worden.

Voor het berekenen van de schade tijdens een waterstandsinterval kan gebruik gemaakt worden van de relatie tussen schade en belastingduur volgens Van der Meer (1990). Hij is de enige die hiervoor een relatie geeft:

$$S \sim N^{0,5} \quad (5)$$

Hierbij geldt voor N een maximum van 7500 golven. Formule (4) wordt hiermee:

$$S = \left( C_{KPL} \frac{H_s^{0,75} T_{m-1,0}^{M_T} (\cot \alpha_{mtg})^{M_\alpha}}{\Delta D_{n50}} \right)^{M_{KPL}} \sqrt{\min\left(\frac{N}{1000}; 7,5\right)} \quad (6)$$

Met:

$$C_{KPL} = \max(0,63 - 0,84 \cdot (h_t/H_s)^{0,75}; 0,13) \quad (7)$$

$$M_T = \max(0,50 - 0,084 \cdot h_t/H_s; 0,33) \quad (8)$$

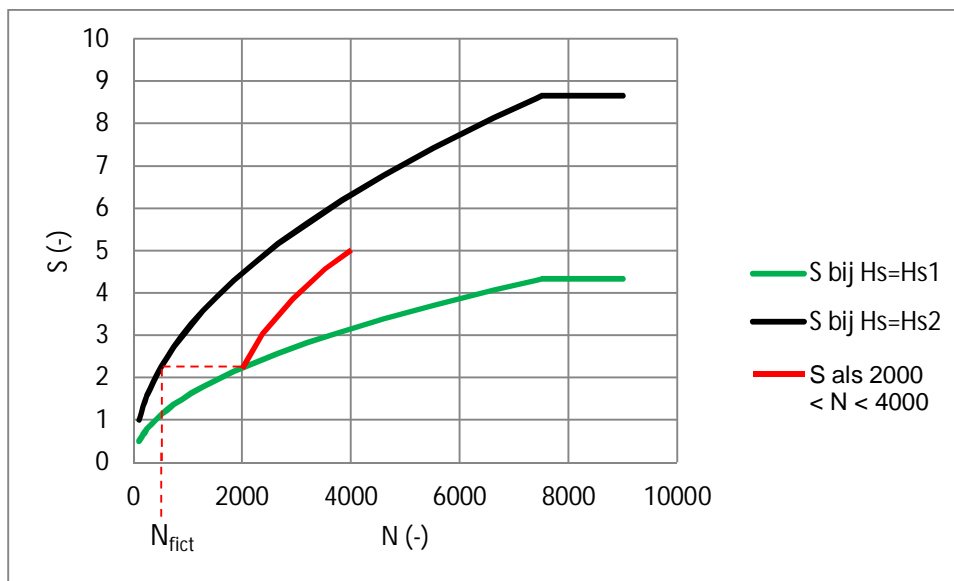
$$M_\alpha = \min(-0,50 + 0,25 \cdot h_t/H_s; 0) \quad (9)$$

$$M_{KPL} = \max(5,0 - h_t/H_s; 3,0) \quad (10)$$

Omdat de relatie niet lineair is kan de berekende schade voor 2 opeenvolgende belastingperiodes niet zondermeer opgeteld worden. Dit is namelijk afhankelijk van de hoeveelheid schade die reeds is opgetreden.

Met Figuur 5.2 is dit nader uitgelegd aan de hand van een voorbeeld. De eerste belastingperiode bestaat uit 2000 golven bij een golfhoogte  $H_s = H_{s1}$ . De daaropvolgende belastingperiode heeft ook 2000 golven, maar dan bij  $H_s = H_{s2}$ . De vraag is hoeveel schade er is opgetreden na deze twee belastingperiodes.

Tijdens de eerste belastingperiode volgt het schadeverloop de groene lijn in de figuur. Vanaf 2000 golven moet de lijn steiler gaan lopen, omdat de hydraulische belasting is toegenomen. Als  $N = 2000$  is  $S = 2,2$ . Als deze schade zou zijn ontstaan door een golfbelasting met  $H_s = H_{s2}$ , zou de belastingduur slechts 500 golven zijn. Dit is dus het fictieve aantal golven dat dezelfde schade geeft als de eerste belastingperiode bij de golfcondities van de tweede belastingperiode:  $N_{fict} = 500$  golven. De totale schade aan het eind van de tweede belastingperiode kan nu eenvoudig berekend worden door  $N_{fict}$  op te tellen bij het aantal golven van de tweede belastingperiode:  $N = 500 + 2000 = 2500$ . Met die belastingduur en de golfcondities van de tweede belastingperiode kan met formule (6) de schade aan het eind van de tweede periode berekend worden:  $S = 5,0$ .



Figuur 5.2 Verloop van de schade als functie van het aantal golven

In formulevorm wordt dit:

$$S_{1000i} = \left( C_{KPL} \frac{H_s^{0,75} T_{m-1,0}^{M_T} (\cot \alpha_{mg})^{M_\alpha}}{\Delta D_{n50}} \right)^{M_{KPL}} \quad \text{bij } H_s = H_{s(i)} \text{ en } T_{m-1,0} = T_{m-1,0(i)} \quad (11)$$

$$N_{fict} = (S_{i-1}/S_{1000i})^2 \quad (12)$$

$$S_i = S_{1000i} \cdot \sqrt{(\min(N_{fict} + N_{stap}; 7500)/1000)} \quad (13)$$

Met:

- $S_{1000i}$  : Schade na 1000 golven met golfcondities uit de huidige belastingperiode [-]
- $S_{i-1}$  : Schade aan het eind van de vorige belastingperiode i-1 [-]
- $S_i$  : Schade aan het eind van de huidige belastingperiode i [-]
- $H_{s(i)}$  : golfhoogte in de huidige belastingperiode [m]
- $T_{m-1,0(i)}$  : golfperiode in de huidige belastingperiode [m]
- $N_{fict}$  : fictieve aantal golven dat net zoveel schade geeft als aan het eind van de vorige belastingperiode is opgetreden met de golfcondities uit de huidige belastingperiode [-]
- $N_{stap}$  : Aantal golven in de huidige belastingperiode [-]

Met behulp van deze formule verloopt de rekenprocedure als volgt:

1. Knip de storm op in belastingperiodes met een hoogte van ca. 0,5 m of een duur van ca. 0,5 uur;
2. Bereken voor belastingperiode de representatieve waarden voor  $h_t$ ,  $H_s$ ,  $T_{m-1,0}$  en  $T_m$  (aan de teen van de dijk, niet op een uitvoerpunt enige tientallen meters vóór de dijk);
3. Bereken op basis van  $T_m$  voor elke periode het aantal golven ( $N_i$ );
4. Bereken met de koepelformule (6) voor de eerste periode de schade  $S$ ;
5. Bereken voor de volgende belastingperiode de schade met formule (11) t/m (13);
6. Herhaal stap 5 tot het einde van de storm, of totdat  $N = 7500$  is bereikt;
7. Toets de berekende totale schade voor de bestaande of ontwerpconstructie aan de toetsnorm of ontwerppeis.

De maatgevende belasting voor de teenbestorting zal meestal niet optreden bij het waterstandsverloop wat leidt tot toetspeil. Daarom moeten meerdere waterstandsverlopen

doorgerekend worden om de maatgevende belasting en daarmee de maatgevende schade en de benodigde steensortering voor de teenbestorting te vinden.

### 5.3 Toepassingsvoorwaarden

In de praktijk bedraagt de dikte van de teenbestorting meestal  $2D_{n50}$  en de breedte 5 m. Deze breedte komt overeen met  $21D_{n50}$  bij een steensortering van 10-60 kg en met  $14D_{n50}$  bij 40-200 kg.

Bij de modelonderzoeken bedroeg de dikte van de teenbestorting meestal  $2D_{n50}$  à  $5D_{n50}$  en de breedte  $5D_{n50}$  à  $10D_{n50}$ .

Op grond van het bovenstaande zijn voor de afgeleide nieuwe rekenregel de volgende toepassingsvoorwaarden gekozen:

- 1 De dikte van de teenbestorting is minimaal  $2D_{n50}$ ;
- 2 De breedte van de teenbestorting is minimaal  $15D_{n50}$ .

De breedte is uitgedrukt in de steendiameter ( $D_{n50}$ ), omdat de toelaatbare schade direct gerelateerd is aan het aantal stenen in de teenbestorting. Een grotere hydraulische belasting vereist dan, via de steendiameter, automatisch ook een grotere breedte.

Er is geen toepassingsvoorwaarde voor de steensortering omdat in de modelonderzoeken waarop de rekenregel is gebaseerd steeds gebruik is gemaakt van zeer kleine steentjes. Daarom is er geen reden om de rekenregel bij fijne steensorteringen in twijfel te trekken.

Als niet voldaan wordt aan de toepassingsvoorwaarden moet een toetsing of ontwerp op maat gemaakt worden.

### 5.4 Teenbestorting met knik (IJsselmeerconstructie)

De toetsing of het ontwerp van een teenbestorting met een flauw deel aan de teen van de dijk wat overgaat in een steiler deel zeewaarts daarvan (IJsselmeerconstructie, zie Figuur 2.2), ofwel een teenbestorting met een knik, verloopt als volgt:

- 1 Bereken de schade met de waterstand aan de bovenzijde van de breuksteen met de taludhelling van het steile deel en de formules van Van der Meer;
- 2 Bereken de schade met de taludhelling van het flauwe deel en de procedure uit paragraaf 5.2
- 3 De grootste schade van de voorgaande twee stappen is maatgevend.

### 5.5 Toetscriteria en ontwerpveiligheid

De berekende schade moet vergeleken worden met de acceptabele schade. Voor het toetsen en ontwerpen van teenbestortingen wordt daarvoor verwezen naar de binnenkort uit te brengen Handreiking Dijkbekledingen.

## 6 Implementatie in Steentoets2014

### 6.1 Hydraulische randvoorwaarden

De rekenregel geeft alleen correcte resultaten als gerekend wordt met hydraulische randvoorwaarden aan de teen van de dijk. Dit geldt in veel sterkere mate dan bij andere rekenregels voor de waterkering, omdat de schades gesommeerd worden voor alle relevante waterstanden in een storm en omdat de meeste schade doorgaans op zal treden bij lage waterstanden.

Bij toetsing en ontwerp wordt in Nederland veelal gewerkt met hydraulische randvoorwaarden die zijn afgeleid voor een uitvoerpunt op enige tientallen meters vóór de dijk. Bij implementatie van de rekenregel in Steentoets2014 moeten de hydraulische randvoorwaarden daarom worden omgerekend naar de teen van de dijk. Als dit niet gedaan wordt, zal dit vaak leiden tot onnodig afkeuren bij toetsing of een overdimensionering bij ontwerp.

### 6.2 Belastingduur en aanbevelingen voor implementatie

In de afgeleide rekenregel wordt de belastingduur anders verdisconteerd dan in de rekenregels van Infram en PBZ. Bij deze laatste werd verondersteld dat het alleen nodig was om de maatgevende waterstand te bepalen en dat daarmee direct de benodigde steensortering berekend kon worden. De invloed van de belastingduur was daarom niet nader uitgewerkt.

Pas bij het gebruik van de rekenregel van PBZ werd duidelijk dat er bij meerdere waterstanden een significante schade kan optreden en dat er daardoor bij een storm met een variërende waterstand niet één maatgevende waterstand is.

Dit probleem is in de hier gepresenteerde rekenregel opgelost door de schade te sommeren en hierbij de belastingduur gefractioneerd in rekening te brengen. Deze methode is vergelijkbaar met de methodes die hiervoor gebruikt worden of in ontwikkeling zijn voor steenzettingen, gras en klei.

Gezien het bezwijkmechanisme is deze werkwijze een duidelijke verbetering, maar omdat het een vrij grote verandering betreft kan dit in de praktijk leiden tot andere uitkomsten dan tot nog toe het geval is. Daarom wordt aanbevolen om met de hier afgeleide rekenregel eerst een aantal cases door te rekenen. Op deze manier kan met een kleine inspanning inzicht worden verkregen in de resultaten van de rekenregel en kunnen desnoods nog kleine aanpassingen gedaan worden aan de koepelformule en de rekenregel.



## 7 Vervolg

Dit rapport is bedoeld als startpunt voor een discussie met deskundigen. Een vergadering hiervoor is gepland op 14 januari 2015.

Daarna kan de procedure verder verbeterd worden en kunnen een aantal cases doorgerekend worden om te zien of het vertrouwenwekkende resultaten geeft. Tenslotte zou het voorgelegd kunnen worden aan ENW Techniek en/of opgenomen kunnen worden in een update van de Handreiking Dijkbekledingen van 2016.





## 8 Referenties

1. Arets, K.: Modellerings van de stroomsnelheden bij de teen van een golfbreker (TU Delft, Delft, 2013)
2. Baart, S.A.: Toe structures for rubble mound breakwaters (TU Delft, Delft, 2008)
3. Baart, S.A., Ebbens, R.E., Nammuni-Krohn, J. & Verhagen, H.J.: Toe rock stability for rubble mound breakwaters (ICCE, Shanghai, 2010)
4. Bosters, R.: Verbetering ontwerpmethodiek kreukelberm Projectbureau Zeeweringen (PBZ, Middelburg, 2010)
5. Bosters, R.: Verbetering ontwerpmethodiek kreukelberm PBZ (2) (PBZ, Middelburg, 2012)
6. Docters van Leeuwen, L.: Toe stability of rubble-mound breakwaters (TU Delft, Delft, 1996)
7. Ebbens, R.E.: Toe structures of rubble mound breakwaters (TU Delft, Delft, 2009)
8. Gent, M.R.A. van & Werf, I.M. van der: Rock toe stability of rubble mound breakwaters (Coastal Engineering, 2014)
9. Gent, M.R.A. van & Werf, I.M. van der: Toe stability of rubble mound breakwaters (Coastal Engineering, 2014)
10. Gerding, E.: Toe structure stability of rubble mound breakwaters (TU Delft/WL, Delft, 1993)
11. Meer, J.W. van der: Geometrical design of coastal structures (Infram, Zeewolde, 1998)
12. Meer, J.W. van der: taluds van losgestorte materialen; stabiliteit van lage dammen en overgangskonstrukties bij stortsteen onder golfaanval (WL, Delft, 1990)
13. Meer, J.W. van der, d'Angremond, K. & Gerding, E.: Toe structure stability of rubble mound breakwaters (Thomas Telford, London, 1996)
14. Meer, J.W. van der en Wouters, J.: Ontwerpregel teenbestorting bij een ondiep, flauw voorland (Infram, i507, Zeewolde, 2002)
15. Muttray, M.: A pragmatic approach to rock toe stability (Coastal Engineering, 2013)
16. Nammuni-Krohn, J.,: Flow velocity at rubble mound breakwater toes (TU Delft, Delft, 2009)
17. Technisch Rapport Steenzettingen (TAW, Delft, 2003)
18. The Rock Manual (CIRIA, CUR & CETMEF, London, 2007)
19. Verhagen, H.J.: New developments in toe berm design for breakwaters (PIANC, Liverpool, 2010)
20. Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen (VTV2006) (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag, 2007)