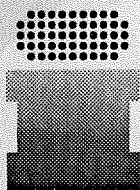


Opdrachtgever:
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Bouwdienst

Ontwerpregel teenbestorting bij een ondiep, flauw voorland

i 507
September 2002

INFRAM



Ref. nr: 025477

Opdrachtgever:
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Bouwdienst

Ontwerpregel teenbestorting bij een ondiep, flauw voorland

i 507
September 2002

Ref. nr: 025477

Projectgegevens

Titel	Ontwerpregel teenbestorting bij een ondiep, flauw voorland
Opdrachtgever	Opdrachtgever: Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat Bouwdienst
Projectnummer	i 507
Omschrijving project	Voor teenbestortingen bij dijken en een ondiep, flauw voorland ontbreken eenduidige ontwerpregels. De huidige praktijk en ervaring met teenbestortingen is in kaart gebracht. Op basis hiervan is een eenduidige definitie gegeven van wat precies onder een teenbestorting moet worden verstaan. Daarnaast zijn verschillende ontwerpmethoden van aanverwante constructies vergeleken. Tot slot is een voorstel voor een ontwerpregel gedaan.
Uitgevoerd door	dr ir J.W. van der Meer ir J. Wouters

Inhoudsopgave

1.	Inleiding	1
1.1	Probleemstelling, doelstelling en aanpak	1
1.2	Definitie teenbestorting	1
2.	Inventarisatie teenbestortingen in de praktijk	3
2.1	Zeeland	3
2.2	Midden- en noord Nederland	4
3.	Ontwerpmethoden	7
3.1	Bestaande ontwerpmethoden voor een teenbestorting	7
3.2	Uitgangssituatie voor afleiden nieuwe ontwerpmethode voor teenbestortingen	8
3.3	Benadering via de orbitaalbeweging	9
4.	Twee empirische methoden nader geanalyseerd	12
4.1	Inleiding	12
4.2	Een 1:6 benedentalud als teenbestorting	13
4.3	De teenconstructie bij een golfbreker	14
5.	Voorstel ontwerpmethode voor teenbestortingen	17

Referenties

Figuren

Foto's

1 Inleiding

1.2 Probleemstelling, doelstelling en aanpak

Op basis van een door WIS (Bouwdienst) opgesteld projectplan is voorgesteld een nieuwe ontwerpmethode of -regel voor teenbestortingen bij dijken af te leiden. In de eerste fase van het project is alleen naar de situatie in Zeeland gekeken, zie "Eerste concept, april 2002". In de tweede fase is het project op een landelijk niveau getrokken. In dit definitief verslag is het commentaar op het tweede conceptverslag, dat door een zestal geïnteresseerden is gegeven, verwerkt.

De probleemstelling kent twee aspecten. Ten eerste een goede definitie of omschrijving van wat een teenbestorting is. Ten tweede het ontbreken van een goede ontwerpregel voor dit onderdeel van een dijk. Het uitgangspunt is dat het gaat om teenbestortingen met daarvoor een ondiep, flauw voorland. De definitie van een ondiep flauw voorland zal ook duidelijk moeten worden gegeven. Ook moet de mogelijkheid van het ontstaan van een erosie- of ontgrondingskuil worden bekeken.

De doelstelling is dan ook het helder maken wat een teenbestorting met een ondiep, flauw voorland is en het afleiden van een eventuele ontwerpregel. Er bestaan geen formules voor het ontwerpen of toetsen van een teenbestorting. Een af te leiden ontwerpregel zal daarom gebaseerd zijn op formules of methoden voor aanverwante constructies. Onder een ontwerpregel wordt een methode verstaan waarmee een teenbestorting kan worden ontworpen. Dit hoeft niet een eenduidige formule te zijn.

Het project kent een aanpak met twee ingangen: een inventarisatie (interviews) omtrent teenbestortingen in de praktijk en een evaluatie van diverse ontwerpmethoden. Uit de inventarisatie zal moeten blijken wat nu een goede definitie is van een teenbestorting met een ondiep voorland. De evaluatie van ontwerpmethoden zou moeten leiden tot een aanbeveling voor een ontwerpmethode voor teenbestortingen.

Het uitgevoerde werk is volledig in dit rapport weergegeven. De lezer die alleen geïnteresseerd is in de resultaten, wordt verwezen naar de volgende paragraaf 1.2, waar de definitie van een teenbestorting is gegeven en naar het laatste hoofdstuk waar de voorgestelde ontwerpmethode is beschreven.

Deze notitie is geschreven door dr ir J.W. van der Meer en ir. J. Wouters.

1.2 Definitie teenbestorting

In dit rapport is een aantal doorsneden opgenomen van dijken met een teenbestorting of aanverwante constructies. Deze doorsneden zijn door verschillende beheerders op tekeningen toegeleverd. Voor deze notitie is vaak een *deel* van de volledige tekening gescand en als figuur opgenomen. Hierbij is de vorm van de teenconstructie duidelijk te zien, maar is het mogelijk dat andere delen van de dijk, door het ontbreken van beschrijvingen, niet duidelijk zijn. De figuren zijn dan ook alleen bedoeld om een idee te krijgen van de verschillende teenbestortingen en aanverwante constructies in de praktijk.

Figuren 1-11 geven voorbeelden van teenbestortingen en aanverwante constructies in de praktijk. Verderop in het rapport worden de figuren per stuk behandeld, hier wordt uit het totaalbeeld een definitie gehaald van wat wel en wat niet als een teenbestorting wordt gezien.

De belangrijkste conclusie is dat de *teenbestorting* de overgang vormt tussen de *taludbekleding* van een dijk en de *vooroever*. Het verleent steun aan het teenschot en voorkomt erosie direct voor het teenschot. De bestorting ligt vrijwel horizontaal of is licht hellend. Figuren 1, 4, 6 en 9-10 geven directe voorbeelden hiervan, zonder verdere complicaties van de definitie.

Bij de andere figuren is wel in een of andere vorm een complicatie aanwezig. In figuur 2 is een teenbestorting gegeven, waarbij ook een deel van het boventalud met breuksteen is uitgevoerd. Het horizontale deel wordt als teenbestorting gezien, de bestorting van het talud niet (daar wordt dus ook geen ontwerpregel voor afgeleid). In figuur 3 is ongeveer hetzelfde te zien als in figuur 2, waarbij de teenbestorting ook nog *beneden* de vooroever is aangelegd om rekening te houden met een mogelijke erosie van de vooroever. Alleen het horizontale gedeelte wordt als teenbestorting beschouwd.

In figuur 5 is een duidelijke teenbestorting aanwezig, maar deze sluit niet aan op een steenbekleding van het boventalud, maar op een overlaging van breuksteen. Deze overlaging wordt niet als onderdeel van de teenbestorting beschouwd.

In figuur 7 is een 4 m brede bestorting aanwezig, die wel op een bovenbekleding aansluit, maar dan overgaat in een benedentalud dat ook door breuksteen wordt beschermd. Dit talud loopt door tot de vooroever (verder naar rechts op de figuur en niet aangegeven). De beheerder noemt dit een "plasberm met teenbestorting". In de definitie voor dit rapport is het echter *geen* teenbestorting, maar een bestorting van het benedentalud van een dijkprofiel. Ook de "plasberm" wordt niet als teenbestorting gezien, maar als een breuksteenberm in het dijkprofiel.

Figuur 8 geeft een schematische doorsnede van een nieuwe IJsselmeerdijk (inpoldering Noordoostpolder en Flevoland). Wat opvalt is dat de vooroever veel dieper ligt dan NAP en dat beneden NAP breuksteen aanwezig is. De breuksteen beschermt het benedentalud en vormt een *berm* rondom de waterlijn. In dit geval is *geen* teenbestorting aanwezig en dit soort bestortingen worden in het rapport dus niet beschouwd.

Het is mogelijk dat de overgang van een teenconstructie naar een "plasberm met bestort benedentalud" niet altijd eenduidig is. Figuren 9-11 geven hiervan een voorbeeld. In de figuren wordt een opmeting van een dijkprofiel met een stukje voorland gegeven. De bestorting is ook aangeduid. De teenbestortingen in figuren 9 en 10 zijn 5-7 m breed en hebben een gemiddelde helling van ongeveer 1:6. Het verticale verschil tussen de aansluiting op het boventalud en op het voorland is orde 1 m, mogelijk iets meer. In figuur 11 loopt de bestorting verder door. De bestorting is 12 m lang en het verticale verschil tussen de aansluitingen is ongeveer 1,7 m. De vooroever ligt dus 1,7 m beneden de bovenkant van de berm. Dit is een doorsnede die al heel dicht bij een plasberm en bestort benedentalud komt.

Om tot een goede afbakening te komen, wordt gesteld dat de bovenkant van een teenbestorting niet meer dan orde 1 m boven het voorland mag uitsteken, met een maximum van 1,5 m. Met deze definitie behoort figuur 11 dan tot de categorie: plasberm met bestort benedentalud.

Er komen ook bestortingen van vooroevers en geulen voor, met het doel de geometrie vast te leggen. Dit soort bestortingen worden in dit rapport niet beschouwd.

Bovenstaande beschrijving geeft duidelijk weer wat als een teenbestorting wordt beschouwd. In dit rapport gaat het over teenbestortingen bij een ondiep, flauw voorland. Ook daar moet een definitie voor worden gegeven. Als het voorland vrijwel horizontaal is en de teenbestorting ligt met de bovenkant gelijk of zelfs beneden de vooroever, dan is duidelijk dat het om een ondiep en flauw voorland gaat. Figuren 1-6 zijn hier duidelijke voorbeelden van. Om tot een voorland of vooroever te worden gerekend, *moet het flauwe*

deel vanaf de teenbestorting minimaal één golf lengte lang zijn en mag de helling niet steiler zijn dan 1:30.

In Zeeland wordt in plaats van de benaming teenbestorting ook wel de term kreukelberm gebruikt. Deze term is afgeleid van "kreukel" wat een soort slakje is. Om verwarring te voorkomen wordt voorgesteld uitsluitend de term teenbestorting te gebruiken.

In het laatste hoofdstuk van dit rapport wordt een ontwerpregel gegeven voor de hierboven omschreven teenbestorting bij een ondiep en flauw voorland. De tussenliggende hoofdstukken geven een schets van de praktijk middels interviews, een vergelijking van ontwerpregels en de afleiding tot een ontwerpregel voor teenbestortingen.

2. Inventarisatie teenbestortingen in Nederland

2.1 Zeeland

Er zijn twee gesprekken in Zeeland gevoerd:

- Waterschap Zeeuws Vlaanderen: M. Stroo
- Waterschap Zeeuwse Eilanden: H. van der Sande en H. Everaars.

Tijdens de Deltawerken zijn de dijken versterkt en zijn ook teenbestortingen aangebracht. Deze bestortingen werden op kraagstukken of op azobématten in combinatie met een geotextiel aangelegd. Deze azobématten zijn nog steeds in goede conditie. De bestorting bestond uit overbodig materiaal als te kleine basaltzuilen (meestal 20 cm hoog), maar ook natuursteen als Vilvoordse steen. Globaal is het een bestorting tussen 10-60 kg met een hoeveelheid van 400 kg/m². De bestorting werd tegen een teenschot aangelegd, bestaande uit palen en planken, zie figuur 1.

Bij een lang en ondiep voorland werd de *bovenkant van de teenbestorting* gelijk of iets lager gelegd dan het bestaande voorland. Bij de Noordzeekust van Zeeuws Vlaanderen werd de onderkant, indien mogelijk, op de kleilaag gelegd. Deze bevond zich ongeveer 1-3 m onder de zandige vooroever. In die gevallen waar de kleilaag te diep zat, werd afgegaan op een te verwachten ontgronding of erosie van de vooroever en werd de teenbestorting op deze hoogte aangelegd. In al deze gevallen ligt de teenbestorting nu onder het bestaande voorland. In figuren 2 en 3 zijn voorbeelden gegeven van teenbestortingen die beneden de bestaande vooroever liggen.

Doordat begin jaren negentig het handhaven van de basiskustlijn van kracht werd, zijn eerder berekende erosies van vooroevers niet opgetreden, omdat men bij ontstane erosies suppleties heeft aangebracht. Daar waar hier sprake van is, is een heel stabiele situatie ontstaan met de teenbestorting duidelijk onder de vooroever.

In zijn algemeenheid treedt er geen schade door golfaanval op aan teenbestortingen bij een ondiep, flauw voorland. De heel zware "krokusstorm" van 1990 gaf wel schade aan taluds, maar niet aan teenbestortingen. In die zin kunnen de bestaande teenbestortingen in Zeeland, met de bovenkant gelijk of beneden het voorland, als onderhoudsvrij worden gekenmerkt.

Er is wel eens schade geconstateerd aan teenbestortingen die niet al te ver van een geul af lagen. In deze situatie is het voorgekomen dat een stukje vooroever erodeerde en de geul vlak bij de dijk kwam te liggen. De stenen van de teenbestorting vielen dan naar beneden in het ontstane diepere gedeelte. Men heeft dit probleem opgelost door de geulrand zelf te beschermen en vast te leggen. Ook al zou enige schade aan deze constructie ontstaan, de vooroever kan nu niet meer eroderen en daarmee is de teenbestorting weer stabiel.

geworden. Ook zijn er situaties waar de geul dicht bij de dijk loopt. Daar is het hele gedeelte vanaf de dijk tot en met de helling van de geul vastgelegd met steen. Ook daar is geen verdere erosie te verwachten.

Als momenteel een glooiing tot aan de teen wordt vervangen (dus inclusief de ondertafel), dan wordt, als het teenschot niet in goede conditie is, ook de teenbestorting vervangen. Het Projectbureau Zeeweringen heeft de laatste jaren het ontwerp geleverd. Als bij de ontwerpwaterstand de golfhoogte meer dan 1,5 m bedraagt, dan wordt een teenbestorting van zwaarder materiaal gemaakt, namelijk 40-200 kg of 60-300 kg. Voorbeelden van het ontwerp van het Projectbureau Zeeweringen zijn gegeven in figuren 4 en 5.

De ervaring met deze grote steen is in Zeeuws Vlaanderen soms negatief, met name als deze boven het niveau van het strand of het slik liggen. Het blijkt dat net geboren jonge vogels niet van het slikstrand naar de dijk kunnen komen, doordat de stenen en de gaten daartussen te groot zijn. Bij opkomend water zouden deze dieren kunnen verdrinken. Reeds gebouwde teenbestortingen van deze grote steensortering zijn aangepast. Men heeft over gedeelten langs de dijk de gaten met kleiner materiaal opgevuld en gepenetreerd. Hierdoor is voor de vogels op plekken een "vlakke" oversteek gemaakt. Nieuwe teenbestortingen worden volgens geïnterviewden, om deze reden niet meer zwaarder uitgevoerd dan 10-60 kg. Indien een zwaardere steen volgens ontwerp nodig is, wordt een sortering 5-40 kg dan wel 10-60 kg gepenetreerd met gietasfalt of colloïdaal beton toegepast. Dit alles geldt voor gebieden met een voorland en een gebied voor de dijk waar het "vogelprobleem" voorkomt, niet voor dijken met diepere voorlanden.

De grootste belasting op een teenbestorting die boven het voorland ligt, is mogelijk niet golfaanval, maar ijsbelasting. Hoe meer een steen uitsteekt boven de rest, hoe eerder kruisend ijs de steen zal meenemen. Dit zou kunnen betekenen dat zwaardere sorteringen breuksteen gevoeliger zijn voor schade door ijs. Hierbij moet worden opgemerkt dat ijsgang in zoute wateren minder voorkomt dan in de zoete wateren.

Bij de Zeeuwse eilanden zijn de teenbestortingen vaak direct op de ondergrond (klei?) gelegd, zonder azobémat. Ook hier is geen sprake van schade door stormen. Sommige teenbestortingen liggen dicht bij een geul. De geulrand en het stukje voorland is dan zelf ook helemaal bestort. De geul zelf kan heel steile wanden hebben, soms steiler dan 1:3.

Aan de Westkappelse Zeedijk komt soms wel schade voor. Stenen van orde 2 ton zijn daar bij zware storm hoog op het talud van de dijk "gezet". Het talud van de dijk zelf is heel flauw (orde 1:8) en er ligt een steile vooroever voor de dijk van orde 1:10 tot 1:30. Hoge golven breken op deze vooroever en de voorwaartse snelheid van deze brekende golven kan min of meer *losliggende en/of uitstekende* stenen of objecten meenemen. Dit moet als een speciale situatie worden gezien die niet vergelijkbaar is met een horizontaal voorland.

Conclusies:

Op basis van de ervaring van beheerders in Zeeland kan worden gesteld dat er nauwelijks moeilijkheden met teenbestortingen zijn geweest. Er is geen of nauwelijks onderhoud nodig, de bestorting ligt vaak *gelijk met of beneden de vooroever*. Vooroevers die mogelijk erosiegevoelig zijn, zijn op de een of andere manier vastgelegd. Natuurlijk is de "ontwerpstorm" nog niet voorgekomen.

2.2 Noord en midden Nederland

Ten einde een overzicht te kunnen geven van de toepassing van teenbestortingen in noord en midden Nederland zijn er drie gesprekken gevoerd, namelijk met:

- Waterschap Uitwaterende Sluizen: E. Neef
- Rijkswaterstaat Directie IJsselmeergebied: ing. E. Regeling (telefonisch)
- Wetterskip Fryslân: ing. J. Langenberg en A. van Dijk

Voor het ontwerp van teenbestortingen worden door Uitwaterende Sluizen geen rekenregels toegepast. Het ontwerp wordt gemaakt op basis van ervaring. In het kader van het op Deltasterkte brengen van de dijken grenzend aan de Waddenzee zijn ook de teenbestortingen van deze dijken aangepakt. Teenbestortingen zijn toegepast op de Waddenzeedijk lopend van Den-Oever, via Amsteldiepdijk (kleine Afsluitdijk) en de Balgzanddijk richting Den Helder en op het eiland Texel (Zeedijk Prins Hendrikpolder, zie figuur 6, en zeedijk van het Noorden).

Deze teenbestortingen lijken erg op elkaar. Ze hebben een lengte van 4 m en een helling 1:20 en zijn geplaatst op een geotextiel met een spreidse van rijshout of rietmatten. De sortering 10-60 kg dan wel 40-200 kg wordt toegepast of een mengsel van beide sorteringen. Veelal wordt over de eerste 1,5 à 2,0 m grenzend aan het teenschot de bestorting met gietasfalt (patroonpenetratie) ingegoten. Bij de aanleg van deze teenbestortingen is er een ontgraving bij de teen van de dijk gemaakt, waarin de teenconstructie is geplaatst. De meeste teenbestortingen liggen onder het niveau van de vooroever en zijn derhalve bedekt met zand dan wel slib.

Schade aan teenbestortingen op de dijken in het genoemde gebied is alleen als gevolg van ijsgang waargenomen. Oudere teenbestortingen behoeven onderhoud omdat het rijshout uit het kraagstuk is vergaan en daardoor verzakking van de teenbestorting is opgetreden. Schade door golfwerking is niet bekend.

Op de Pettemer zeewering ligt dit anders. Met name aan de basaltzuiltjes (30/40 cm) op de plasberm treedt regelmatig bij storm schade op. Vandaar dat er onderhoudswerken aan deze dijk zijn gepland, waarbij de basaltzuiltjes worden vervangen door gepenetreerde stortsteen (mengsel van 10-60 kg en 5-40 kg met gietasfalt, zie figuur 7). Ook de zogenaamde teenbestorting wordt hersteld en verlengd. Het herstellen van deze bestorting zal er uit bestaan dat:

- de oude bestorting wordt verwijderd,
- een nieuw kraagstuk zal worden gelegd,
- dit kraagstuk zal worden afgestort met stortsteen 40-200 kg (ook hier wordt de eerste paar meter ingegoten met gietasfalt).

De eerste 4 m van deze bestorting ligt onder een talud 1: 20 (plasberm), daarna wordt er een 10 m lang gedeelte onder een helling 1: 7 aangelegd op het stuk vooroever vóór de dijk. Deze bestorting voldoet derhalve niet aan de omschrijving van een teenbestorting, maar aan een plasberm met een bestort benedentalud.

De dijken van Flevoland vallen in principe onder de noemer "flauw en ondiep voorland", want de bodem van het IJsselmeer is nagenoeg vlak en onder ontwerpcondities wordt de golfhoogte door de aanwezige waterdiepte beperkt. Toch is de uitgangssituatie anders, want de bovenkant van de bestorting ligt ver boven de bodem van de vooroever. Het standaardprofiel van de dijken rond de Flevopolders is, zie ook figuur 8:

- Teen op NAP - 4,0 m. Op een enkele locatie ligt de teen van de dijk op NAP - 2,0 m i.p.v. NAP - 4,0 m,
- Bestorting 1:6 van NAP - 4,0 m tot NAP - 1,5 m,
- Bestorting 1:4 van NAP - 1,5 m tot NAP 0
- Op NAP 0 m een zeker 2 m brede stortberm tot aan het teenschot
- Voor de bestorting wordt 60-300 kg stortsteen toegepast.

Zoals in paragraaf 1.2 is uiteengezet voldoet de definitie van die profiel niet aan een teenbestorting, maar aan een (plas)berm met bestort benedentalud.

In het kader van de verbeteringswerken van de dijken van Flevoland zijn voor de Oostvaardersdijk-Noord nieuwe bestortingen ontworpen. Hierbij is gebruik gemaakt van de standaardformules voor stortsteen taluds. Deze berekeningen resulteren in het

algemeen in zwaardere steensorteringen dan de tot nu toe gebruikte sortering (60 – 300 kg). Ditzelfde geldt voor controleberekeningen voor andere bestaande bestortingen. De indruk bestaat bij RDIJ dat deze benadering conservatief is. Er wordt bijvoorbeeld geen rekening mee gehouden dat in de 1/4000 situatie (dit is de normfrequentie voor dit gebied) de maatgevende waterstand (aanzienlijk) hoger is dan het niveau van de stortberm en de stortberm dan in feite eerder als een lage dam onder water moet worden gezien dan als een doorgaand stortsteen talud.

Met een zekere regelmaat moeten bestaande bestortingen hier worden bijgestort. Verlies van steen treedt met name op doordat het kraagstuk onder de bestorting vergaat. Een enkele keer is enige schade als gevolg van golf- dan wel ijsbelasting geconstateerd. Als gevolg van deze belasting komen er enkele stenen omhoog en blijven dan op de stortberm of boventalud liggen.

De IJsselmeerdijk bij Stavoren (in beheer bij Wetterskip Fryslân) heeft wel een flauw en ondiep voorland. De lengte van de teenbestorting varieert hier tussen de 4 m en 10 m, zie figuur 9. Als bestortingsmateriaal is stortsteen 40 – 200 kg toegepast. De teenconstructie bij de Waddenzeedijk bij Zurich lijkt erg op die bij Stavoren, alleen nu is stortsteen 60 – 300 kg toegepast. Bij Roptazijl (industriehaven van Harlingen) is weer stortsteen 40 – 200 kg voor de teenbestorting toegepast, zie figuren 10 en 11. In paragraaf 1.2 is geconcludeerd dat de bestorting in figuur 11 meer lijkt op een (plas)berm met bestort benedentalud, dan een teenbestorting.

Bij de Waddenzeedijk van Terschelling heeft het Wetterskip gebruik gemaakt van granietblokken 0,30/0,50x0,20/0,30x0,18/0,22 m³ voor de teenbestorting. Deze teenbestorting heeft een lengte van ca. 10 m en loopt vanaf NAP 0 tot NAP – 1,0 m. De vier bovengenoemde (teen)bestortingen zijn onderhoudsbestortingen, die over reeds bestaande bestortingen zijn heengelegd.

De teenbestorting voor de Lauwersmeerdijk bestond oorspronkelijk uit een mengsel van 0,25 t/m² 10-60 kg en 0,25 t/m² 60 – 200 kg (dus niet 60-300 kg). Deze bestorting bleek in de praktijk erg schraal vandaar dat de beheerder deze heeft bijgestort met 40 – 200 kg. Bij de Lauwersmeerdijk is lokaal wel eens schade geconstateerd. Deze schade werd veroorzaakt doordat er stenen verloren zijn gegaan in de nabij gelegen diepe geul. Enkele karakteristieke foto's van de bij Wetterskip Fryslân in beheer zijnde teenbestortingen zijn in deze notitie opgenomen. Daar het hier veelal gaat om onderhoudsbestortingen laat de doorsnede van de teenbestortingen in dit gebied vaak een rug stenen zien, op of boven de waterlijn, en een iets steilere helling van de teenbestorting.

Conclusies

Voor zowel de IJsselmeerdijken als die van de Waddenzee kan worden gesteld dat de teenbestortingen nauwelijks aanleiding hebben gegeven tot moeilijkheden. Stormschade is er vrijwel nooit geconstateerd en onderhoud is alleen nodig als gevolg van het vergaan van de kraagstukken en in mindere mate door ijsschade. Opvallend verschil tussen de praktijk van Uitwaterende Sluizen en van Wetterskip Fryslân is dat Uitwaterende Sluizen vrijwel standaard een penetratie met gietasfalt toepast en dat het Wetterskip dit niet doet.

3 Ontwerpmethoden

3.1 Bestaande ontwerpmethoden voor een teenbestorting in Nederland

Huidige praktijk in Nederland

Teenbestortingen en onderhoudsbestortingen aan de teenconstructie worden veelal op basis van ervaring uitgevoerd. In het geval van grote onderhoudswerken wordt het ontwerp met behulp van rekenregels nagerekend en eventueel aangepast naar aanleiding van de uitkomsten van deze berekeningen.

Voor het ontwerp van de "kreukelberm" onderscheidt het projectbureau Zeeweringen twee karakteristieke belastingsomstandigheden, namelijk:

1. De "kreukelberm" wordt door golfklappen belast, en.
2. De "kreukelberm" wordt niet door golfklappen belast.

In het eerst genoemde geval ligt de constructie rondom de waterlijn en is in feite sprake van een (plas)berm met bestort benedentalud. Hier beveelt het projectbureau aan om de stabiliteitsformules van "Van der Meer" toe te passen. Dit geval wordt in dit rapport niet behandeld. In het tweede geval ligt de constructie duidelijk onder water en is vergelijkbaar met de hier in dit rapport gesteld uitgangspunt teenbestorting bij een ondiep en flauw voorland. De volgende ontwerptabel wordt door Projectbureau Zeeweringen voorgesteld en is hier in feite onderwerp van discussie.

sortering	M_{50}	H_s bij NAP + 6 m
10-60 kg	36 kg	< 1,5 m
40-200 kg	115 kg	1,3 – 2,0 m
60-300 kg	184 kg	1,5 – 2,5 m
300-1000 kg	676 kg	> 2,5 m

Tabel 1: Ontwerptabel voor teenbestortingen van het Projectbureau Zeeweringen

Wetterskip Fryslân heeft zich bij enkele ontwerpen laten adviseren door verschillende externe adviseurs. Voor de bestorting op het kraagstuk aan de buitenzijde van het Lauwersmeerdijk heeft men in 1988 gebruik gemaakt van de "Van der Meer" formulering voor stortsteen op een talud. Er wordt bij het ontwerp onderscheid gemaakt tussen "dagelijkse" omstandigheden met $H_s = 1,5$ m en extreme omstandigheden met $H_s = 2,25$ m. Voor de dagelijkse omstandigheid werd als toelaatbare schade $S = 2$ gehanteerd, terwijl voor de extreme omstandigheid $S = 12$ werd gebruikt. Op basis hiervan werd gesteld dat een $D_{n50} = 0,38$ m nodig is. Toegepast is een mengsel van 10-60 kg en 60 – 200 kg.

Hierbij is S het dimensieloze schadegetal, A_e/D_{n50}^2 , waarin A_e het erosieoppervlak is en D_{n50} de nominale steendiameter. $S = 2$ komt bij een doorgaand breuksteentalud overeen met 0 tot 5 % schade, $S = 8$ met ca. 10 % schade en $S = 12$ met ca. 15 % schade. In feite kunnen deze percentages voor een teenbestorting anders zijn.

Voor de onderhoudsbestorting van de dijksbekleding aan de zuidzijde van Terschelling is de volgende werkwijze gehanteerd. Voor situaties waarbij de waterstand vrijwel gelijk is met de hoogte van de teenbestorting, is de stabiliteitsformulering voor een overlaging gebruikt. Dit is de "Van der Meer" formule met een verzwaringsfactor. Deze verzwaringsfactor is proefondervindelijk door het WL (WL, 1998) vastgesteld voor de situatie dat de waterspiegel gelijk ligt met de bovenkant van de overlaging.

In geval dat de waterstand ruim boven het niveau van de teenbestorting staat, is gebruik gemaakt van de reductiefactoren zoals deze in paragraaf 5.1.3.9 van (CUR/CIRIA, 1991) zijn weergegeven. Ook hier is weer onderscheid gemaakt tussen geen toelaatbare schade bij veel voorkomende situaties en veel schade toelaatbaar bij extreme omstandigheden. Geconcludeerd werd dat bij een maximale golfhoogte van $H_s = 1,5$ m granietblokken met een D_{n50} van 0.25 m voldoen.

Bij het ontwerp van de vooroeverbewerking van de kop van de strekdam bij Zuricherpolder is een andere benadering toegepast (N.B. situatie komt niet overeen met een flauw-ondiep voorland). Middels de uitgebreide Shields formulering is hier uitgerekend dat bij een golfhoogte van $H_s = 1,2$ m en een waterdiepte boven de bestorting van 2 m de sortering 10-60 kg voldoet.

Methode uit de "British Standards"

Figuur 8 geeft een voorbeeld van een "toe bund" met een "bed protection" (bovenste figuur) of een "anti-scour apron" (British Standards, 1991). Voor het bepalen van de steengrootte van de "apron" of "bed protection", min of meer overeenkomend met onze definitie van een teenbestorting (dus niet de toe bund!), kan men een schema volgen. Dit schema is weergegeven in figuur 9 en geeft begin van bewegen van stenen op een bodem (open zee) onder golfaanval. De parameters die bekend moeten zijn, zijn golfhoogte, golfperiode en waterdiepte. De achtergrond van het schema is niet gegeven en wordt in dit rapport ook niet verder uitgediept.

In het schema van figuur 9 moet de golfhoogte $H_{1/10}$ worden aangehouden (het schema is hoogstwaarschijnlijk afgeleid voor regelmatige golven en een bestorting op een vlakke bodem, zonder constructie). Een conservatieve inschatting is dat $H_{1/10} = 1,27 H_s$. Verder moet het steengewicht dat uit het schema komt *worden verdubbeld* voor de teenbestorting (de diameter moet dan ongeveer 25% groter worden). Dit om voor de invloed van het talud op de waterbeweging te compenseren. Uitgaande van $H_s = 0,5 h$ (met h = waterdiepte) kunnen voor verschillende waterdieptes de benodigde steendiameters worden bepaald. In de range van waterdieptes tussen 2 en 6 m is dan een steendiameter nodig van orde 70-140 mm.

Benodigde steendiameters in deze situatie zijn kleiner dan de in de praktijk toegepaste klasse van 10-60 kg. Geconcludeerd kan worden dat voor een teenbestorting *met de bovenkant gelijk aan de vooroever* een klasse 10-60 kg meer dan voldoende is. Er wordt in dit rapport niet nagegaan of een lichtere klasse mogelijk is en eventueel economisch aantrekkelijk is. De klasse 10-60 kg wordt als ondergrens aangenomen.

3.2 Uitgangssituatie voor afleiden nieuwe ontwerpmethode voor teenbestortingen

Uit de gesprekken met de dijkbeheerders in Zeeland blijkt dat teenbestortingen meestal gelijk met of beneden de bestaande vooroever liggen. Alleen bestortingen die tijdens storm bloot komen te liggen kunnen schade ondervinden. Een eerste situatie om te bekijken is een teenbestorting die met de bovenkant gelijk ligt met de vooroever. Als de teenbestorting "vrij" komt te liggen boven de vooroever, zijn er mogelijk twee oorzaken:

- erosie van de vooroever over de hele breedte van de vooroever
- een ontgrondingskuil aan de teen van de dijk door zware golfaanval (en stroming)

Als een algehele erosie van de vooroever optreedt, ligt het in de verwachting dat maatregelen worden genomen om dit tegen te gaan (zoals in het verleden is gedaan). Het is daarom moeilijk een goede uitgangssituatie te bedenken waarbij de teenbestorting hoger komt te liggen dan de (voormalige) vooroever. Het effect van erosie van de vooroever zelf is dat het meest zeewaartse gedeelte van de teenbestorting mee zakt met de erosie. De

bestorting komt dan "rond" te liggen. Op zich is dat geen probleem als de teenbestorting maar lang genoeg is. Het andere effect is dat de constructie zwaarder wordt aangevallen door golven. Ten eerste kunnen door de grotere waterdiepte hogere golven worden verwacht, ten tweede ligt de constructie hoger dan de vooroever.

Als uitgangssituatie wordt gekozen voor een teenbestorting waarbij de vooroever *1 m over de volledige breedte is geërodeerd*. Dit houdt in dat de bovenkant van de teenbestorting 1 m boven de vooroever ligt. De maximale golfhoogte die kan worden bereikt, wordt gesteld op 0,5 maal de waterdiepte. Dit is voor een vrijwel horizontale en niet te korte vooroever een goede benadering, waarbij niet te kort minimaal één golfengte betekent ($gT_p^2/(2\pi)$, met T_p de piekperiode).

Bij zware golfaanval is het mogelijk dat ontgrondingskuilen ontstaan voor de teen van de constructie. In veel gevallen is dit bij constructies met steile of verticale taluds, zoals bij golfbrekers. De British Standards (1991) vermeldt dat voor constructies met taluds van 1:3 of steiler er een teenconstructie ontworpen moet worden. De meeste dijken hebben een benedentalud van 1:3 of flauwer. Bij dijken met zulke flauwe taluds en lage reflectiecoëfficiënten is het niet direct te verwachten dat ontgrondingskuilen ontstaan, alhoewel dit natuurlijk wel mogelijk is. Als uitgangssituatie voor de ontwerpregel wordt hier daarom vanuit gegaan.

Een ontgrondingskuil betekent dat de teenconstructie, net als bij erosie van de vooroever, mee moet zakken. Als de teenbestorting breed genoeg is (orde 5 m) dan is dat inderdaad mogelijk. De teenbestorting wordt niet direct zwaarder aangevallen. Dit komt omdat de rest van de vooroever op de oorspronkelijke hoogte blijft *en de maximaal te verwachten golfhoogte bij de teen van de constructie niet verandert* (wat wel het geval is bij volledige erosie van de vooroever). In feite is een teenbestorting met een ontgrondingskuil (veel) stabielere dan bij volledige erosie van de vooroever. Daarom wordt bovenstaande tweede uitgangssituatie ook representatief geacht (met conservatisme) voor de situatie met een ontgrondingskuil. Een teenbestorting met de bovenkant gelijk aan de vooroever lijkt het meest op een apron als in figuur 8. Hier kan de British Standards worden gebruikt, zie hoofdstuk 3.

Bij de inventarisatie van teenbestortingen in noord en midden Nederland is komen vast te staan dat de teenbestorting niet altijd horizontaal en gelijk met het voorland ligt. Figuren 6, 9 en 10 geven teenbestortingen die onder een flauwe helling zijn aangelegd en waarbij er een verticaal verschil is tussen de bovenkant van de teenbestorting en de hoogte van het voorland bij de teenconstructie. Als de bestorting lang wordt doorgezet, ontstaat eerder een (plas)berm met een bestort onderwatertalud, dan een teenbestorting. Zie ook paragraaf 1.2 en figuur 11. Bij de definitie van een teenbestorting is gezegd dat de bovenkant van de teenbestorting niet meer dan 1 m boven het begin van het voorland mag liggen. Deze situatie komt vrijwel overeen met een horizontale teenbestorting waarbij de vooroever over de hele lengte met 1 m is geërodeerd. Het verschil is de ligging van de teenconstructie zelf: horizontaal of onder een flauw talud.

Uitgangspunt voor het afleiden van een ontwerpmethodode voor een teenbestorting is dus dat de bovenkant van de teenbestorting niet meer dan 1 m boven het begin van het voorland ligt. Als dit wel het geval is, dan is meer sprake van een bestort benedentalud dan van een teenbestorting, en die situatie is geen onderwerp in dit rapport.

3.3 Benadering via de orbitaalbeweging

Bij een doorgaand stortstenen talud is er altijd een locatie waar de brekende golven op het talud slaan. Dit is meestal een locatie net onder de waterlijn. De teenbestorting onderscheidt zich hierin van het doorgaande talud dat deze zich doorgaans onder water bevindt. De maatgevende hydraulische omstandigheden zullen als gevolg hiervan

aanzienlijk verschillen van die op het doorgaande talud. De teenbestorting krijgt te maken met een gereduceerde golfaanval en kan daardoor doorgaans lichter worden ontworpen dan de taludbekleding. Deze afname in hydraulische belasting kan worden geïllustreerd aan de hand van de grootte van de orbitaalsnelheid als functie van de diepte.

De stabiliteit van de stenen kan worden gerelateerd aan de maximale schuifspanning (τ) bij een oscillerende waterbeweging:

$$\tau = \frac{1}{2} \rho f_w u_0^2$$

hierin is:

f_w = wrijvingsfactor

u_0 = de maximale horizontale orbitaalsnelheid op de bodem

ρ = de massadichtheid van water

$$u_z = (\omega H) \cosh k(h+z)/(2 \sinh(kh))$$

hierin is:

u_z = de maximale horizontale orbitaalsnelheid op diepte $-z$

$\omega = 2\pi/T$

T = golfperiode

$k = 2\pi/L$

L = golflengte

h = waterdiepte

Voor $z = -h$ (dit is de zeebodem) gaat deze relatie over in:

$$u_0 = (\omega H)/(2 \sinh(kh)) \dots\dots\dots (1)$$

In ondiep water ($h/L < 0,05$) gaat deze relatie over in

$$u_0 = \frac{1}{2} H (g/h)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

De stabiliteitsformulering van Komar en Miller geeft:

$$u_0 = 1.05 \Delta^{4/7} g^{4/7} D^{3/7} T^{1/7} \dots\dots\dots (3)$$

Deze formule wordt algemeen gezien als een ondergrens voor de kritieke orbitaalsnelheid voor relatief grote stenen. Uit vergelijking 2 kan worden opgemaakt dat in ondiep water geldt dat:

$$u_0^2 \propto 1/h.$$

Uit vergelijking 3 volgt dat:

$$u_0^2 \propto D^{6/7}$$

Uit combinatie van 2 en 3 mag men verwachten dat $D^{6/7} \propto 1/h$. Of in woorden: "De benodigde steendiameter bij een bepaalde golfhoopte is vrijwel omgekeerd evenredig met de diepte waarop de bestorting zich onder de waterspiegel bevindt". Indien in plaats van vergelijking 2 vergelijking 1 wordt toegepast, dan neemt de benodigde steendiameter nog sneller af bij een toenemende waterdiepte. De mate waarin dit sneller gaat is sterk afhankelijk van de beschouwde golfperiode.

Met deze benadering komen we in de praktijk niet veel verder dan te constateren dat bij gelijke golfhoopte de aanval op een ondiep gelegen constructie groter is dan op een dieper

gelegen constructie. Kwantificering van dit verschil vanuit bovenstaande theorie bij een talud is om verschillende redenen erg moeilijk:

1. De waterbeweging bij de teen van een dijk laat zich niet beschrijven met de formulering voor een lopende golf en wel om de volgende redenen:
 - de horizontale orbitaalbeweging wordt door de aanwezigheid van de dijk gehinderd; in het extreme geval bij een verticale wand, wordt de horizontale beweging omgezet in een verticale beweging,
 - de stroming bij de teen wordt gedomineerd door de op- en neergaande beweging van het water op het talud, inclusief het breken van golven
 - bij hoogwater zullen de golven ook op het talud breken waardoor er luchtinsluiting komt. De stroming wordt dan gedomineerd door een zeer hoge turbulentiegraad, alhoewel de teenbestorting hier mogelijk niet al te veel last van heeft.
2. De golf laat zich in dit gebied niet beschrijven met een eerste orde benadering zoals bij bovenstaande formules is gedaan, we zitten hier in het gebied van de hogere orde Stokes golven.

Al met al laat de waterbeweging nabij de teen van een talud zich niet of nauwelijks beschrijven met de standaard golftheorie. Vandaar dat onderzoekers hun toevlucht hebben genomen tot een empirische benadering.

Toch is een verdere uitwerking wel mogelijk, in die zin dat de waterbeweging op, in en nabij een constructie ook numeriek kan worden berekend. Het model ODIFLOCS is een 1D horizontaal golvenmodel (golfvergelijkingen voor ondiep water), dat de waterbeweging op een ondoorlatende, maar ook in een poreuze constructie kan berekenen. In principe kan een teenbestorting met een ondoorlatend talud worden gesimuleerd. Ook is het met dit model mogelijk stabiliteit van breuksteen uit te rekenen.

Als een verdere analyse van de stabiliteit van teenbestortingen middels een meer theoretische beschouwing van de waterbeweging wordt verlangd, dan wordt aanbevolen ODIFLOCS-berekeningen voor een aantal situaties te maken.

4 Twee empirische methoden nader geanalyseerd

4.1 Inleiding

Resultaten van met onregelmatige golven uitgevoerd onderzoek naar de stabiliteit van teenbestortingen bij dijken zijn niet bekend. Alleen het (laten) uitvoeren van dergelijk onderzoek biedt zicht op een direct toepasbare en betrouwbare ontwerpformule voor teenbestortingen.

Wel zijn er twee onderzoeken naar min of meer vergelijkbare situaties, namelijk onderzoek naar de stabiliteit van overgangsconstructies bij dijken en onderzoek naar de stabiliteit van teenconstructies bij golfbrekers.

Beide onderzochte constructies lijken op een teenbestorting maar zijn het net niet. In het kader van M1983 deel V (WL, 1990) zijn onderzoeksresultaten verzameld voor geknikte dijktaaluds. Met o.a. een glad, niet doorlatend boventalud 1:3 en een stortstenen ondertalud 1:6. Het verschil met de teenbestorting is met name het niet aanwezig zijn van het flauwe voorland bij de modelproeven. Bij de modelproeven was er geen sprake van diepte gelimiteerde golfhoogten bij de constructie. Dit is wel uitgangspunt bij de hier beschouwde teenbestortingen. Verder was het benedentalud 1:6, wat in vergelijking met een teenbestorting soms erg steil is, maar soms echter ook niet, zie bijvoorbeeld figuren 9 en 10.

Het schadebeeld bij bovenstaande situatie is dat de schade ontstaat op de overgang van het gladde boventalud naar het breukstenen talud.

In het kader van H1874 (TUDelft/WL, 1993) is er uitgebreid onderzoek verricht naar de stabiliteit van teenconstructies van golfbrekers. De vormgeving van de teenconstructie lijkt erg op die van een teenbestorting: horizontaal met een zekere breedte. Ook is dit onderzoek uitgevoerd met diepte gelimiteerde golven. Het grote verschil met een teenbestorting voor een dijk is dat het boventalud veel steiler is dan gebruikelijk bij dijken en dat dit talud een open, goed doorlatende, ruwe constructie is. In vergelijking met een dijktaalud geeft het steilere talud grotere waterbewegingen in de buurt van de teen, maar de waterbeweging wordt weer geremd door de grote ruwheid en doorlatendheid. Welk effect de overhand heeft is niet bekend.

Het schadebeeld bij de teen van een golfbreker is dat het meest zeewaartse deel wordt "afgerond" en dat de teen meer onder een helling komt te liggen. De schade ontstaat nooit bij de overgang van de teen naar het golfbrekertalud.

Beide methoden worden hier behandeld.

De volgende standaard sorteringen worden veelal voor teenbestortingen toegepast en de stabiliteit van teenconstructies wordt hierop afgestemd.

sortering (kg)	M ₅₀ (kg)	D _{n50} (m)
10-60	26-46	0,21-0,26
40-200	90-140	0,32-0,38
60-300	150-220	0,38-0,43

Tabel 2. Standaard steensorteringen

4.2 Een 1:6 benedentalud als teenbestorting

Op basis van resultaten uit M1983 wordt in paragraaf 5.1.3.9 van de "Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering – kortweg CUR/CIRIA-manual" een ontwerpmethode gepresenteerd voor geknikte dan wel samengestelde taluds. Met name de ontwerprelatie voor een glad boventalud (1:3) en een stortstenen ondertalud (1:6) komt goed overeen met de situatie zoals dit bij de teenbestortingen van Nederlandse dijken zich voordoet, namelijk:

- gladde, ondoorlatend boventalud 1:3, 1:4,
- stortstenen teenbestorting met een flauw talud,
- waterstanden rond of boven het niveau van de teenbestorting.

Figuur 14 geeft de methode uit de CUR/CIRIA-manual. Het uitgangspunt is het toepassen van de Van der Meer-formule voor een *doorgaand 1:6 stortstenen talud* onder gegeven hydraulische omstandigheden. Daarna volgt er een correctie, afhankelijk van de plaats van de overgang van het 1:3 gladde boventalud naar het 1:6 benedentalud van stortsteen, ten opzichte van de waterlijn. Deze overgang wordt aangeduid met h_t/D_{n50} , ofwel het aantal stenen (verticaal gemeten) dat de overgang onder water ligt. De correctie zelf wordt aangeduid met f_i . De benodigde steendiameter voor een doorgaand talud kan worden gedeeld door de correctiefactor om de juiste steendiameter voor het benedentalud te bepalen.

Voor waarden van h_t/D_{n50} tussen de -2 en 3 geeft deze ontwerpgrafiek (figuur 14) een correctiefactor die kleiner is dan 1 (minimum waarde 0,86 bij h_t/D_{n50} is 0). Ook bij de stabiliteitsformulering voor een overlaging is te zien dat een stabiliteitsverlagende factor in rekening moet worden gebracht bij deze situatie. Dit komt omdat voor hoog gelegen overgangen, het neerstromende water bij neerloop langs het gladde talud direct de steen beneden dit gladde talud aanvalt.

Voor waarden van h_t/D_{n50} tussen de 3 en de 7 is een correctiefactor f_i tussen 1 en 1,4 te realiseren. Voor de steensortering 10-60 kg komt de waarde van $h_t/D_{n50} = 7$ overeen met 1,68 m, voor 40-200 kg met 2,52 m en voor 60-300 kg met 2,87 m.

Voor situaties waarbij de waterdiepte boven de teenbestorting groter wordt dan 7 maal de D_{n50} zou de lijn in figuur 14 voor f_i lineair geëxtrapoleerd kunnen worden. Voor waarden van $h_t/D_{n50} > 10-11$ wordt ver buiten het onderzochte gebied geëxtrapoleerd, zie figuur 14. De verwachting is dat de lijn eerder parabolisch dan lineair gaat lopen en dat een toepassing in dit gebied middels lineaire extrapolatie een conservatieve aanname is, maar zeker is dat niet. In ieder geval zijn berekende waarden in dit gebied minder betrouwbaar door te grote extrapolatie.

De toepassing van bovengenoemde methode is op de volgende aannamen gebaseerd. De "teenbestorting" heeft een talud 1:6. Dit geeft over een breedte van 6 m een hoogteverschil van 1 m, welke als maximaal wordt gezien voor wat betreft de definitie van een teenbestorting. Het komt ook overeen met de teenbestortingen langs het IJsselmeer in Friesland, waar de bovenkant van de bestorting boven de flauwe vooroever ligt, zie de foto's. De constructie bestaat dus uit een 1:3 glad boventalud en een 6 m lang benedentalud of teenbestorting. Het uiteinde van de teenbestorting ligt gelijk met de vooroever, de overgang naar het gladde talud ligt 1 m hoger (dit is dus afwijkend van feitelijke methode, waarbij geen dieptegelimiteerde situatie is beschouwd).

Dus h_t is 1 m minder dan de waterdiepte. De benodigde steendiameters als functie van de waterdiepte boven de teenbestorting zijn uitgerekend en weergegeven in de onderstaande tabel. Hierbij is van de volgende uitgangspunten gebruik gemaakt, die deels in de stabiliteitsformule voor stortsteen nodig zijn:

- schade $S = 2, 8$ en 12
- helling ondertalud $1:6$
- $P = 0.1$ (permeabiliteit van de constructie)
- $N = 3000$ golven
- $\rho_s = 2700 \text{ kg/m}^3$
- $\rho_w = 1025 \text{ kg/m}^3$

De golfhoogte wordt diepte gelimiteerd aangenomen en voor de golfperiode is een tweetal situaties onderscheiden:

- $H_{s,b} = 0,5 h$
- $T_p = 5 \text{ s}$ en $T_p = 8 \text{ s}$

In tabel 3 zijn de resultaten van de berekeningen samengevat. Voor verschillende waterstanden met bijbehorende golfhoogten en voor twee golfperiodes, is de benodigde nominale steendiameter bepaald en wel voor drie schadeniveaus. De cursief gedrukte waarden zijn bepaald (ver) buiten het toepassingsgebied en zijn derhalve minder betrouwbaar.

h_t	h	H_s	$T_p = 5 \text{ s}$			$T_p = 8 \text{ s}$		
m	m	m	$S = 2$	$S = 8$	$S = 12$	$S = 2$	$S = 8$	$S = 12$
0	1	0,5	0,19	0,14	0,13	0,20	0,15	0,14
1	2	1,0	0,25	0,18	0,15	0,34	0,24	0,22
2	3	1,5	0,30	0,20	0,18	0,40	0,28	0,24
3	4	2,0	0,34	0,22	0,20	0,48	0,32	0,28
4	5	2,5	0,38	0,24	0,22	0,52	0,35	0,31
5	6	3,0	0,41	0,27	0,23	0,57	0,38	0,33

Tabel 3. Methode geknikt talud. Benodigde D_{n50} in m als functie van de waterdiepte boven de $1:6$ teenbestorting, bij een erosiediepte van 1 m en diepte gelimiteerde golven.

Voor een waterdiepte vóór de teenbestorting van 5 m of meer (en dieptegelimiteerde golfaanval) wordt steeds ver buiten het toepassingsgebied geëxtrapoleerd. Het acceptabele schadeniveau hangt af van de omstandigheid die wordt beschouwd. Een jaarlijkse omstandigheid moet geen schade opleveren. Een situatie die veel extremer is, zoals de storm bij de normfrequentie, mag natuurlijk veel meer schade opleveren, zolang de bekleding boven de teenbestorting het maar niet begeeft door verlies van stabiliteit van de teenbestorting. Op acceptabele schade wordt later terug gekomen.

4.3 De teenconstructie bij een golfbreker

Een vrijwel horizontale teenbestorting lijkt qua vorm erg op de situatie zoals onderzocht in het onderzoek H1874 naar de stabiliteit van een teenconstructie van een golfbreker, zie ook figuur 15. Op basis van deze en andere resultaten is voor een teenconstructie van een golfbreker de volgende relatie afgeleid (Van der Meer, 1998):

$$H_s / \Delta D_{n50} * N_{od}^{-0.15} = 2 + 6.2 (h_t/h)^{2.7} \quad (4)$$

In de formule is h_t ook hier de waterdiepte boven de teen of teenbestorting. De parameter $H_s / \Delta D_{n50}$ is het stabiliteitsgetal waaruit de benodigde steendiameter (of gewicht) kan worden bepaald. De parameter N_{od} geeft de schade aan, namelijk het aantal stenen dat in een doorsnede verplaatst. Globaal kan worden gesteld dat $S = 2 N_{od}$, zodat een vergelijking met stortsteenconstructies mogelijk is. Voor een teenconstructie van een golfbreker kan worden gesteld dat $N_{od} = 0,5$ begin van schade voorstelt, $N_{od} = 2$ betekent een beetje afvlakking van de teen en $N_{od} = 4$ betekent voor een relatief korte teenconstructie volledige afvlakking.

Een teenconstructie bij een golfbreker is meestal maar 3 tot 4 stenen breed, zodat bij $N_{od} = 4$ de bovenste laag weg is. Dit is anders bij een teenbestorting die meestal orde 5 m breed is en dus tientallen stenen breed bij een klasse 10-60 kg. $N_{od} = 4-8$ betekent bij een teenbestorting dat ongeveer 4-8 stenen uit het profiel verdwijnen en kan voor extreme situaties als een ontwerpstorm als zeker acceptabel worden gezien.

Figuur 15 geeft formule 4 weer, tezamen met een schets van de doorsnede. Een teen is stabieler als deze verder onder water ligt (de verhouding h_t/h komt in de buurt van 1). Bij de gegeven situatie ligt de teenbestorting 1 m boven de vooroever. De relatieve diepte van de teen h_t/h is het grootst als de waterstand het laagst is. Maar bij deze situatie is de golfhoogte beperkt tot de helft van de bij deze lage waterstand behorende waterdiepte. Een hogere waterstand geeft hogere golven, maar de teenbestorting ligt dan weer gunstiger. Welke situatie doorslaggevend is kan met de formule worden bekeken.

In het onderzoek is de golfsteilheid of golfperiode uitvoerig gevarieerd. Op basis van de resultaten werd geconcludeerd dat er geen merkbare invloed viel te constateren van de golfperiode, dit in tegenstelling tot de stabiliteit van doorgaande breukstenen taluds. Of er bij teenconstructies een invloed van de golfperiode is te verwachten, is daarmee discutabel.

Wat verder in figuur 15 opvalt is dat de spreiding rondom de formule behoorlijk groot is. De formule zelf gaat ongeveer door het midden van de punten en houdt geen rekening met deze spreiding.

In de onderstaande tabel worden de benodigde steendiameters voor teenbestortingen weergegeven die met bovenstaande formule zijn berekend. Uitgangspunt is weer een erosie van 1 m en nu een horizontale teenbestorting. De cursief gedrukte getallen zijn minder betrouwbaar omdat de teen voor de formule te hoog ligt ($h_t/h > 0,4$ is een voorwaarde, zie figuur 15).

h_t m	h m	h_t/h	H_s m	$N_{od}=1;$ $S=2$	$N_{od}=4;$ $S=8$	$N_{od}=6;$ $S=12$
0	1	0	0,5	0,15	0,12	0,11
1	2	0,5	1,0	0,21	0,17	0,16
2	3	0,67	1,5	0,23	0,19	0,18
3	4	0,75	2,0	0,25	0,20	0,19
4	5	0,8	2,5	0,32	0,26	0,24
5	6	0,83	3,0	0,32	0,26	0,24

Tabel 4. Benodigde D_{n50} op basis van de formule voor een teenconstructie bij golfbrekers. Erosiediepte is 1 m en de golven zijn diepte gelimiteerd.

Op basis van deze resultaten zou 10-60 kg in alle gevallen voldoende zijn, zeker als bij extremere situaties meer schade wordt geaccepteerd. Met de formule voor teenconstructies bij golfbrekers wordt een lichtere steen gevonden dan met de methode van geknikte taluds. Als overigens een zekere veiligheid in acht wordt genomen om de grote spreiding in figuur 15 mee te nemen, dan zullen de uitkomsten dicht bij elkaar in de buurt komen te liggen.

Beide methoden geven de mogelijkheid om na te gaan wat het gewicht moet zijn als de golven niet diepte gelimiteerd zijn. Als de waterdiepte redelijk hoog wordt, dan is het zeker mogelijk dat de golfhoogte minder gaat bedragen dan de helft van de waterdiepte. En zo'n situatie is gunstiger dan een lagere waterstand met dezelfde golfhoogte. Juist bij een zeer extreme situatie, zoals bij de normfrequentie, zou dit kunnen voorkomen. Bij waterstanden van orde 5 à 6 m boven NAP zijn er mogelijk omstandigheden (Zeeland) waar de golfhoogte dan minder bedraagt dan 3 m.

Figuur 16 geeft de uitwerking als de golfhoogte niet meer diepte gelimiteerd is. In deze figuur is uitgegaan van een acceptabel geacht schadeniveau van $N_{od} = 4$ ($S = 8$). Nu is het steengewicht uitgezet tegen de waterdiepte h . Bij elke waterdiepte is de golfhoogte beperkt tot de helft van deze waterdiepte. Vandaar dat de lijnen voor verschillende golfhoogten steeds verder naar rechts in de figuur beginnen. In feite komt de linker begrenzing overeen met de grootst mogelijke belasting van $H_s = 0,5 h$.

Het kan ook zijn dat bij een bepaalde waterstand de golfhoogte kleiner is dan de maximale diepte gelimiteerde golfhoogte. De lijnen in figuur 12 geven de invloed van een andere golfhoogte dan de maximale. Het benodigde gewicht wordt dan kleiner. Is bijvoorbeeld bij een golfhoogte van 2,5 m en een waterdiepte van 5 m nog een steengewicht nodig van 35 kg, als deze golfhoogte bij een waterdiepte van 7 m voorkomt, dan is nog maar een gewicht van 24 kg nodig.

Ook is in figuur 16 het gemiddeld gewicht voor de klasse 10-60 kg getekend. Tot een waterdiepte van 5 m voldoet een klasse 10-60 kg bij het gegeven schadeniveau. Tussen een waterdiepte van 5-7 m hangt de acceptatie van deze steenklasse af van de golfhoogte en waterstand. Voor een golfhoogte van 2,8 m en een waterdiepte van 7 m voldoet de klasse nog.

5 Voorstel ontwerpmethode voor teenbestortingen

Tabellen 3 en 4 geven benodigde steendiameters voor twee verschillende ontwerpmethoden die beide niet helemaal de situatie van een teenbestorting weergeven. Tabel 3 komt tot iets grotere diameters, maar bij tabel 4 is geen rekening gehouden met een behoorlijke spreiding rondom de gebruikte formule (geen conservatieve aannamen). De twee methoden kunnen als volgt worden samengevat:

Benedentalud 1:6

- Om het benodigde gewicht te berekenen moeten de stabiliteitsformules voor een doorgaand stortsteentalud worden gebruikt. Hierbij moet men van een talud 1:6 uitgaan, want flauwere taluds kunnen niet met de formules worden berekend. Daarna moet in figuur 15 een correctiefactor worden afgelezen om het juiste gewicht voor de teenbestorting te bepalen.
- De uitgangssituatie van een glad en flauw boventalud 1:3 met een stortsteenconstructie daaronder, komt goed overeen met een teenbestorting. Het benedentalud is meestal echter wel te steil voor een teenbestorting (1:6).
- Bij de proeven, waarop de methode is gebaseerd, is de situatie met diepte gelimiteerde golven niet bekeken.
- In de stabiliteitsformules zit een sterke invloed van de golfperiode. Deze is bij doorgaande taluds duidelijk aanwezig. Of deze sterke invloed ook aanwezig is voor teenbestortingen mag worden betwijfeld, want deze is bij een teen van een golfbreker niet aangetoond.
- De methode is niet meer toepasbaar voor teenbestortingen die ver onder water liggen ($h/D_{n50} > 10-11$).
- Schade ontstaat bij de overgang van teenbestorting naar steenbekleding.

Teenconstructie bij een golfbreker

- Het benodigde gewicht kan met een eenvoudige formule worden berekend (formule 4).
- De situatie met een vrij lange en vrijwel horizontale teen, die dicht bij de bodem ligt, is onderzocht. Een situatie met de bovenkant gelijk aan de waterlijn kan niet worden berekend.
- Het boventalud was steil (1:1,5) en met afdekelementen voorzien, waardoor het boventalud ruw en doorlatend was. De golfbeweging op het boventalud was daardoor heel anders dan bij een glad en relatief flauw boventalud.
- Het onderzoek bracht aan het licht dat er *geen* invloed van de golfperiode aanwezig was. Dit kan te maken hebben met het steile en doorlatende talud, maar onderbouwt de twijfel of de sterke periode invloed in de stabiliteitsformules voor stortsteen wel geldt voor een teenbestorting.
- De formule heeft een grote spreiding (figuur 15) en bij het bepalen van tabel 4 is daarmee geen rekening gehouden.
- Schade ontstaat door het uitvlakken van het meest zeewaarts gelegen deel.

De hier gehanteerde uitgangspunten voor een kritieke situatie zijn:

- Het voorland is flauw en lang genoeg om golven diepte gelimiteerd te laten zijn. De minimale lengte van het voorland moet 1 golfengete bedragen, anders zijn de golven nog niet aan de diepte aangepast als ze de teenbestorting bereiken. Voor deze situatie wordt verondersteld dat de golfhoogte maximaal de helft van waterdiepte zal zijn.
- De teenbestorting ligt met de bovenkant maximaal 1 m boven het voorland. In veel situaties (Zeeland), waar de teenbestorting vrijwel horizontaal ligt, betekent dit dat er over het hele voorland ongeveer 1 m erosie moet zijn opgetreden. Of dit mogelijk of reëel is, is hier geen onderwerp van studie. In sommige gevallen ligt de teenbestorting iets hoger dan het voorland en ligt de bestorting onder een talud (IJsselmeerdijken Friesland, Waddenzeekust). Mogelijk moeten beide situaties worden onderscheiden.

- De meest kritieke situatie ontstaat als bij een bepaalde waterstand de golven inderdaad diepte gelimiteerd zijn: door het breken van golven op het voorland kan er geen grotere golfhoogte ontstaan. *De hoogste waterstand, waarbij de golven nog diepte gelimiteerd zijn, geeft de grootste belasting.* De belasting is lager bij lagere waterstanden en ook lager bij hogere waterstanden, maar geen diepte gelimiteerde golfhoogte.
- Bij zeer hoge waterstanden en golven (de ontwerp- of toetssituatie) is een behoorlijke schade aan de teenbestorting acceptabel.

Een vrijwel *horizontale teenbestorting* (figuren 1-6) komt mogelijk het meest overeen met de formule voor een teen bij een golfbreker. De schade zal eerder aan de zeezijde optreden en minder snel bij de overgang van teenbestorting naar boventalud. Enige schade zal daarom ook geen gevaar opleveren voor het te beschermen boventalud. Op basis van tabel 4 kan het volgende worden afgeleid, waarbij de bovenkant van de teenbestorting niet meer dan 1 m boven het voorland mag liggen:

1. Als geen schade is gewenst of toelaatbaar is, geldt:
10-60 kg voor $H_s \leq 2$ m
40-200 kg voor $H_s > 2$ m
2. Als enige schade acceptabel is voor extreme situaties, dan geldt:
10-60 kg voor $H_s < 3$ m
3. Als de bovenkant van de teenbestorting gelijk ligt met het voorland is in alle gevallen 10-60 kg voldoende.

In het IJsselmeergebied en aan de Waddenzeekust komen teenbestortingen voor, die met de bovenkant ongeveer 1 m boven het voorland kunnen liggen en die een talud vertonen (orde 1:6 of flauwer). Zie figuren 9 en 10. Met name voor de twee genoemde gebieden geldt dat een golfperiode van 8 s niet voorkomt (5-6 s is meer voorkomend). Een teenbestorting met een talud 1:6 komt goed overeen met de methode voor een geknikt talud. De methode is niet meer toepasbaar voor ver onder water liggende teenbestortingen. Dan is mogelijk eerder de methode voor een teen bij een golfbreker meer bepalend. De schade bij dit type teenbestorting zal vooral geconcentreerd zijn bij de overgang van teenbestorting naar boventalud.

Op basis van bovenstaande bespiegelingen kan met behulp van tabellen 3 en 4 het volgende voor deze *teenbestortingen onder een talud* worden afgeleid:

1. Als geen schade is gewenst of toelaatbaar is, geldt:
10-60 kg voor $H_s \leq 1$ m
40-200 kg voor $1 \text{ m} \leq H_s \leq 2$ m
60-300 kg voor $2 \text{ m} \leq H_s \leq 3$ m
2. Als bij de hogere golfhoogten enige schade toelaatbaar is, geldt:
40-200 kg voor $1,5 \text{ m} \leq H_s \leq 2,5$ m
60-300 kg voor $2,5 \text{ m} \leq H_s \leq 3,5$ m
3. Als golfperiodes langer dan 5-6 s kunnen voorkomen, kan de methode voor een geknikt talud direct worden gebruikt.

De zwaardere klassen 40-200 kg en 60-300 kg kunnen mogelijk lichter worden gekozen als de golfhoogte niet diepte gelimiteerd is. Bijvoorbeeld in een situatie met een golfhoogte van 2 m en een waterstand van 5 of 6 m, komt al gauw de klasse 10-60 kg in aanmerking.

Tot slot: om een goede ontwerpformule af te leiden voor een teenbestorting is het noodzakelijk modelonderzoek uit te voeren. Dit soort systematisch onderzoek naar een specifiek onderdeel van een constructie kan prima worden uitgevoerd en geanalyseerd door een afstudeerder, mogelijk in combinatie met uitvoering bij WL.

Referenties

British Standards, 1991. Maritime Structures. Part 7. Guide to the design and construction of breakwaters. BS 6349.

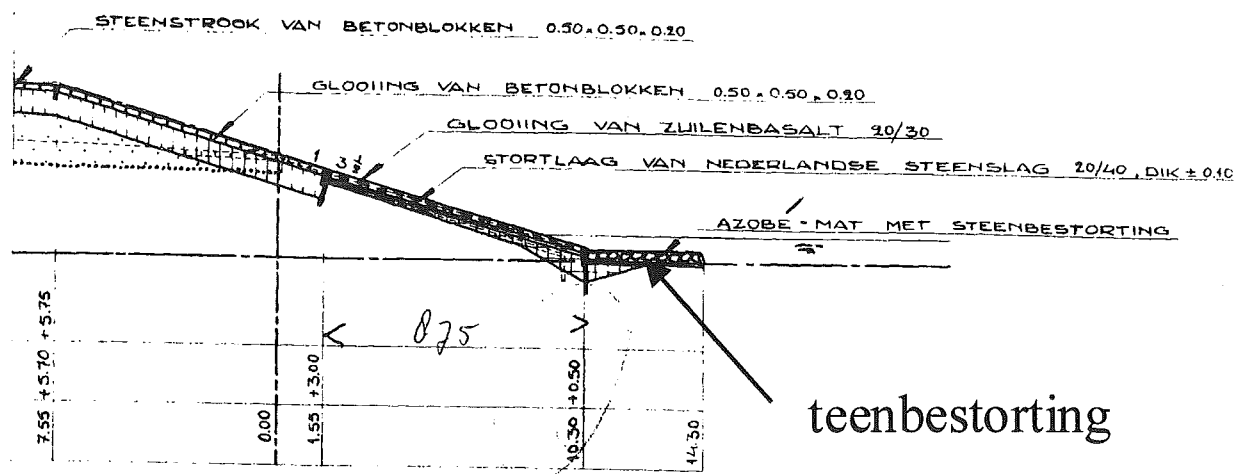
Van der Meer, J.W., 1998. Geometrical design of coastal structures. Chapter 9 in: "Seawalls, dikes and revetments". Edited by K.W. Pilarczyk. Balkema, Rotterdam. Also Infram Publications number 2.

WL, 1990. Taluds van losgestorte materialen; stabiliteit van lage dammen en overgangsconstructies bij stortsteen onder golfaanval. Rapport M1983 deel V.

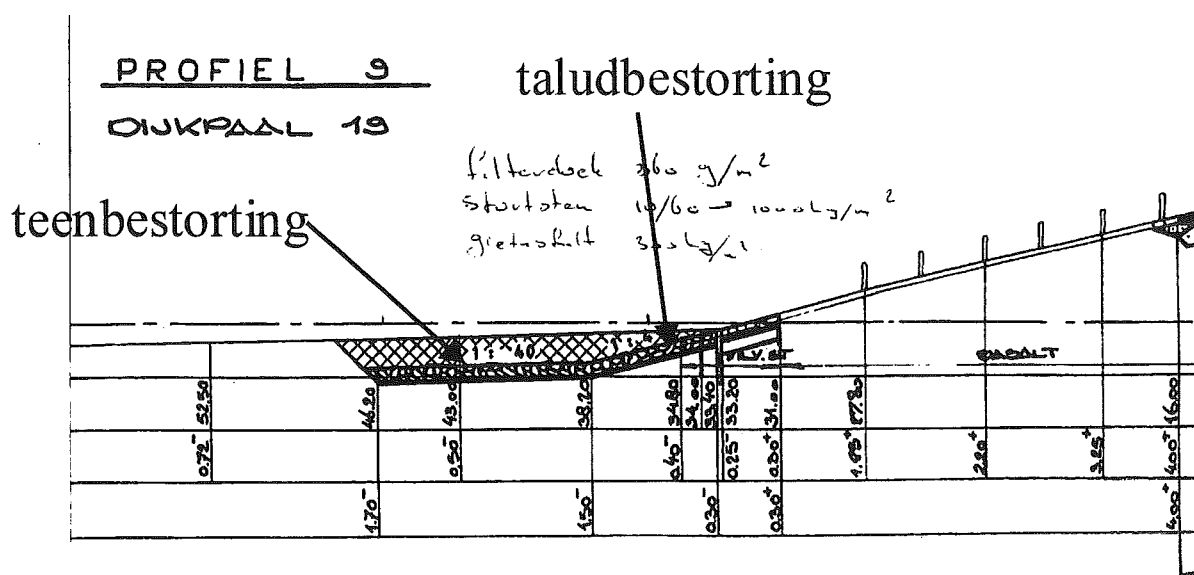
TU Delft/WL, 1993. Toe structure stability of rubble mound breakwaters. Master's thesis at Delft University of technology. Author: E. Gerding.

CUR/CIRIA, 1991. Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering.

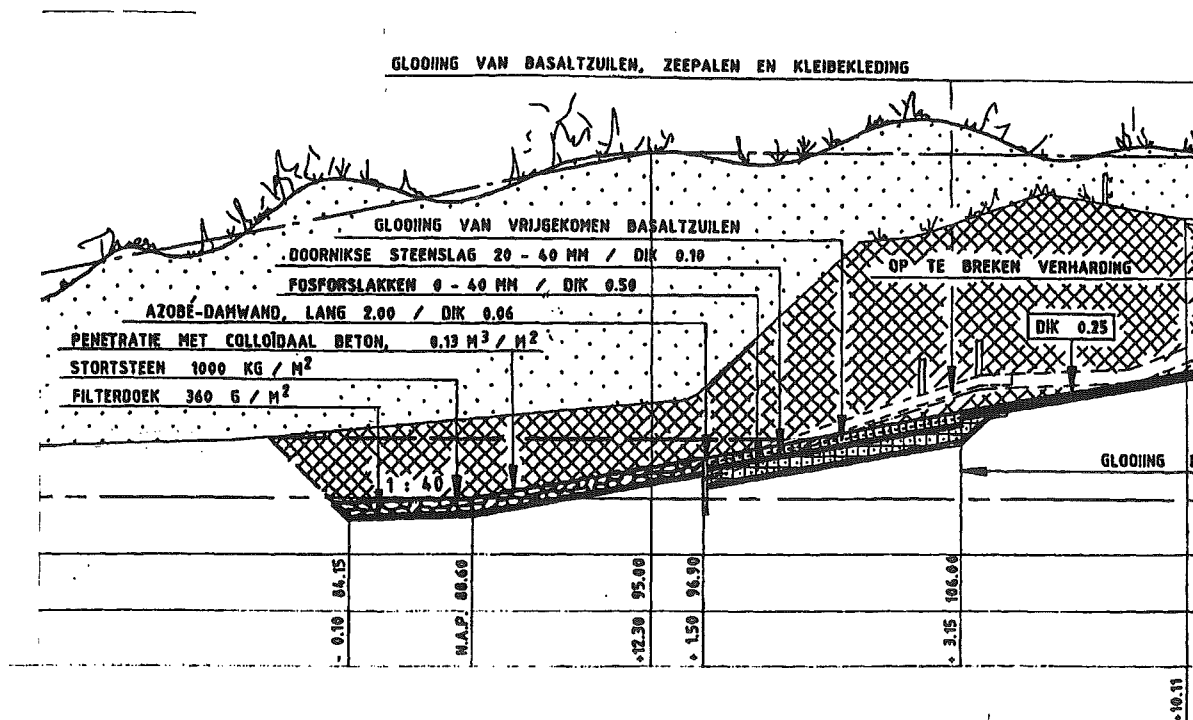
Figuren



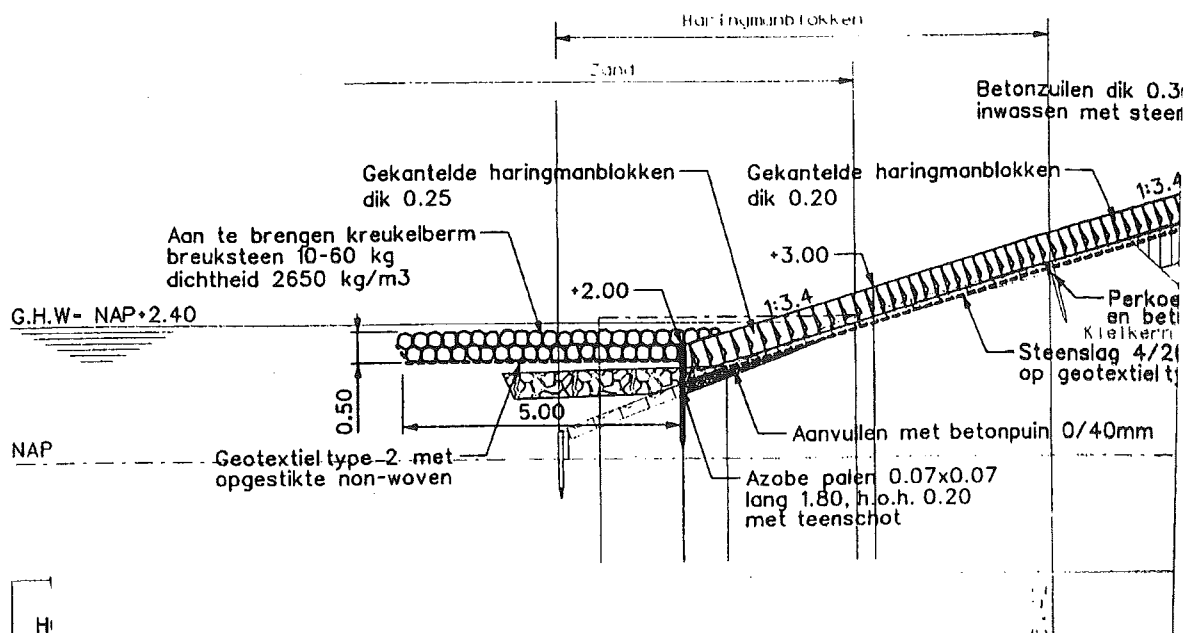
Figuur 1. Teenbestorting Paulinapolder met azobémat.



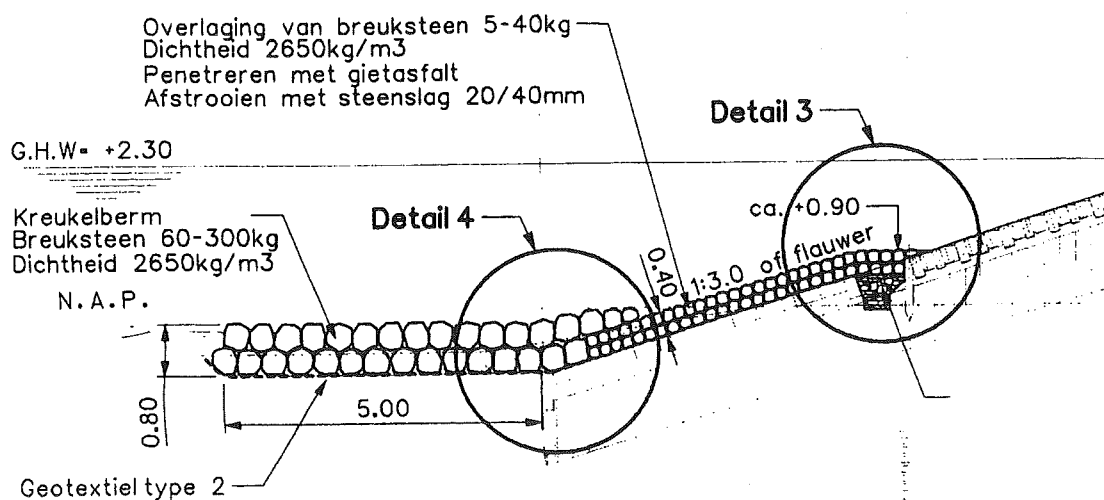
Figuur 2. Teenbestorting op filterdoek, aangelegd lager dan de vooroever



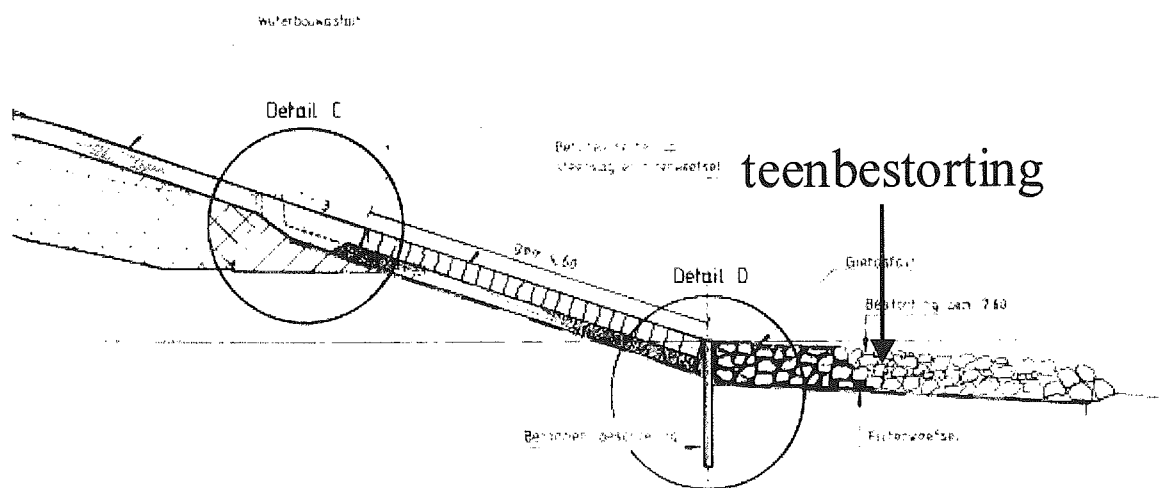
Figuur 3. Dijktafud verlengd met steen tot verwachte erosiediepte en teenbestorting op deze diepte



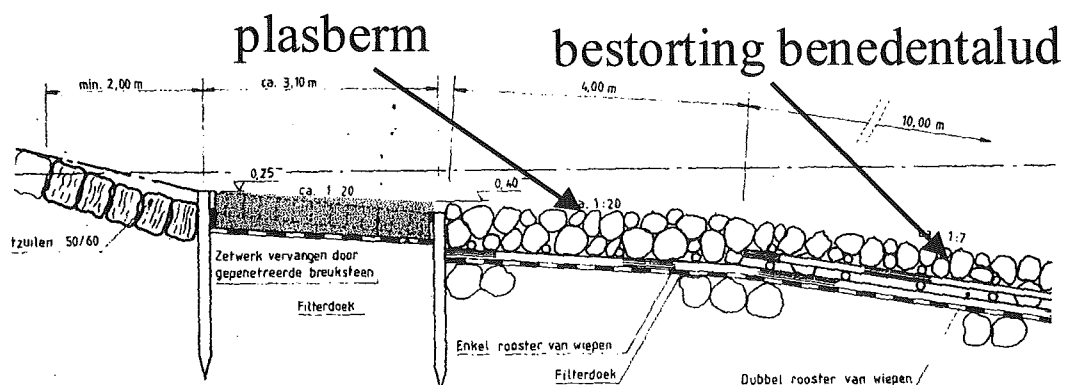
Figuur 4. Ontwerp teenbestorting Projectbureau Zeeweringen met breuksteen 10-60 kg



Figuur 5. Ontwerp teenbestorting Projectbureau Zeeweringen met breuksteen 60-300 kg en overlaging van het onderste gedeelte van het talud

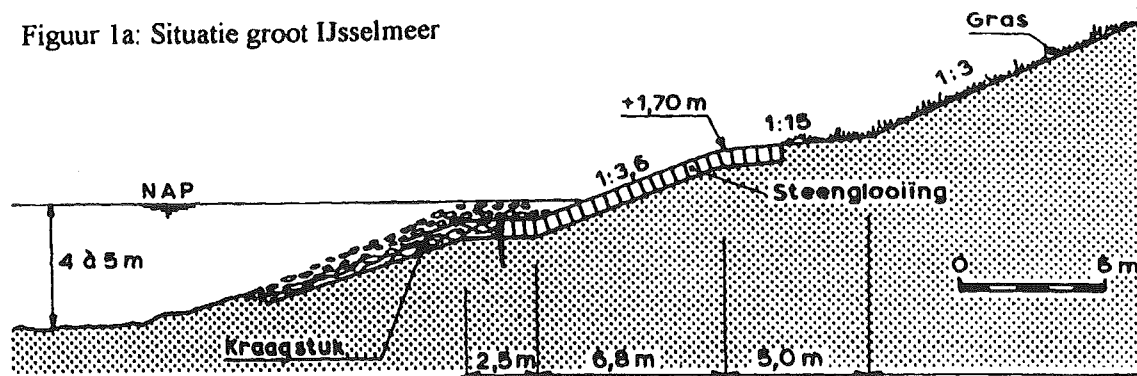


Figuur 6. Zeedijk Prins Hendrikpolder, Texel

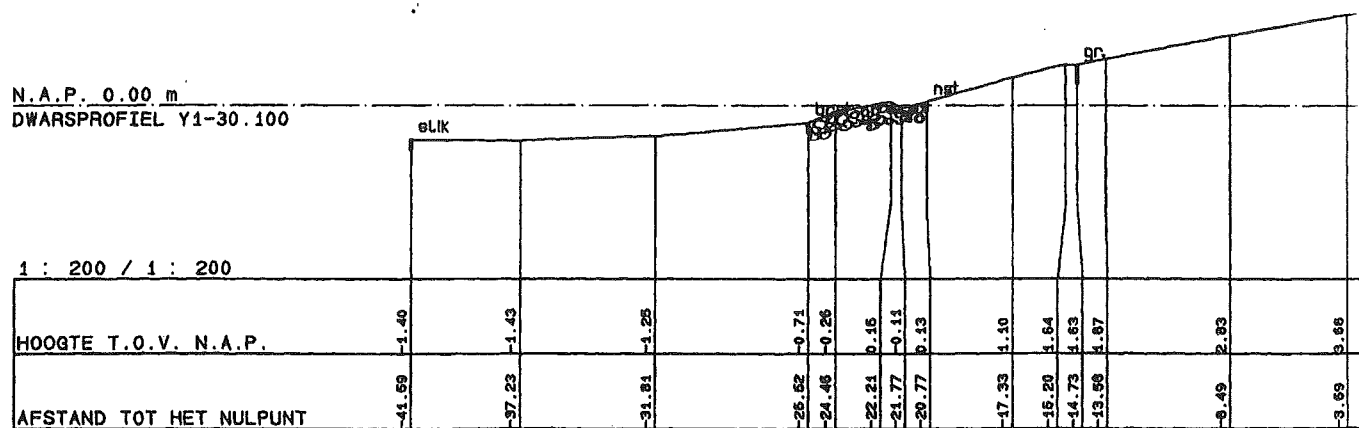


Figuur 7. Plasberm en bestorting benedentalud Pettemer zeewering. Geen teenbestorting.

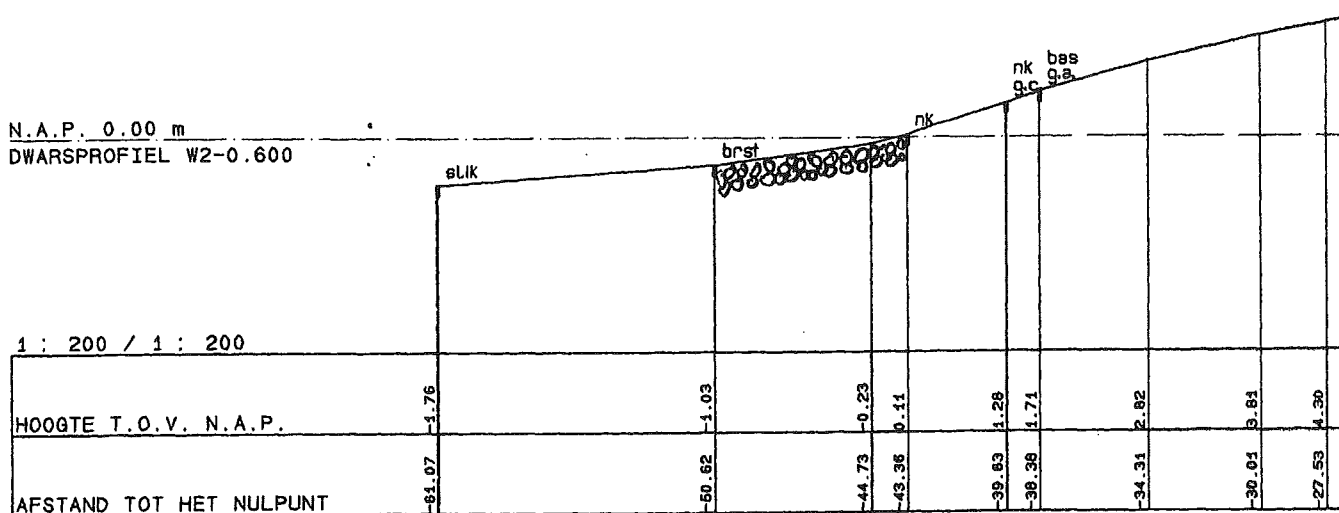
Figuur 1a: Situatie groot IJsselmeer



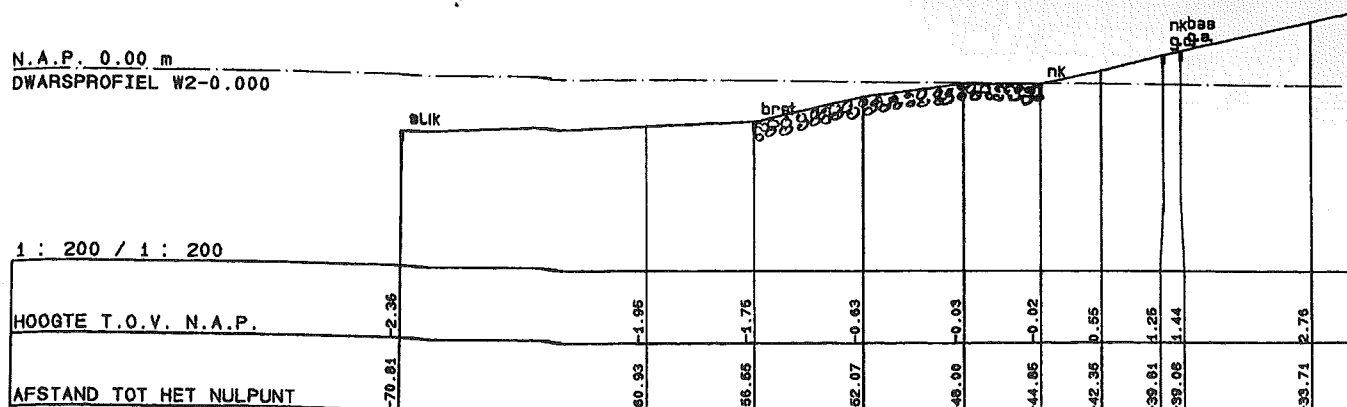
Figuur 8. Schematische doorsnede IJsselmeerdijken van Noordoostpolder en Flevoland. Plasberm met bestorting benedentalud, geen teenbestorting.



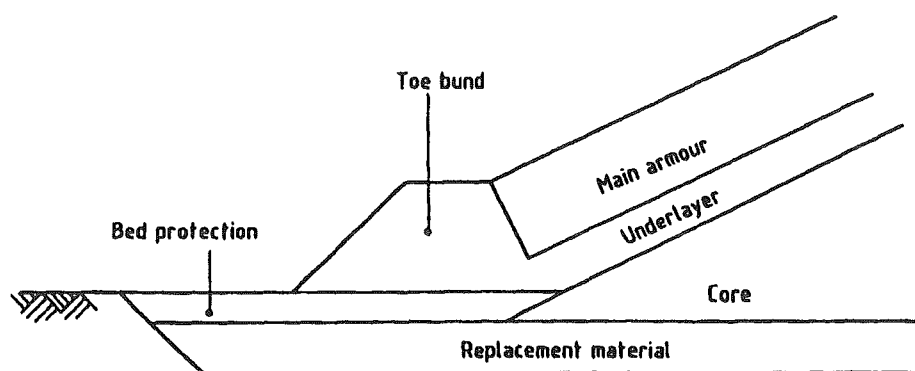
Figuur 9. Dwarsprofielmeting dijk Stavoren, met teenbestorting



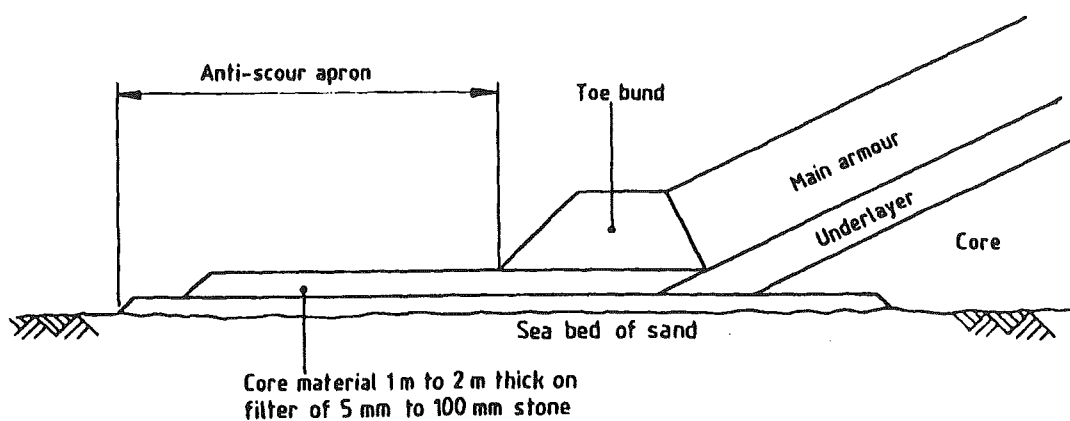
Figuur 10. Dwarsprofielmeting dijk Harlingen, nieuwe industriehaven, met teenbestorting



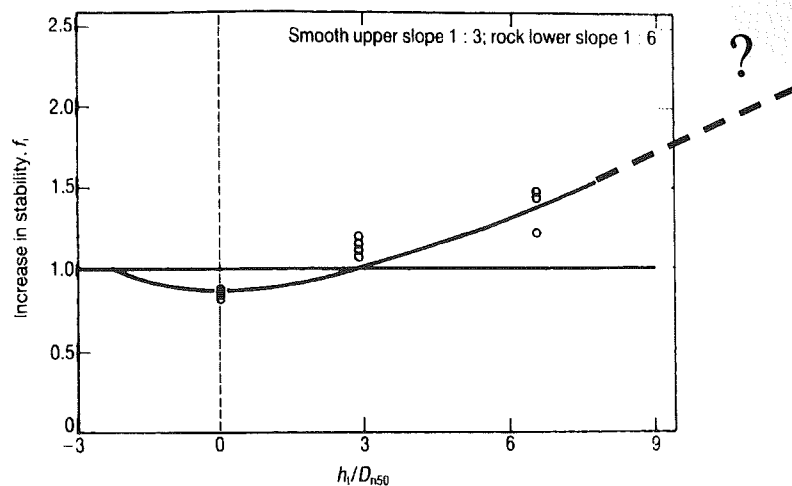
Figuur 11. Dwarsprofielmeting dijk Harlingen, nieuwe industriehaven. Plasberm met bestorting benedentalud.



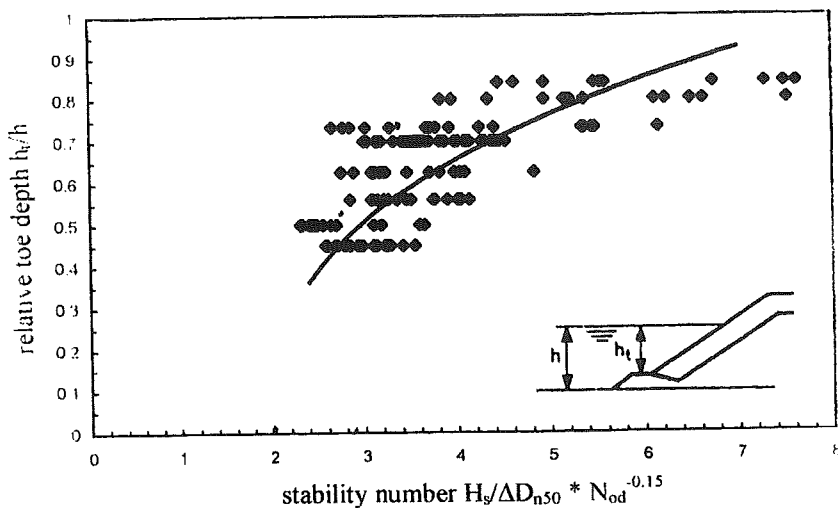
(d) Soft material at bed level



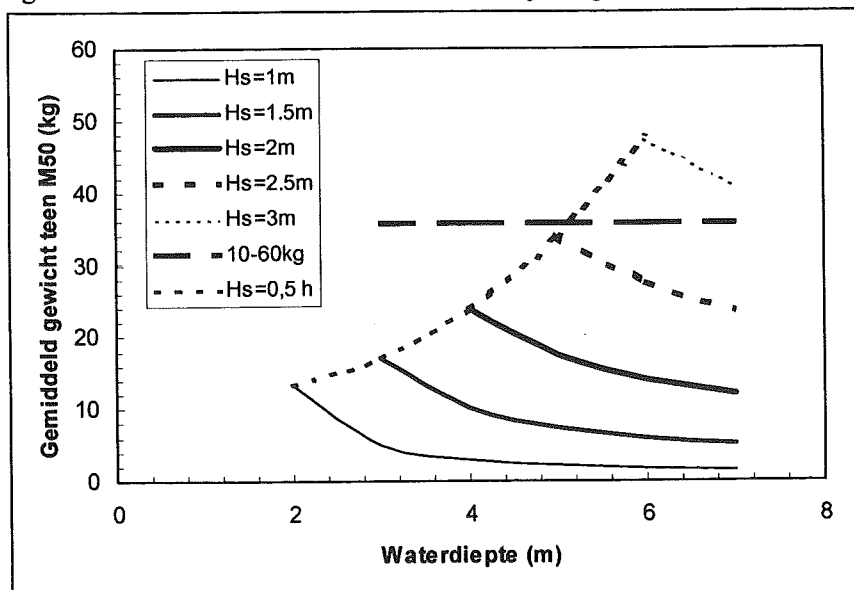
Figuur 12. Teenconstructies met anti-scour apron (British Standards, 1991)



Figuur 14. Correctiefactor voor de stabiliteit van een 1:6 stortsteen benedentalud en een glad 1:3 boventalud, in vergelijking met de stabiliteit van een doorgaand 1:6 stortsteentalud (CUR/CIRIA-manual, 1991).



Figuur 15. Stabiliteit van een teenconstructie bij een golfbreker (Van der Meer, 1998)



Figuur 16. Teenstabiliteit als functie van waterdiepte en golfhoogte

Foto's



Foto 1. Teenbestorting IJsselmeerdijk bij Stavoren



Foto 2. Teenbestorting IJsselmeerdijk bij Stavoren



Foto 3. (Onderhouds)teenbestorting Lauwersmeerdijk