

## **Advisering Houtribdijk onderdeel A**

**studie van vragen bij golfbreker  
en voorland opties**

Dr. B.G.H.M. Wichman



**Titel**  
 Advisering Houtribdijk onderdeel A

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Rijkswaterstaat Waterdienst namens IJsselmeergebied	1001676-002	1001676-002-GEO-0005	62

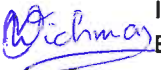


**Trefwoorden**  
 Houtribdijk, golfbreker, voorland, geotextiele tubes, baggerspecie

**Samenvatting**

De Houtribdijk voldoet niet aan de veiligheidsnorm. De dijk moet versterkt worden. Er zijn grove ontwerpen gemaakt van een golfbreker en voorland voor het traject Trintelhaven – Houtribsluizen, welke moeten leiden tot een significante reductie in significante golfhoogte  $H_s$  (van 2,3 m naar 0,9 m). Dit levert een besparing op t.a.v. de benodigde dikte en breedte van de harde bekleding op de Houtribdijk. Tevens wordt de hoeveelheid golfploop en overslag bij de Houtribdijk teruggebracht, wat wenselijk kan blijken te zijn. De ontwerpen zijn beoordeeld op geotechnische risico's, uitvoerbaarheid en kosten. Er is rekening gehouden met het feit dat er flinke zettingen optreden, en dus een overhoogte nodig is. Onderzocht is of geotextiele tubes gevuld met baggerspecie gebruikt kunnen worden voor genoemde constructies. Er blijkt een dikke breukstenen deklaag nodig te zijn en er zijn eisen gesteld aan het zandgehalte van de baggerspecie. De ontwerpen zijn in principe haalbaar gebleken, mits baggerspecie met een voldoende hoog zandgehalte wordt gebruikt. Er is nader onderzoek nodig naar het faalmechanisme squeezing, daar dit kan leiden tot de noodzaak een zandcunet onder de constructie aan te leggen. Dit cunet is niet in de kostenberekeningen meegenomen. Optimalisatie van de dikte van de deklaag is zeker mogelijk, door gebruik te maken van modelproeven. Het gebruik van met baggerspecie gevulde geotextiele tubes als kern van de golfbreker of voorlandconstructie geeft weinig kosten voordeel ten opzichte van de klassieke golfbreker, die geheel bestaat uit breuksteen. Pas als de dikte van de deklaag kan worden gereduceerd tot 50%, is er substantiële winst (meer dan 20%).

De verontreinigingsgraad van de baggerspecie mag naar verwachting de omgevingswaarden niet overschrijden, wat ertoe leidt dat alleen schone tot licht verontreinigde baggerspecie mag worden gebruikt. Voor de voorland-optie kan overtollige baggerspecie worden gebruikt, wat kan leiden tot een besparing op de transportkosten.

Aanbevolen wordt een pilot test te doen met enkele geotextiele tube constructies van 30 tot 50 m lengte over een tracé van 100 m, waarbij de optimalisatie van het ontwerp en de uitvoering nader worden onderzocht en wordt onderzocht welk minimum zandgehalte de baggerspecievulling moet hebben. Meer inzicht in de bodemligging en opbouw van de ondergrond is gewenst, wat gebruikt kan worden om het ontwerp en de uitvoering nader uit te werken.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	2009-07-08	Dr. B.G.H.M. Wichman		Ing. E.W. Vastenburg		Ing. A.T. Aantjes	
2	2009-07-30	Dr. B.G.H.M. Wichman		Ing. E.W. Vastenburg		Ing. A.T. Aantjes	
3	2009-09-29	Dr. B.G.H.M. Wichman		Ing. F.P.W. van den Berg		Ing. A.T. Aantjes	

**Status**  
 definitief



## Inhoud

<b>Lijst van Tabellen</b>	<b>i</b>
<b>Lijst van Figuren</b>	<b>iii</b>
<b>Lijst van Symbolen</b>	<b>v</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Kader	1
1.2 Opdracht	2
1.3 Afbakening	2
1.4 Leeswijzer	2
<b>2 Aanpak studie golfbreker en voorland opties</b>	<b>3</b>
2.1 Aanpak	3
2.2 Hydraulische randvoorwaarden en normstelling	6
2.3 Effect reductie golfhoogte op dimensies bekleding	7
2.4 Dimensioneren golfbreker en voorland constructies	9
2.5 Geotechnische berekeningen	11
2.6 Uitvoeringstechnische haalbaarheid en eisen aan constructie	17
2.7 Kosten van diverse varianten	18
<b>3 Resultaten</b>	<b>21</b>
3.1 Dimensioneren	21
3.2 Geotechnische berekeningen	23
3.3 Uitvoeringsaspecten	24
3.3.1 Werkwijze	24
3.3.2 Faalscenario's en aandachtspunten.	26
3.4 Nadere detaillering ontwerp	28
3.5 Bevindingen t.a.v. bruikbaarheid baggerspecie	29
3.6 Combinaties met natuurontwikkelingsprojecten	31
<b>4 Kostenvergelijking varianten</b>	<b>33</b>
4.1 Golfbreker opties	33
4.2 Voorland opties	34
4.3 Kostenvergelijking golfbreker en voorlandopties	35
4.4 Vergelijking met besparing op dijkversterkingskosten	36
4.5 Vergelijking met besparing op stortkosten baggerspecie	37
<b>5 Conclusies</b>	<b>39</b>
5.1 Beantwoording van de onderzoeksvragen	39
5.2 Resterende risico's	41
5.3 Combinaties met natuurontwikkelingsprojecten	42
<b>6 Aanbevelingen</b>	<b>43</b>
6.1 Dimensioneren	43
6.2 Controle op geotechnische faalmechanismen	43
6.3 Uitvoerbaarheid	43

# Deltares

6.4	T.a.v. bruikbaarheid baggerspecie	44
6.5	T.a.v. kostenbesparingen	44
<b>7</b>	<b>Referenties</b>	<b>45</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A</b>	<b>Bovenaanzicht tracé Houtribdijk met dijkvakken</b>	<b>48</b>
<b>B</b>	<b>Berekeningsresultaten geotechnische stabiliteit</b>	<b>49</b>
<b>C</b>	<b>Technische data Geotube</b>	<b>50</b>

## Lijst van Tabellen

Tabel 2.1	Relatie tussen dikte WAB bekleding en significante golfhoogte $H_s$ .	8
Tabel 2.2	Relatie tussen dikte van een open steenbekleding en de significante golfhoogte $H_s$ .	8
Tabel 2.3	Gehanteerde parameters bij zettings- en stabiliteitsberekeningen	11
Tabel 2.4	Ontwerpspecificaties als uitgangspunt bij nader ontwerp	18
Tabel 3.1	Karakteristieken van golfbrekers met voldoende golfremmende werking.	21
Tabel 3.2	faalscenario's en aandachtspunten bij uitvoering	28
Tabel 4.1	Globale begroting smalle golfbreker variant 3 met zandrijke baggerspecie (> 90% zand)	33
Tabel 4.2	Globale begroting smalle golfbreker variant 3 met voorbereiding baggerspecie	33
Tabel 4.3	Globale begroting smalle golfbreker variant 3 volledig opgebouwd uit breuksteen (klassieke golfbreker).	34
Tabel 4.4	Globale begroting voorland constructie variant 4 met zandrijke (>90% zand) baggerspecie (excl. het achterliggende voorland).	34
Tabel 4.5	Globale begroting voorland constructie variant 4 met voorbereiding baggerspecie (excl. het achterliggende voorland).	35
Tabel 4.6	Globale begroting voorland constructie variant 4 volledig opgebouwd uit breuksteen (excl. het achterliggende voorland).	35
Tabel 4.7	Kostenvergelijking (hierin zijn de kosten voor geotextiele tubes met enkel zand niet gecalculeerd en dus niet opgenomen)	36



## Lijst van Figuren

Figuur 2.1	Aanpak op hoofdlijnen met de diverse deelaspecten.	3
Figuur 3.1	Golfbrekerprofielen met voldoende golfremmende werking (dikte steenbestorting is aangegeven).	21
Figuur 3.2	Alternatief 3	22
Figuur 3.3	Alternatief 4	22



## Lijst van Symbolen

$c$  effectieve cohesie

$C_p$  primaire-samendrukkingscoëfficiënt beneden de grensspanning

$C_p$  primaire-samendrukkingscoëfficiënt boven de grensspanning

$C_s$  secundaire-samendrukkingscoëfficiënt beneden de grensspanning

$C_s$  secundaire-samendrukkingscoëfficiënt boven de grensspanning

$D$  effectieve blokhoogte (rekenwaarde van de toplaagdikte)

$F$  stabiliteitsfactor

$H_{m0}$  de gemiddelde golfhoogte van de golven uit een golfveld

$H_s$  Significante golfhoogte, komt in deze rapportage overeen met  $H_{m0}$

$L_{op}$  basiswaarde van de golflengte op diep water

OCR graad van overconsolidatie

PL phreatic level = stijghoogte

$R_d$  maximale rundown bij golfterugtrekking

$S$  schadegetal = geërodeerd oppervlak / (steendiameter in het kwadraat)

$T_p$  golfperiode behorende bij de piek van het spectrum

$\tan(\alpha)$  tangens van taludhelling

WAB Waterbouw Asphalt Beton

$\Delta$  relatieve volumieke massa van de blokken

$\gamma_{nat}$  volumiek gewicht van verzadigde grond

$\xi$  brekerparameter

$\Phi$  effectieve hoek van inwendige wrijving



# 1 Inleiding

## 1.1 Kader

Bij de laatste vijfjaarlijkse toetsing volgens het Voorschrift Toetsen op Veiligheid is vastgesteld dat de Houtribdijk niet voldoet aan de vereiste veiligheidsnorm van 1/10000 per jaar.

Om te bereiken dat de dijk wel weer aan de veiligheidsnorm voldoet wil Rijkswaterstaat IJsselmeergebied de Houtribdijk versterken. Behalve versterken spelen ook belangen op het gebied van weginfrastructuur en natuurontwikkeling een rol.

In de Intergrale Verkenning Houtribdijk (ref.1) is variant 2, vooroeververdediging met geotextiele elementen, opgenomen, als een mogelijkheid om te besparen op de kosten van verzwaaring van de Houtribdijk. Het gaat hier om de Markermeerzijde van de dijk.

Als een eerste stap was in 2007 door het ingenieursbureau Arcadis een quick scan naar de haalbaarheid van een golfreductor voor de Houtribdijk uitgevoerd (zie ref. 2), met als doel: een eerste inzicht geven of de toepassing van geotextiele tubes als golfreductor bij de Houtribdijk, gevuld met baggerspecie uit het project Ruimte voor de Rivier, een economisch, technisch en uitvoeringstechnisch haalbare constructie is. Tevens is aangegeven hoe de nader te bepalen voorkeursvariant past binnen de vigerende (milieu)wetgeving en ecologische voorwaarden.

Vervolgens heeft in 2008 Deltares een Advies Houtribdijk uitgebracht aan RWS Dienst IJsselmeergebied ("Advies Houtribdijk, Plan van Aanpak incl. kostenraming", Deltares, B. Wichman, 24 september 2008) waarin de volgende onderzoeksvragen werden geformuleerd:

1. Is het mogelijk om met een golfbreker de golfaanval zodanig te verminderen dat een besparing op harde bekleding mogelijk wordt in de aanleg respectievelijk de onderhoudsfase? Welke opties zijn er om zo'n golfbreker aan te leggen en welke optie is financieel het voordeligste? Bij het beantwoorden van deze vraag zullen kosten van aanleg, onderhoud en opslag van baggerspecie worden meegenomen. Voor de golfaanval moeten zowel dagelijkse als maatgevende omstandigheden worden meegenomen.
2. Hoe moet rekening gehouden worden met natuurontwikkeling bij de aanleg van een golfbreker? Hierbij wordt niet gekeken naar het oermeeras, maar wel wordt nagegaan of de golfbreker wat verder voor de dijk kan liggen en toch zijn (tijdelijke) functie kan vervullen.
3. Is een met baggerspecie/slib gevulde golfbreker concurrerend met een klassieke golfbreker? Bij deze laatste is investering in de aanleg noodzakelijk, terwijl een geotextiele tube organisch kan groeien.
4. Zijn met baggerspecie gevulde geotextiele tubes toepasbaar als golfbreker?
5. Welke combinaties zijn er mogelijk voor waterkerende met baggerspecie gevulde geotextiele tubes met een medefunctie ten behoeve van natuur?
6. Welke bergingsmogelijkheden bieden met slib gevulde geotextiele tubes met waterkerende functie naar hoeveelheden en kwaliteit baggerspecie bij deze dijkverbetering?

## 1.2 Opdracht

In het advies van september 2008 was een plan van aanpak opgenomen met een aantal aanvullende vragen. Naar aanleiding hiervan is door RWS Waterdienst offerte aangevraagd en is aan Deltares opdracht verleend met omschrijving: "advisering Houtribdijk kenmerk 436990-0002", met bestelnummer 4500137259, zaaknummer 31010963. Deze rapportage betreft "onderdeel A, vragen bij aanleg van een golfbreker" uit deze opdracht.

De volgende onderzoeksvragen zijn de basis geweest voor deze nadere studie:

1. Het dimensioneren van diverse golfbreker en voorland opties, waarmee een golfhoogte reductie van minstens 50% aan de Markermeerzijde van de dijk kan worden bereikt.
2. De toekomstige belasting volgens plan Veerman aan de IJsselmeerzijde ook meenemen. Welke zijde van de dijk wordt maatgevend?
3. Aangeven hoeveel besparing op de bekledingdikte, hoogte van de harde bekleding en dijkhoogte hiermee kan worden bereikt.
4. Grove ontwerpen maken en deze beoordelen op de diverse geotechnische faalmechanismen, waarbij de zetting van de constructies na aanleg is meegenomen. Gebruik wordt gemaakt van de probabilistische grondopbouw, zoals verkregen bij het tevens in opdracht van RWS uitgevoerde project "grondmechanisch onderzoek Houtribdijk" (ref. 3).
5. De eis is dat de golfbreker en voorlandoptie samen met de dijk een kerende functie behouden onder maatgevende omstandigheden.
6. De toepassing van geotextiele tubes als bouwelementen voor deze ontwerpen uitwerken, en nagaan of als vulling baggerspecie kan worden gebruikt.
7. Nagaan welke eisen aan de constructie en baggerspecie moeten worden gesteld in verband met de uitvoerbaarheid.
8. Kostenvergelijking van klassieke stenen ontwerpen en de geotextiele tube oplossingen.
9. Meerwaarde van gebruik baggerspecie bepalen en mogelijke combinaties met natuurontwikkelingsprojecten aangeven.

De tweede vraag betreft de situatie op termijn, als het plan Veerman wordt uitgevoerd. Deze vraag is niet in de offerte meegenomen, omdat dit voorlopig van minder belang is en niet binnen het kader van het Hoogwaterbeschermingsprogramma past.

In hoofdstuk 5 is aangegeven wat de antwoorden zijn op de algemenere vraagstelling uit par. 1.1 op basis van de analyse die voor het beantwoorden van bovenstaande vragen is uitgevoerd.

## 1.3 Afbakening

Eventuele veranderingen in het beleid t.a.v. waterstanden op het Markermeer zijn niet meegenomen. De studie is uitgevoerd voor het traject Trintelhaven-Lelystad, dijkvakken 4 en 5 (zie bijlage A). Er is van de mogelijkheid uitgegaan om aldaar over ca. 10 km lengte parallel aan de dijk golfbrekers aan te leggen of een voorland voor de dijk aan te brengen. Dit tracé is genoemd als een mogelijke locatie voor een oermeeras of wat meer kleinschalige natuurontwikkeling. Deze afbakening is in overleg met de opdrachtgever tot stand gekomen.

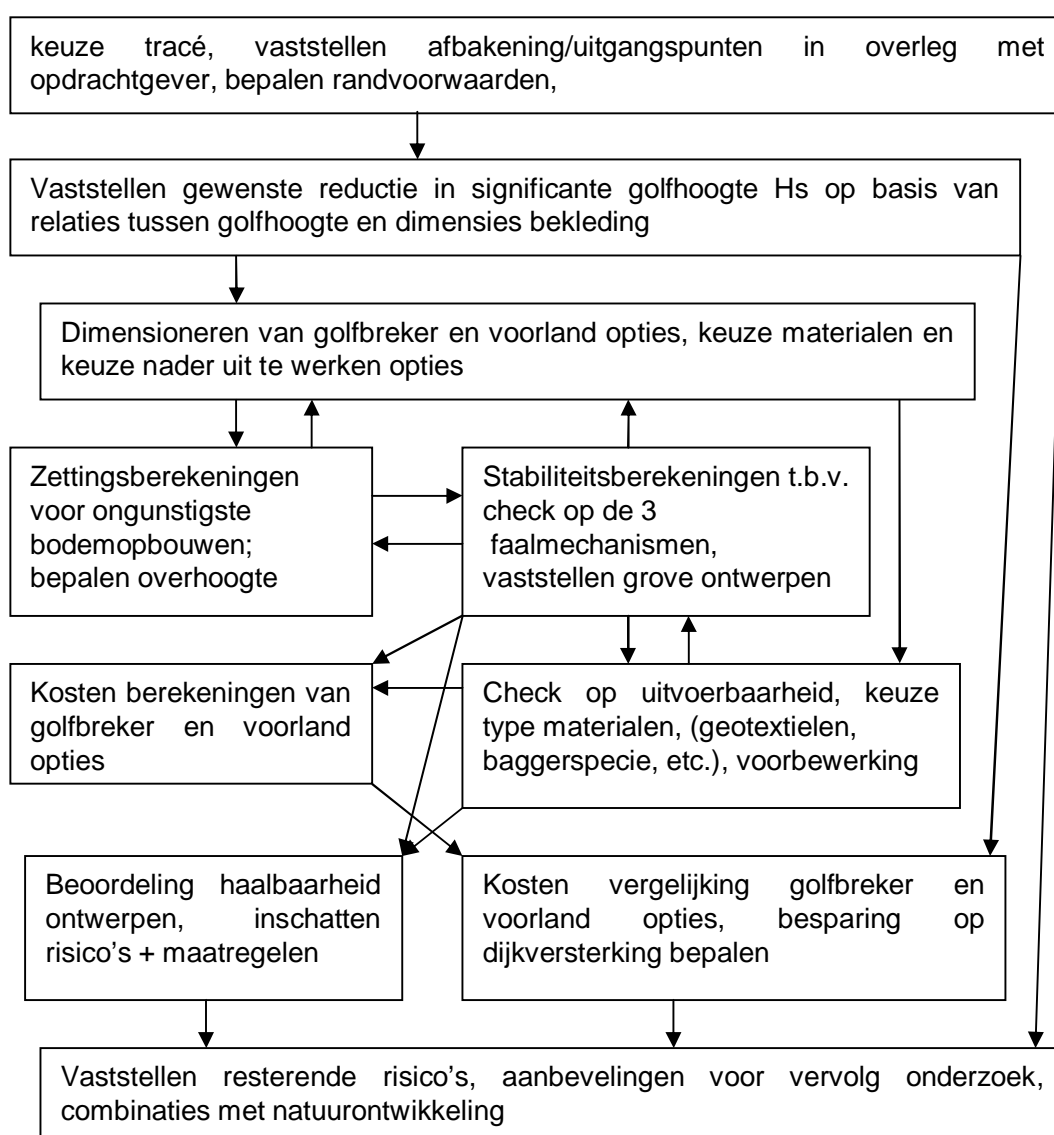
## 1.4 Leeswijzer

De onderzoeksvraagstelling is gegeven in hoofdstuk 1. Hoofdstuk 2 geeft de aanpak bij het beantwoorden van de onderzoeksvragen. De resultaten worden gegeven in hoofdstuk 3. Een kostenvergelijking is gemaakt in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 worden de antwoorden op de onderzoeksvragen besproken en tevens de resterende risico's. Tot slot volgen aanbevelingen in hoofdstuk 6.

## 2 Aanpak studie golfbreker en voorland opties

### 2.1 Aanpak

De aanpak is weergegeven in het stroomdiagram in figuur 2.1. Hier volgt een toelichting op hoofdlijnen en in de volgende paragrafen een nadere toelichting. Deze studie betreft een haalbaarheidsstudie en het doel was niet al te komen met een uitgewerkt ontwerp. Tevens had deze studie tot doel risico's op de diverse deelaspecten te inventariseren en in te schatten.



Figuur 2.1 Aanpak op hoofdlijnen met de diverse deelaspecten.

Uit figuur 2.1 volgt dat er een sterke interactie is tussen de diverse deelaspecten. Dit blijkt ook uit de nadere omschrijving van deze aspecten in dit hoofdstuk. Er is bijvoorbeeld uitgegaan

van de resultaten uit verkennende berekeningen voor de beschrijving van hoe de uitvoeringstechnische haalbaarheid is onderzocht. Er is tijdens het proces ook met voorlopige ontwerpvarianten gewerkt. Een volledig op alle deelaspecten uitgebalanceerd ontwerp was op basis van deze studie nog niet mogelijk.

## **Toelichting bij figuur 2.1**

### *Uitgangspunten en randvoorwaarden*

Eerst zijn de randvoorwaarden en uitgangspunten vastgesteld ten behoeve van het dimensioneren van de golfbreker en voorland opties. Voor het dimensioneren is uitgegaan van de golftrandvoorwaarden en bodemligging bij Hydra-M uitvoerpunt 310 (zie par. 2.2). Vervolgens is de vereiste veiligheidsnorm voor de golfbreker, resp. voorlandconstructie bepaald, analoog aan de berekeningswijze voor de Houtribdijk (zie par. 2.2). Dit omdat de golfbreker/voorland constructie met de dijk een waterkerend geheel vormt, waarbij er vanuit is gegaan dat als de golfbreker bezwijkt, de golfaanval op de dijk groter wordt en dan ook de dijk gevaar loopt te bezwijken. De dijk in dit waterkerende geheel is dus niet in staat om een 1/10.000 jaar storm te keren, aangezien de golfbreker resp. het voorland de golfaanval beperkt en in de dijkversterking hier al rekening mee is gehouden. Er is niet gekeken naar mogelijke combinaties met reststerkte.

### *Vaststellen gewenste reductie in golfhoogte*

Voor dijkvak 4 is nagegaan hoeveel besparing op de dimensies van de bekleding mogelijk is, zoals reductie van de dikte, hoogte bovenbegrenzing en beperking van overslag, zie par. 2.3).

### *Dimensioneren en selectie nader uit te werken opties*

Aangenomen is dat de golfbreker niet meer dan 50 tot 100 m uit de teen van de dijk ligt, en ook is aangenomen dat de golfbreker niet dicht bij de dijkteen ligt dan op een afstand van 20 meter in verband met effecten van mogelijk zijdelings wegdrukken van de ondergrond richting de dijk. Voor het voorland is een minimale breedte van ca. 50 meter voorzien.

Vervolgens is er gedimensioneerd, waarbij de eis is gesteld dat de golfremmende werking van respectievelijk de golfbreker en het voorland gegarandeerd is onder maatgevende omstandigheden; dat is een 1:10000 jaar storm. Ook zijn eisen gesteld aan het schadeniveau bij een storm die 1:100 jaar voorkomt. De aanpak is nader omschreven in paragraaf 2.4.

Er zijn diverse ontwerpen mogelijk, waaruit de meest wenselijke zijn geselecteerd op basis van de te verwachten zetting en stabiliteit en de mate van horizonvervuiling. In eerste instantie is een klassieke golfbreker ontworpen, in tweede instantie is ontworpen voor een ondoorlatend veronderstelde kern met geotextiele tubes, waarbij de opbouw van de stenen deklaag en de te gebruiken steensorteringen zijn berekend (zie paragraaf 2.4). Een golfbreker opgebouwd uit alleen geotextiele tubes lijkt voor het beoogde doel niet haalbaar, gezien de kwetsbaarheid van de elementen. Te denken valt aan UV belasting, of beschadiging door drijfhout of een aanvaring.

### *Zettingsberekeningen*

Vervolgens is voor de meest ongunstige grondopbouwen van respectievelijk dijkvakken 4 en 5 nagegaan hoe het zettingsverloop is in de planperiode van 50 jaar en hoeveel restzetting er na 50 jaar nog optreedt (zie par.2.5). Er is uitgegaan van een constructie bestaande uit een kern van geotextiele tubes met een deklaag van breuksteen. De ontwerpen hebben een overhoogte gekregen om voor deze zettingen te compenseren. Gedurende de planperiode van 50 jaar hoeft er dus, buiten de reguliere onderhoudswerkzaamheden om, geen extra breuksteen meer te worden bijgestort. Het streven was om een zo groot mogelijke kern

gevuld met geotextiele tubes in de ontwerpen mee te nemen, in verband met het kostenreducerend effect hiervan.

De bodemligging is bepaald aan de hand van echoloadingsgegevens en is voor dijkvak 4 vastgesteld op -4,30 m ten opzichte van NAP. Er zijn enkele controleberekeningen gemaakt voor een bodemligging van -5 m ten opzichte van NAP voor een bodemopbouw behorende bij dijkvak 5.

De bevindingen uit het aanpalende project Grondmechanisch onderzoek Houtribdijk (ref.3) zijn gebruikt om de meest ongunstige bodemopbouw voor dijkvakken 4 en 5 te bepalen.

#### *Stabiliteitsberekeningen en faalmechanismen*

Deze ontwerpen zijn doorgerekend met MSettle in combinatie met MStab, waarbij is gekeken naar de geotechnische stabiliteit van de golfbreker en het voorland (zie paragraaf 2.5). De bouwtijd is geoptimaliseerd, en de te gebruiken geotextielen zijn op twee verschillende wijzen geschematiseerd in MStab, corresponderend met de diverse mogelijkheden waarop de constructie geotechnisch zou kunnen falen. Er is onderscheid gemaakt tussen twee faalmechanismen, afhankelijk van de opbouw van de kern met geotextiele tubes. Tevens is er een inschatting gemaakt van de mogelijkheid dat een derde faalmechanisme, te weten squeezing, optreedt. Uit verkennende berekeningen voor de geselecteerde ontwerpen kwam naar voren dat er aanzienlijke overhoogten nodig zijn en dat de stabiliteit waarschijnlijk voldoende gewaarborgd is.

#### *Uitvoeringstechnische haalbaarheid, keuze materialen*

Er is vervolgens nagegaan wat de uitvoeringstechnische haalbaarheid van de ontwerpen is, en welke eisen hiervoor gesteld worden aan de constructie, dimensies en sterkte van de geotextiele tubes en welke vulling van de tubes voldoende zekerheid geeft over de uitvoerbaarheid en vormvastheid van de kern (zie par. 2.6). Er zijn op basis van deze bevindingen keuzes gemaakt t.a.v. de opbouw van de kern met geotextiele tubes, mogelijke soorten vulmateriaal en de te gebruiken typen geotextielen. Er is tevens nagegaan welke risico's zijn gemoeid met uitvoering (zie par. 2.6)

#### *Bepalen van risico's*

Vervolgens zijn de geotechnische berekeningen deels herhaald (zie par. 2.5) en is een inventarisatie gemaakt van resterende geotechnische risico's.

#### *Kosten berekeningen*

Daarna zijn de kosten bepaald voor een klassieke golfbreker, resp. voorland optie, en voor oplossingen met een kern van geotextiele tubes (zie par. 2.7). De kosten zijn vergeleken met de mogelijke besparingen op de dijkversterking. Tevens is nagegaan welke besparing het gebruik van overtollige baggerspecie kan geven.

#### *Beantwoorden van onderzoeksvragen en vervolgstappen*

Tot slot zijn de antwoorden op de in paragraaf 1.2 aangegeven vragen geformuleerd en is nagegaan welke vervolgstappen nodig zijn, gezien de resterende risico's (zie hoofdstuk 5). Er zijn conclusies geformuleerd t.a.v. de bruikbaarheid van baggerspecie en t.a.v. mogelijke combinaties met natuurontwikkelingsprojecten.

### **Samenvatting ontwerpfilosofie**

Uitgangspunt is dat de golfbreker resp. voorland tesamen met de daar achter gelegen dijk de gewenste veiligheid tegen overstroming bieden. Dit betekent dat als de golfbreker faalt, de kans erg groot is dat de dijk faalt. Er worden dus strenge eisen gesteld aan de golfbreker resp. het voorland.

De dimensies van de golfbreker resp. voorland zijn zo gekozen dat de golven in voldoende mate worden gebroken. De ondiepte van het voorland zorgt voor een reductie in golfhoogte bij de dijkteen. Deze reductie in golfhoogte moet groot genoeg zijn om wezenlijke besparingen op de aan te leggen bekleding of de benodigde dijkverhoging te bereiken.

Een reductie in golfhoogte leidt tot minder golfoploop en dus minder infiltratie van water en daardoor een lagere freatische lijn in de dijk.

Bij het ontwerp is er van uit gegaan dat de constructies niet of nauwelijks beschadigd mogen raken tijdens een maatgevende storm. Om dit te bereiken is een deklaag van breuksteen nodig. Er is ook vanuit gegaan dat de constructie niet of nauwelijks vervormt bij golfaanval.

Dit stelt eisen aan de te gebruiken materialen.

Deze uitgangspunten voor het ontwerp hebben geleid tot een type constructie wat lijkt op een klassieke golfbreker volledig bestaande uit breuksteen. Vervolgens is onderzocht of de kern van deze constructie opgebouwd zou kunnen worden uit een stapeling van geotubes, te vullen met baggerspecie.

Er is voor gekozen de afstand uit de dijk van de golfbreker klein genoeg te houden (d.w.z. max. 100 m uit de dijkteen) om de groei van windgolven achter de golfbreker beperkt te houden. Als een grotere afstand uit de dijkteen gewenst is moet de constructie zwaarder worden, zodat minder transmissie optreedt en dat dit dan in combinatie met de windgolven een vergelijkbare reductie van de golfhoogte bij de dijkteen oplevert.

In verband met de golfdempende werking en de golflengte van de inkomende golven, moet het voorland minimaal 50 meter breed zijn, met aan de voorzijde een harde verdediging. Het voorland kan ook breder worden gemaakt.

Een andere ontwerpfilosofie zou kunnen zijn dat het voorland zo breed wordt gemaakt en met zeer flauwe taluds dat ook deze onder maatgevend omstandigheden voldoende golfdemping geeft. Er zou hier wel schade aan het voorland mogen optreden. Deze variant is hier niet beschouwd.

De golfbreker, resp. het voorland moeten een overhoogte hebben, zodanig dat de golfdempende werking gegarandeerd blijft na zetting. Om de kern met geotubes zo groot mogelijk te laten zijn is hier gekozen voor een overhoogte die gedurende 50 jaar blijft voldoen, en met daarna een kleine inspanning qua onderhoud.

De grondmechanische stabiliteit van de constructies is onderzocht voor een selectie van ongunstige bodemopbouw, analoog aan de aanpak die gevolgd werd voor het stabiliteitsonderzoek van de Houtribdijk (zie ref. 3). Er zijn 3 faalmechanismen onderscheiden, die onderzocht zijn onder condities bij uitvoering en onder maatgevende omstandigheden. De in deze studie berekende zettingen zijn een bovengrens, aangezien is uitgegaan van een ongunstige bodemopbouw.

## 2.2 Hydraulische randvoorwaarden en normstelling

Uitgangspunt voor het dimensioneren van de golfbreker en voorland constructie waren de volgende condities, die kenmerkend voor dijkvak 4 zijn:

Voor Hydra-M uitvoerpunt 310 (ter hoogte van vak 4B-2, zie bijlage A) zijn de volgende hydraulische randvoorwaarden verkregen:

1:100 jaar condities uit Hydra-M

Waterstand = 0,91 m ten opzichte van NAP (incl. 0,1 m toeslag voor slingeren)

Golfhoogte  $H_{m0} = 1,90$  m (komt overeen met  $H_s = 1,9$  m)

Golfperiode  $T_p = 5,92$  s

1:10000 jaar condities uit Hydra-M

Waterstand = 1,64 m ten opzichte van NAP (incl. 0,1 m toeslag voor slingeren)

Golfhoogte  $H_{m0} = 2,34$  m (komt overeen met  $H_s = 2,3$  m).  
Golfperiode  $T_p = 6,36$  s

Voor de dimensioneringsberekeningen is uitgegaan van de  $H_s$  uit hydra-M, maar met de meest ongunstige windrichting, namelijk loodrecht op de golfbreker, resp. het voorland. Het winter peil van het Markermeer is  $-0,35$  m ten opzichte van NAP. De stijghoogte in het Pleistoceen is  $-2$  m ten opzichte van NAP.

Voor dijkvak 4 is een bodemligging bepaald op basis van peilingen en het bij toetsing gehanteerde dwarsprofiel, te weten  $-4,3$  m ten opzichte van NAP.

Voor dijkvak 5 is een gemiddelde bodemligging van  $-5$  m ten opzichte van NAP aangehouden. Een diepere bodemligging is ongunstig in verband met de extra belasting op de ondergrond, omdat de golfbreker en het voorland wel de gewenste hoogte ten opzichte van NAP moeten hebben. Voor dijkvak 5 zijn geen dimensioneringsberekeningen uitgevoerd, maar is uitgegaan van de ontwerpen voor dijkvak 4. De onzekerheid in de optredende zettingen per type grondopbouw maakte een nadere dimensionering voor dijkvak 5 minder zinvol.

De vereiste veiligheidsnorm voor de geotechnische stabiliteitsberekeningen van de golfbreker, resp. voorland constructie is bepaald analoog aan de berekeningswijze voor de Houtribdijk (zie par. 2.2). Dit omdat de golfbreker/voorland constructie met de dijk een waterkerend geheel vormt, waarbij er vanuit is gegaan dat als de golfbreker bezwijkt, de golfaanval op de dijk groter wordt en dan ook de dijk gevaar loopt te bezwijken. De dijk in dit waterkerende geheel is dus niet in staat om een  $1/10.000$  jaar storm te keren, aangezien de golfbreker resp. het voorland de golfaanval beperkt en in de dijkversterking hier al rekening mee is gehouden. Er is niet gekeken naar mogelijke combinaties met reststerkte.

Er is gebruik gemaakt van de werkwijze zoals vermeld in par. 2.3.2 uit ref.3. Bij een maatgevende storm van  $1:10000$  is aangenomen dat de kans op falen gegeven een instabiliteit van de golfbreker of voorland constructie  $1$  is en het tracé  $10$  km lang is. Dit geeft volgens ref. 3 een toelaatbare kans op instabiliteit op een bepaalde locatie van  $1,3 \text{ E-}06$  (1/jaar) en een schadefactor van  $1,091$ . Aangezien wordt uitgegaan ongunstige keuzes voor de bodemopbouw en de mate van golfterugtrekking en het waterspanningsverloop in de golfbreker is gekozen voor een schematisatiefactor van  $1,1$ . Dit geeft als eis voor de stabiliteitsfactor:  $F > 1,20$  (zie ref. 3 voor berekeningswijze).

Tevens is de stabiliteit tijdens de diverse bouwfasen beoordeeld. Gebruikelijk is hier een eis aan de stabiliteitsfactor van  $F > 1,00$ .

### 2.3 Effect reductie golfhoogte op dimensies bekleding

Voor de Markermeerzijde van de Houtribdijk is nagegaan hoeveel reductie van de golfhoogte een significante kostenbesparing op de bekledingsdikte (zuilhoogte) kan opleveren. Er is vanuit gegaan dat er een geheel nieuwe bekleding op de Houtribdijk Markermeerzijde moet worden aangelegd, aangezien de oude bekleding is afgekeurd. Een halvering van de dikte van de nieuwe bekleding kan een substantiële kostenbesparing geven.

Hieronder zijn voor een Waterbouw Asphalt Beton bekleding en een zuilenzetting aangegeven wat de relatie is tussen de benodigde bekledingslaag dikte (zuilhoogte) en de significante golfhoogte (zie tabellen 2.1 en 2.2).

#### Asfaltdijkbekleding (WAB) op keileem:

Adhv figuur 7.13 uit TRAW, WAB op klei (ref.4)	
talud 1:3	
$H_s$	dikte WAB bekleding
3	0,28
2,5	0,195
2,2	0,15
2	0,13
1,5	0,125
1	0,12
0,5	0,1

Bij  $H_s = 2,5$  m is de vereiste dikte 0,195 m  
 Voor de volgens het TRAW, tabel 7.2 vereiste minimum laagdikte van 0,15 m wordt gevonden  $H_s = 2,2$  m

Tabel 2.1 Relatie tussen dikte WAB bekleding en significante golfhoogte  $H_s$ .

Steenbekleding (hydroblocks) op granulair filter						
Volgens tabel 2, type 3 uit hoofdstuk 4 van ref. 5.						
Effectieve zuilhoogte $D_{eff}$ (m)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$\xi$	$\Delta$	$\tan(\alpha)$	L (m)
0,729386	2,5	6,3	1,657208	1,28	0,333	61,9164
0,628568	2	6,3	1,852815	1,28	0,333	61,9164
0,518874	1,5	6,3	2,139447	1,28	0,333	61,9164
0,395978	1	6,3	2,620276	1,28	0,333	61,9164
0,369119	0,9	6,3	2,762014	1,28	0,333	61,9164
0,326874	0,75	6,3	3,025634	1,28	0,333	61,9164
0,249453	0,5	6,3	3,70563	1,28	0,333	61,9164

Bij  $H_s = 2,5$  m is de vereiste dikte 0,73 m.  
 Voor de helft van deze dikte wordt gevonden  $H_s = 0,9$  m.

Tabel 2.2 Relatie tussen dikte van een open steenbekleding en de significante golfhoogte  $H_s$ .

Uit tabel 2.2 volgt dat een halvering van de dikte van de zuilenzetting wordt bereikt bij een reductie van  $H_s$  van 2,5 m tot 0,9 m. Een  $H_s$  van 2,5 m is een redelijk gemiddelde voor dijkvakken 4 en 5.

Voor asfalt is bij  $H_s = 2,5$  m de vereiste dikte 0,2 m (zie tabel 2.1). Het asfalt heeft echter als eis een minimum laagdikte van 0,15 m, in verband met de aanwezigheid van de keileem onderlaag (zie ref.4, tabel 7.2). Een verdere reductie van de golfhoogte heeft bij dit type bekleding dan ook geen extra positief effect op de toe te passen laagdikte. Verder moet er nog een check plaatsvinden op het mechanisme opdrukken ten gevolge van wateroverdruk onder de bekleding. Het kan zijn dat in verband hiermee onderaan de bekleding een grotere laagdikte nodig is.

Er zijn nog andere besparingen mogelijk (met als voorbeeld dijkvak 4):

- De vereiste bovenbegrenzing van de harde bekleding ligt op ongeveer MHW +  $H_s$ . Het talud is 1:3, dus als de golfhoogte  $H_s$  voor dijkvak 4 afneemt van 2,3 m naar 0,9 m geeft dit een besparing op de breedte van de strook harde bekleding van 4,4 meter.
- Een afname van  $H_s$  van 2,3 m naar 0,9 m geeft enkele meters verlaging van het niveau van significante golfoploop. Dit kan voordelen bieden voor die tracés waar de overslag groter is dan 1 (voor delen van dijkvak 4) of 10 l/m/s (delen van dijkvak 5). Dit alles kan vertaald worden in een substantiële besparing op de kosten van een nieuwe harde bekleding en mogelijk op de kosten van een dijkverhoging.
- Tevens zal onder vaker voorkomende stormcondities de breukstenen kreukelberm minder zwaar worden aangevallen, en zo is er minder onderhoud nodig.

Voor het vervolg gaan we voor dijkvak 4 uit van een gewenste reductie in significante golfhoogte  $H_s$  van 2,3 m naar 0,9 m, zodat voor de zuilenzetting een halvering van de zuilhoogte mogelijk is.

#### 2.4 Dimensioneren golfbreker en voorland constructies

De belangrijkste uitgangspunten zijn:

- Golfbreker met geotextiele tube(s) als kern;
- Buitenkant gemaakt van breuksteen;
- Ligging 50 tot 100 m vanaf teen van de dijk i.v.m. windgolven achter de golfbreker;
- Golfhoogte na passeren van golfbreker:  $H_{m0} = 0,9$  m;
- Schade bij 1:100 jr conditie: "initial", d.w.z. schadegetal  $S = 2$ ;
- Schade bij 1:10000 jr conditie: "intermediate", d.w.z. schadegetal  $S = 6$ .

Er is voor gekozen om de afstand tussen golfbreker en dijk zo te kiezen dat er geen substantiële aangroei van windgolven plaatsvindt. Hierdoor hoeft de constructie minder zwaar te worden uitgevoerd.

Golfbrekers van breuksteen zijn taaie constructies. Ze vertonen een gradueel verloop van de optredende schade bij een storm. Een bepaald schadeniveau wordt meestal gekozen dat als toelaatbaar wordt gezien. Er wordt nu aangenomen dat als onderhoudseis (weinig onderhoud) wordt gesteld dat een laag schadeniveau van 'beginnende schade' wordt geaccepteerd bij een storm die gemiddeld eens per 100 jaar voorkomt. Bij een storm die gemiddeld eens per 10.000 jaar voorkomt wordt aangenomen dat een schadeniveau van 'gemiddelde schade' wordt geaccepteerd. Bij de laatste verplaatsen er redelijk wat stenen, maar is de golfremmende werking van de golfbreker onder maatgevende omstandigheden nog wel gegarandeerd.

De ontwerpwaterstand is maatgevend voor de golfoverslag. Voor de stabiliteit van de teen en de lagere gedeeltes van het talud worden ook lagere waterstanden meegenomen.

Enkele aannames zijn:

- Grootste steensortering direct toe te passen op geotextiel: 10-60 kg als onderlaag;
- Dichtheid steen 2650 kg/m<sup>3</sup>;
- Loodrechte golfaanval op de golfbreker.

#### Bepaling dimensies

## *Kruinhoogte / breedte*

De transmissie van golven wordt bepaald door kruinhoogte, kruinbreedte, en in mindere mate door de helling van de taluds en de gebruikte materialen voor de kern en toplagen.

Er zijn geen transmissieformules gevonden voor lage (d.w.z. met een kruin rond de waterlijn) golfbrekers met een kern van geotextiele elementen (geocore). Recente metingen aan een geocore golfbreker geven aan dat voor een hoge geocore golfbreker de golftransmissie minder is dan een permeabele golfbreker, maar dat het verschil verdwijnt voor lagere en onderwater golfbrekers. Daarom worden formules voor permeabele golfbrekers gebruikt voor het inschatten van de transmissie, te weten d'Angremond & De Jong (ref. 6) voor golfbrekers met een smalle kruin, en Briganti et. al (ref. 7) voor golfbrekers met een wijde kruin.

De resulterende ontwerpopties voor een golfhoogte reductie van  $H_s = 2.3$  m naar 0,9 m zijn gegeven in par. 3.1.

## *Steengrootte toplaag*

Voor golfbrekers met een lage kruin en een geocore zijn geen formules gevonden. Daarom wordt de formule van Van der Meer (ref. 8) gebruikt voor de steengrootte op een hoog talud met ondoorlatende onderlaag. Dit kan als een bovengrens worden gezien van de schade aan een lagere golfbreker, waarbij over het algemeen minder schade ontstaat omdat een deel van de golfenergie over de golfbreker heenslaat. De kruin van de profielen die bekeken worden steekt nog steeds mogelijk uit het water bij reële waterstanden (ook lagere waterstanden dan de ontwerpwaterstand kunnen optreden). De schade aan lage golfbrekers wordt pas significant minder dan bij hoge golfbrekers zodra de kruin onder water ligt. Dat is bij de meeste huidige alternatieven dus nog niet het geval.

## *Filterlagen*

Voor de filterlagen worden de standaard regels gebruikt dat het steengewicht van de eerste filterlaag niet kleiner mag zijn dan maximaal  $1/15^e$  van het gewicht van de toplaag.

## *Teen*

Hiervoor zijn enkele oriënterende berekeningen met BREAKWAT (ref.9) uitgevoerd. Een 60-300 kg gradering lijkt stabiel.

## **Alternatieven dimensies buitenkant ivm golftransmissie**

Uitgaande van de golf die doorgelaten mag worden dient de golfbreker zekere dimensies te hebben (breedte, hoogte, helling). Een golfbreker met een kruin die bij het normale meerpeil onder water ligt is niet mogelijk. Ongeacht de breedte zal deze golfbreker niet de benodigde golfremmende werking hebben.

Uit de diverse varianten zijn de meest wenselijke geselecteerd op basis van de te verwachten zetting en stabiliteit.

## **Klassieke golfbreker**

Als referentie voor de kostenberekeningen is een volledig uit stortsteen opgebouwde variant gehanteerd. Hierbij kan de kern vervangen worden door 5-40 kg breuksteen of andere goedkopere steensoort.

## **Rekening houden met zettingen**

Er zijn vervolgens ontwerpen gemaakt met een overhoogte en steilere taludhellingen dan de uiteindelijk beoogde. Door de zetting gedurende de periode na aanleg zullen de taludhellingen minder steil worden en ongeveer gelijk worden aan die voor welke de golfreductie is berekend (zie ook par. 2.5).

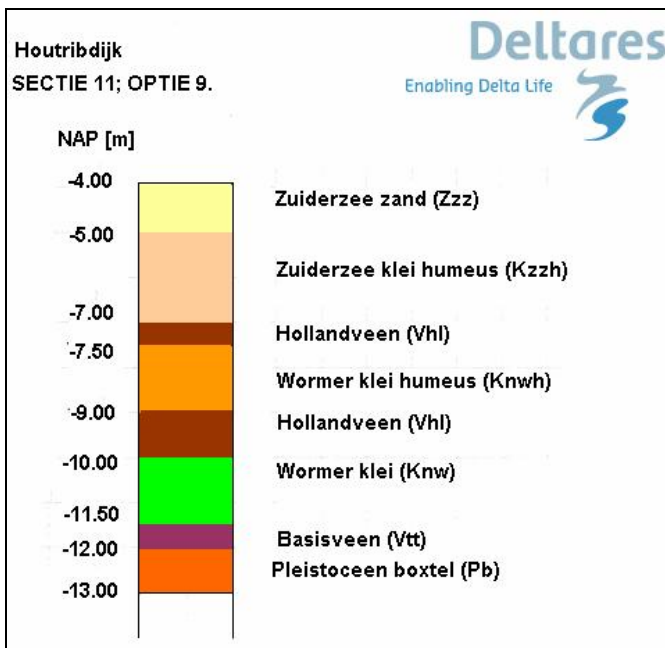
## 2.5 Geotechnische berekeningen

In paragraaf 2.4 is beschreven hoe men komt tot de vereiste afmetingen van de voorkeursvarianten van de golfbreker en het voorland en is er aangegeven hoe de afmetingen, opbouw en sortering van de breukstenen bestorting zijn bepaald.

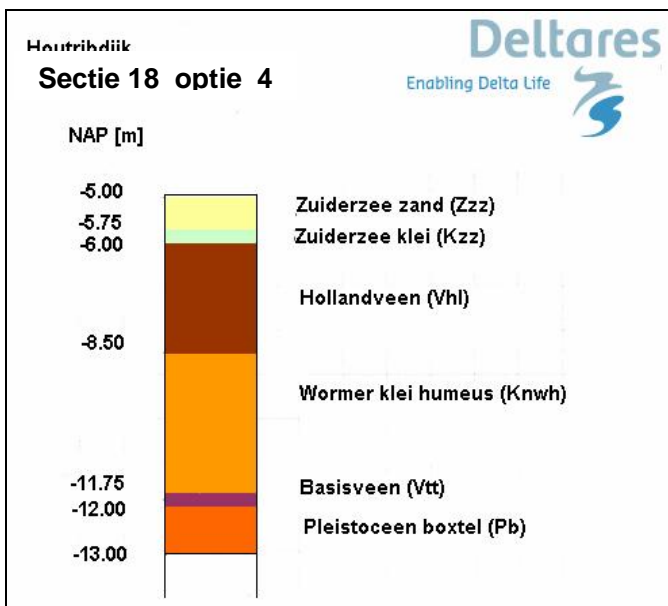
Vervolgens is voor de voorkeursvarianten nagegaan welke zetting er optreedt en de grondparameters uit ref. 3 zijn op basis van expert judgement bijgesteld. Het betreft de zettingsparameters. Er is gewerkt met bodemopbouw sectie 11, scenario 9 voor dijkvak 4 en sectie 18, scenario 4 voor dijkvak 5. Dit resulteerde in de parameters zoals gegeven in tabel 2.3. Deze geselecteerde bodemopbouwen zijn die welke de meest ongunstige stabiliteitsfactoren geven, zoals eerder bekend n.a.v. de studie grondmechanisch onderzoek Houtribdijk (ref. 3). De bodemopbouwen zijn gegeven in figuren 2.2 en 2.3.

	$\gamma$ nat [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma$ dr [kN/m <sup>3</sup> ]	MSettle input		MStab input				
			Cp	Cs	OCR	Cp'	Cs'	c'	Phi
Zuiderzee zand	18,5	17	800	1E+09	1,5	200	1E+09	0,3	25
Zuiderzee klei	16	16	84	1E+09	1,5	21	125	1,1	20
Zuiderzee klei zandig	17	17	2000	1E+09	1,5	500	60	0,8	22
Zuiderzee klei humeus	14	14	50	1E+09	1,5	12,5	70	0,6	24
Wormer zand	18	18	800	1E+09	1,5	200	1E+09	0,8	23
Wormer klei	14	14	50	1E+09	1,5	12,5	70	1,1	21
Wormer klei zandig	16	16	84	1E+09	1,5	21	125	0,8	22
Wormer klei humeus	13	13	40	1E+09	1,5	10	60	0,8	21
Hollandveen	10	4,5	25	1E+09	1,5	6,25	35	1,1	25
Basisveen	11	12	33,2	1E+09	1,5	8,3	50	1,1	22
Pleistoceen:	-	-	-	-	-	-	-	1,1	24
Steen:	20,2	16,2	-	-	-	-	-	0	35
Geotextiele tube zand	20	18	-	-	-	-	-	24	30

Tabel 2.3 Gehanteerde parameters bij zettings- en stabiliteitsberekeningen



Figuur 2.2 Maatgevende bodemopbouw voor dijkvak 4



Figuur 2.3 Maatgevende bodemopbouw voor dijkvak 5

Uitgangspunt is geweest dat de hoogte van de golfbreker resp. het voorland na zetting gedurende 50 jaar aan de norm voldoen, dus voldoende golfreductie leveren. Hiertoe krijgen de golfbreker en het voorland een overhoogte, die iteratief is bepaald. Voor de periode na 50 jaar is gecontroleerd of de resterende restzettingen klein zijn, in verband met het benodigde onderhoud. Er is aangenomen dat na 50 jaar een maximale restzetting mag optreden van 0,02 m p/j. Dit lijkt een redelijke veronderstelling omdat dan 1 maal in de 5 á 10 jaar moet worden bijgestort.

Vervolgens zijn grove ontwerpen van de voorkeursvarianten gemaakt inclusief de benodigde overhoogte. De overhoogte is op de hoogte van de kern met geotextiele tubes gezet, en met een ongewijzigde dikte van de breuksteen deklaag. Hierbij zijn de taludhellingen in het begin

steiler opgezet en zullen t.g.v. de zetting minder worden. Er is ook gerekend met een funderingsmat, die zorgt voor voldoende lastspreiding en stabiliteit.

### Faalmechanisme 1 voor kern met één grote geotube

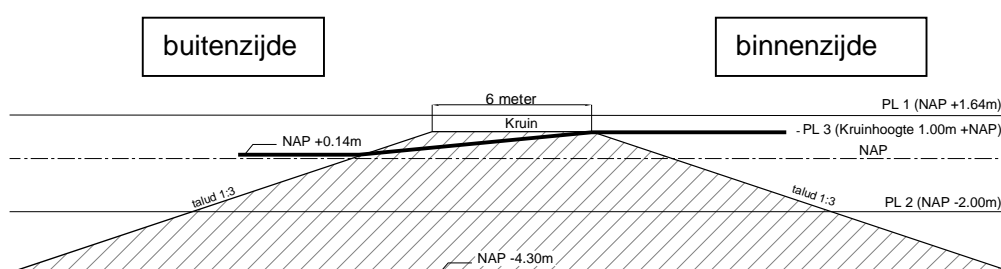
In eerste instantie, voordat de uitvoeringstechnische haalbaarheid werd onderzocht is er van uit gegaan dat er één grote geotextiele tube in de kern zit, met als faalmechanisme dat de basis van de geotextiele tube op trek belast wordt ten gevolge van het zijdelings wegzakken van de geotextiele tube (zie voorbeeld in figuur 2.5). Dit kan alleen gebeuren als de ondergrond niet sterk genoeg zou zijn. De sterkte van het doek is met een veiligheidsfactor van 3 meegenomen in de cohesie van de geotextiele tubevulling. Tevens is voorzien dat er een funderingsmat zal worden aangebracht. Deze is in de berekeningen als een apart geotextiel meegenomen. Voor de geotextiele tube vulling is aangehouden dat hiervoor zand wordt gebruikt met een hoek van inwendige wrijving  $\phi$  van  $30^\circ$ . De cohesie is verhoogd van 0 naar 24 kPa over een hoogte van 2,80 meter, in verband met de treksterkte van de geotextiele tube (gesteld op 200 kN/m; dit geeft een cohesie  $c' = 200 \text{ kN/m} / (\text{veiligheidsfactor } 3) / 2,8 \text{ m} = 24 \text{ kPa}$ ). De hoogte van de geotube in de kern is 2,80 meter verondersteld, waarbij in eerste instantie geen tubes worden gestapeld.

Er zijn gecombineerde MSettle en MStab berekeningen uitgevoerd, waarbij is aangehouden dat de maximale bouwtijd 1 maand is. Er zijn ook berekeningen gemaakt met een bouwtijd van 5 dagen. Op diverse tijdstippen is de stabiliteit van de constructie gecontroleerd, waarbij de eis tijdens de bouwfase is dat de stabiliteitsfactor  $F$  groter is dan 1,00, en bij golfterugtrekking onder maatgevende omstandigheden dat  $F$  groter is dan 1,20. Onderzocht is welke treksterkte van het geotextiel en de funderingsmat nodig zijn.

Hierbij is ook rekening gehouden met de vervormingen in de ondergrond die zullen ontstaan door de zettingen in de tijd. Een voorbeeld van de schematisatie is gegeven in figuur 2.5.

### Waterspanningen

De waterspanningen zijn als volgt geschematiseerd (zie figuur 2.4).



Figuur 2.4 Verloop in stijghoogte voor golfbreker bij maximale golfterugtrekking. PL = "phreatic level"

PL lijn 2 geldt voor het pleistocene zand, PL lijn 1 (niveau maatgevend hoog water) geldt voor de onderzijde van het Zuiderzeezand (drukvariaties t.g.v. golven zijn op deze diepte klein geworden) en PL lijn 3 (golfterugtrekking) geldt voor de bovenzijde van het Zuiderzeezand en de golfbreker constructie. Over de relatief ondoorlatende grondlagen tussen het Zuiderzeezand en het pleistocene zand is geïnterpoleerd tussen PL lijn 1 en PL lijn 2. Dit is een conservatieve benadering.



### **Bouwfasering**

Bijlage B geeft in de rechter kolom een beschrijving van de gehanteerde bouwfasering bij de diverse berekeningen.

### **Combinaties van belastingen**

Aan het eind van de planperiode, na 50 jaar is de stabiliteit onder 1:10000 jaar stormcondities bepaald. Dit is na 50 jaar gedaan, omdat het gebruik is om eerst de waterspanningen ten gevolge van de ophoging te laten dissiperen. Dit is gebruikelijk voor dijken (zie pagina's 45 en 46 uit ref. 16), en is hier overgenomen voor de golfbreker.

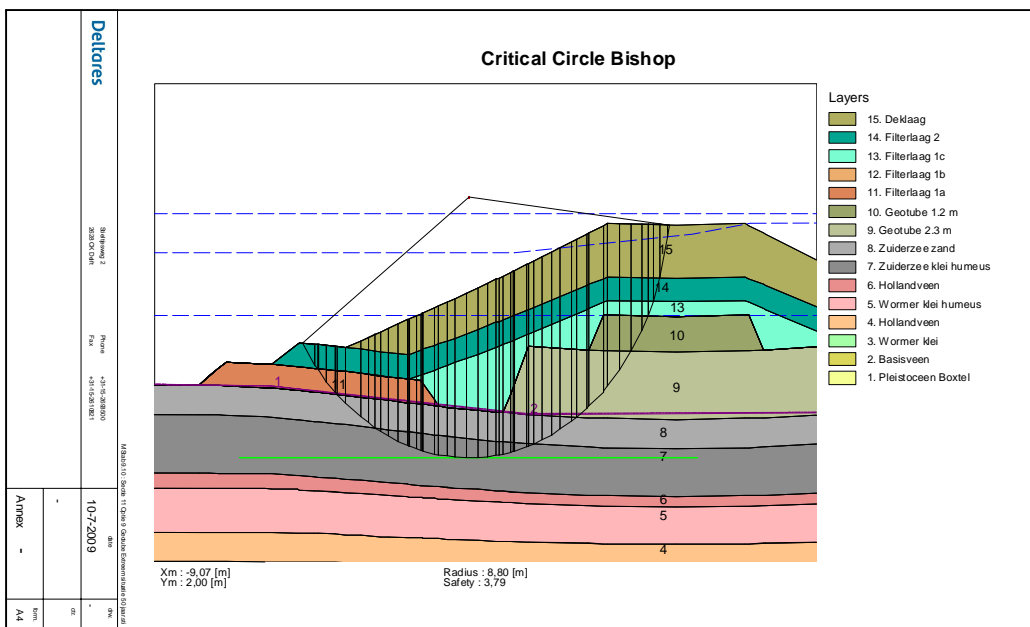
Vervolgens is na het gereed komen van het advies over de uitvoeringstechnische haalbaarheid een optimalisatie gedaan van de taludhelling en bouwtijd.

Uit het advies t.a.v. de uitvoeringstechnische haalbaarheid volgde ook dat de kern zal moeten worden opgebouwd uit een stapeling van geotextiele tubes. Dit geldt voor zowel de golfbreker als de voorland optie. Aangezien uit de verkennende berekeningen blijkt dat de stabiliteit van de golfbreker bij een gefaseerde bouwtijd voldoende is en de golfbreker ook onder maatgevende condities voldoet, is verder niet gerekend aan de stabiliteit van de constructie van het voorland. De stabiliteit van deze constructie is gunstiger dan die van de golfbreker.

### **Faalmechanisme 2 bij stapeling van geotubes**

Voor het geoptimaliseerde ontwerp met aangepaste taludhelling en stapeling van geotextiele tubes is gerekend aan het volgende faalmechanisme (zie het voorbeeld in figuur 2.6):

Voor de voorkeursvariant van de golfbreker is de kern van onder naar boven opgebouwd uit 3 geotextiele tubes met een vulhoogte van 2,40 m, met daarbovenop 3 tubes met een vulhoogte van 1,20 m. Het glijvlak in figuur 2.6 gaat door het grensvlak van de buitenste tube met de naastgelegen tube in de bovenlaag. Er is vanuit gegaan dat de onderste tube aan de buitenzijde zich naar links verplaatst, zodat de bovengelegen tube richting de vrijgekomen ruimte beweegt. De wrijving tussen de geotextielen is geschematiseerd met een hoek van inwendige wrijving  $\phi$  van  $25^\circ$ , conform ref.11. Voor de vulling van de tubes is zand gebruikt, waarvan de  $\phi$  is verlaagd naar  $25^\circ$ .



Figuur 2.6 Voorbeeld van schematisatie faalmechanisme gestapelde tubes

De volgende bouwfases zijn uiteindelijk aangehouden (zie figuur 2.6 en bijlage B):

De tweede laag tubes wordt na 14 dagen op de eerste laag gebracht. Na 28 dagen wordt de bestorting in 1 keer gebracht. Dit is redelijk conform de te verwachten uitvoering, waarbij voorschrijdend langs het traject steeds met ploegen de diverse handelingen worden uitgevoerd (zie ref.12). T.a.v. het gebruik van baggerspecie als vulling is eerst gekeken naar de uitvoeringstechnische haalbaarheid bij diverse samenstellingen van de specie. Uit ref.13 volgt dat de samenstelling van de baggerspecie, met name het zandgehalte, zeer bepalend is voor de geotechnische eigenschappen, zoals sterkte, snelheid van consolidatie, en de zetting. De begindichtheid is ook zeer bepalend. De bouwfase inclusief, indien mogelijk, het navullen van de tubes is bepalend voor de begindichtheid van de specie.

Voor de resulterende optimale baggerspecie vulling, waarbij te verwachten is dat dit uitvoeringstechnisch kan, is nagegaan hoeveel klink van de geotextiele tube zou kunnen optreden.

Faalmechanisme 2 is alleen voor bodemopbouw sectie 11, scenario 9 doorgerekend.

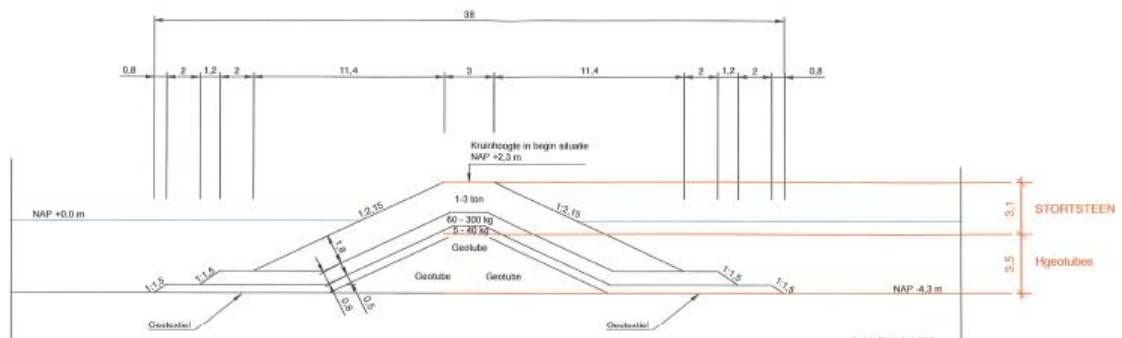
De hydraulische randvoorwaarden zijn gelijk aan die voor faalmechanisme 1.

### Faalmechanisme 3: squeezing

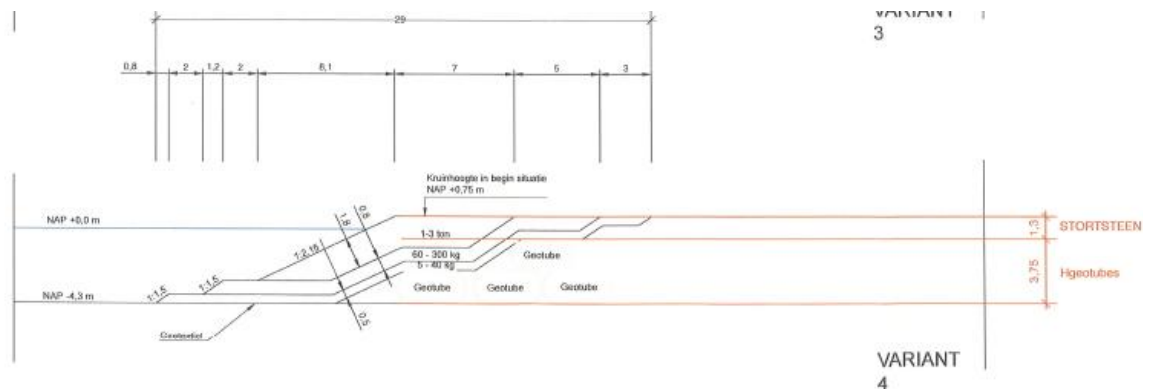
Een derde faalmechanisme is squeezing, d.w.z. dat een deel van de samendrukbare grondlagen zijdelings naar buiten wordt weggeperst, ten gevolge van het gewicht van de golfbreker of het voorland. Squeezing treedt vooral op tijdens de bouwfase. Dit risico is globaal ingeschat op basis van de te verwachten ongedraineerde sterkte van de grondlagen. Hierbij kan het aan de oppervlakte gelegen Zuiderzeezand een stabiliserend effect hebben.

## 2.6 Uitvoeringstechnische haalbaarheid en eisen aan constructie

Voor twee voorlopige ontwerpvarianten (zie figuren 2.7 en 2.8) heeft het ingenieursbureau Promeco B.V. de uitvoeringstechnische haalbaarheid onderzocht (zie ref.12). Verdere optimalisatie van deze ontwerpen is mogelijk en dit is vervolgens ook gedaan t.b.v. de geotechnische berekeningen.



Figuur 2.7 Grof ontwerp van een smalle golfbreker variant (variant-3 in tabel 2.4)



Figuur 2.8 Grof ontwerp van de voorland optie, met harde verdedigingsconstructie (variant-4 in tabel 2.4)

Voor de studie op uitvoeringstechnische haalbaarheid is bodemopbouw sectie 11, scenario 9 (maatgevend voor dijkvak 4, zie figuur 2.2) gebruikt. Bodemopbouw sectie 18, scenario 4 is gebruikt t.b.v. het bepalen van de mogelijke verschilzettingen waarmee Promeco rekening heeft gehouden. Voor deze grondopbouw zijn geen stapelingen van geotubes beschouwd (zie ook bijlage B).

Het golfbreker ontwerp uit figuur 2.7 is dus anders dan die waarvoor de uiteindelijke geotechnische berekeningen zijn gedaan: de kruin is 3 m breed i.p.v. 6 m en de taludhelling is steiler te weten 1:2,15 i.p.v. 1:2,3.

Qua hoogte is deze golfbreker nog niet optimaal, maar voor dit onderdeel uit de haalbaarheidsstudie wel bruikbaar. Op basis van eerder uitgevoerde verkennende berekeningen waarbij de taludhelling en de bouwtijd is gevarieerd, kan de geotechnische stabiliteit tijdens aanleg worden beoordeeld. Deze is voldoende gebleken.

Onderstaande uit geotechnische berekeningen volgende ontwerpsspecificaties zijn aan Promeco meegegeven (zie tabel 2.4).

**DELTAIRES - HOUTRIBDIJK**  
**uitgangspunten ontwerp , memo 2 april 2009 (J.v.d. Berg)**  
 versie-5 dd. 20-4-09

golfbreker variant-3 (golfbreker)	kruin bij aanleg [m NAP]	H geotube bij aanleg [m]	zetting 1 jr [m]	kruin na 1 jr [m NAP]	tot. Zett 50 jr [m]	kruin na 50 jr [m NAP]
sectie11, optie 9	+2,30	3,50	0,47	1,83	1,16	+1,00

golfbeker Variant-4 (voorland)	kruin bij aanleg [m NAP]	H geotube bij aanleg [m]	zetting 1 jr [m]	kruin na 1 jr [m NAP]	tot. Zett 50 jr [m]	kruin na 50 jr [m NAP]
sectie11, optie 9	+0,75	1,91 / 3,75	0,35	0,40	0,87	-0,13

3,75 = H geotubes, gestapeld

Tabel 2.4 Ontwerpspecificaties als uitgangspunt bij nader ontwerp

De zettingen zijn fors, aangezien gerekend is met de meest ongunstige bodemopbouw scenario's. Er is een schatting gemaakt van de maximaal te verwachten verschilzettingen over een typische lengte van 50 m van de geotextiel tube. Deze verschilzettingen geven trek in het doek. Uit een vergelijking van de zettingen bij resp. de grondopbouw sectie 11, scenario 9 en sectie 18, scenario 4 is ingeschat dat de verschilzettingen over een afstand van 50 meter niet meer dan  $\pm 1$  m zullen bedragen (zie par. 3.2). Dit is van belang in verband met de trek die moet worden opgenomen door de geotextiele tubes.

Op basis van deze gegevens is door Promeco samen met ten Cate aangegeven welk type funderingsmat en type geotextiele tubes gebruikt zouden kunnen worden.

Er is nagegaan of de aangenomen treksterktes in de geotechnische berekeningen kleiner of gelijk zijn aan de door Promeco en ten Cate afgegeven specificaties. Dit is in orde gebleken. Deze keuzen t.a.v. type geotextielen is gecombineerd met een advies over de samenstelling van de gewenste vulling van de geotextiele tubes. Er is tevens nagegaan in hoeverre baggerspecie gebruikt kan worden, en welke mogelijke voorbewerkingstappen hierbij nodig zijn.

Vervolgens is er door Promeco een stappenplan gemaakt t.a.v. de fasering in uitvoering, waarop de kostenramingen zijn gebaseerd (zie par. 3.3). Gekoppeld hieraan zijn mogelijke faalscenario's en aandachtspunten aangegeven. Er zijn conclusies geformuleerd t.a.v. de haalbaarheid van dit grove ontwerp en welke onzekerheden er nog zijn (zie par 5.2) . Er is vervolgens een voorstel de aanpak voor een vervolgstudie naar de uitvoerbaarheid gedaan.

## 2.7 Kosten van diverse varianten

Op basis van de eisen aan de opbouw van de constructie en de veronderstelde wijze van uitvoering, de weersomstandigheden en de bouwtijd zijn de kosten berekend van de volgende varianten:

Variant-3: smalle golfbreker (zie figuur 2.7):

- geotextiele tubes met zandrijke baggerspecie (zandgehalte > 85%);
- geotextiele tubes met uit hydrocyclonage afkomstige baggerspecie (zandgehalte van uitgangsmateriaal = 70%);
- golfbreker volledig opgebouwd uit stortsteen (klassieke golfbreker).

Variant-4: Voorland optie met harde verdedigingsconstructie (zie figuur 2.8):

- geotextiele tubes met zandrijke baggerspecie (zandgehalte > 85%);
- geotextiele tubes met uit hydrocyclonage afkomstige baggerspecie (zandgehalte van uitgangsmateriaal = 70%);
- golfbreker volledig opgebouwd uit stortsteen (klassieke golfbreker).

Door Promeco zijn ook varianten met een 50% dunnere stortsteen laag doorgerekend, waarbij dezelfde hoogte en breedte van de gehele constructie is aangehouden.

Indien door nader onderzoek (zie paragraaf 6.1) kan worden aangetoond dat de stortstenen laag dunner kan worden uitgevoerd, geeft deze kostenberekening aan wat de winst kan zijn.

Er zijn in dit stadium nog een groot aantal onzekerheden, die sterk kostenbepalend kunnen zijn:

- ontwerp (kruinbreedte; dikte + zwaarte afdeklaag);
- bodemopbouw en hoogteligging;
- baggerspecie (kwaliteit, kwantiteit, beschikbaarheid);
- wel of niet voorbereiden baggerspecie (zand-/slibscheiding; hydrocyclonage);
- flocculantverbruik;
- periode van uitvoering;
- etc.

Derhalve geven de kostenramingen slechts een globaal beeld, gebaseerd op aannames en onzekerheden. De cijfers moeten met de nodige voorzichtigheid worden betracht.

Voor de kostenberekening zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

Ten aanzien van een eventuele grondverbetering is in de kostenramingen alleen voorzien in het profileren (afvlakken) van het tracé. Het aanbrengen van een cunet (indien nodig) is niet meegenomen.

In de kostenberekening voor variant-4 (vooroever) zijn de kosten voor de aanleg van het 50 m brede voorland (tussen de 'kern met geotextiele tubes' en de Houtribdijk) niet opgenomen. De calculatie heeft voor het vergelijk met alternatief-3 alleen betrekking op de aanleg van de constructie met geotextiele tubes en stortsteen.

De kosten voor de aanvoer van de benodigde baggerspecie zijn niet in de kostencalculatie meegenomen.

De kosten voor aanleg van het achterliggende voorland hangen in sterke mate af van hoe dit voorland wordt opgebouwd en welke materialen hiervoor worden gebruikt. Indien gratis baggerspecie kan worden gebruikt in combinatie met drijvende rietmatten dan kost dit per m<sup>2</sup> minimaal €5 tot €7 (voor grote werken = >2000m<sup>2</sup>).

De kostenramingen zijn geanalyseerd en er zijn conclusies getrokken over mogelijke prijsvoordelen.



### 3 Resultaten

#### 3.1 Dimensioneren

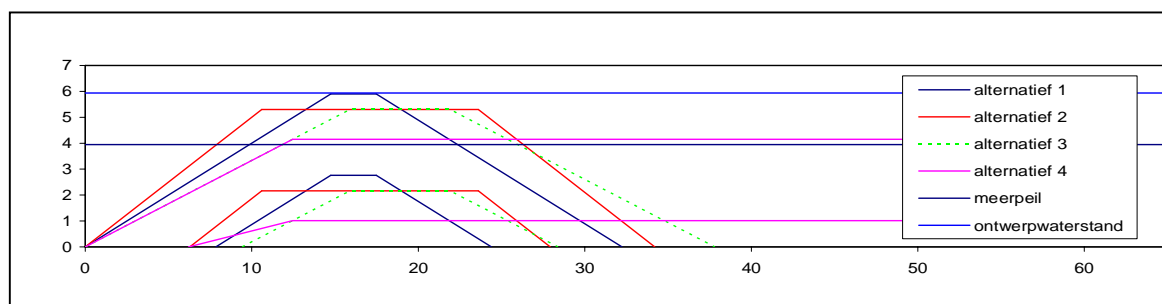
In figuur 3.1 staan een viertal alternatieven waarvan voldoende golfremmende werking verwacht wordt. De in de figuur getoonde profielen zijn de profielen na zetting, omdat de golfremmende werking gehandhaafd moet blijven. Het betreft de volgende alternatieven:

1 Een golfbreker met een smalle kruin, die qua hoogte onder ontwerpomstandigheden precies de gevraagde hoeveelheid golfenergie doorlaat (alternatief 1 in fig. 3.1).

2 Een golfbreker met een bredere kruin, die daardoor iets lager kan zijn. De kern wordt gevormd door geotextiele tubes (alternatief 2 in figuur 3.1).

3 Een golfbreker met bredere kruin t.o.v. alternatief 1 en flauwere helling. Door de flauwere helling is er misschien net een kleinere steengradering toe te passen, waardoor de top- plus filterlaag kleiner kan worden (alternatief 3 in figuur 3.1).

4 Lage golfbreker met weids voorland erachter van minimaal 50 m breed om golfreductie te maximaliseren (alternatief 4 in figuur 3.1). Deze 50 meter is orde grootte de golf lengte  $L_{op}$ . Voorland kan (deels) opgebouwd worden met rietmatten en baggerspecie en voor natuurontwikkeling gebruikt worden. Hier is ook gekozen voor flauwe helling met klein materiaal om ook geotextiele tube in de kern mogelijk te maken. Anders kan ook een golfbreker totaal van steen en steilere hellingen toegepast worden voor dit concept.



Nadere ontwerpdetails zijn gegeven in tabel 3.1.

Figuur 3.1 Golfbrekerprofielen met voldoende golfremmende werking (dikte steenbestorting is aangegeven).<sup>2</sup>

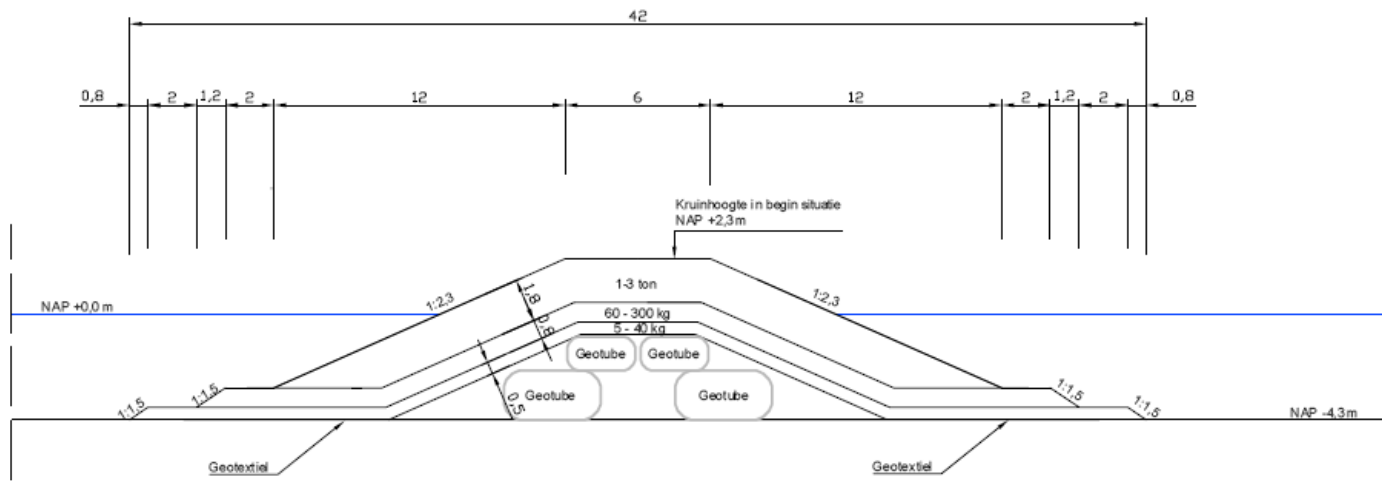
alternatief	helling <sup>4</sup> cot( $\alpha$ )	kruinhogte <sup>2</sup> m ten opzichte van NAP <sup>3</sup>	kruinbreedte <sup>3</sup> m	toplaag <sup>4</sup> ton	1e filterlaag kg	2e filterlaag kg
1	2.5	1.6	2.73	1-3	60-300	5-40
2	2	1	13	1-3	60-300	5-40
3	3	1	6	1-3	60-300	5-40
4	3	-0.15	50	1-3	60-300	5-40

Tabel 3.1 Karakteristieken van golfbrekers met voldoende golfremmende werking.

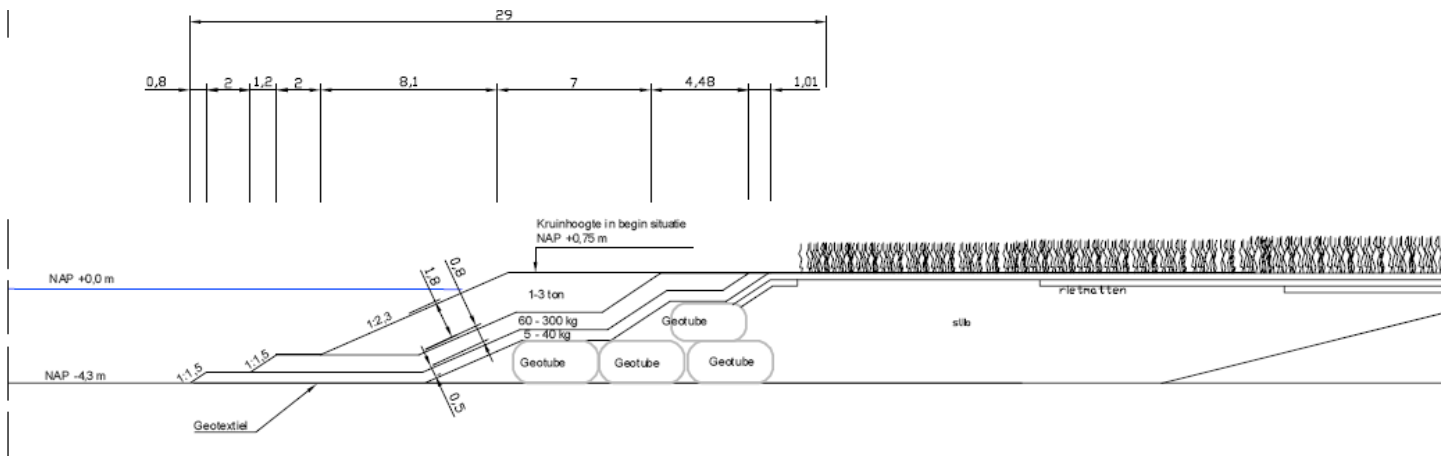
## Keuze alternatieven verdere uitwerking

Alternatieven 3 en 4 zijn gekozen en verder uitgewerkt. Het alternatief 1 met de hoogste kruin geeft (meer) horizonvervuiling en de steile helling van alternatief 2 is niet wenselijk in verband met de geotechnische stabiliteit.

De te verwachten zakkings wordt gecompenseerd door een overhoogte aan te brengen ten opzichte van de profielen in figuur 3.1 (resp. 1,3 en 0,9 m voor alternatieven 3 en 4 met bodemopbouw sectie 11 scenario 9). Hierdoor worden de hellingen na aanleg steiler. Ook onder deze hellingen moet de toplaag stabiel zijn. Alternatief 3 bleek daardoor toch niet de verwachte kleinere toplaag te kunnen krijgen. De ontwerpen staan hieronder gegeven (zie figuren 3.2 en 3.3). N.B. er zijn andere profielen gebruikt voor de kostenberekeningen (zie figuren 2.7 en 2.8).



Figuur 3.2 Alternatief 3



Figuur 3.3 Alternatief 4

## Andere overwegingen

Het ontwerp van de golfbrekers bevat enkele innovatieve aspecten, zoals de ondoorlatende kern. De gevolgen hiervan zijn zo goed mogelijk ingeschat, maar de gebruikte formules zijn niet geldig voor de combinatie van een lage golfbreker met een ondoorlatende kern. Ook de stabiliteit van de laag relatief grof steenmateriaal op het gladde geotextiel van de geotextiele tubes is niet gegarandeerd. De toplaag is zwaar omdat bij een ondoorlatende kern meer

schade optreedt. Verder kan er op het geotextiel niet al te grote steen geplaatst worden, waardoor er 2 filterlagen onder de toplaag nodig zijn. Dit leidt tot de ca. 3 m dikke laag.

Om na te gaan of dit innovatieve ontwerp voldoet, moeten praktijkervaringen, met bijvoorbeeld de vooroeverdammen bij de Houtribdijk en het Naviduct worden verzameld. Daarom wordt aangeraden om voor een definitief ontwerp de stabiliteit en golfremmende werking in een fysiek model te testen, of grotere veiligheidsmarges in het ontwerp aan te brengen.

De eerste schade bij golfbrekers treedt vaak op bij de scherpe hoeken in het ontwerp. Daarom kan ervoor gekozen worden om de scherpe hoeken bij de kruin af te ronden. Hiermee volgt de golfbreker ook beter de vorm van de geotextiele tube(s).

Er is nu gekozen voor een standaard laagdikte en steengradering. De huidige keus is redelijk conservatief, dus enige optimalisatie zou mogelijk kunnen zijn.

### **Lay-out**

Om verversing van het water achter de golfbreker van alternatief 3 te verkrijgen is het aan te raden op enkele plaatsen gaten met mogelijke overlap of plaatselijke verlagingen in de golfbreker aan te leggen. De koppen die zo ontstaan dienen met een flauwer talud en/of grotere steen aangelegd te worden.

### **Rietmatten/voorland bij alternatief 4**

Het gebruik van rietmatten als golfremmers als bij alternatief 4 is een nieuwe ontwikkeling. Deltares heeft hier net enig onderzoek naar opgestart. De rietmatten en/of baggerspecie dienen stijf genoeg te zijn om de golven te laten dempen. De aansluiting van de rietmatten op de harde constructie is ook een aandachtspunt.

## **3.2 Geotechnische berekeningen**

Uit de zettingberekeningen volgt dat voor bodemopbouw sectie 11, scenario 9, de overhoogte voor de golfbreker variant 3 1,3 m bedraagt en voor de voorland variant 4 0.9 m. Voor bodemopbouw sectie 18, scenario 4 is deze overhoogte 2,1 m voor de golfbreker variant 3 en 1,9 m voor voorland variant 4. De restzettingen na 50 jaar voldoen aan de eis dat deze kleiner moeten zijn dan 0,02 m p/j. Het verschil in zetting tussen beide grondopbouwten is  $\pm 1$  meter.

In bijlage B is een overzicht gegeven van de resultaten van de stabiliteitsberekeningen.

Hierbij is gevarieerd met bouwtijd, sterkte van bodemmat, taludhelling en bodemopbouw.

De bovenste 3 tabellen geven een overzicht van de berekeningen aan het eerste faalmechanisme (trek in geotextiel aan de basis van één grote geotextiele tube, die zijdelings deformeert en wegzakt), de onderste tabel geeft een overzicht van de berekeningen van het tweede faalmechanisme voor een stapeling van geotextiele tubes (wegschuiven van onderste tube onderin aan linkerzijde). Er is in de berekeningen geoptimaliseerd naar de sterkte van de funderingsmat. Rechts in bijlage B is de fasering van de bouw gegeven en de opbouw van de constructie. De stabiliteitsfactoren  $F$  zijn gegeven in de kolommen in het midden van bijlage B.

Er volgt voor bodemopbouw sectie 11, scenario 9 dat de uitvoeringsstabiliteit voor faalmechanisme 1 bijna altijd voldoet (ofwel  $F > 1$ ); ook bij onrealistisch snelle bouw binnen 5 dagen. Te verwachten is dat bij een realistische bouwtijd van 1 maand, de uitvoeringsstabiliteit bij beide bodemopbouwten voldoende is. Immers, voor bodemopbouw sectie 18, scenario 4 is de bodemligging – 5 m ten opzichte van NAP en kan met een

sterkere bodemmat, om de gewenste uitvoeringsstabiliteit te waarborgen, en taluds  $< 1:1,5$  een voldoende stabiliteit worden verkregen.

Voor bodemopbouw sectie 11, scenario 9 is bij een bouwtijd van 1 maand, de uitvoeringsstabiliteit voor faalmechanisme 2 voldoende. De stabiliteit bij dit faalmechanisme voor bodemopbouw sectie 18, scenario 4 is niet onderzocht. Verwacht wordt dat voor deze bodemopbouw in de berekeningen een sterkere bodemmat moet worden meegenomen dan voor bodemopbouw sectie 11, scenario 9. De bodemmat die Promeco met Ten Cate heeft gekozen is sterk genoeg voor beide bodemopbouwen. Indien nog nodig moet het bouwtempo (bouwtijd 28 dagen) wat omlaag.

Voor alle varianten volgt dat de stabiliteit onder extreme omstandigheden, bij een 1:10000 storm voldoende is, namelijk de stabiliteitsfactor  $F > 1,2$ .

Voor de in bijlage B gepresenteerde berekeningen is gerekend met een geotextiele tube vulling van zand. Uit par. 3.3 volgt dat indien gebruik gemaakt wordt van een baggerspecie vulling het zandgehalte van deze specie naar verwachting groter moet zijn dan 90 a 95%. Als de eigenschappen van deze specie in de berekeningen worden meegenomen, geeft dit ten gevolge van de grotere cohesie een betere stabiliteit. Voorbeeld: voor berekening uit tabel 1, bijlage B hebben we genomen cohesie = 34 kPa,  $\phi = 0$ , voor ongedraineerd slib. Dit geeft onder maatgevende stormcondities  $F = 3,09$ , d.w.z. 0,3 groter dan die voor een zandvulling.

Het vulproces bepaalt in sterke mate wat de dichtheid en dus sterkte is van de baggerspecie. Het derde mogelijke faalmechanisme is squeezing, welke van belang wordt als de Zuiderzeezandlaag niet dik genoeg is. Uit een eerste inschatting volgt dat het risico van squeezing niet is uit te sluiten. Nader onderzoek is nodig. Een mogelijke maatregel is het aanleggen van een cunet bestaande uit zand onder de golfbreker.

De klink van de baggerspecie in de tube zal beperkt zijn, te weten 10%, gezien het hoge zandgehalte van 90 a 95% waar hier van uit is gegaan (zie paragrafen t.a.v. uitvoeringsaspecten). Deze klink is klein ten opzichte van de onzekerheid in zetting, en is niet meegenomen.

### 3.3 Uitvoeringsaspecten

#### 3.3.1 Werkwijze

In ref.12 is de volgende werkwijze bij uitvoering aangegeven:

In deze paragraaf zal de beoogde werkwijze voor het aanbrengen van een kern met Geotextiele tubes kort worden toegelicht. De beschreven werkwijze vormt ook de basis voor de planning en kostenramingen, die verderop in dit rapport aan bod komen.

#### Vorbewerken ondergrond

Voor het aanbrengen van de golfreductor dient de bestaande waterbodem te worden voorbereid. Hierbij is een goed vooronderzoek naar bodemopbouw en hoogteligging van essentieel belang. Ter voorkoming van ongelijkmatige zettingen, ongelijke ligging en instabiliteit van de geotextiele tubes, kunnen op basis van dit vooronderzoek de volgende voorbereidingen noodzakelijk blijken:

- a] verwijderen (dikke) sliblagen en grove, scherpe materialen;
- b] profileren / uitvlakken ondergrond;
- c] grondverbetering / cunet maken (het maken van een cunet is vooralsnog niet meegenomen).

Een kleine greppel (trench) waar de tube in kan liggen komt de stabiliteit ook ten goede, zeker tijdens het vullen.

### **Aanbrengen funderingsmat en geotextiele tubes**

Nadat de noodzakelijke voorbereiding op de ondergrond zijn uitgevoerd (hier is nog niet uitgegaan van het aanleggen van een cunet), kunnen de funderingsmat en de geotextiele tubes worden aangebracht. Hierbij zal gebruik dienen te worden gemaakt van een hulpframe / -constructies om de mat plus de geotextiele tubes netjes te laten afzinken en op de ondergrond te positioneren.

### **Vullen geotextiele tubes**

De geotextiele tubes dienen te worden gevuld met zeer zandrijke specie, al of niet via voorbereiding met hydrocyclonen (afhankelijk van het type beschikbare baggerspecie). Het vuldebiet dient te worden afgestemd op de dimensionering van de tubes. Via een verdeelsysteem kunnen meerdere tubes tegelijkertijd worden afgevuld. Na ontwatering en consolidatie dienen de tubes enkele keren te worden nagevuld voor het bereiken van de gewenste eindhoogte.

Na afvullen en consolidatie van de onderste laag geotextiele tubes kan de bovenste laag op soortgelijke wijze worden aangebracht.

Voor het succesvol vullen van de geotextiele tubes in een onderwater toepassing is ervaring vereist. Het blijft specialisten werk.

Voor de eisen aan de baggerspecie wordt verwezen naar § 2.4.

### **Flocculant toediening**

Om te voorkomen dat het weefsel van de geotextiele tubes dichtslibt en ter voorkoming van vertroebeling van het oppervlaktewater, dient aan de baggerspecie een geringe hoeveelheid flocculant te worden toegevoegd. Alleen indien de baggerspecie bestaat uit puur, grof zand kan dit achterwege blijven.

Type flocculant en doseergraad dienen d.m.v. vooronderzoek te worden bepaald, zodra duidelijk is welk type baggerspecie beschikbaar is.

De dosering dient te worden uitgevoerd m.b.v. een automatische aanmaak- en doseerunit, waarbij de dosering dient te worden aangestuurd op basis van massaflow-meting (debietmeting en droge stofmeting in de baggerleiding), om over- of onderdosering te voorkomen. Ook hier is ervaring vereist.

### **Afwerken kern**

Nadat de geotextiele tubes op bovenbeschreven wijze zijn aangebracht en afgevuld, dient de gestapelde kern te worden afgewerkt met zinkstukken, bestaande uit op geotextiel gehechte wiepen. Het aanbrengen van een dergelijk zinkstuk heeft meervoudige functies:

- afdekken geotextiele tube ter voorkoming van uitspoeling. De geotextiele tubes moeten altijd geometrisch dicht zijn, om uitspoeling te voorkomen;
- voorkomen van beschadigingen aan geotextiele tubes bij aanbrengen afdeklaag van stortsteen;
- vastleggen / fixeren 1<sup>e</sup> laag stortsteen (5-40 kg).

Uit grootschalige modelproeven (Deltagootproeven) blijkt dat er weinig migratie en uitspoeling van zand optreedt in de geotextiele tubes (mits voldoende gevuld met zand).

### **Aanbrengen afdeklaag stortsteen**

Nadat de kern uit geotextiele tubes is afgewerkt en geprofileerd, kan de stortsteen laagsgewijs worden aangebracht tot de vereiste dikte.

## Werken in ploegverband

De bovenbeschreven werkwijze voor het realiseren van een golfreductor, dient (net als bij andere grote weg- en waterbouwkundige werken) te worden uitgevoerd in een aantal elkaar opvolgende werkgangen met verschillende ploegen:

- voorop de ploeg, die de voorbereiding van de ondergrond uitvoert;
- kort daarachter de ploeg, die de funderingsmat en de geotextiele tubes afzinkt;
- daarachter de ploeg, die de geotextiele tubes vult en navult;
- dan wat verder daarachter de ploeg, die (na consolidatie) de gestapelde tubes afwerkt en profileert;
- en als laatste de ploeg, die de kern van geotextiele tubes afdekt met 3 lagen stortsteen.

In de praktijk zullen meerdere ploegen tegelijk op een onderdeel werken (bijv. 3 of 4 ploegen, die bezig zijn met het vullen van de geotextiele tubes, gevolgd door 3-4 ploegen die de geconsolideerde en gestapelde tubes afwerken etc. etc.) om de voortgang en de capaciteit op peil te houden.

## Planning

Het leggen, vullen, mogelijk navullen en consolideren van een streng geotextiele tubes zal ca. 4-6 weken in beslag nemen bij een vulling met zand. Daarna kunnen de tubes worden afgewerkt en afgedekt met stortsteen. De periode dat de tubes open en bloot onbeschermd in het water liggen blijft dus beperkt tot 1 – 1,5 maand. Op basis van opgedane ervaringen kan deze periode mogelijk nog met enkele weken worden bekort.

Indien het werk met voldoende capaciteit wordt opgepakt, wordt gerekend op een uitvoeringsduur van 2 jaar voor de totale dam met een lengte van ca. 10 km.

### 3.3.2 Faalscenario's en aandachtspunten.

In ref.12 zijn de volgende faalscenario's en aandachtspunten gegeven (zie tabel 3.2):

FAALSCENARIO'S en aandachtspunten bij toepassing geotextiele tubes		maatregelen
constructiefouten	projectvoorbereiding	goede vooronderzoeken uitvoeren praktijkproef / pilotproef uitvoeren (baggerspecie- geotextiele tube - flocculant) programma van eisen vaststellen ontwerp aanpassen aan min. eisen
ondergrond	ongelijke hoogteligging	tracé inmeten profileren / uitvlakken tracé
	ongelijkmatige zettingen	vooraf tracé-onderzoek grondverbetering / stabilisatie toepassen toepassen funderingsdoek (geotextiel) korte tubes toepassen (30-50 m)
aanleg	<u>aanlegfouten - algemeen:</u>	goed bestek / werkschrijving maken door ervaren partij uitvoering door ervaren aannemer

	<p>uitvoering onder begeleiding van ervaren directie/adviseur          automatische dosering flocculant op basis van massaflow door ervaren partij          accurate positionering geotextiele tubes</p>
<p><u>geotextiele tubes plaatsen:</u>          - ongelijke ligging geotextiele tubes</p>	<p>afzinkframe toepassen / (tijdelijk) fixeren met buispalen          korte tubes toepassen (40-50 m)          cunet / grondverbetering aanbrengen</p>
<p><u>Geotextiele tubes vullen:</u>          - 'opblazen' geotextiele tubes          - uitspoelen ondergrond          - vertroebeling water /uitspoeling fijne deeltjes          - kwaliteit effluent uit tubes</p>	<p>baggerdebiet afstemmen op dimensionering geotextiele tube          toepassen funderingsdoek (geotextiel)</p> <p>juiste flocculant doseren          schone / licht-verontreinigde baggerspecie toepassen          verontreinigde baggerspecie reinigen dmv hydrocyclonage          flocculantdosering</p>
<p>- flocculantdosering is risico ivm dichtslibben weefsel geotextiele tubes</p>	<p>uitvoeren vooronderzoek flocculant-toepassing          automatische dosering flocculant obv massaflow door ervaren partij</p>
<p>- onvoldoende consolidatie sediment in tube</p>	<p>alleen zeer zandrijke specie toepassen (&gt; 90% zand)          tubes (enkele keren) indien mogelijk navullen tot max. vulhoogte</p>
<p>- onvoldoende ontwatering</p>	<p>alleen zeer zandrijke specie toepassen (&gt; 90% zand)          flocculantdosering aanpassen</p>
<p>klink in geotextiele tube</p>	<p>alleen zeer zandrijke specie toepassen (&gt; 90% zand)          tubes (enkele keren) navullen tot max. vulhoogte</p>
<p>stabiliteit geotextiele tube</p>	<p>dimensionering tube (L, Ø, vulhoogte)          alleen zeer zandrijke specie toepassen (&gt; 90% zand)          cunet aanbrengen          tubes (tijdelijk) fixeren met palen</p>
<p>stormschade tijdens aanleg</p>	<p>z.s.m. na aanleg+vullen tubes afdekken met stortsteen          ploegenwerk: leg+vulploeg voorop met kort daarachter de 'afdekploeg'</p>
<p>Geotextiel:</p> <p>- scheurvorming geotextiel</p> <p>- ontwatering geotextiel</p> <p>- uitspoeling fijne deeltjes</p>	<p>sterk materiaal gebruiken          korte tubes toepassen (40-50 m)          zo groot mogelijke waterdoorlatendheid geotextiel          alleen zeer zandrijke specie toepassen (&gt; 90% zand)          weefsel afstemmen op korrelgrootte beschikbaar sediment          flocculantdosering</p>
<p>Baggerspecie:</p> <p>- <u>algemeen</u></p> <p>- geen geschikte baggerspecie beschikbaar</p>	<p>vooronderzoek beschikbaarheid baggerspecie          alleen zeer zandrijke specie toepassen (&gt; 90% zand)</p> <p>zandwinning uit beschikbare baggerspecie door hydrocyclonage          * zand toepassen in geotextiele tube          * slib toepassen bij natuurontwikkeling achter golfreductor,          evt. in combinatie met afdekking rietmat</p>

	- verontreiniging in baggerspecie	verontreiniging door zand-/slibscheiding (hydrocyclonage) verwijderen * zand toepassen in geotextiele tube * slib indikken en storten, bijv. in IJsseloo
Flocculant / poly-electroliet (PE)	- type en dosering	flocculant-vooronderzoek automatische dosering flocculant obv massaflow door ervaren partij
	- milieubezwaarlijkheid	minst schadelijke flocc. toepassen obv vooronderzoek overdosering voorkomen door autom. dosering flocculant obv massaflow
Beheer + onderhoud	<u>tijdens aanleg</u>	tubes (enkele keren) indien mogelijk navullen tot max. vulhoogte z.s.m. na aanleg+vullen tubes afdekken met stortsteen 1e laag stortsteen fixeren op tubes mbv wiepen / zinkstukken
	<u>na aanleg</u>	beter periodiek stortsteen bijvullen dan in één keer (te) dikke laag afdeklaag (stortsteen) onderhouden c.q. bijvullen

Tabel 3.2 faalscenario's en aandachtspunten bij uitvoering

### 3.4 Nadere detaillering ontwerp

In ref.12 zijn de volgende nadere specificaties van het ontwerp gegeven:

De kern bestaat uit geotextiele tubes. Na het aanbrengen van deze kern, worden de geotextiele tubes afgedekt met een zinkstuk, bestaande uit een geotextiel met wiepen ten behoeve van het aanbrengen / fixeren van de eerste laag stortsteen (5-40 kg). Gelet op de opbouw en afwerking van de kern, zou de afwerklaag met stortsteen mogelijk minder dik en zwaar kunnen worden uitgevoerd, hetgeen zowel een gunstige uitwerking zal hebben op het voorspelde zettingsgedrag van de ondergrond als op de aanlegkosten van de golfreductor.

Bij de uitvoering dient rekening te worden gehouden met enige vormen van grondverbetering zoals het uitvlakken c.q. cunet maken t.p.v. het beoogde tracé en het aanbrengen van een funderingsmat, die op een redelijk vlakke ondergrond dient te worden afgezonken, vóór het plaatsen van de geotextiele tubes en het aanbrengen van de afdeklaag (stortsteen).

Naast het opvangen van ongelijkmatige zettingen voorkomt de funderingsmat tevens erosie van de ondergrond bij het vullen van de geotextiele tubes. Vooralsnog is Ten Cate Geosynthetics voor deze mat uitgegaan van een PET-weefsel met een sterkte van 400 kN/m1.

Een zetting in de ondergrond van 1 meter over 50 meter leidt tot een verlenging in het weefsel van circa 1 mm, ofwel een rek van 0,2% in het textiel. Deze rek kan eenvoudig door het textiel gevolgd worden omdat het breukrek-percentages ligt rond de 12% voor zowel de systemen- als het funderingsweefsel. Pas als de verlenging van het textiel groter wordt als 12% kan breuk gaan ontstaan. Mochten de lokale omstandigheden leiden tot overschrijding van deze waarden, dan is het mogelijk om een wapeningstextiel in die richting te gaan aanbrengen om zulke grote vervormingen tegen te gaan.

**Dimensionering geotextiele tubes**

Op basis van het ontwerp van Deltares voor de golfreductor, specifiek de smalle golfbreker variant 3 en voorland variant 4 (zie figuren 2.6 en 2.7), heeft Ten Cate Geosynthetics, de voor dit doel benodigde geotextiele tubes als volgt gedimensioneerd, uitgaande van een zandvulling:

**Variant-3 (golfbreker):** Stapeling van 2 types

Onderste laag:	2 tubes, parallel naast elkaar Ø 4 meter, ten behoeve van een vulhoogte van 2.40 meter Lengtes: relatief kort, in overleg: 30 – 50 m
Materiaal	: Geotube® GT 1000 M (zie bijlage C voor technische data)
Uitvoering	: voorzien van vulslurven en positioneringlussen.
Bovenste laag:	1 tube Ø 2 meter, ten behoeve van een vulhoogte van 1.20 meter Lengtes: relatief kort, in overleg: 30 – 50 m
Materiaal	: Geotube® GT 750 M (zie bijlage C voor technische data)
Uitvoering	: voorzien van vulslurven en positioneringlussen

**Variant-4 (voorland):** Stapeling met een type tube.

Onderste laag:	3 tubes, parallel naast elkaar Ø 4 meter, ten behoeve van een vulhoogte van 2.40 meter Lengtes: relatief kort, in overleg: 30 – 50 m
Materiaal	: Geotube® GT 750 M (zie bijlage C voor technische data)
Bovenste laag:	1 tube Ø 2 meter, ten behoeve van een vulhoogte van 1.20 meter Lengtes: relatief kort, in overleg: 30 – 50 m
Materiaal	: Geotube® GT 750 M (zie bijlage C voor technische data)
Uitvoering	: voorzien van vulslurven en positioneringlussen

**Bodemmat:** PET-weefsel met sterkte van 400 kN/m<sup>1</sup>

De berekeningen en de materiaalspecificaties zijn opgenomen in bijlage C en de bijlagen 5.1 en 5.2 van ref.12.

De vullingsgraad van de geotextiele tubes bedraagt in dit geval meer dan 80%. NB; dit betreft de vullingsgraad ten opzichte van de theoretische inhoud (bij bolrond). In de gegeven vorm en hoogte (half rond, ellips) bedraagt de vullingsgraad meer dan 90%. De tube wordt in de praktijk (in meerdere sessies) afgevuuld met zand tot het textiel strak staat.

**3.5 Bevindingen t.a.v. bruikbaarheid baggerspecie**

Gezien de ontwerpfilosofie zijn er eisen gesteld aan de vormvastheid van de kern en tevens moet het bouwen van een stapeling met baggerspecie gevulde geotubes uitvoerbaar zijn.

Dit heeft geleid tot een eis m.b.t. het zandgehalte van de baggerspecie (> 90%).

Dit heeft als consequentie dat voor de golfbreker en de harde verdedigingsconstructie van het voorland maar een beperkt segment van de beschikbare baggerspecie kan worden gebruikt, althans zonder voorbehandeling. Het achterliggende voorland zou wel met lutumrijke

baggerspecie, eventueel in combinatie met begroeiing en rietmatten, kunnen worden opgebouwd.

Een grove berekening leert dat er zeker 3,5 miljoen m<sup>3</sup> aan baggerspecie nodig is om een 50 m breed voorland te maken voor het betreffende tracé (4m waterdiepte, kruinhoogte + 1m NAP over een lengte van 10 km).

In ref.12 zijn de volgende overwegingen gegeven t.a.v. de als vulling van de geotubes te gebruiken baggerspecie:

In de Quicksan (ref.2) heeft Arcadis aangegeven dat er geen civieltechnische eisen (korrelverdeling, org. stofgehalte) gesteld hoeven te worden aan de baggerspecie.

Gelet op het beoogde doel (kernelementen in een golfreductor, in een toepassing ca. 4 m - waterpeil) zijn Promeco en Ten Cate Geosynthetics een andere mening toegedaan. Er dienen voor dit doel strikte eisen te worden gesteld aan de baggerspecie, waarmee de geotextiele tubes dienen te worden gevuld:

alleen zandrijke baggerspecie (naar verwachting > 90 à 95% zand) is geschikt voor het beoogde doel.

Alleen bij vulling met zeer zandrijke specie zal voldoende consolidatie optreden, en zullen de tubes stabiliseren, en zal kans op uitspoeling door golfwerking worden geminimaliseerd.

Grotere slibfracties vormen een risico, wat nader moet worden onderzocht, en deze zijn hier nog niet meegenomen.

Indien deze zandrijke baggerspecie niet voorhanden is, dient de wel beschikbare (meer slibhoudende) baggerspecie door zandafscheiding m.b.v. hydrocyclonen te worden bewerkt.

Het afgescheiden zand kan dan dienen als vulmateriaal voor de geotextiele tubes; de afgescheiden slibfractie kan eventueel via bezinking achter de golfreductor worden aangewend voor natuurontwikkeling. Mogelijk in combinatie met ideeën voor afdekking met een drijvende rietmat (Drs. Mindert de Vries – Universiteit Twente / Deltares).

Er zijn in dit stadium weinig bruikbare gegevens voorhanden over de beschikbare baggerspecie.

Aangezien er grote hoeveelheden verwerkt moeten worden, is het van groot belang hierover inzicht te krijgen zodat een juiste afweging van technieken en kosten kan worden gemaakt. Het onderzoek dient gericht te zijn op de kwantiteit, de kwaliteit (fysische en chemische samenstelling) en het tijdstip / periode van de beschikbaarheid van de baggerspecie.

### **T.a.v. de beschikbaarheid en toelaatbare verontreinigingsgraad van het slib het volgende:**

In de kostenberekeningen is ervan uitgegaan dat de baggerspecie gratis wordt geleverd, wat conform het vigerende beleid is dat stelt dat de kosten voor transport, opslag en eventueel bewerking van de baggerspecie (bijv. zandscheiding) voor rekening komen van de ontdoener. Het is onzeker of geschikte baggerspecie door het Ruimte voor de Rivier project kan worden geleverd, vandaar dat is onderzocht welk type sediment in het Markermeer voor handen is. Uitdiepen van het Markermeer kan een goede maatregel zijn om lokaal de ongewenste vertroebeling tegen te gaan.

Tussen Trintelhaven en Lelystad is de informatie over de waterbodem vrij beperkt. Tussen trintelhaven en de bocht bij Lelystad is er helemaal geen informatie. In dit gebied vinden geen lozingen plaats en geen instroom van verontreinigd water zoals van de Rijn of IJssel. Er is ook vrijwel geen scheepvaart. Daardoor bevindt zich in het Markermeer in het algemeen een nauwelijks verontreinigde waterbodem.

In het Markermeer ligt op sommige punten wel verontreinigd klasse B slib, maar het merendeel lijkt schoon tot licht verontreinigd klasse A of AW slib. Het advies is om klasse A slib toe te passen in de geotextiele tubes.

In overleg met het bevoegd gezag moet worden nagegaan onder welke regelgeving/categorie met baggerspecie gevulde geotextiele tubes vallen.

Volgens het nieuwe besluit bodemkwaliteit worden klasse AW (achtergrondwaarde), A en B onderscheiden. Omdat het hier een schone ontvangende bodem betreft, betekent dit dat klasse A slib gebruikt kan worden. Te verwachten is dat het opsluiten in geotextiele tubes van deze baggerspecie dan niet tot problemen leidt, maar dit is aan het bevoegde gezag.

### 3.6 Combinaties met natuurontwikkelingsprojecten

Een project dat momenteel in het kader van het project Natuurlijker Markermeer IJmeer (NMIJ) wordt opgestart is de oermoeras pilot aan de Markermeerszijde bij de Houtribdijk. Deze pilot kan kansen opleveren om meer natuur te combineren met een minder ingrijpende dijkversterking; zeker op de langere termijn als er meer bekend is over de golfdempende werking van deze natuuroplossingen.

Tevens wordt overwogen een brede waterkeringszone te creëren nabij Volendam (traject Amsterdam-Edam).

In het kader van NMIJ zijn er diverse pilots voorzien waarbij onderzoeksvragen worden onderzocht, zoals:

- Op welke locatie(s) is een grootschalige landwaterzone het meest effectief?
- Is de aanleg van een duurzaam moeras mogelijk?
- Hoe kan gefaseerde aanleg het best worden uitgevoerd? (Modulaire opzet?)
- Hoe verloopt de consolidatie en zetting van een met schone baggerspecie opgehoogd gebied op de zettingsgevoelige Markermeerbodem?
- Wat is de meest wenselijke ophoogstrategie gelet op de ecologische eisen aan hoogteligging en maaiveldval?
- Welke aanlegmethodes kunnen het best gekozen worden voor: Aanbrengen van de baggerspecie? + Insluiten van de specie? (compartimenteringsdammen, en/of metalen damwanden, en /of geotubes, geocontainers, geobags; andere oplossing?) + Versnelling van consolidatie.
- Wat zijn de effecten op de golfbelasting voor de nabij liggende waterkeringen?

Deze ontwikkelingen kunnen in de toekomst leiden tot aantrekkelijke ontwerpconcepten, waarbij 3 zaken gecombineerd kunnen worden, te weten:

- een veilige waterkering(szone)
- een aantrekkelijk natuurgebied
- nuttig gebruik van overtollige baggerspecie uit het Markermeer



## 4 Kostenvergelijking varianten

### 4.1 Golfbreker opties

Onder verwijzing naar de specificaties in bijlage 4.1.1 uit ref.12 worden de aanlegkosten excl. BTW, zoals geraamd door Promeco, voor deze (sub)varianten hieronder slechts op hoofdpostniveau weergegeven:

Globale begroting Golfbreker variant 3-A: KERN VAN GEOTUBES, gevuld met zandrijke baggerspecie (> 85% zand)				
	aantal	eenh.	Prijs/eh	Totaal
1. Kosten aanbrengen kern met Geotubes incl. funderingsdoek	229.900	m3	€ 45,24	
	10.000	m1	€ 1.040,01	€ 10.400.145
2. Afvullen tot dijkprofiel en aanbrengen geotextiel en wiepen	120.100	m3	€ 53,23	
	10.000	m1	€ 639,35	€ 6.393.500
3. Leveren en aanbrengen stortsteen in 3 lagen	837.000	m3	€ 49,49	
	10.000	m1	€ 4.142,70	€ 41.427.000
			Subtotaal variant 3-A	€ 58.220.645
Staartkosten (U.K., A.K., W&R): 15%				€ 8.733.097
Onvoorzien: 15%				€ 8.733.097
			TOTAAL VARIANT 3-A	€ 75.686.838
			<b>KOSTEN per m1</b>	<b>€ 7.568,68</b>

Tabel 4.1 Globale begroting smalle golfbreker variant 3 met zandrijke baggerspecie (> 90% zand)

### Globale begroting Golfbreker variant 3-B: KERN VAN GEOTUBES, INCL. ZAND-/SLIBSCHEIDING BAGGERSPECIE

	aantal	eenh.	Prijs/eh	Totaal
1. Kosten aanbrengen kern met Geotubes incl. funderingsdoek	229.900	m3	€ 68,20	
	10.000	m1	€ 1.567,89	€ 15.678.934
2. Afvullen tot dijkprofiel en aanbrengen geotextiel en wiepen	120.100	m3	€ 53,23	
	10.000	m1	€ 639,35	€ 6.393.500
3. Leveren en aanbrengen stortsteen in 3 lagen	837.000	m3	€ 49,49	
	10.000	m1	€ 4.142,70	€ 41.427.000
			Subtotaal variant 3-B	€ 63.499.434
Staartkosten (U.K., A.K., W&R): 15%				€ 9.524.915
Onvoorzien: 15%				€ 9.524.915
			TOTAAL VARIANT 3-B	€ 82.549.264
			<b>KOSTEN per m1</b>	<b>€ 8.254,93</b>

Tabel 4.2 Globale begroting smalle golfbreker variant 3 met voorbereiding baggerspecie

Globale begroting Golfbreker variant 3-C: geheel opgebouwd uit stortsteen				
	aantal	eenh.	Prijs/eh	Totaal
1. Kosten aanbrengen kern met Geotubes incl. funderingsdoek	229.900	m3	€ 11,09	
	10.000	m1	€ 255,00	€ 2.550.000
2. Afvullen tot dijkprofiel en aanbrengen geotextiel en wiepen	120.100	m3	€ 53,23	
	10.000	m1	€ 639,35	€ 6.393.500
3. Leveren en aanbrengen stortsteen in 3 lagen	837.000	m3	€ 64,13	
	10.000	m1	€ 5.367,70	€ 53.677.000
			Subtotaal variant 3-C	€ 62.620.500
Staartkosten (U.K., A.K., W&R): 15%				€ 9.393.075
Onvoorzien: 15%				€ 9.393.075
			TOTAAL VARIANT 3-C	€ 81.406.650
			<b>KOSTEN per m1</b>	<b>€ 8.140,67</b>

Tabel 4.3 Globale begroting smalle golfbreker variant 3 volledig opgebouwd uit breuksteen (klassieke golfbreker).

## 4.2 Voorland opties

Onder verwijzing naar de specificaties in bijlage 4.1.2 van ref.12 worden de aanlegkosten, zoals geraamd door Promeco, voor deze (sub)varianten hieronder slechts op hoofdpstniveau weergegeven:

Globale begroting Golfbreker variant 4-A: KERN VAN GEOTUBES, gevuld met zandrijke baggerspecie (> 85% zand)				
	aantal	eenh.	Prijs/eh	Totaal
1. Kosten aanbrengen kern met Geotubes incl. funderingsdoek	332.100	m3	€ 35,10	
	10.000	m1	€ 1.165,84	€ 11.658.368
2. Afvullen tot dijkprofiel en aanbrengen geotextiel en wiepen	187.900	m3	€ 45,32	
	10.000	m1	€ 851,65	€ 8.516.500
3. Leveren en aanbrengen stortsteen in 3 lagen	578.000	m3	€ 51,48	
	10.000	m1	€ 2.975,60	€ 29.756.000
			Subtotaal variant 4-A	€ 49.930.868
Staartkosten (U.K., A.K., W&R): 15%				€ 7.489.630
Onvoorzien: 15%				€ 7.489.630
			TOTAAL VARIANT 4-A	€ 64.910.129
			<b>KOSTEN per m1</b>	<b>€ 6.491,01</b>

Tabel 4.4 Globale begroting voorland constructie variant 4 met zandrijke (>90% zand) baggerspecie (excl. het achterliggende voorland).

Globale begroting Golfbreker variant 4-B: KERN VAN GEOTUBES, INCL. ZAND-/SLIBSCHEIDNG BAGGERSPECIE					
		aantal	eenh.	Prijs/eh	Totaal
1.	Kosten aanbrengen kern met Geotubes incl. funderingsdoek	332.100	m3	€ 57,88	
		10.000	m1	€ 1.922,16	€ 19.221.550
2.	Afvullen tot dijkprofiel en aanbrengen geotextiel en wiepen	187.900	m3	€ 45,32	
		10.000	m1	€ 851,65	€ 8.516.500
3.	Leveren en aanbrengen stortsteen in 3 lagen	578.000	m3	€ 51,48	
		10.000	m1	€ 2.975,60	€ 29.756.000
			Subtotaal variant 4-B		€ 57.494.050
	Staartkosten (U.K., A.K., W&R): 15%				€ 8.624.108
	Onvoorzien: 15%				€ 8.624.108
			TOTAAL VARIANT 4-B		€ 74.742.265
			<b>KOSTEN per m1</b>		<b>€ 7.474,23</b>

Tabel 4.5 Globale begroting voorland constructie variant 4 met voorbereiding baggerspecie (excl. het achterliggende voorland).

Globale begroting Golfbreker variant 4-C: geheel opgebouwd uit stortsteen					
		aantal	eenh.	Prijs/eh	Totaal
1.	Kosten aanbrengen kern met Geotubes incl. funderingsdoek	332.100	m3	€ 5,17	
		10.000	m1	€ 171,75	€ 1.717.500
2.	Afvullen tot dijkprofiel en aanbrengen geotextiel en wiepen	187.900	m3	€ 45,32	
		10.000	m1	€ 851,65	€ 8.516.500
3.	Leveren en aanbrengen stortsteen in 3 lagen	578.000	m3	€ 82,97	
		10.000	m1	€ 4.795,60	€ 47.956.000
			Subtotaal variant 4-C		€ 58.190.000
	Staartkosten (U.K., A.K., W&R): 15%				€ 8.728.500
	Onvoorzien: 15%				€ 8.728.500
			TOTAAL VARIANT 4-C		€ 75.647.000
			<b>KOSTEN per m1</b>		<b>€ 7.564,70</b>

Tabel 4.6 Globale begroting voorland constructie variant 4 volledig opgebouwd uit breuksteen (excl. het achterliggende voorland).

De kosten voor aanleg van het achterliggende voorland hangen in sterke mate af van hoe dit voorland wordt opgebouwd en welke materialen hiervoor worden gebruikt. Indien gratis baggerspecie kan worden gebruikt in combinatie met drijvende rietmatten dan kost dit per m<sup>2</sup> minimaal € 5-7 (voor grote werken = >2000m<sup>2</sup>). Hier hebben we 50 m (breedte voorland) x 10000 (lengte tracé) = 500000 m<sup>2</sup>, dus de kosten voor het voorland worden minimaal € 2,5 miljoen.

Tevens zijn de kosten bepaald voor de "light" varianten met een 50% dunnere breukstenen deklaag (zie ref. 12 en tabel 4.7).

#### 4.3 Kostenvergelijking golfbreker en voorlandopties

Alle ramingen zijn nog eens kort en bondig weergegeven in de tabel 4.7. Na analyse van de kostenramingen kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. bij het 'zware' ontwerp van Deltares is het kostenaandeel van de afdeklaag uit stortsteen ten opzichte van de overige kostenposten dermate hoog, dat er geen groot prijsvoordeel te behalen valt door een kern op te bouwen uit met zand of met baggerspecie gevulde geotextiele tubes.

2. indien de baggerspecie eerst moet worden gecycloneerd (zandafscheiding) dan ligt de prijs op hetzelfde niveau als voor een dam van stortsteen. Hierbij dient te worden opgemerkt dat een prijsvoordeel a.g.v. de besparing op stortkosten, die anders mogelijk zouden moeten worden betaald voor deze baggerspecie, niet is meegenomen in de kostenopzet.
3. indien uit modellering of praktijkonderzoek blijkt dat de afdeklaag van de golfreductor lichter kan worden uitgevoerd (minder dik en minder zware laag stortsteen), dan zijn er grote prijsvoordelen te behalen door het aanbrengen van een kern uit geotextiele tubes.

variant	aanbr. tubes [€/m1]	afwerken [€/m1]	afdekken [€/m1]	totaal, incl. staart [€/m1]	bedrag bij L = 10 km
<i>Deltares</i>					
3A - zand	€ 1.040,01	€ 639,35	€ 4.142,70	€ 7.568,68	€ 75.686.838
3B - bagger	€ 1.567,89	€ 639,35	€ 4.142,70	€ 8.254,93	€ 82.549.264
3C - stortst.	€ 255,00	€ 639,35	€ 5.367,70	€ 8.140,67	€ 81.406.650
4A - zand	€ 1.165,84	€ 851,65	€ 2.975,60	€ 6.491,01	€ 64.910.129
4B - bagger	€ 1.922,16	€ 851,65	€ 2.975,60	€ 7.474,23	€ 74.742.265
4C - stortst.	€ 171,75	€ 851,65	€ 4.795,60	€ 7.564,70	€ 75.647.000
<i>altern. "light"</i>					
3A - zand	€ 1.170,21	€ 657,90	€ 2.401,35	€ 5.498,30	€ 54.983.044
3B - bagger	€ 1.869,53	€ 657,90	€ 2.401,35	€ 6.407,42	€ 64.074.203
3C - stortst.	€ 255,00	€ 639,35	€ 5.367,70	€ 8.140,67	€ 81.406.650
4A - zand	€ 1.239,71	€ 762,40	€ 1.831,80	€ 4.984,08	€ 49.840.813
4B - bagger	€ 2.053,03	€ 762,40	€ 1.807,80	€ 6.010,19	€ 60.101.927
4C - stortst.	€ 171,75	€ 851,65	€ 4.795,60	€ 7.564,70	€ 75.647.000

Tabel 4.7 *Kostenvergelijking (hierin zijn de kosten voor geotextiele tubes met enkel zand niet gecalculeerd en dus niet opgenomen)*

De kosten voor de aanleg van het achterliggende voorland zijn naar verwachting een orde kleiner dan die voor de harde verdedigingsconstructie (zie voorgaande paragraaf).

#### 4.4 Vergelijking met besparing op dijkversterkingskosten

Een vergelijking met de besparing op de dijkversterking Houtribdijk (excl. BTW) kan als volgt worden gemaakt:

- Een halvering van de dikte van de basaltton zetting levert minstens € 157/m<sup>2</sup> (incl. filter, zie tabel 6-3 uit ref. 15) x 0,2 (schatting minimale winst t.g.v. 50% reductie dikte basalttonzuilen) x 10.000 m (lengte tracé) x 13 m (strookbreedte bij H<sub>s</sub> = 2,3 m) = € 4082000 = 4,082 miljoen €, d.w.z. € 408,2/m.
- Verder nog: 4 m minder strookbreedte van de harde bekleding (zie par. 2.3) levert op: € 157./m<sup>2</sup> (basaltton zetting incl. filter, zie tabel 6-3 uit ref. 15) x 10.000 (lengte tracé) x 4 (afname strookbreedte) = € 6280000 = 6,28 miljoen €, d.w.z. € 628/m.
- De stabiliteit van de kreukelberm is een punt van onderzoek. Mogelijke besparingen op de te nemen maatregelen lijkt mogelijk. De kosten zijn nog niet goed aan te geven.

- De hoeveelheid overslag kan worden beperkt, waardoor er geen dijkverhoging meer nodig is. Dit moet nader worden onderzocht, i.v.m. de beperkte breedte van het cunet onder de dijk en de kwaliteit van de keileem deklaag (zie ref. 3). Als er minder golfloop optreedt, loopt de freatische lijn minder hoog op en dit is gunstig voor de stabiliteit van de keileem deklaag.

De besparingen op de bekleding zijn een order lager dan de kosten bij aanleg van de diverse golfbreker typen. Voor een Waterbouw Asphalt beton bekleding geldt dit in sterkere mate, i.v.m. de lagere kosten van €71 per m<sup>2</sup> en de minimum laagdikte eis (15 cm).

Er zijn echter nog forse besparingen denkbaar op de verbetering van de teenconstructie/kreukelberm en op een mogelijke dijkverhoging.

De besparingen zullen dus zeker 10 miljoen € kunnen bedragen (voor dit tracé van 10 km).

Indien de keileem deklaag niet hoeft te worden vervangen kan dit nog eens eenzelfde bedrag opleveren.

#### 4.5 Vergelijking met besparing op stortkosten baggerspecie

In de kostenberekeningen is ervan uitgegaan dat de baggerspecie gratis wordt geleverd, wat conform het vigerende beleid is dat stelt dat de kosten voor transport, opslag en eventueel bewerking van de baggerspecie (bijv. zandscheiding) voor rekening komen van de ontdoener. Indien sprake is van klasse B specie (dus verontreinigd) dan kan deze gestort worden in IJsseloo, maar bij zandgehalten groter dan 60% is men verplicht zandscheiding toe te passen. Dit zou ook op kosten van de ontdoener moeten geschieden.

Voor schone tot licht verontreinigde klasse A baggerspecie is het storten in zandwinputten een, zij het omstreden, optie. Deze putten liggen nogal eens op aanzienlijke transportafstanden. Ook dit transport komt voor rekening van de ontdoener.

Er kan een flink kostenvoordeel ontstaan (van ca. €5,-/ m<sup>3</sup> bij een transportafstand van 50 tot 100 km) als er minder transport nodig is (over. max. 10 km). Hierbij is uitgegaan van transport per schip, incl. overslag uit het schip op bestemming.

In totaal is de verwachting dat er vanuit RWS ca. 1 miljoen m<sup>3</sup>/jaar aan zoete specie in deze regio beschikbaar is.

Dit materiaal kan ook (anders) nuttig gebruikt worden, i.p.v. te storten in zandwinputten.

Indien de specie uit het Markermeer, dat doorgaans licht verontreinigd is, kan worden gebruikt voor natuurontwikkeling kan de transportafstand flink worden beperkt.

Voor Rijkswaterstaat kan het in haar belang zijn om een deel van de 1 miljoen m<sup>3</sup>/jaar aan specie te gebruiken voor natuurontwikkeling.

Een grove berekening leert dat er zeker 3,5 miljoen m<sup>3</sup> aan baggerspecie nodig is om een 50 m breed voorland te maken voor het betreffende tracé (4m waterdiepte, kruinhoogte + 1m NAP over een lengte van 10 km).

RWS zou dus zeker 3,5 miljoen m<sup>3</sup> X €5,-/ m<sup>3</sup> = 17,5 miljoen € kunnen besparen en tevens nog de voordelen van de golfreductie uit par. 4.4 (minstens 10 miljoen €) incasseren.

Daar staat tegenover dat het huidige ontwerpconcept van de harde verdedigingsconstructie relatief duur is (minstens 50 miljoen € voor 10 km).



## 5 Conclusies

### 5.1 Beantwoording van de onderzoeksvragen

- T.a.v. onderzoeksvragen 1 en 3 (zie par. 1.1), blijkt het inderdaad mogelijk te zijn een constructie (golfbreker of constructie met voorland) te ontwerpen die voldoende reductie in golfhoogte geeft om zo tot besparingen op de dijkversterkingskosten te komen. Hierbij is de in paragraaf 2.1 omschreven ontwerpfilosofie gebruikt. Dit heeft geleid tot constructies met een deklaag van breuksteen, en met een kern opgebouwd uit geotubes, te vullen met baggerspecie. Deze constructies liggen op een afstand van 50 a 100m uit de dijkteen. Deze keuze is gemotiveerd in de par. 2.1 omschreven ontwerpfilosofie. Grotere afstanden uit de dijkteen zijn mogelijk, waarbij ervoor moet worden gezorgd dat de golfaanval op de dijk niet zwaarder wordt t.g.v. windgolven die achter de golfbreker aangroeien. Dit betekent dat de transmissie van de golfbreker minder moet worden.

Gezien de ontwerpfilosofie zijn er eisen gesteld aan de vormvastheid van de kern en tevens moet het bouwen van een stapeling met baggerspecie gevulde geotubes uitvoerbaar zijn.

Dit heeft geleid tot een eis m.b.t. het zandgehalte van de baggerspecie.

Dit heeft als consequentie dat maar een beperkt segment van de beschikbare baggerspecie kan worden gebruikt, althans zonder voorbehandeling.

Grove ontwerpen van de constructie zijn getoetst t.a.v. het optreden van geotechnische faalmechanismen, en de haalbaarheid qua uitvoering. Er treden voor de hier onderzochte ongunstige bodemopbouw en forse zettingen op, resulterend in extra benodigde ontwerphoogte. De hier weergegeven grove ontwerpen zijn waarschijnlijk haalbaar, mits er geen squeezing optreedt en mits baggerspecie wordt gebruikt met voldoende zandgehalte. Echter het is niet uitgesloten dat bij nadere verkenning van de ondergrond en van het faalmechanisme squeezing, het nodig blijkt te zijn om een cunet onder de golfbreker aan te leggen of de bouwtijd te optimaliseren. Vooralsnog is dit niet meegenomen.

De besparingen op de bekleding zijn een order lager dan de kosten bij aanleg van de hier uitgewerkte golfbreker en voorland typen. Voor een Waterbouw Asphalt beton bekleding geldt dit in sterkere mate, i.v.m. de lagere kosten van € 71 per m<sup>2</sup> en de minimum laagdikte eis (15 cm). Er zijn echter nog forse besparingen denkbaar op de verbetering van de teenconstructie/kreukelberm en op eventueel in de toekomst noodzakelijke dijkverhogingen.

De besparing op de aanlegkosten door gebruik te maken van een met zand of baggerspecie gevulde geotextiele tube is beperkt ten opzichte van de kosten van een klassieke golfbreker of klassieke vooroever constructie. Dit wordt veroorzaakt door de dikke breukstenen filter- en deklagen. T.a.v. de dikte van deze deklagen is er nog optimalisatie mogelijk.

Aangezien alleen zonder problemen gebruik kan worden gemaakt van schone of licht verontreinigde baggerspecie is er geen besparing op de storkosten mogelijk, maar wel op de transportkosten (voor het voorland ca. 17,5 miljoen € bij reductie van de transportafstand van 50-100 km naar 10 km). In de kostencalculaties van de golfbreker, resp. het voorland is er van uit gegaan dat de baggerspecie gratis kan worden geleverd. Als er gebruik zou worden gemaakt van zand moet hiervoor wel worden betaald.

Aangezien de als vulling te gebruiken baggerspecie naar verwachting minstens 90%-95% zand moet bevatten, is wellicht een voorbehandeling van de specie, zoals hydrocyclonage nodig. Dit werkt licht kosten verhogend. Indien gekozen wordt voor zand als vulling, moet voor de aanvoer hiervan worden betaald, in tegenstelling tot de gratis aanvoer van baggerspecie. Er zijn geen kostencalculaties uitgevoerd voor constructies bestaande uit een kern met zand gevulde geotubes.

Indien het ontwerp van de breukstenen deklaag verder wordt geoptimaliseerd (dikte reductie tot van 3.1 m tot 2 m is de moeite waard om te onderzoeken), dan kan een aanzienlijk prijsvoordeel gaan ontstaan voor de geotextiele tube oplossing t.o.v. de klassieke oplossing in breuksteen (te weten  $\pm 5,5$  k€/m i.p.v.  $8,1$  k€/m). Deze kosten zijn een bovengrens, aangezien is uitgegaan van zettingen bij een ongunstige bodemopbouw, en dus een relatief grote overhoogte. Uit nader grondonderzoek kan blijken dat er voor een groot deel van het tracé minder overhoogte nodig is, wat leidt tot lagere materiaalkosten.

De eisen aan de golfbreker zijn streng omdat deze samen met de dijk een waterkerende functie heeft. Deze eisen zijn ook gehanteerd voor de verdedigingsconstructie van het voorland.

Indien alleen gekozen wordt voor natuurontwikkeling dan kunnen stapelingen van geotextiele tubes een nuttige functie hebben als erosiebescherming of opsluitkaden. Er komt binnenkort een CUR-rapportage uit over het hoogwaardig bouwen met baggerspecie in geotextiel tubes. Tevens zijn er diverse andere technieken waarmee baggerspecie kan worden versterkt (ref. 17).

Op basis van recent onderzoek lijkt het mogelijk om stapelingen met alleen geotextiele tubes, zonder stortstenen deklaag, te gebruiken als golfreductor bij zwaardere stormen. Dit is nog onderwerp van onderzoek. Er moet worden nagegaan of meer slibrijke baggerspecie hierbij kan worden gebruikt, met name als van een andere ontwerpfilosofie wordt uitgegaan. Te denken valt aan een breed voorland met flauwe taluds, waarbij er vanuit wordt gegaan dat er schade mag optreden, terwijl de golfdempende werking gedurende de maatgevende storm gewaarborgd blijft.

Hiermee zij ook de aanvullende onderzoeksvragen 1 t/m 8 uit par. 1.2 beantwoord.

- Onderzoeksvraag 4 (zie par. 1.1) kan met "ja, mits" worden beantwoord, aangezien er eisen moeten worden gesteld aan de baggerspecievulling en er voor voldoende zekerheid een breukstenen deklaag moet worden aangebracht.

- Het antwoord op onderzoeksvraag 6 (zie par. 1.1) luidt als volgt: Er is  $229.900\text{m}^3$  voor smalle golfbrekervariant 3 en  $332.100\text{ m}^3$  voor de harde voorland constructie aan baggerspecievulling nodig. Stel dat er baggerspecie wordt aangeleverd met 70% zand en 30% slib, droge stof%= 60%. Dit moet eerst gehydrocycloneerd worden, dus we hebben in totaal  $467.276\text{ m}^3$ , resp.  $675.000\text{ m}^3$  als uitgangshoeveelheden nodig. De (enigszins verontreinigde) slibfractie kan gestort worden achter de harde constructie als deel van het voorland. Er is echter niet voldoende om het gehele voorland te vullen, want daar is nog een aanzienlijke extra hoeveelheid baggerspecie voor nodig ( $\pm$  hoogte x breedte x lengte =  $5 \times 50 \times 10000 = 2,5$  miljoen  $\text{m}^3$  en daarna moet er nog worden bijgevuld). Er dient nog wel te worden nagegaan in hoeverre een erosiebescherming nodig is aan de bovenzijde van dit voorland van baggerspecie. Hiervoor kunnen rietmatten in combinatie met begroeiing worden gebruikt.

Er kan, aangezien de waterbodem in de omgeving van de golfbreker nauwelijks verontreinigd is, alleen met schone of licht verontreinigde baggerspecie worden gewerkt. Deze baggerspecie zou grotendeels afkomstig kunnen zijn uit het Markermeer. Het Markermeer heeft last van teveel omwoeling van slib wat leidt tot vertroebeling. Het gedeeltelijk uitbaggeren van het Markermeer kan een goede maatregel zijn om dit tegen te gaan.

Onderzoeksvragen 2 en 5 (zie par. 1.1) zouden in een vervolgstudie nader kunnen worden uitgewerkt. In het kader van het project Natuurlijker Markermeer IJmeer (NMIJ) wordt er gewerkt aan praktische oplossingen voor het creëren van natuur in brede waterkeringszones. Combinaties met dijkversterkingen zijn in dit kader te overwegen. In dit kader kan ook wat dieper worden ingegaan op de aanvullende onderzoeksvraag 9, uit par. 1.2. Een project dat

momenteel wordt opgestart is de oermoeras pilot aan de Markermeerzijde bij de Houtribdijk. Deze pilot kan kansen opleveren om meer natuur te combineren met een minder ingrijpende dijkversterking; zeker op de langere termijn als er meer bekend is over de golfdempende werking van deze natuuroplossingen. Tevens wordt de aanleg van een brede waterkeringszone bij Volendam (traject Amsterdam-Edam) overwogen.

## 5.2 Resterende risico's

### T.a.v. het dimensioneren:

De opbouw van de breukstenen deklaag is conservatief. Aandachtspunt bij de aanleg blijft dat het geotextiel niet tijdens de aanleg beschadigd mag worden.

Bij alternatief 4 is de erosiebestendigheid van het grondlichaam achter de harde constructie punt van aandacht. Voor dit grondlichaam zou bijvoorbeeld baggerspecie kunnen worden gebruikt met een erosiebescherming van rietmatten in combinatie met de gewenste begroeiing.

De golfremmende werking is voor beide alternatieven 3 (golfbreker) en 4 (constructie bij voorland) redelijk zeker.

### T.a.v. de geotechnische risico's:

Er kunnen aanzienlijke zettingsverschillen optreden, maar het is niet goed bekend waar precies. Deze zettingsverschillen mogen niet te groot worden (zie par. 3.4).

Het is van belang het tracé qua hoogteligging en grondopbouw nader te verkennen en op basis daarvan het ontwerp te optimaliseren.

Uit een eerste inschatting volgt dat het risico van squeezing niet is uit te sluiten. Nader onderzoek is nodig. Een mogelijke maatregel is het aanleggen van een cunet bestaande uit zand onder de golfbreker. De aanleg van een cunet is niet in de kostencalculaties meegenomen. Optimalisaties van de bouwtijd zijn ook denkbaar om squeezing tegen te gaan. Als baggerspecie met een minder hoog zandgehalte (d.w.z. < 90%) wordt gebruikt is het risico aanwezig dat de baggerspecie in de tube direct na vullen een te lage dichtheid krijgt en dat de tube niet in voldoende mate kan worden gevuld.

### T.a.v. de kostencalculatie:

Zoals in de voorgaande hoofdstukken is aangegeven, zijn er in dit stadium nog een groot aantal onzekerheden, die sterk kostenbepalend kunnen zijn:

- ontwerp (kruinbreedte; dikte + zwaarte afdeklaag, specificeren geotextiel en sterkte naainaad); zie ref. 14;
- bodemopbouw en hoogteligging;
- baggerspecie (kwaliteit, kwantiteit, beschikbaarheid, gradatie en toepasbaarheid);
- wel of niet voorbereiden baggerspecie (zand-/slibscheiding; hydrocyclonage);
- flocculantverbruik en gebruik onder water;
- periode van uitvoering/weersomstandigheden;
- etc.

### T.a.v. de uitvoering:

Hier zijn er ook de nodige risico's in kaart gebracht (zie hoofdstuk 3, tabel 3.2).

Er moet nader worden onderzocht in hoeverre slibrijke specie als vulling van de geotextiele tubes voor de hier gehanteerde ontwerp concepten haalbaar is. Dit is geen gangbare praktijk, dus het uitvoeren van een pilotproef kan wenselijk zijn.

### 5.3 Combinaties met natuurontwikkelingsprojecten

Geotextiele tubes gevuld met (zandige) baggerspecie kunnen goed dienst doen als vooroever verdediging en opsluitkade, bij het aanleggen van natuur. Deze constructies mogen beschadigen bij een zware storm.

Als ook een waterkerende functie in combinatie met de Houtribdijk ("hybride dijk") wordt beoogd, is er een breukstenen beschermende deklaag nodig, zoals voor de grove ontwerpen uit deze rapportage. Stapelingen met alleen geotubes bieden vooralsnog niet voldoende zekerheid.

Bij de voorland-optie kan worden nagegaan hoe het achterliggende grondlichaam erosiebestendig kan worden gemaakt. Een andere mogelijkheid is het werken met zeer flauwe taluds, in combinatie met rietmatten en begroeiing. Mogelijk geven deze voldoende reductie in golfhoogte om besparing op de dijkversterkingskosten te geven. Het is nog niet bekend of deze constructie het houdt onder zware golfbelasting.

## 6 Aanbevelingen

### 6.1 Dimensioneren

De toplaag is zwaar omdat bij ondoorlatende kern meer schade optreedt. Verder kan er op het geotextiel niet al te grote steen geplaatst worden, waardoor er 2 filterlagen onder de toplaag nodig zijn. Dit leidt tot de ca 3 m dikke laag. Misschien dat er met optimalisatie onder de huidige aannames tot 2 m gegaan kan worden, maar dat moet verder onderzocht worden. Het is gebruikelijk om modelproeven uit te voeren, aan de hand waarvan het ontwerp verder kan worden geoptimaliseerd. Bij alternatief 4 zou de steenlaag kleiner kunnen, mits dit getest wordt in een modelproef. Tevens kan d.m.v. modelproeven de optimale zand/slib fractie van de vulling van de geotextiele tubes worden vastgesteld.

Op basis van recent onderzoek lijkt het mogelijk om stapelingen met alleen tubes, zonder stortstenen deklaag, te gebruiken als golfreductor bij zwaardere stormen. Dit moet nader worden onderzocht d.m.v. modelonderzoek.

In onderhavige studie is uitgegaan van een aanzienlijke reductie (50%) van de dikte van de nieuwe bekleding op de Houtribdijk, i.v.m. de gewenste orde grootte van de besparingen.

Er is nog een optimalisatieslag mogelijk, waarbij de ontwerpen van de golfbreker, resp. het voorland zo worden gekozen dat er minder golfreductie optreedt. Of dit nog tot substantiële kosten voordelen leidt is de vraag.

Onderzoeksvragen 2 en 5 (zie par. 1.2) hebben in deze studie minder aandacht gekregen, maar de vragen zijn zeker relevant en kunnen leiden tot gewijzigde ontwerpen. Een vervolgstudie is gewenst.

### 6.2 Controle op geotechnische faalmechanismen

De geotechnische berekeningen zijn uitgevoerd voor twee ongunstige bodemopbouw. De in deze studie gepresenteerde zettingen zijn dus pessimistisch. Dit geldt ook voor de inschatting t.a.v. van het derde faalmechanisme squeezing.

Nader grondonderzoek in combinatie met berekeningen kan een beter inzicht geven in waar welke verschilzettingen optreden. M.b.v. Plaxis berekeningen kan dan onderzocht worden of squeezing zou kunnen optreden. Er moet worden nagegaan of het aanleggen van een cunet nodig is. De diepte en breedte van het cunet moeten dan worden bepaald.

Het type constructie waarvoor hier is gekozen bepaalt in sterke mate wat de geotechnische risico's zijn. Flauwere taluds over een grotere breedte zouden voordelen kunnen bieden, mits geen dure bestorting nodig is.

Tevens is het zinvol om de ervaringen met het nabijgelegen Naviduct en de bestaande vooroever dammen mee te nemen.

### 6.3 Uitvoerbaarheid

D.m.v. een pilot over een tracé van 100 m kan worden onderzocht of de stabiliteit tijdens aanleg voldoende is. Vooraf moet a.d.h.v. aanvullend grondonderzoek worden vastgesteld waar zich kritieke locaties bevinden en kan worden nagegaan of een pilot aldaar zinlijk is. Als alternatief is altijd het aanbrengen van een cunet onder de golfbreker mogelijk. Tevens kan onderzocht worden hoe goed de geotextiele tubes gestapeld en gevuld kunnen worden voor baggerspecie met variabele slib/zand fracties. Bij gebruik van baggerspecie kan vooraf worden gehydrocycloneerd, om zo de grove fractie in de specie te sturen. Als referentie kan een geotextiele tube volledig met zand van de gewenste gradering worden gevuld, waarvoor ontwerpmethoden voorhanden zijn (zie ref. 14)..

De proef moet dan met name gericht zijn op de afstemming tussen baggeren – zandafscheiding – vullen geotextiele tubes – slibverwerking.

Een nadere studie van de combinatie van het type geotextiele tube en het vulmateriaal is nodig. Dit betreft de o.m. de geometrische dichtheid, het flocculantgebruik, de waterdoorlatendheid en duurzaamheidsaspecten.

#### **6.4 T.a.v. bruikbaarheid baggerspecie**

De eisen aan de baggerspecie die als vulling van de geotextiele tubes kan worden gebruikt zijn streng:

Het zandgehalte moet voldoende hoog zijn (vooralsnog is de inschatting > 90%) en het moet schone tot licht vervuilde baggerspecie zijn. D.m.v. modelproeven kan de vereiste zand/slib fractie nader worden onderzocht. Tevens moet hierbij worden gelet op de risico's bij uitvoering en er kan worden nagegaan welke technieken de uitvoerbaarheid zouden kunnen verbeteren.

Er kan worden nagegaan welke baggerspecie geschikt kan zijn als voorland achter de harde vooroeververdediging in combinatie met de gewenste begroeiing.

Het voorland gaat zich zetten, maar moet wel op hoogte worden gehouden in verband met de waterkerende functie (reductie in golfhoogte).

Een ander mogelijkheid is een breder voorland aan te leggen met flauwe taluds. Ook hier moet onderzocht worden welke baggerspecie gebruikt kan worden in combinatie met de gewenste begroeiing en eventueel rietmatten. Ook hier zullen zettingen optreden.

#### **6.5 T.a.v. kostenbesparingen**

Onderzocht kan worden hoeveel kosten worden bespaard als de golfaanval op de kreukelberm en de teenconstructie van de Houtribdijk wordt beperkt. Ervaringen met de bestaande hockeysticks bij de Houtribdijk moeten worden meegenomen.

Bij golfaanval vanaf de Markermeerzijde is de hoeveelheid overslag voor delen van dijkvakken 4 en 5 groter dan 1 l/m/s en soms > 10 l/m/s, wat het nodig kan maken de dijk te verhogen.

Het is zinvol om na te gaan hoe ingrijpend een verhoging van de Houtribdijk is, i.v.m. de breedte van het cunet onder de dijk en de kwaliteit van de keileem deklaag. In ref. 3 is hier een eerste verkenning naar uitgevoerd.

Een beter inzicht in voorland- en golfbreker opties kan leiden tot aanzienlijke besparingen op de dijkversterkingskosten. Hierbij kunnen diverse varianten voor golfbreker en voorland ontwerpen worden meegenomen, ook alternatieven die vooralsnog wat minder zekerheid bieden dan een golfbreker of voorland constructie met een breukstenen deklaag.

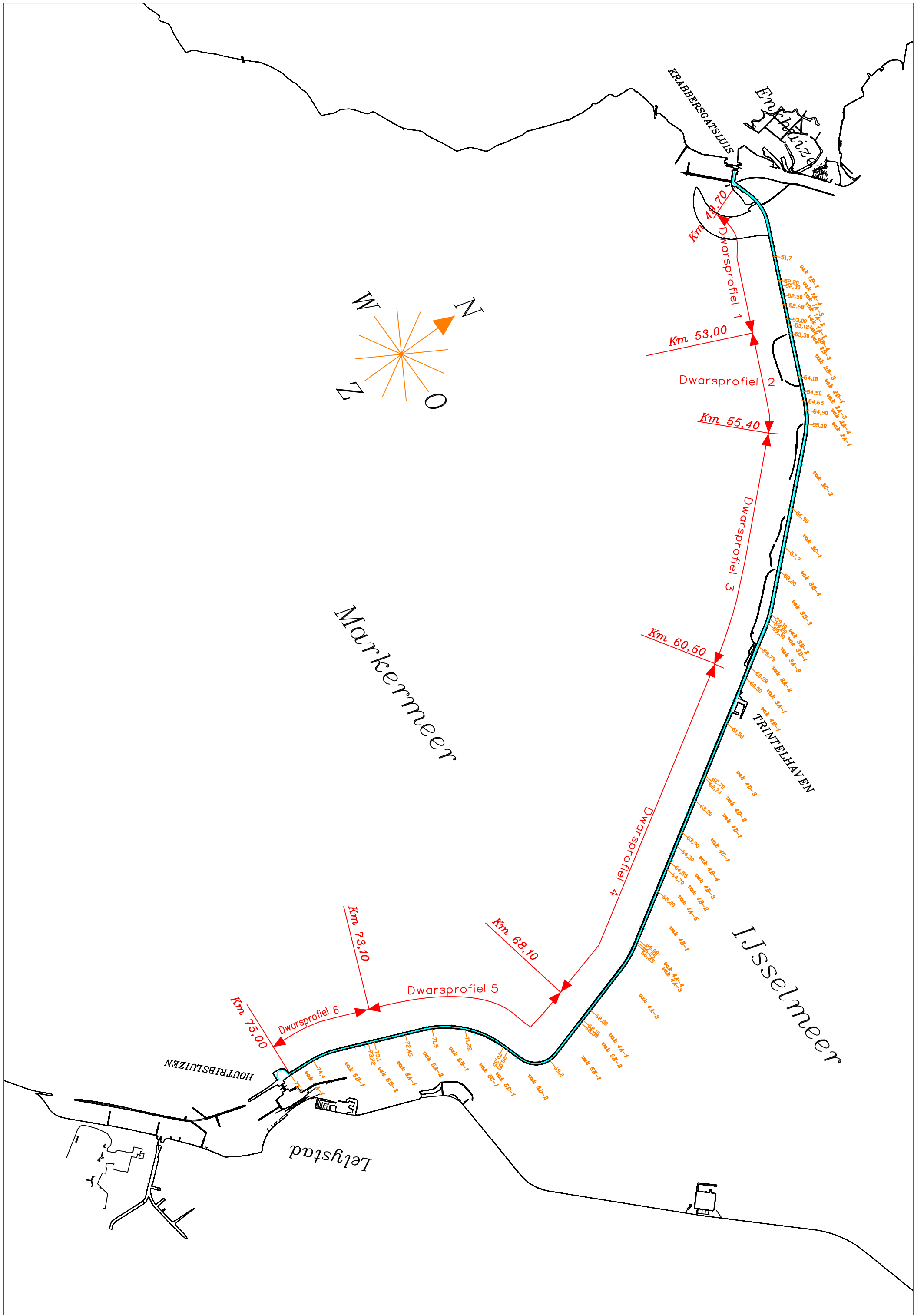
## 7 Referenties

1. Integrale verkenning HoutribdijkTauw BV, 21 februari 2008.
2. Quicksan Houtribdijk, golfbreker van baggertubes, Arcadis Nederland BV, 6 februari 2008.
3. Grondmechanisch onderzoek Houtribdijk, Deltares, concept rapport 23 juni 2009.
4. Technisch rapport Asphalt voor Waterkeren, TAW, november 2002.
5. Ontwerpmethode voor het "Hydroblock", Waterloopkundig Laboratorium, december 1996.
6. d'Angremond, K, JW van der Meer, R.J. de Jong (1996) Wave transmission at low-crested structures. ASCE, Proc. ICCE, Orlando, Florida.
7. Briganti, R., JW van der Meer, M. Buccino, M. Calabrese (2003) Wave transmission behind low crested structures. ASCE. Proc. Coastal Structures. Portland Oregon.
8. J.W. van der Meer (1988) Rock slopes and gravel beaches under wave attack. PhD thesis. Delft University of Technology, The Netherlands.
9. BEAKWAT 3.2 (2006) Design tool for breakwater structures. Delft Chess program. Deltares | Delft Hydraulics. <http://www.wldelft.nl/soft/chess/breakwat/index.html>
10. Schiereck, G.J. (2001) Introduction to Bed bank and shore protection. First edition. Delft, Delft University Press. ISBN 90-407-1683-8
11. Geotechnical calculation for Açu Port Breakwaters, GeoDelft, mei 2007.
12. Uitvoeringstechnische haalbaarheid toepassing Geotextiele tube in golfreductor, Houtribdijk – Markermeer, traject Trintelhaven-Houtribsluizen; Promeco, juni 2009.
13. Wichman, B.G.H.M. (1999), Consolidation behaviour of gassy mud: theory and experimental validation, PhD thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.
14. Ontwerpen met geotextiele zandelementen, CUR rapport 217, juli 2006.
15. Dijkbekledingsvarianten Houtribdijk Markermeerzijde, Breijn B.V., 3 september 2008.
16. Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1 september 2004.
17. Berg, F.P.W. van den, Technology scan, versneld ophogen met baggerspecie, Deltares, 1001461-004-GEO-0001, 26 augustus 2009.





## **A Bovenaanzicht tracé Houtribdijk met dijkvakken**



## **B Berekeningsresultaten geotechnische stabiliteit**

Datum: 10-7-2009 ing. J.P. van den Berg

**tabel 1**  
enkele tube, faalmechanisme 1

Fase:	File naam:
5e dag	Sectie 11 Optie 9. dag 5 (talud 1 op 1,5)
5e dag incl. geotextiel 80 kN/m	Sectie 11 Optie 9. dag 5 incl. geotextiel (talud 1 op 1,5)
28 ste dag	Sectie 11 Optie 9. dag 28 (talud 1 op 1,5)
28 ste dag incl. geotextiel 80 kN/m	Sectie 11 Optie 9. dag 28 incl. geotextiel (talud 1 op 1,5)
Extreem 50 jaar	Sectie 11 Optie 9 50 jaar extreem2 (talud 1 op 1,5)
Extreem 50 jaar incl. geotextiel 80 kN/m	Sectie 11 Optie 9 50 jaar extreem2 incl. geotextiel (talud 1 op 1,5)

F	Sectie 11: optie 9
	0,95
	1,1
	1,01
	1,17
	2,55
	2,78

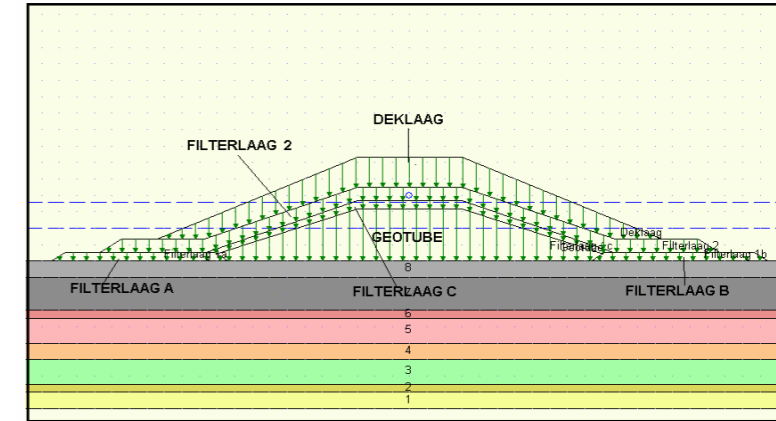
voor de tabellen 1 t/m 3 gelden de volgende belasting stappen, zie plaatje doorsnede variant 3.

dag 0	aanbrengen filterlaag A en B
dag 1	aanbrengen geotubes
dag 2	aanbrengen filterlaag C
dag 3	aanbrengen filterlaag 2
dag 4	aanbrengen deklaag

**tabel 2**  
enkele tube, faalmechanisme 1

Fase:	File naam:
5e dag	Sectie 18 Optie 4. dag 5 (talud 1 op 1,5)
5e dag incl. geotextiel 80 kN/m	Sectie 18 Optie 4. dag 5 incl. geotextiel (talud 1 op 1,5)
5e dag incl. geotextiel 160 kN/m	Sectie 18 Optie 4. dag 5 incl. geotextiel2 (talud 1 op 1,5)
28 ste dag	Sectie 18 Optie 4. dag 28 (talud 1 op 1,5)
28 ste dag incl. geotextiel 80 kN/m	Sectie 18 Optie 4. dag 28 incl. geotextiel (talud 1 op 1,5)
28 ste dag incl. geotextiel 160 kN/m	Sectie 18 Optie 4. dag 28 incl. geotextiel2 (talud 1 op 1,5)
Extreem 50 jaar	Sectie 18 Optie 4. 50 jaar extreem (talud 1 op 1,5)
Extreem 50 jaar incl. geotextiel 80 kN/m	Sectie 18 Optie 4. 50 jaar extreem. Incl. geotextiel (talud 1 op 1,5)

F	Sectie 18: optie 4
	0,63
	0,73
	0,82
	0,78
	0,9
	1
	1,6
	1,91



**tabel 3**  
enkele tube, faalmechanisme 1

Fase:	File naam:
5e dag	Sectie 11 Optie 9. dag 5 (talud 1 op 2,3)
5e dag incl. geotextiel 80 kN/m	Sectie 11 Optie 9. dag 5 incl. geotextiel (talud 1 op 2,3)
28 ste dag	Sectie 11 Optie 9. dag 28 (talud 1 op 2,3)
28 ste dag incl. geotextiel 80 kN/m	Sectie 11 Optie 9. dag 28 incl. geotextiel (talud 1 op 2,3)
Extreem 50 jaar	Sectie 11 Optie 9 50 jaar extreem2 (talud 1 op 2,3)
Extreem 50 jaar incl. geotextiel 80 kN/m	Sectie 11 Optie 9 50 jaar extreem2 incl. geotextiel (talud 1 op 2,3)

F	Sectie 11: optie 9
	1,08
	1,22
	1,15
	1,28
	2,22
	2,36

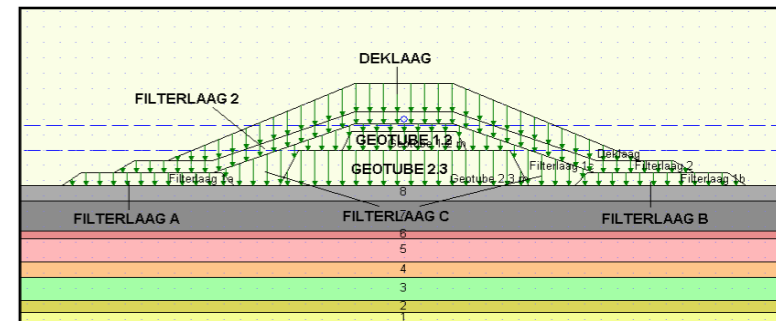
**tabel 4**  
gestapelde tubes, faalmech 2

Fase:	File naam:
dag 0	Sectie 11 Optie 9, dag 0 afstand -1,265 1e laag geotube (talud 1 op 2,3)
14e dag incl. geotextiel 80 kN/m	Sectie 11 Optie 9, dag 14 afstand -1,265 2e laag geotube (talud 1 op 2,3)
14e dag incl. geotextiel 80 kN/m	Sectie 11 Optie 9, dag 14 afstand -2,53 1e laag geotube (talud 1 op 2,3)
28 ste dag incl. geotextiel 80 kN/m	Sectie 11 Optie 9, dag 28 afstand -1,265 2e laag geotube (talud 1 op 2,3)
28 ste dag incl. geotextiel 80 kN/m	Sectie 11 Optie 9, dag 28 afstand -2,53 1e laag geotube (talud 1 op 2,3)
Extreem 50 jaar incl. geotextiel	Sectie 11 Optie 9 Geotube Extreem situatie 50 jaar afstand -1.265 2e laag (talud 1 op 2,3)

F	Sectie 11: optie 9
	2,49
	1,26
	1,46
	1,23
	1,17
	3,79

Voor tabel 4 gelden de volgende belasting stappen, zie plaatje doorsnede variant 3.

dag 0	aanbrengen geotube 2,3 m
dag 14	aanbrengen geotube 1,2 m
dag 28	aanbrengen filterlaag en deklaag



## **C Technische data Geotube**

# Geotube®

## Technical data

Properties <i>(Standard)</i>	Unit	GT 750 M	GT 1000 M	
Type of product Material		High strength woven textile Polypropylene yarns		
<b>Mechanical properties</b>				
Minimum tensile strength <sup>1</sup> <i>(EN ISO 10319)</i>	MD	kN/m	120	198
	CD	kN/m	110	189
Elongation at ult. tensile strength <i>(EN ISO 10319)</i>	MD	%	15	15
	CD	%	9	11
Minimum Seamstrength <sup>1</sup> <i>(EN ISO 10321)</i>		kN/m	96	160
Static puncture resistance (CBR-value) <i>(EN ISO 12226)</i>		kN	14	20
Dynamic perforation (cone drop) <i>(EN ISO 13433)</i>		mm	8	6
<b>Hydraulic properties</b>				
Water permeability normal to the plane ( $?h=50\text{mm}$ ) <i>(EN ISO 11058)</i>		l/m <sup>2</sup> /min	720	1200
Characteristic opening size $O_{90}$ <sup>2</sup> <i>(EN ISO 12956)</i>		µm	260	416
<b>Durability</b>				
Resistance to thermo-oxidation <i>(EN 5132)</i>		class	B	B
Resistance to UV <i>(EN ISO 12224 and EN ISO 12226)</i>		%	≥80	≥80

MD = machine direction / CD = cross direction

The values given are indicative and correspond to minimum results obtained in our laboratories and in testing institutes.

<sup>1</sup> these minimum values are given within the 95% confidence level.

<sup>2</sup> this maximum value is given within the 95% confidence level

© Copyright TenCate Geosynthetics BV, November 2007.

Previously issued data is not longer valid.

The right is reserved to make changes without notice at any time. The control is following the evaluation of conformity for CE marking.

Geotube® is a registered trademark of TenCate Geosynthetics.

TenCate Geosynthetics Netherlands bv  
 Sluiskeade n.z. 14, 7602 HR Almelo  
 Tel: +31 (0)546 544 811 Fax +31 (0)546 544 490  
[geotube@tencate.com](mailto:geotube@tencate.com), [www.geotube.com](http://www.geotube.com)

Protective & Outdoor Fabrics  
 Aerospace Composites  
 Armour Composites

Geosynthetics  
 Industrial Fabrics  
 Grass



materials that make a difference