

**Meerwaarde luwtestructuur
voor oeverdijk**



Meerwaarde luftestructuur voor oeverdijk

A.J. Smale
J.H. de Vroeg
A. Capel

1206471-000

Titel
Meerwaarde luwtestructuur voor oeverdijk

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Waterdienst	1206471-000	1206471-000-HYE-0006	21

Trefwoorden
Oeverdijk, luwtestructuur, Markermeer, golfhoogtereductie

Samenvatting

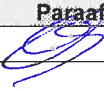
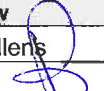
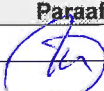
In het kader van dit project is onderzocht of de aanleg van een luwtestructuur invloed kan hebben op de afmetingen van de oeverdijk met behoud van dezelfde veiligheidseisen. Anders geformuleerd: Het gaat hierbij om het vaststellen van de meerwaarde van luwtestructuren voor het ontwerp van de oeverdijk: wat zijn de kosten van het aanbrengen van de luwtestructuren en tot welke kostenreductie kunnen deze luwtestructuren leiden voor de aanleg van de oeverdijk.

Een analyse van het golfhoogtereducerende effect door een luwtestructuur heeft laten zien dat het golfreducerende effect voor de beoogde luwtestructuren maximaal orde 30% bedraagt (op een locatie aan de teen van de dijk midden achter de luwtestructuur). De daadwerkelijke gemiddelde golfhoogtereductie achter de gehele luwtestructuur is circa 15%.

Op basis van het huidige ontwerp van de oeverdijk wordt gesteld dat deze nauwelijks gevoelig is voor verandering in de maatgevende golfbelasting. Dit maakt dat een afname van de golfhoogte slechts zeer beperkte invloed heeft op de aanlegkosten van de oeverdijk. Gegeven deze beperkte invloed en de potentiële toename van onderhoudskosten als gevolg van de aanleg van een luwtestructuur wordt de kostenreductie verwaarloosd. De verwachte aanlegkosten van een luwtestructuur zijn zeer veel groter dan de te verwachten maximale reductie van de aanlegkosten van de oeverdijk.

Geconcludeerd wordt dan ook dat de aanleg van een luwtestructuur niet tot een kostenreductie van de oeverdijk leidt. Bij het aanleggen van luwtestructuren dient daarnaast mogelijk rekening te worden gehouden met (lichte) erosie van de oeverdijk door aanleg van de luwtestructuur en daarmee een toename van de aanleg- en onderhoudskosten van de oeverdijk. Nader onderzoek op dit punt is aan te raden.

Referenties
1206471-000-HYE-0001

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	aug. 2012	A.J. Smale		P. Wellens		M.R.A. van Gent	
		J.H. de Vroeg					
		A. Capel					

Status
definitief

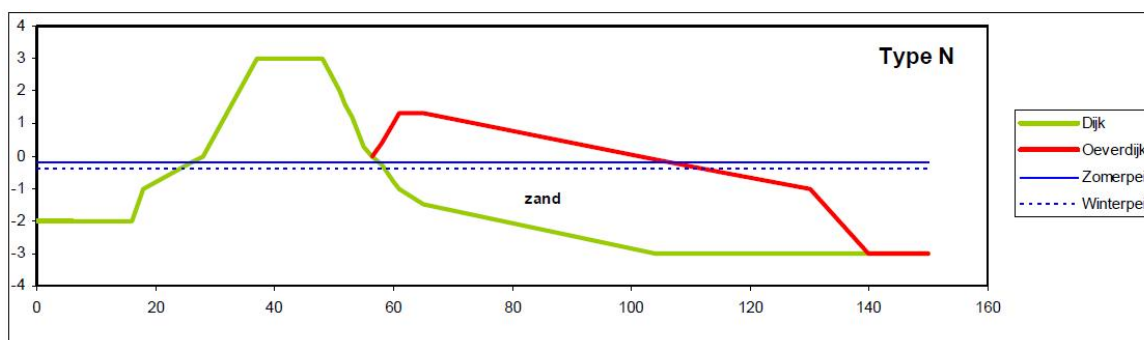
Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Probleemstelling	1
1.3 Aanpak	2
1.4 Leeswijzer	3
2 Vaststelling golfreducerend effect luwtestructuren	5
2.1 Inleiding	5
2.2 Randvoorwaarden	5
2.3 Schematisatie	6
2.4 Instellingen SWAN: numeriek en fysica	7
2.5 Resultaten	7
3 Effecten luwtestructuren op aanleg en onderhoud oeverdijk	9
3.1 Inleiding	9
3.2 Het effect van luwtestructuren op het ontwerpprofiel	9
3.3 Het effect van luwtestructuren op het onderhoud	10
3.4 Conclusies ten aanzien van effecten op aanleg en onderhoud oeverdijk	12
4 Aanlegkosten luwtestructuren	13
4.1 Dimensionering typische doorsnede luwtestructuur	13
4.2 Bepaling kosten typische doorsnede luwtestructuur	14
5 Discussie en conclusie	17
6 Referenties	19
Bijlage(n)	
A Alternatieve doorsnedes voor luwtestructuur	A-1

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Rijkswaterstaat is, vanuit zijn doelstelling om synergie te bewerkstelligen tussen ecologie en veiligheid, al enige tijd betrokken bij de Markermeerdijkversterking (Hoorn-Amsterdam) van HHNK (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier). HHNK doet al enkele jaren onderzoek naar de haalbaarheid van de dijkversterking middels een oeverdijk (dit is een zanddijk welke tegen de bestaande dijk wordt aangelegd, zie Royal Haskoning (2010) en Figuur 1.1, omdat deze goedkoper lijkt te zijn dan de traditionele dijkversterking. Vanuit genoemde synergiedoelstelling heeft DGRW de afgelopen jaren bijdragen geleverd ter uitwerking van ecologische varianten van dit oeverdijkalternatief.



Figuur 1.1 Voorbeeld van een oeverdijk. Bron: Haskoning (2010)

Eén van de ecologische varianten die hierbij in beeld is, is de zogeheten T-variant, waarbij synergie wordt gezocht door twee projecten te koppelen, enerzijds het genoemde oeverdijkalternatief van het Markermeerdijkversterkingsproject en anderzijds het project eerste fase TBES (ToekomstBestendig ecologisch Systeem voor het Markermeer), waarbij de eerste fase een luwtmaatregel in de Hoornse Hop moet inhouden.

Het idee is dat beide projecten van een dergelijke koppeling zouden kunnen profiteren. De aanleg van een luwtmaatregel kan er mogelijkwijs toe leiden, dat de afmetingen van de oeverdijk kunnen worden gereduceerd, waardoor deze goedkoper kan worden. Het koppelen van de projecten kan dus leiden tot lagere totale aanlegkosten.

Het is de bedoeling dat de T-variant uiteindelijk in een oeverdijkontwerp wordt uitgewerkt, dat voldoet aan de gestelde veiligheidseisen en waarbij de ecologie gemaximaliseerd is. Omdat dit ontwerpproces de nodige onzekerheden kent, zal een en ander stapsgewijs worden aangepakt. Deze studie heeft betrekking op de eerste stap in dit proces.

1.2 Probleemstelling

Voordat er wordt overgegaan tot het doorrekenen van verschillende alternatieven, moet eerst worden nagegaan of de hierboven genoemde veronderstelling klopt:

“Kan de aanleg van een luwtmaatregel invloed hebben op de afmetingen van de oeverdijk met behoud van dezelfde veiligheidseisen? Anders geformuleerd: Het gaat hierbij om het vaststellen van de meerwaarde van luwtstructuren voor het ontwerp van de oeverdijk: wat zijn de kosten van het aanbrengen van de luwtstructuren en tot welke kostenreductie kunnen deze luwtstructuren leiden voor de aanleg van de oeverdijk.”

1.3 Aanpak

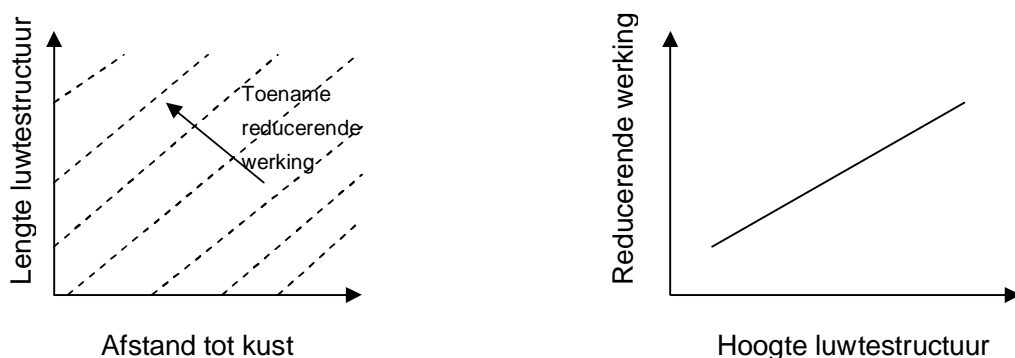
Voor de bepaling van de meerwaarde van luwtestructuren voor de oeverdijk wordt de volgende aanpak gehanteerd:

(i) vaststelling (golf)reducerende werking luwtestructuren

Voor het maken van een vergelijking van de kosten van luwtestructuren versus de reductie van aanlegkosten van de oeverdijk is het van belang om te weten in welke mate een luwtestructuur de aanlegkosten van de oeverdijk (via ontwerprandvoorwaarden) kan beïnvloeden. Omwille van een gestaffelde aanpak wordt in deze fase een typische locatie (typische maatgevende hydraulische randvoorwaarden) gedefinieerd waarvoor de invloed van de luwtestructuur op de maatgevende hydraulische condities in beeld wordt gebracht. Dit resulteert in een aantal ontwerpgrafieken zoals deze in Figuur 1.2 conceptueel zijn weergegeven.

De linker afbeelding geeft de golfreducerende werking van een luwtestructuur (in contourlijnen) als functie van de afstand van de kust en lengte van de luwtestructuur. Een luwtestructuur met grote lengte heeft een groter reducerend effect dan een korte luwtestructuur. Daarnaast geldt dat een luwtestructuur dicht bij de kust een grotere golfreducerende werking heeft dan een luwtestructuur die van de kust verwijderd is.

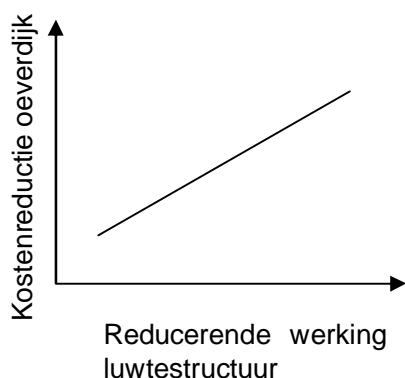
De tweede afbeelding presenteert de relatie tussen de hoogte van een oneindig lange dam en de golfhoogte reductie: een hogere luwtestructuur leidt tot een sterkere golfreducerende werking.



Figuur 1.2 Conceptuele weergave ontwerpgrafieken

(ii) kostenreductie aanleg oeverdijk (aanleg en onderhoud)

Een belangrijk aspect van het onderzoek is het bepalen van de baten, welke gedefinieerd zijn als de reductie van de aanlegkosten voor de oeverdijk. Deze baten worden voor een typische locatie bepaald door de relatie tussen golfhoogte en benodigd zandvolume voor de oeverdijk te bepalen, wat leidt tot een afbeelding zoals onderstaand weergegeven. Deze relatie wordt vervolgens vertaald naar een relatie tussen golfhoogte en kosten door gebruik te maken van een indicatieve kostprijs per m^3/m .



Figuur 1.3 Conceptuele weergave relatie golfreducerende werking luwtestructuur en kostenreductie oeverdijk

Gedurende het project bleek dat het ontwerp van de oeverdijk dusdanig is vormgegeven dat deze nauwelijks gevoelig is voor de ontwerpgolfhoogte (RWS, 2012). Dat maakt dat de lijn in bovenstaande figuur nagenoeg horizontaal loopt en dicht bij “nul” ligt: geen kostenreductie voor de oeverdijk. In overleg is voorgesteld om dit niet verder uit te werken en een kostenreductie van nagenoeg nul te hanteren in deze studie.

(iii) aanlegkosten luwtestructuren

Het golfreducerend effect bepaald in (i) dient te worden gekoppeld aan de kosten gemoeid met het aanleggen van een luwtestructuur (welke afhangt van afstand uit de kust en hoogte van de luwtestructuur). In het kader van deze studie wordt op grofstoffelijke wijze een typische doorsnede voor de luwtestructuur gedimensioneerd, waarna hiervoor de aanlegkosten per strekkende meter worden geschat. De afgeleide kosten per strekkende meter kunnen vervolgens gebruikt worden om voor iedere combinatie gepresenteerd in de afbeelding met de golfreducerende werking de kosten te bepalen.

(iv) grofstoffelijke vergelijking aanlegkosten luwtestructuur versus kostenreductie oeverdijk

Op basis van de in (i) afgeleide golfreducerende werking, de in (iii) afgeleide kosten voor de realisatie van deze golfreducerende werking en de in (ii) afgeleide reductie in aanlegkosten van de oeverdijk kan een vergelijking worden gemaakt tussen de kosten en baten van de aanleg van een luwtestructuur in combinatie met de oeverdijk.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt het golfreducerend effect van de luwtestructuren beschreven. De doorvertaling van dit golfreducerende effect naar reductie van aanlegkosten voor de oeverdijk is beschreven in Hoofdstuk 3. De bepaling van de kosten van een (drietal) typische doorsnede van de luwtestructuur wordt beschreven in hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 sluit af met de conclusies ten aanzien van de meerwaarde van luwtestructuren voor de oeverdijk.

2 Vaststelling golfreducerend effect luwtestructuren

2.1 Introductie

Het golfreducerend effect van luwtestructuren (uitgedrukt in golfhoogtereductie) wordt bepaald met behulp van met het golfmodel SWAN (Simulating WAVes Nearshore). SWAN is een spectraal golfmodel waarmee golfgroei en propagatie kan worden gesimuleerd, zie Booij et al. (1999). Daarnaast is het mogelijk om met behulp van SWAN de mate van golftransmissie over een dam te simuleren. De combinatie van deze aspecten maakt dat SWAN het geschikte model is voor de bepaling van het golfreducerend effect (uitgedrukt in golfhoogtereductie) van luwtestructuren.

Met behulp van SWAN wordt voor een groot aantal afmetingen/locaties van een luwtestructuur het effect op de golfcondities aan de teen van de primaire waterkering bepaald. Dit effect wordt vervolgens uitgedrukt in een reductie van de golfhoogte en grafisch gepresenteerd.

Opgemerkt wordt dat in deze studie enkel gekeken wordt naar de invloed van de luwtestructuur op de golfhoogte. De luwtestructuur zal ook effect hebben op de golfperiode en golfrichting. Deze aspecten zullen echter niet worden meegenomen in deze analyse en mogelijk in een vervolg analyse aan de orde komen.

2.2 Randvoorwaarden

De golfhoogtereductie wordt bepaald voor de condities waartegen de oeverdijk bestand moet zijn. Dit betekent dat er gerekend wordt met condities (waterstand, windsnelheid, windrichting en golfcondities) gebaseerd op de Hydraulische Randvoorwaarden met een gemiddelde herhalingstijd van eens per 10.000 jaar (de normfrequentie voor de betreffende primaire waterkering).

De condities behorende bij de normfrequentie zijn bepaald met behulp van het probabilistische model Hydra-M (HKV&Alkyon, 2007). Hydra-M bepaald op basis van meerdimensionale statistiek de meest waarschijnlijke combinatie van waterstand, windsnelheid, windrichting en golfcondities bij de normfrequentie: het illustratiepunt (HKV&Alkyon, 2007). Het illustratiepunt hangt af van het beschouwde faalmechanisme via weegfactoren voor de invloed van waterstand, golfhoogte, periode en richting op het faalmechanisme. In het geval van de oeverdijk gaat het om een zandige oplossing waarbij zowel waterstand, golfhoogte, periode als golfrichting een rol spelen. Binnen Hydra-M is het faalmechanisme "overslag" het enige mechanisme dat deze invloeden meeneemt. Derhalve wordt het illustratiepunt bepaald op basis van overslag in combinatie met een standaard profiel en een kritisch overslagdebiet van 1 l/s/m. Het feitelijke illustratiepunt voor afslag zal hier enigszins van afwijken, doch niet dusdanig dat dit tot andere conclusies zal leiden.

Locatie "27A Polder Zeevang N" (nabij Groote Braak) is gekozen als een representatieve locatie voor de dijk tussen Amsterdam en Hoorn omdat deze halverwege het traject ligt met een oriëntatie ten opzichte van het noorden overeenkomstig de gemiddelde oriëntatie van het traject. Dit heeft geleid tot de volgende set van randvoorwaarden voor het spectrale golfmodel SWAN zoals weergegeven in Tabel 2.1.

Eigenschap illustratiepunt	Waarde
Windsnelheid	18 [m/s]
Waterstand	0,32 [m+NAP]
Golfhoogte (H_{m0})	1,11 [m]
Golfperiode (T_p)	4,8 [s]

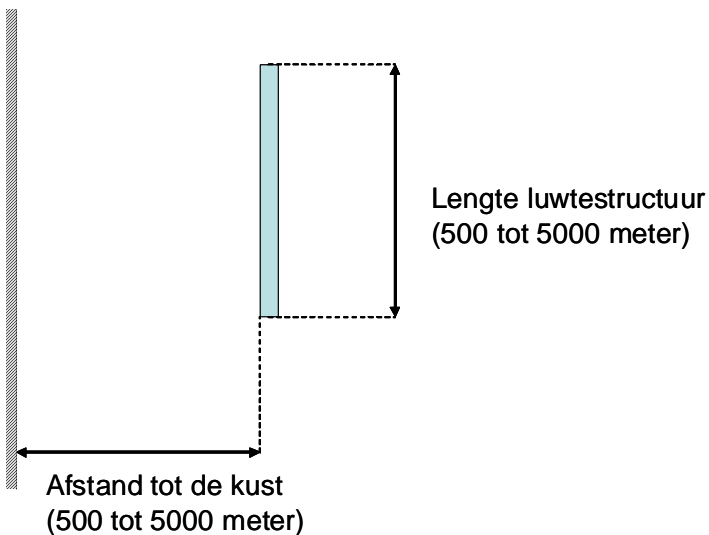
Tabel 2.1 Illustratiepunt locatie "27A Polder Zeevang N"

De richtingsinformatie van het illustratiepunt (wind- en golfrichting) wordt niet gebruikt in de hier gepresenteerde quasi-eendimensionale golfberekeningen met een windrichting loodrecht op de kust en derhalve worden deze componenten van het illustratiepunt niet gerapporteerd.

2.3 Schematisatie

Met behulp van SWAN wordt voor een groot aantal combinaties van mogelijke afmetingen van een luwtestructuur de transformatie van golven aan de Markermeerzijde van de luwtestructuur naar golfcondities aan de teen van de dijk bepaald. Dit wordt gedaan met een schematische weergave van de toepassing van een luwtestructuur.

Er wordt van uitgegaan dat de luwtestructuur bestaat uit een rechte dam. Mogelijk is dit niet de meest optimale vorm van een luwtestructuur, maar voor de bepaling van de golfreducerende werking van de luwtestructuur wordt met een rechte dam het primaire effect van de luwtestructuur in beeld gebracht. Verder wordt de luwtestructuur geschematiseerd met behulp van de variabelen (i) afstand tot de kust, (ii) lengte van de luwtestructuur (zie Figuur 2.1) en (iii) hoogte van de luwtestructuur (zie Figuur 2.1).



Figuur 2.1 Definitie van typische eigenschappen afstand en lengte van luwtestructuur

Ten behoeve van de bepaling van de golfreducerende werking van een luwtestructuur wordt gevarieerd met de afstand van de luwtestructuur tot de primaire waterkering: van 500 tot 5000 meter (6 stappen). Een luwtestructuur dicht bij de primaire waterkering zal een relatief groot golfreducerend effect hebben, terwijl een luwtestructuur ver van de primaire waterkering een relatief klein golfreducerend effect zal hebben vanwege golfgroei achter de dam en propagatie van golven om de dam (transmissie en diffractie).

De tweede variatie is de lengte van de luwtestructuur: deze wordt gevarieerd van 500 meter tot en met 5000 meter (6 stappen). Een kleine dam heeft een beperkt golfreducerend effect terwijl een grote dam een groot golfreducerend effect zal hebben. Deze variatie wordt gecombineerd met de variatie van de afstand tot de primaire waterkering, waardoor in totaal 36 combinaties van afstand en lengte ontstaan.

Tot slot wordt ook gevarieerd met de hoogte van de luwtestructuur: NAP + 0,0 en NAP +1,0 meter. De hoogte van de luwtestructuur bepaalt de mate van transmissie van golven over/door de luwtestructuur. Een hoge dam heeft een lage transmissie (en dus groot golfreducerend effect) terwijl een lage dam juist veel golfenergie door zal laten. De daadwerkelijke bepaling van de mate van transmissie is gebaseerd op de formulering van Goda (Goda, 1967) met coëfficiënten behorende bij een stortstenen dam.

Voor de bodemligging in het SWAN model wordt uitgegaan van een typische kustdwarse doorsnede op een locatie nabij Groote Braak. De bodemligging voor deze doorsnede is gebaseerd op de bodemschematisatie zoals gebruikt voor in Deltares (2012). De bodemligging wordt constant verondersteld in kustlangse richting.

2.4 Instellingen SWAN: numeriek en fysica

Voor de instellingen ten aanzien van de fysische processen in SWAN wordt gebruik gemaakt van de instellingen zoals afgeleid voor en gebruikt binnen WTI 2011. De vaststelling van deze instellingen is beschreven in Deltares (2010). Onderstaand tekstkader presenteert de gehanteerde instellingen:

```

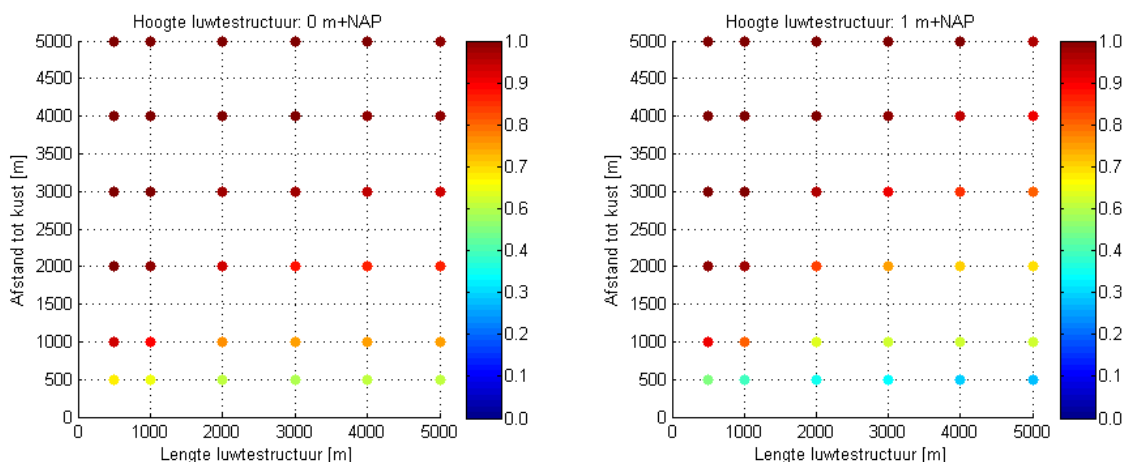
$***** PHYSICS *****
GEN3 WESTH
WCAP WESTH cds2=5.00000e-05 br=0.00175000 p0=4.00000 powst=0.00000 powk=0.00000 &
      ndisp=0.00000 cds3=0.800000 powfsh=1.00000
QUAD iquad=2 lambda=0.250000 Cnl4=3.00000e+07
LIMITER ursell=10.0000 qb=1.00000
FRIC JONSWAP cfjon=0.038000
BREA WESTH alpha=0.960000 pown=2.50000 bref=-1.39630 shfac=500.000
TRIAD trfac=0.10000 cutfr=2.50000
$

```

Verder wordt voor de numerieke instellingen (convergentie criterium) de volgende instelling gehanteerd: NUM STOPC dabs=0.00 drel=0.01 curvat=0.001 npnts=99. STAT mxitst=80 alfa=0.001.

2.5 Resultaten

De resultaten van de berekeningen zijn samengevat in Figuur 2.2. De figuur laat op de horizontale as de lengte van de luwtestructuur zien en op de verticale as de afstand tot de kust. De kleur van de bolletjes geeft de relatieve golfhoogte weer voor de betreffende combinatie van afstand tot de kust en lengte van de luwtestructuur. Hierbij staat een relatieve golfhoogte van 1 voor een 0% afname van de golfhoogte aan de teen van de primaire waterkering en een relatieve reductie van 0 voor 100% afname van de golfhoogte aan de teen van de primaire waterkering.



Figuur 2.2 Samenvatting resultaten SWAN berekeningen, relatieve golfhoogte als functie van afstand en lengte van de luwtestructuur

Uit de figuur is af te leiden dat een lange luwtestructuur op korte afstand van de primaire waterkering de grootste golfhoogtereductie genereert; tot 70% bij een damhoogte van NAP +1,0 meter. Een korte luwtestructuur op grotere afstand van de primaire waterkering resulteert nauwelijks in golfhoogte reductie (relatieve golfhoogte is nagenoeg 1).

Opgemerkt wordt dat de hier genoemde/gepresenteerde golfhoogtereductie geldt voor één locatie midden achter de geschematiseerde luwtestructuur. Op deze locatie is de mate van golfhoogtereductie maximaal. De golfhoogtereductie achter de gehele luwtestructuur is gemiddeld minder dan deze maximale waarde (orde 15%). Om tenminste de hier genoemde golfhoogtereductie van 30% te kunnen realiseren voor de gehele oeverdijk dient de lengte van de luwtestructuur te worden verhoogd met de lengte van de te beschermen oeverdijk.

Voor de luwtestructuren voorzien in het kader van TBES geldt dat deze voorzien zijn op grotere afstand van de kust: tenminste orde 2 kilometer uit de kust (Deltares, 2011). Bij kleinere afstanden tot de kust geldt dat het luwtegebied achter de luwtestructuur van een te kleine omvang is om vanuit ecologisch perspectief interessant te zijn. Met inachtneming van deze minimale afstand kan gesteld worden dat de te realiseren golfhoogtereductie 15 en 30% bedraagt (wederom de maximale reductie achter de luwtestructuur) voor een hoogte van de luwtestructuur van respectievelijk NAP 0.0 meter en NAP +1.0 meter. Voor het gehele gebied langs de dijk achter de luwtestructuur geldt een gemiddelde afname van de golfhoogte met respectievelijk orde 7 en 15%.

De vastgestelde golfhoogtereductie ten gevolge van de luwtestructuur is beperkt. In Hoofdstuk 3 wordt de golfhoogtereductie vertaald naar effect op aanlegkosten van de oeverdijk.

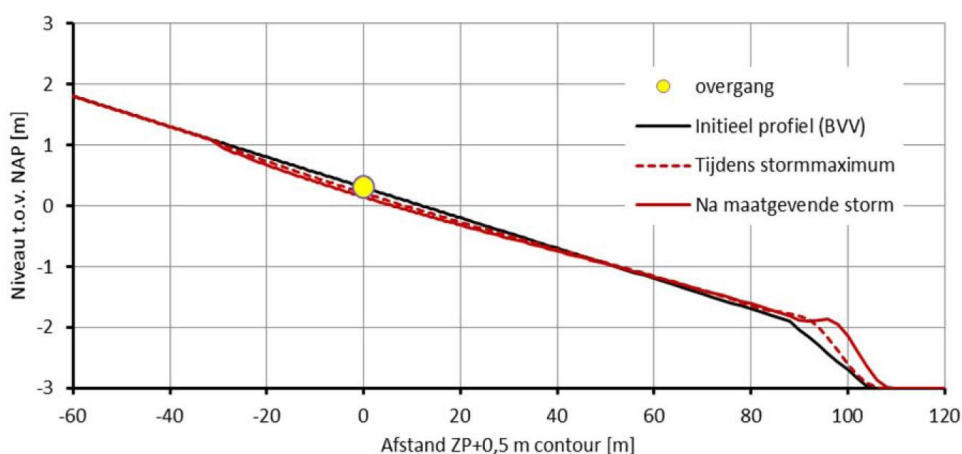
3 Effecten luwtestructuren op aanleg en onderhoud oeverdijk

3.1 Introductie

In dit hoofdstuk wordt het potentiële effect van een luwtestruktuur op het ontwerpprofiel van de oeverdijk (Sectie 3.2) en op het onderhoud (Sectie 3.3) beschouwd. Het gaat hierbij om het afleiden van een relatie tussen de golfreducerende werking van een luwtestruktuur en de kostenreductie voor de oeverdijk zoals schematisch weergegeven in Figuur 1.3. Conclusies zijn geformuleerd in Sectie 3.4.

3.2 Het effect van luwtestructuren op het ontwerpprofiel

Door Arcadis is een ontwerphelling voor het oeverdijkprofiel bepaald, welke tijdens de maatgevende storm slechts in geringe mate wordt uitgevlakt, zie Figuur 3.1 (bron: RWS, 2012).



Figuur 3.1 Effect maatgevende storm op ontwerphelling (bron: RWS, 2012)

Op basis van de ecologische beschouwingen in het verleden is geconcludeerd dat voor het behalen van ecologische meerwaarde de luwtestructuren minimaal op een afstand van 2 à 3 km uit de kust dienen te liggen. In deze studie wordt voor de TBES luwtestructuren dan ook uitgegaan van afstanden uit de kust van 2 à 3 kilometer, conform Deltares (2011).

In Hoofdstuk 2 is het effect van verschillende configuraties van luwtestructuren op de golfhoogte tijdens de maatgevende conditie beschouwd. Hieruit blijkt dat voor afstanden van 2 à 3 km uit de kust de golfhoogtereductie bij de teen van de dijk voor een structuur met kruinhoogte op NAP hooguit 15% is. Voor een hogere dam met kruinhoogte NAP +1 m is een golfhoogte reductie van hooguit 30% haalbaar. Deze maximale reductie treedt lokaal op langs een korte zone ongeveer midden achter de luwtestruktuur. Voor het overgrote deel van de luwtezone is de reductie minder dan bovengenoemde percentages: hiervoor wordt 7 en 15% gehanteerd voor luwtestruktuur met een kruinhoogte van respectievelijk NAP+ 0.0 meter en NAP +1.0 meter (zie hoofdstuk 2).

Uit onderzoek uitgevoerd door Arcadis, zoals genoemd in de presentatie van Arcadis en bijgevoegd bij RWS (2012), volgt bovendien dat de helling van het ontwerpprofiel van de oeverdijk slechts in zeer beperkte mate gevoelig is voor dergelijk kleine golfhoogtereducties.

Deze beperkte gevoeligheid van het ontwerpprofiel voor de golfhoogtereductie komt voort uit het feit dat het profiel reeds erg flauw is. Als gevolg van golven zal een steil profiel normaliter flauwer worden totdat een evenwichtsprofiel is bereikt. In dit geval is het profiel reeds zeer flauw en is de verwachte vervorming van het aangelegde profiel naar het evenwichtsprofiel zeer beperkt. Veranderingen van de golfhoogte hebben dientengevolge ook een beperkte invloed op de vervorming van het profiel. Daar komt bovendien bij dat de golven als gevolg van het flauwe talud al ruim voor de oeverdijk beginnen te breken en dat daarmee de aandrijvende kracht voor morfologische veranderingen over een lang traject wordt uitgesmeerd, wat vervolgens ook geldt voor de mogelijke reductie van de golfhoogte. Dit alles maakt dat het ontwerpprofiel slecht in beperkte mate gevoelig is voor de golfhoogtereductie.

Uit bovenstaande volgt dat voor ecologisch interessante luwtstructuren slechts geringe golfhoogtereducties aan de teen van de oeverdijk mogelijk zijn, en dan nog slechts langs korte secties (relatief ten opzichte van de totale dijk lengte), en dat derhalve de potentiële besparing aan zand in de aanlegfase gering is.

Figuur 3.1 laat zien dat er in de orde van 5 tot 10 m³/m afslag plaats vindt zonder aanwezigheid van een luwtstructuur. Indien de golfhoogte afneemt met orde 30% als gevolg van de luwtstructuur, dan zal de afslag een fractie van deze 10 m³/m afnemen. Onder de aanname van een kostprijs van 10 EUR/m³ voor de aanleg van zand, wordt een kostenreductie van een fractie kleiner dan 100 EUR/m gerealiseerd.

Een ander effect van de luwtstructuur kan zijn dat de oeverdijk met een steilere helling kan worden aangelegd. Uit Figuur 3.1 kan worden afgeleid dat het hanteren van een helling van 1:35 in plaats van een helling van 1:40 leidt tot een afname van het benodigd zandvolume met orde 20 m³/m. Dit zou overeen komen met een kostenreductie van de oeverdijk van orde 200 EUR/m.

De luwtstructuren hebben een verwaarloosbaar effect op de waterstand nabij de oeverdijk. Het geringe effect op de golfhoogte in combinatie met het verwaarloosbare effect op de waterstand maakt dat op de kruinhoogte van de oeverdijk geen noemenswaardige besparing mogelijk is.

De potentiële besparing van 100 à 200 EUR/m is op de geschatte aanlegkosten voor de oeverdijk van orde 10,000 EUR/m slechts 1 à 2%.

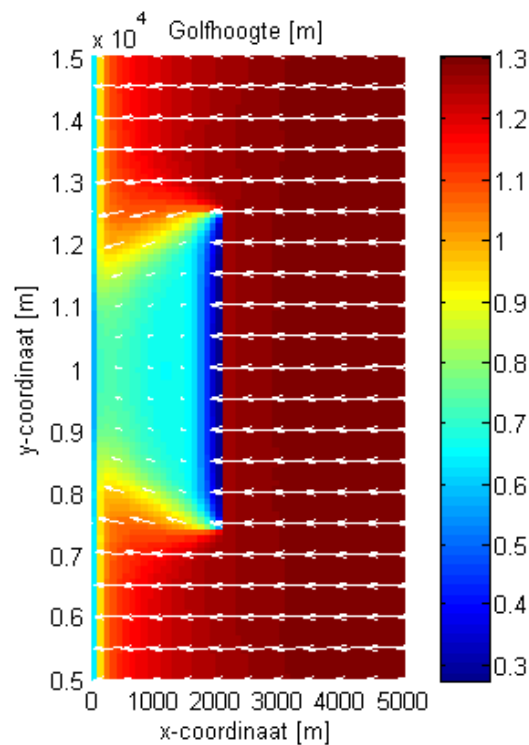
Dit leidt tot de conclusie dat de relatie tussen de golfreducerende werking en de reductie in aanlegkosten van de oeverdijk zeer beperkt is: de lijn geschetst in Figuur 1.3 ligt dicht bij de "nul-lijn" en heeft een zeer beperkte helling (geen sterke afhankelijkheid). Het effect van de luwtstructuur op het ontwerp van de oeverdijk is dan ook nagenoeg nul.

3.3 Het effect van luwtstructuren op het onderhoud

Onderhoud van de oeverdijk zal nodig zijn op plaatsen waar in de loop van de tijd zand uit het dwarsprofiel verdwijnt, dus op plaatsen waar erosie optreedt. Erosie ontstaat o.a. door gradiënten in het langstransport van zand.

Zoals in Figuur 3.3 geïllustreerd, ontstaan achter en naast een luwtstructuur gradiënten in golfhoogte en golfrichting. Aangezien het langstransport van zand langs de oeverdijk sterk wordt bepaald door zowel de golfhoogte als –richting, zullen door de luwtstructuren dus ook gradiënten in het langstransport worden gegenereerd, zoals schematisch geschetst in Figuur 3.4. In het algemeen zal zich hierdoor in de luwtzone wat zand ophopen en zal aan

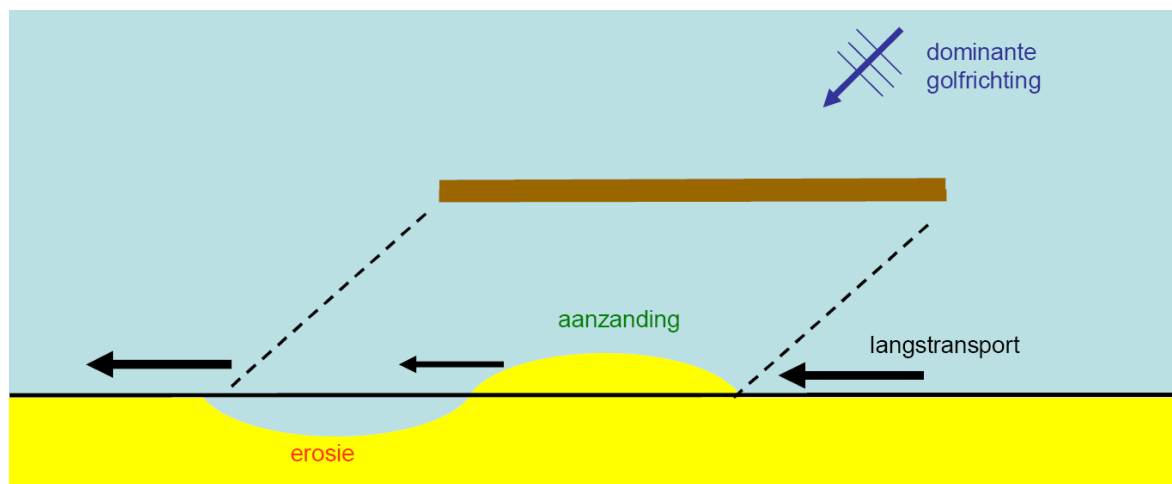
weerszijde hiervan wat erosie optreden. De luwtestructuur kan lokaal dus extra erosie opleveren, en daarmee extra onderhoud. Door dit effect resulteert het creëren van lokale luwten waarschijnlijk aanvankelijk eerder in meer dan in minder onderhoud aan de oeverdijk. Nadat zich een bepaalde gekromde kustlijn vorm heeft ingesteld, stopt dit effect.



Figuur 3.2 Illustratie van effect van dam op golfhoogte en -richting

De bovenbeschreven gradiënten dienen te worden opgeteld bij de natuurlijke gradiënten in het langstransport, welke ontstaan als gevolg van krommingen in de kustlijn en natuurlijke gradiënten in golfhoogten en –richtingen.

Overigens zou bovenbeschreven extra onderhoud kunnen worden gereduceerd door vooraf de hoeveelheid aanzanding achter de dam (zie schets in Figuur 3.4) te voorspellen en aan te leggen.



Figuur 3.3 Schets van door luwtestructuur gecreëerde gradiënten in langstransport

3.4 Conclusies ten aanzien van effecten op aanleg en onderhoud oeverdijk

Geconcludeerd wordt dat voor ecologisch interessante configuraties van luwtestructuren er slechts een geringe hoeveelheid kan worden bespaard bij aanleg van de oeverdijk. Door de relatief grote afstand uit de kust kunnen slechts geringe reducties in de golfhoogte bij de dijk worden bewerkstelligd. Met name voor dammen met de kruin op NAP is de reductie zeer gering.

Luwtestructuren kunnen aanvankelijk zelfs leiden tot meer onderhoud, als gevolg van door de dammen veroorzaakte gradiënten in het zandtransport welke lokaal erosie kunnen opleveren.

Op basis van deze afwegingen wordt verwacht dat de luwtestructuren niet leiden tot een significante reductie van de kosten voor aanleg en onderhoud van de oeverdijk. Mogelijk zelfs tot wat meer kosten als gevolg van toename van onderhoudsinspanning.

4 Aanlegkosten luwtestructuren

4.1 Dimensionering typische doorsnede luwtestructuur

Ten behoeve van de kostenraming voor de luwtestructuur geldt dat de luwtestructuur gedimensioneerd dient te worden. De dimensionering gaat uit van een dam met een kruinhoogte van NAP +1.0 meter. Verder wordt voor het talud een helling van 1:1.5 aangehouden en een kruinbreedte van 2,1 meter. Dit leidt, op basis van Brigante et al. (2003), tot een transmissiecoëfficiënt onder maatgevende condities (Tabel 2.1) overeenkomstig met de transmissie zoals gebruikt in de SWAN modellering.

Voor deze studie is een verdere detaillering van de afmetingen niet noodzakelijk en er wordt voor alternatieven A en B dan ook een kruinhoogte van NAP +1.0 meter, een kruinbreedte van 2,1 meter en een taludhelling van 1:1.5 gehanteerd. Bij de bepaling van de dimensies van alternatief C is rekening gehouden met het feit dat er hier meer shoaling en golfopzet plaats vindt door de ruwheid te verlagen (ruwheid is een parameter in Brigante et al.).

De berekening van de toplaagstabiliteit van alle alternatieven is gedaan met de Van der Meer formule op basis van de $T_{m-1,0}$ (Rock Manual, 2007). Voor de golfbelasting zijn de condities gehanteerd zoals weergegeven in Tabel 2.1. Hierbij is verder uitgegaan van een schadegetal van 2, wat inhoudt dat er gedurende de ontwerpomstandigheden wel schade mag optreden, maar dat de luwtestructuur blijft functioneren (golfreducerende werking). Bijlage A geeft de 3 resulterende alternatieven weer.

Alternatief A kenmerkt zich als volgt:

- transmissie coëfficiënt van 20%
- binnen en buitentalud 1:1.5
- kruinbreedte 2,1m
- toplaag van 300-1000 kg
- kern van "quarry run" (15-300 kg)
- teen van "quarry run" (15-300 kg)
- geotextiel tussen bodem en constructie
- granulaire beschermingslaag van 20-40 mm ter bescherming van het geotextiel voor aanleg en puntlasten van grote stenen uit het kernmateriaal.

Alternatief B kenmerkt zich als volgt:

- transmissie coëfficiënt van 20%
- binnen en buitentalud 1:2
- kruinbreedte 1,5m
- kern en toplaag van hetzelfde materiaal 60-300 kg
- geotextiel tussen bodem en constructie
- granulaire beschermingslaag van 20-40 mm ter bescherming van het geotextiel voor aanleg en puntlasten van grote stenen uit het bovenliggende materiaal.

Alternatief C kenmerkt zich als volgt:

- transmissie coëfficiënt van 20%
- binnen en buitentelud 1:7
- kruinbreedte 0,3m
- toplaag van 10-60 kg
- kernmateriaal van zand
- geotextiel tussen zand en toplaag
- geen granulaire beschermingslaag nodig onder toplaag

4.2 Bepaling kosten typische doorsnede luwtestructuur

Voor de hierboven gedefinieerde alternatieve typische doorsnedes zijn de volumes van de doorsnede bepaald. In Tabel 4.1 worden naast deze volumes ook de kosten gepresenteerd voor het leveren en aanbrengen van de verschillende materialen. De kentallen zijn vergeleken met onder andere de studie naar de Houtribdijk, Deltares (2009), en het kostendatabestand WV21 versie 1.6.

De kentallen uit het eerste rapport zijn gemiddeld zo'n 50% hoger en worden hier gezien als een bovengrens. De kentallen uit het tweede rapport worden hier verder gebruikt om de minimale kosten te bepalen (ondergrens). Wel is er een toeslag van 20% gehanteerd aangezien de luwtedam met drijvend materieel aangelegd moet worden. Kosten voor mobilisatie-demobilisatie, winst en risico, en onvoorzien zijn hier niet in meegenomen. Hiervoor wordt vooralsnog een opslagfactor van 2 gekozen.

Normaliter is de kostprijs voor de 60-300 kg gradering rond de € 55,- per m3. In alternatief B wordt het materiaal echter ook als kernmateriaal gebruikt. Hierdoor is de bouw aanzienlijk makkelijker. In de berekening is daarom gekozen voor een prijs die tussen die van het kernmateriaal 15-300 kg ligt en de originele kostprijs van het in dubbellaags aanbrengen van 60-300 kg.

Klasse	Eenheid	Volume/Oppervlakte			Kostprijs (leveren+aanbrengen) per eenheid	Kostprijs per meter		
		Alternatieven				A	B	C
		A	B	C				
300-1000 kg	m ³ /m	13,2			€72,00	€ 950,40	€ -	€ -
60-300 kg	m ³ /m		38,0		€54,00	€ -	€ 2,052,00	€ -
QR = 15-300 kg	m ³ /m	21,2			€36,00	€ 763,20	€ -	€ -
10-60 kg	m ³ /m			23,1	€36,00	€ -	€ -	€ 831,60
cushing layer (20-40mm)	m ³ /m	3,3	4,0		€42,00	€ 138,60	€ 168,00	€ -
Zand (IJsselmeer)	m ³ /m			98,5	€9,50	€ -	€ -	€ 935,75
geotextiel	m ² /m	16,7	20,1	47,0	€4,20	€ 70,14	€ 84,42	€ 197,40
Totale kostprijs per meter golfbreker						€ 1922,34	€ 2304,42	€1964,75
Opslagfactor = x2						€4000,-	€4600,-	€4000,-

Tabel 4.1 Overzicht volumes en kosten typische doorsnede per alternatief

De kostenschattingen voor alternatief A en C komen vrijwel gelijk uit. Een kilometer luwtedam kost zo'n 4 miljoen euro. Alternatief B valt 15% duurder uit. De prijs van dit alternatief wordt vooral gedomineerd door de kostprijs van de 60-300 kg gradering. Hier is een kilometer luwtedam 4,6 miljoen euro.

In de alternatieven is geen rekening gehouden met de bodemgesteldheid. De bodem van het Markermeer kenmerkt zich door een relatief slappe bovenlaag welke enkele meters dik kan zijn. Om zakking van de constructie te compenseren is mogelijk meer materiaal nodig dan in Tabel 4.1 geschat. Door toepassing van een brede luwtestructuur in alternatief C kan mogelijk een kostenreductie gerealiseerd worden, welke gunstig kan uitvallen voor alternatief C. Het voert nu echter te ver om hier verder op in te gaan.

Geconcludeerd kan worden dat de minimale kosten van een luwtestructuur (dus exclusief grondverbetering e.d.) ongeveer 4000,- EUR/meter bedragen. Opgemerkt wordt dat hierbij geen rekening is gehouden met de te verwachten onderhoudskosten van de luwtestructuur.

5 Discussie en conclusie

In het kader van dit project is onderzocht of de aanleg van een luwtestructuur invloed kan hebben op de afmetingen van een oeverdijk met behoud van dezelfde veiligheidseisen. Anders geformuleerd: Het gaat hierbij om het vaststellen van de meerwaarde van luwtestructuren voor het ontwerp van de oeverdijk: wat zijn de kosten van het aanbrengen van de luwtestructuren en tot welke kostenreductie kunnen deze luwtestructuren leiden voor de aanleg van de oeverdijk.

Een analyse van het golfreducerende effect door een luwtestructuur heeft laten zien dat het golfreducerende effect voor de beoogde luwtestructuren maximaal orde 30% bedraagt (op een locatie aan de teen van de dijk midden achter de luwtestructuur). De daadwerkelijke gemiddelde golfhoogtereductie achter de gehele luwtestructuur is circa 15%.

Op basis van het huidige ontwerp van de oeverdijk wordt gesteld dat deze nauwelijks gevoelig is voor verandering in de maatgevende golfbelasting. Dit maakt dat een afname van de golfhoogte slechts zeer beperkte invloed heeft op de aanlegkosten van de oeverdijk. Gegeven deze beperkte invloed en de potentiële toename van onderhoudskosten als gevolg van de aanleg van een luwtestructuur wordt de kostenreductie verwaarloosd.

De verwachte aanlegkosten van een luwtestructuur (orde 4000,--EUR/meter) en die van de Oeverdijk (orde 10.000,-- EUR/meter) zijn erg hoog en een reductie van 100 euro per meter oeverdijk valt daarbij in het niet. Een sterk gekoppelde aanpak van de twee projecten vloeit dus niet logischerwijs voort uit mogelijke kostenreducties.

Bij het aanleggen van luwtestructuren dient daarnaast mogelijk rekening te worden gehouden met (lichte) erosie van de oeverdijk door aanleg van de luwtestructuur en daarmee een toename van de aanleg- en onderhoudskosten van de oeverdijk. Nader onderzoek op dit punt is aan te raden.

6 Referenties

- Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen (1999): A third-generation wave model for coastal regions, 1, Model description and validation, *J. Geophys. Res.*, Vol. 10, No. C, 7649-7666,
- Briganti, R., Van der Meer, J.W., Buccino, M., Calabrese, M. Wave transmission behind low crested structures. *Coastal Structures 2003*,
- CIRIA, CUR, CETMEF (2007), *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering.* (2nd edition). Publication C683, CIRIA, London. ISBN 978-0-86017-683-1
- Deltares (2009), *Advisering Houtribdijk onderdeel A, studie van vragen bij golfbreker en voorland opties.* Deltares rapport 1001676-002-GEO-0005. Dr. B.G.H.M. Wichman. September 2009, v3.
- Deltares (2010), *SWAN calibration and validation for HBC2011*, Deltares rapport 1200103-020, C, Gautier, Mei 2010.
- Deltares (2011), *Quicksan slibeffecten verbreding gedeelte vaargeul Markermeer.* Deltares rapport 1205557-000-ZWS-0004. M. Genseberger. November 2011.
- Deltares (2012), *Validation suspended sediment model Markermeer & Application to silt screen*, Deltares rapport 1201198-010-ZWS-0001, P, Boderie, A,J, Smale en C, Thiange, June 2012,
- Goda, Y., H. Takeda and Y. Moriya (1967), *Laboratory investigation of wave transmission over breakwaters*, *Rep, port and Harbour Res, Inst.*, 13 (from Seelig, 1979)
- HKV & Alkyon (2007), *Hydra-M gebruikershandleiding versie 1,4*, HKV rapport PR1240, I,B,M, Lammers en R,P, Waterman, Augustus 2007.
- Royal Haskoning (2010) *Dijkversterking Markermeerkust Hoorn-Amsterdam. De oeverdijk als extra alternatief?*. Haskoning rapport 9W2206/R0002/500261/Rott. F.G. Haarman, A. Capel, G.J. Akkerman, R. Noordhuis, B. Wichman. 20 december 2010.
- RWS (2012). *Verslag afstemmingsoverleg oeverdijk 18 juni 2012.* H. Warmer. 10 juli 2012.

A Alternatieve doorsnedes voor luwtestructuur

LEGENDA

- Zand
- Kern materiaal
- Granulaire beschermingslaag
- Toplaag Breuksteen
- Geotextiel

