



# **Natuurlijk(er) Markermeer IJmeer**

Initiële bureaustudie slib 2010

Deel I: Luwtestructuren

RWS Dienst IJsselmeergebied

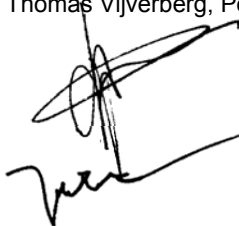
31 augustus 2010 – update september 2015

Definitief rapport

9V6742.A5

Documenttitel    Natuurlijk(er) Markermeer IJmeer  
                          Initiële bureaustudie slib 2010  
                          Deel I: Luwtestructuren  
Verkorte documenttitel    NMIJ Slib, Deel I: Luwtestructuren  
                          Status    Definitief rapport  
                          Datum    31 augustus 2010 – update september 2015  
                          Projectnaam    Natuurlijk(er) Markermeer IJmeer  
Projectnummer    9V6742.A5  
Opdrachtgever    RWS Dienst IJsselmeergebied  
                          Referentie    9V6742.A5/R0036/903718/BW/Nijm

Auteur(s)    Klaas Pieter Visser, Thomas Vijverberg, Petra Dankers  
Collegiale toets    Gert Jan Akkerman  
Datum/paraaf    31 augustus 2010  
Vrijgegeven door    Roelof Moll  
Datum/paraaf    31 augustus 2010



## INHOUDSOPGAVE

	Blz.	
1	INLEIDING	1
1.1	Kader en achtergrond	1
1.2	Probleemstelling en doel	2
1.3	Visie TMIJ	3
1.3.1	Luwtegebieden en luwtestructuren	3
1.4	Leeswijzer	6
2	VORMGEVING EN WERKING	7
2.1	Inleiding	7
2.2	Luwtestructuren als geleidingsstructuren	7
2.2.1	Werking	7
2.2.2	Vormgeving	12
2.2.3	Lengte en positionering	14
2.3	Golfbrekers	16
2.3.1	Werking	16
2.3.2	Vormgeving	21
2.3.3	Lengte en positionering	28
2.4	Luwtestructuren met golfluwte werking en met stromingsluwte werking	32
2.4.1	Combinatie van golfluwte en stromingsluwte	32
2.4.2	Vormgeving: dubbelfunctie	32
2.4.3	Lengte en positionering: samengesteld effect	33
3	RESULTATEN UIT EERDERE MODELSTUDIES	36
3.1	Inleiding	36
3.2	Royal Haskoning – Januari 2006	36
3.2.1	Compartimentering	36
3.2.2	Strekdammen	38
3.2.3	Eilanden	38
3.2.4	Aandachtspunten	38
3.3	WL   Delft Hydraulics - December 2007	39
3.3.1	Inleiding	39
3.3.2	Hoornsche Hop (zie ook figuur 4.1)	40
3.3.3	Marken	41
3.4	Deltares - December 2008	42
3.4.1	Inleiding	42
3.4.2	Hoornsche Hop	42
3.4.3	Marken	43
3.5	Deltares – Juli 2009	45
3.6	Deltares – Januari 2010	47
4	BESTAANDE CONSTRUCTIES	50
4.1	Inleiding	50
4.2	Bestaande situaties	51
4.2.1	Dammen langs de Houtribdijk	51
4.2.2	Hoekelingsdam	52
4.2.3	Dam Oostvaardersdijk	53
4.2.4	Luwtedam Gooi-Eemmeer	53

BIJLAGEN

1. Resultaten Delft3D berekeningen december 2007
2. Resultaten Delft3D berekeningen december 2008
3. Resultaten Delft3D berekeningen december 2010

## 1 INLEIDING

### 1.1 Kader en achtergrond

Deze initiële bureaustudie naar de werking van 'Luwtestructuren' (eerder aangeduid met 'Geleidingsstructuren') is onderdeel van het project Natuurlijk(er) Markermeer IJmeer (NMIJ). NMIJ is op haar beurt onderdeel van het Programma Randstad Urgent (PRU). Eén van de thema's binnen PRU is gericht op de realisatie van een aantrekkelijk woon-, werk- en leefklimaat. Binnen dit thema wordt het project Toekomstagenda Markermeer IJmeer (TMIJ) uitgevoerd.

In TMIJ-verband is het 'Ontwikkelingsperspectief investeren in Markermeer en IJmeer' opgesteld, waarin is aangegeven dat geïnvesteerd moet worden in maatregelen voor de ontwikkeling van een robuust en duurzaam functionerend watersysteem, zodat ruimte kan ontstaan voor de ontwikkeling van andere functies.

Het NMIJ project, als verdere uitwerking van de TMIJ, wordt uitgevoerd door Royal HaskoningDHV en Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat Dienst IJsselmeergebied. Dit project moet uitwijzen welke investeringen in natuurontwikkeling het meest kansrijk zijn voor het realiseren van een robuust ecologisch systeem en een klimaatbestendig watersysteem in het Markermeer en IJmeer.

Voor het NMIJ project zijn drie hoofddoelen geïdentificeerd:

- Verminderen van het slibgehalte;
- Vergroten van de habitatdiversiteit en hydrodynamiek;
- Verbinden van watersystemen en verbinden van binnen- en buitendijks gebied.

Binnen het NMIJ project zijn 11 typen maatregelen benoemd welke mogelijk tot het bereiken van de hoofddoelen kunnen leiden (overeenkomstig het Definitief programma NMIJ). De 11 maatregelen zijn hierna per hoofddoel/thema aangegeven:

Verminderen slibgehalte:

- S-A Aanbrengen van luwtestructuren;
- S-B Aanbrengen van verdiepingen;
- S-C Afdekken van slib.

Vergroten habitatdiversiteit en hydrodynamiek:

- H-A Inrichten van grootschalige land-waterzone/moeras;
- H-B Aanleggen van een vooroever Lepelaarsplassen;
- H-C Creëren van heldere en ondiepe zones;
- H-D Vergroten van de dynamiek (seizoensgebonden peil).

Verbinden van systemen:

- V-A Versterken van de ecologische verbindingen binnen- en buitendijks;
- V-B Aanleggen van ecologische verbindingen voor vismigratie;
- V-C Semi-open verbinding tussen Markermeer en IJsselmeer via de Houtribdijk;
- V-D Visstandbeheer.

In het NMIJ project zullen bovenstaande maatregelen nader onderzocht worden. Het is de bedoeling dat bij afronding van het project in 2015, op grond van een integraal advies, onderbouwde keuzes kunnen worden gemaakt voor de inrichting van een veerkrachtig en robuust ecosysteem.

De voorliggende initiële bureaustudie is onderdeel van het hoofddoel 'Verminderen slibgehalte' en richt zich op de maatregel 'Geleidingsstructuren'. Tijdens de bureaustudie bleek echter dat de invloed van geleidingsstructuren op de doorzichtcondities in de meeste gevallen niet alleen bestaat uit het afleiden van de stroming en daarmee van het transport van slibrijk water. Doorzichtcondities worden door zowel het slibtransport als resuspensie ten gevolge van windgolven bepaald. Geleidingsstructuren beïnvloeden in veel gevallen beide processen op hetzelfde moment en functioneren daarmee tevens als golfbrekers. De lokatie van de geleidingsstructuur/golfbreker en het windklimaat bepalen de verhouding tussen bijdrage van de stroomgeleidingswerking en de golfwuwwerking op de doorzichtcondities. De beide functies zijn slechts bij uitzondering strikt te scheiden. Vandaar dat er in deze studie voor is gekozen om voor deze maatregel zowel het effect ervan op het slibtransport als op de golfwuwte werking te onderzoeken. Daarom is de titel '**Luwtestructuren**' gekozen, waarmee beide effecten kunnen worden aangeduid.

Initiële bureaustudies naar de overige maatregelen om het slibgehalte te verminderen, zoals het aanbrengen van verdiepingen, zijn in afzonderlijke rapportages vastgelegd.

## 1.2 Probleemstelling en doel

Sinds de bouw van de Afsluitdijk is het IJsselmeergebied veranderd van een zoutwatergebied naar een zoetwaterbinnenmeer. Vervolgens heeft de afsluiting van het Markermeer tot gevolg gehad dat de slibconcentraties in het water zijn toegenomen terwijl dit in het resterende IJsselmeer veel minder het geval is. Een groot verschil tussen het Markermeer en IJsselmeer is dat het IJsselmeer dieper is (en daardoor minder last heeft van golfwerking op de bodem) en dat de bodemopbouw verschilt: het IJsselmeer heeft voornamelijk een zandige bodem terwijl de bodem van het Markermeer grotendeels bestaat uit zeeklei en leem, afgezet ten tijde van de Zuiderzee. Deze bodem, en dan voornamelijk het bovenste laagje, komt gemakkelijk in beweging onder de invloed van stroming en golven. Dit heeft tot gevolg dat het meer in zijn huidige staat bijna altijd troebel is en dat het doorzicht beperkt is. Het doel van de slibmaatregelen binnen het NMIJ project is het verminderen van de slibconcentratie in het water en het verbeteren van het doorzicht.

Luwtestructuren kunnen de doorzichtcondities in de door luwte beïnvloede delen van het Markermeer verbeteren door zowel het verminderen van resuspensie van bodemmateriaal ten gevolge van verlaging van de windgolven en/of door het afleiden van stromingen met slibrijk water naar andere gebieden. Het is daarbij nu nog onbekend hoe groot de afzonderlijke bijdragen van beide effecten zijn aan het totale effect van verbetering van de doorzichtcondities.

Het doel van deze literatuurstudie is inzicht verkrijgen in de huidige stand van zaken met betrekking tot het effect van bestaande of gesimuleerde Luwtestructuren op de slibconcentraties en doorzichtscondities in en nabij de luwtegebieden en eventuele effecten op het totale systeem. Hiertoe worden in dit rapport de relevante fenomenen beschreven en is bestaande literatuur geïnventariseerd, inclusief recente modelstudies.

Bij de bureaustudie staan de relevante onderzoeksvragen van NMIJ centraal. Deze onderzoeksvragen zijn door Rijkswaterstaat IJsselmeergebied gedefinieerd tijdens een workshop binnen het NMIJ project met betrekking tot Luwtestructuren.

### 1.3 Visie TMIJ

#### 1.3.1 Luwtegebieden en luwtestructuren

Zoals eerder aangegeven valt het NMIJ project onder TMIJ. In een eerdere fase is er binnen TMIJ een visie ontwikkeld op het creëren van heldere ondiepe kustzones door middel van damachtige Luwtestructuren. Hierbij wordt op een aantal locaties in het meer in deze structuren voorzien. De structuren kunnen daarbij ofwel een stroomgeleidende werking of golfbrekende werking hebben, maar ook beide functies.

Het TMIJ-rapport is sterk ingestoken vanuit een ecologisch, economisch en recreatief perspectief en gaat niet zozeer in op de technische uitwerking. De Luwtestructuren zijn schetsmatig aangegeven, zie figuur 1.1 en bevinden zich aan de rand van het Markermeer nabij de Hoornsche Hop. Dit toekomstbeeld is overigens geen formeel plan en er worden geen onomkeerbare keuzes in gemaakt.

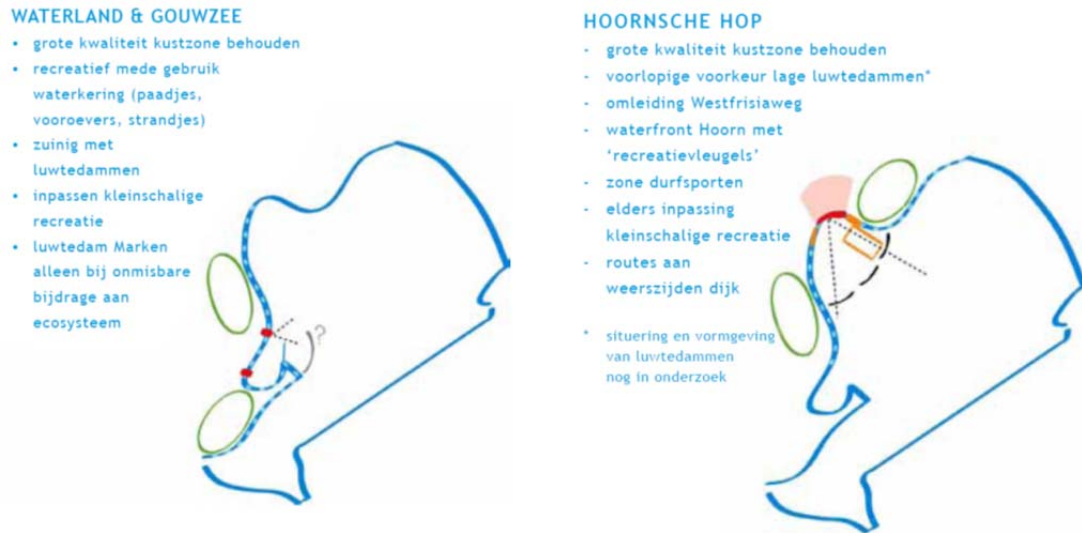
In het plan wordt over de Luwtestructuren gemeld:

*'Dit Toekomstbeeld geeft de stand van zaken weer in de zomer van 2009. De nieuw opgedane kennis ondersteunt en nuanceert de aannames van het Ontwikkelingsperspectief en, zeker zo belangrijk, gemeenten en andere lokale partijen hebben meer zicht gekregen op wat de maatregelen beogen en voor hen kunnen betekenen. Het Toekomstbeeld kan op een stevig regionaal draagvlak rekenen. Op hoofdlijnen bestaat grote overeenstemming.'*

Buiten een keten van strekdammen nabij de vaargeul bij Flevoland en het IJmeer worden in de TMIJ visie twee locaties voor de toepassing van Luwtedammen vermeld (zie figuur 1.1):

1. Bij de Hoornsche Hop.
2. Bij het eiland Marken.

Beide locaties zijn onderdeel van de Noord-Hollandse Markermeerkust.



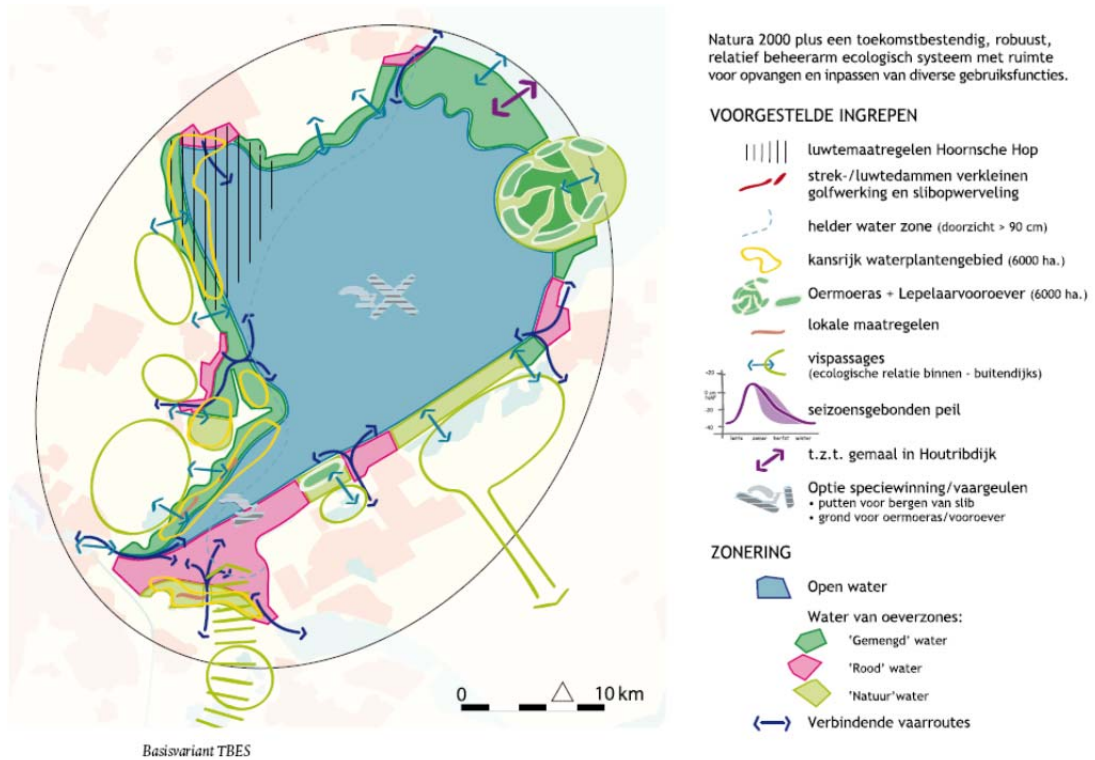
**Figuur 1.1: Visie voor Waterland & Gouwzee en Hoornsche Hop (Samenwerkingsverband Toekomstagenda Markermeer IJmeer (2009))**

Over de inpassing van de ecologie aan deze zijde van het Markermeer wordt het volgende opgemerkt:

*'In het ecologische systeem spelen hier vooral de luwtmaatregelen, om helder water te verkrijgen, en de verbindingen met de waterrijke landschappen achter de dijk. De luwtmaatregelen voor de kust belemmeren het vrije zicht zo min mogelijk. Ze blijven laag, liefst zelfs onder water, en krijgen geen functie als vaardoel. Wel moeten obstakels zichtbaar zijn voor de scheepvaart. Dammen parallel aan de kust of een aaneengesloten damstructuur gaan te veel ten koste van de openheid en hebben daarom geen steun in de regio. Een luwtedam bij Marken komt pas in aanmerking als andere maatregelen om helder water te creëren onvoldoende effect sorteren en blijft dan bij voorkeur vanaf de kust bij Volendam verscholen achter de bestaande strekdam. Op de routes voor de recreatievaart is een onbelemmerde doorvaart een vereiste. Vaarroutes door ondiepe delen zijn gemarkeerd en blijven vrij van belemmerende waterplanten.'*

De visie is binnen NMIJ overgenomen en wordt als leidraad bij de verdere uitwerking gebruikt. In figuur 1.2 zijn schetsmatig de aspecten aangegeven die met de luwtedammen samenhangen, dan wel doelen die worden beoogd.





**Figuur 1.2: Diverse maatregelen, zoals geïdentificeerd in TMIJ (Samenwerkingsverband Toekomstagenda Markermeer IJmeer (2009))**

#### 1.4 Leeswijzer

Na de voorafgaande inleiding gaat dit rapport in hoofdstuk 2 in op de recente kennis ten aanzien van de vormgeving van Luwtestructuren en op de werkingsprincipes bij stroming en golven.

Een verdere kwantificering van deze twee fysische processen is gepresenteerd in hoofdstuk 3, waarin de effecten meer in detail worden besproken aan de hand van recent uitgevoerde onderzoeken.

Vervolgens wordt in hoofdstuk 4 een overzicht gegeven van de hoedanigheid van de bestaande of bestaand hebbende Luwtestructuren. Opgemerkt wordt dat eventueel onderzoek aan bestaande constructies, voor zover relevant, al bij hoofdstuk 3 is behandeld.

In de bijlagen zijn details van interessante onderzoeksuitkomsten vermeld van de onderzoeken die in hoofdstuk 3 worden behandeld.

## 2 VORMGEVING EN WERKING

### 2.1 Inleiding

Luwtestructuren kunnen gericht zijn op een tweetal functies: een functie bij het reduceren van de golfinvloed (golfdemping, golfbreker) en een stroomgeleidende functie. Vaak zullen beide functies in meerdere of mindere mate door een Luwtestructuur worden vervuld.

Luwtestructuren kunnen het doorzicht in bepaalde gebieden verbeteren door het afleiden of veranderen van de (lokale) stroming en daarmee het slibtransport. Het verminderen van de toestroom van slibrijk water kan leiden tot betere doorzichtcondities. De effectiviteit wordt bepaald door zowel de vormgeving, lengte en positionering van de structuur als door het stroombeeld (inclusief slibdynamiek) waarin de structuur wordt toegepast.

Golfbrekers vergroten het doorzicht in achtergelegen luwtegebieden door het verminderen of tegengaan van resuspensie van bodemmateriaal en tevens door het versterken van de sedimentatie van zwevend stof uit de waterkolom. Naast een toename van doorzicht leidt de afname van golfdynamiek tevens tot een toename van de vestigingskansen voor bepaalde waterflora en waterfauna. Het doorzicht is echter niet alleen afhankelijk van de lokale resuspensie maar ook van het transport van (slibrijk) water van en naar het luwtegebied. Dit geeft het belang aan om beide aspecten, de golfuwtewerking en stroomgeleidende werking, steeds in samenhang te bekijken, zie paragraaf 2.4.

In dit hoofdstuk wordt allereerst de werking en vormgeving van geleidingsstructuren en golfbrekers apart behandeld. Vervolgens wordt ingegaan op een gecombineerde werking.

### 2.2 Luwtestructuren als geleidingsstructuren

#### 2.2.1 Werking

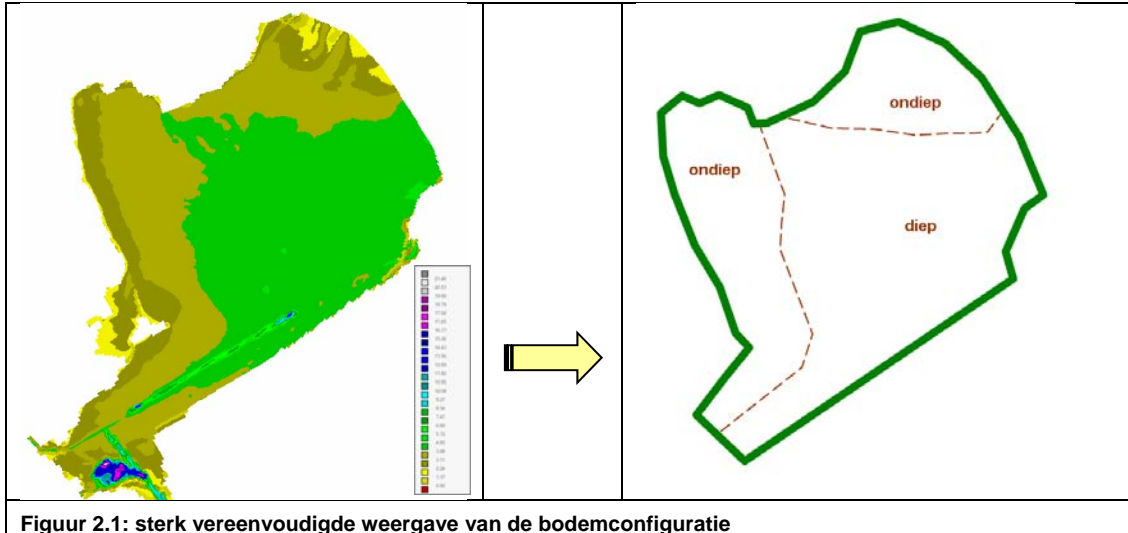
De werking van stroomgeleidende structuren is in eerste instantie afhankelijk van het stroombeeld/stroomtype waarin deze worden toegepast. In deze paragraaf wordt eerst het globale stroombeeld in het Markermeer besproken en vervolgens de werking van stroomgeleidende structuren binnen het stroombeeld van het Markermeer.

#### *Stroming in het Markermeer*

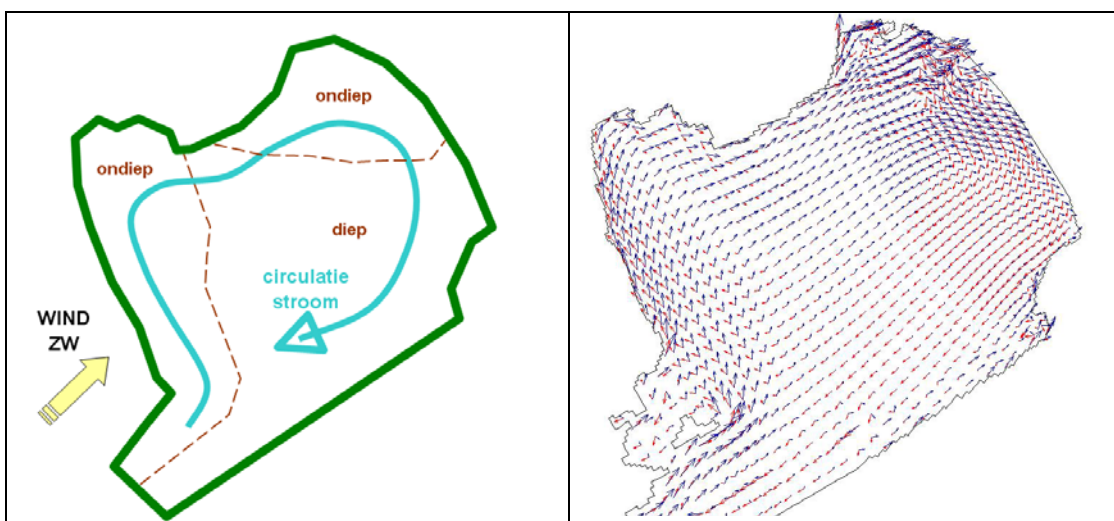
De stroming in het Markermeer is windgedreven en wordt daarmee bepaald door de optredende windcondities en de lokale bodemconfiguratie. Het stroombeeld in een windgedreven systeem verschilt wezenlijk van het stroombeeld dat bijvoorbeeld optreedt in rivieren. In het Markermeer bedraagt de maximale windgedreven stroomsnelheid ca. 0,25 m/s. Daarnaast kan de richting van de stroming in het Markermeer in de tijd sterk variëren, omdat deze naast de waterdiepte door de overheersende windrichting op een bepaald moment wordt bepaald. Ook de kortelings daaraan voorafgaande windcondities spelen een rol. De stroming kan hierdoor in tegengestelde richtingen bewegen.

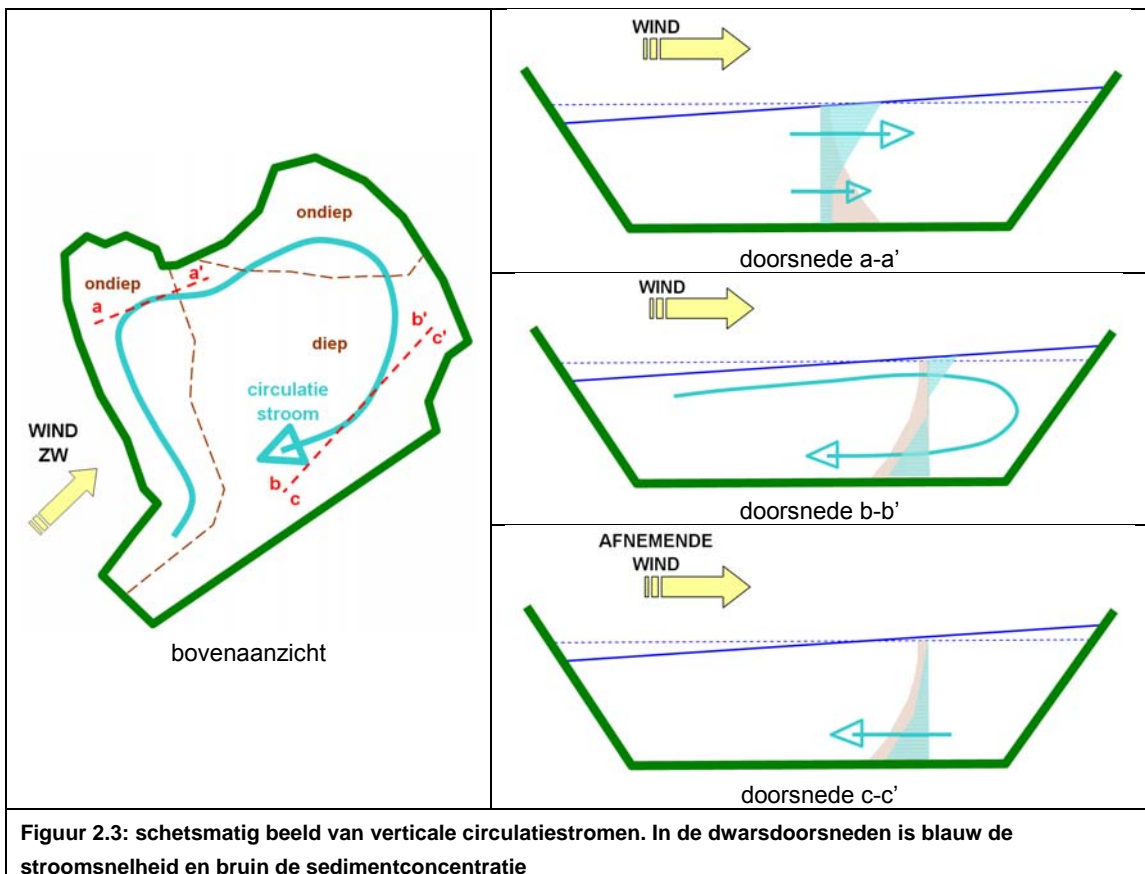
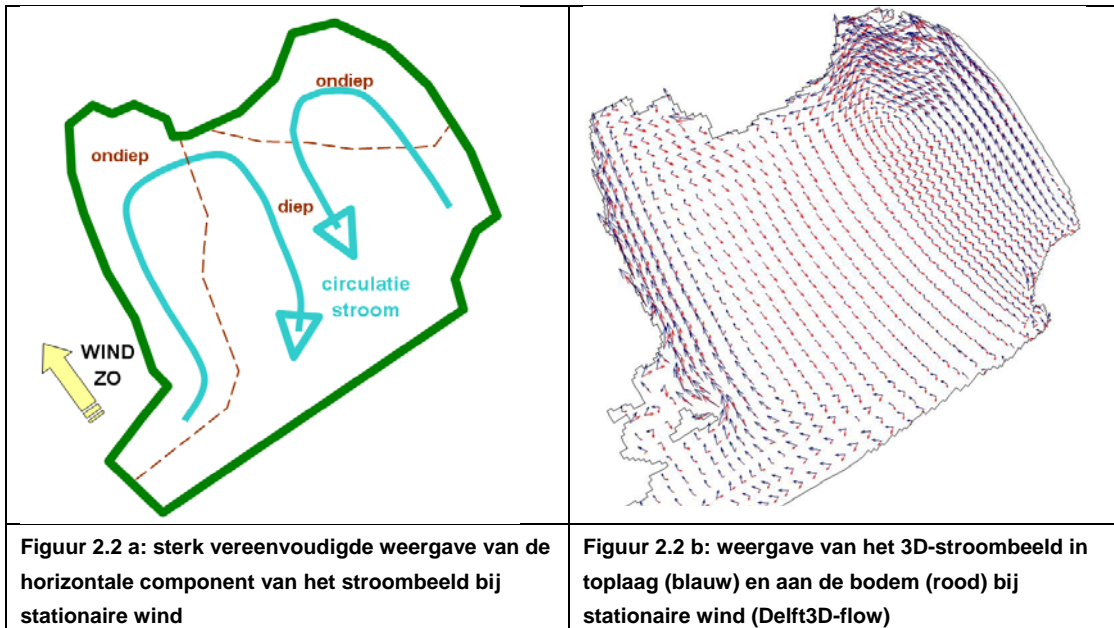
Het sterk variërende stroombeeld maakt op het eerste gezicht de toepassing van stroomgeleidende structuren in het Markermeer minder voor de hand liggend.

Analyse van het stroombeeld laat echter zien dat bepaalde stromingspatronen zich vaker voordoen dan andere. Wanneer we het Markermeer sterk schematisch weergeven kunnen we de bodemconfiguratie weergeven als in figuur 2.1.



In een windgedreven gesloten systeem als het Markermeer bestaat het stroombeeld uit circulatiestromen ten gevolge van windopzet. Dergelijke circulatiestromen kunnen worden beschreven door horizontale en verticale stromingscomponenten. Figuren 2.2.a en 2.2.b toont het stroombeeld bij twee stationaire windcondities: zuidwestenwind (bovenste figuur) en zuidoostenwind (onderste figuur). Deze twee condities laten twee kenmerkende stromingstypen zien die zich in het Markermeer voor kunnen doen: één grote gekantelde (dat wil zeggen: verticale) neer door het gehele meer en twee gekantelde neren die in tegengestelde richting draaien. Voor de tegenpolen van deze twee windrichtingen (namelijk noordwesten en noordoostenwind) geldt een vergelijkbaar stroombeeld, enkel stroomt het water dan in de tegengestelde richting.



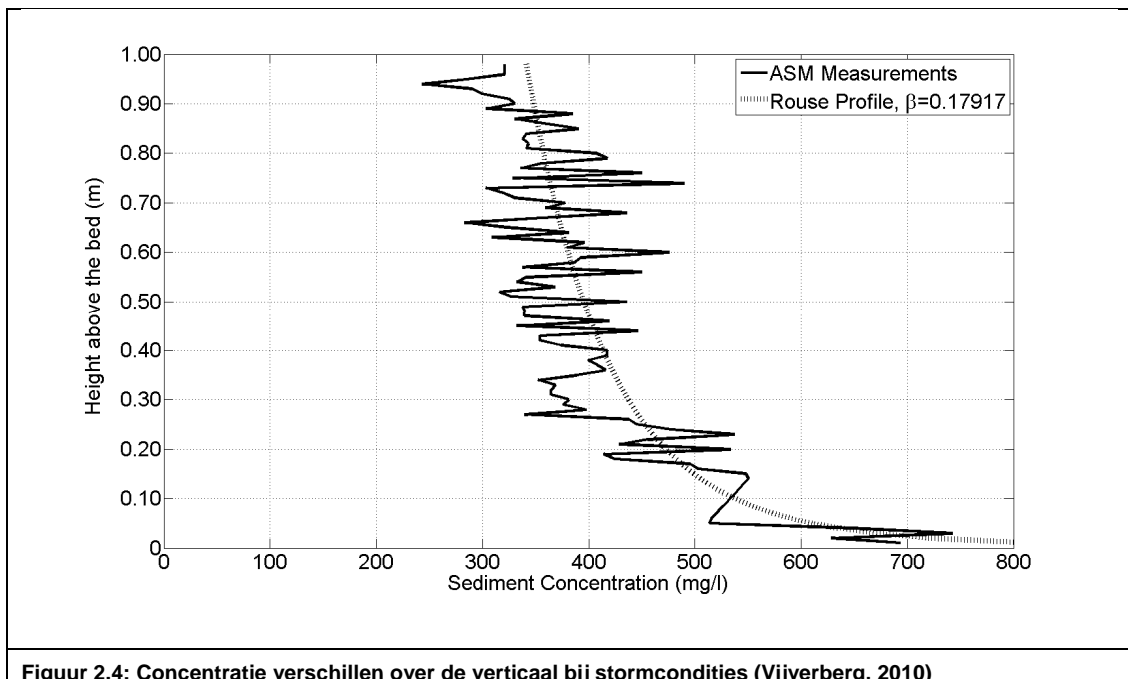


Het is echter nog onduidelijk hoe deze stationaire stromingspatronen in elkaar overgaan bij variërende windrichtingen. Door middel van modelsimulaties kan dit worden onderzocht en kan worden vastgesteld of ook aan de hand van windfrequentie tabellen kan worden geschat wat de specifieke stroombeelden zijn bij draaiende winden.

De mate van voorkomen van bepaalde typen stroombeelden kan vervolgens gebruikt worden bij het beantwoorden van de vraag op welke locaties het toepassen van stroomgeleidende structuren het meest werkzaam zal zijn.

De horizontale component van de circulatiestromen geeft doorgaans een goede indicatie van het stroombeeld, maar is wel een vereenvoudigde weergave<sup>1</sup>. In een windgedreven systeem kunnen stroomrichtingen en snelheden in de toplaag en aan de bodem namelijk sterk verschillen en in sommige gevallen zelfs tegengesteld zijn. Het verschil in stroomrichting tussen toplaag en de laag aan de bodem is in figuur 2.3 voor twee locaties bij zuidwesten wind schematisch weergegeven.

Dit verschil is in principe van belang voor het slibtransport (Vijverberg, 2008), zeker aangezien slibconcentraties tijdens stormcondities sterk over de verticaal kunnen verschillen (zie figuur 2.4) en vaak hoger zijn nabij de bodem. Onduidelijk is echter nog hoe groot dit effect is en in welke mate dit proces het algehele slibtransport bepaalt.<sup>2</sup> Wanneer de bijdrage van het transport aan de bodem significant is, heeft dit invloed op de benodigde hoogte of diepte van stroomgeleidende structuren. Dit onderwerp wordt verder besproken in paragraaf 2.2.2 'vormgeving'.



**Figuur 2.4: Concentratie verschillen over de verticaal bij stormcondities (Vijverberg, 2010)**

#### *Effect van Luwtestructuur op stroomgeleiding*

Een stroomgeleidende structuur kan in een systeem met windgedreven stroming een bepaald gebied afzonderen van de hoofdcirculatiestroom door het afleiden van de optredende circulatiestroom. Het gebied achter de stroomgeleidende structuren wordt als het ware 'losgekoppeld' van de hoofdcirculatie en er ontstaat een stroomluw gebied achter de geleidingsstructuur.

<sup>1</sup> In feite is dit in de meeste gevallen de resultante van zowel de verticale als horizontale componenten, maar deze wordt meestal getoond in het horizontale vlak.

<sup>2</sup> Van Duin is in haar studie uitgegaan van een zeer goede en snelle menging over de verticaal, waardoor er ten aanzien van slibtransport gerekend kon worden met diepte gemiddelde stroomsnelheden (Van Duin, 1992).

Door plaatsing van een geleidingsstructuur wordt op deze manier voorkomen dat slibrijk water vanuit het meer naar het luwtegebied getransporteerd kan worden en visa versa, zie ook figuur 2.5 (stroming met nummer 1).

Figuur 2.5 geeft een voorbeeld van het effect van plaatsing van een geleidingsstructuur in de Hoornsche Hop op de stroming. De Hoornsche Hop wordt gezien als kansrijke locatie vanwege het relatief constante stroombeeld (Visser, 2007). Hierdoor kan de geleidingsstructuur bij sterk verschillende windrichtingen een gunstige uitwerking hebben.



**Figuur 2.5: Schetsmatige werking stroomgeleidende structuren in Hoornsche Hop**

In de schetsen in figuur 2.5 is gekozen voor een stroomgeleidende structuur met een opening. Een volledige afsluiting is niet wenselijk vanuit het oogpunt van recreatie, ecologische verbindingen (2<sup>e</sup> V-thema/ doelstelling NMIJ) en waterkwaliteit.

Door middel van opening(en) in de stroomgeleidende structuren blijft het luwtegebied verbonden met de peildynamiek van het meer ten gevolge van windopzet (zie stroming met nummer 2 in figuur 2.5). Dit zorgt er voor dat het transport van slibrijk water naar het gebied niet geheel wordt tegengegaan. Dit effect is echter van een kleinere orde dan het transport via de hoofdstroom.

Wel kan toename van stroomsnelheden ter plaatse van de openingen zorgen voor relatief meer resuspensie en daardoor minder doorzicht dan het geval zou zijn bij een compleet gesloten geleidingsstructuur (Boderie & Hulsbergen, 2009). Dit effect wordt verder besproken in de paragraaf 2.2.3 'lengte en positionering'. Stroomgeleidende structuren kunnen daarnaast op andere plaatsen juist weer zorgen voor een afname van stroomsnelheden wat kan leiden tot een toename van de sedimentatie.

Eerder is al aangegeven dat de stroomrichting in het Markermeer variabel is. Hoewel uit de analyse van de stationaire windcondities blijkt dat het stroombeeld in de Hoornsche Hop relatief constant is, dient door middel van modelstudie en een pilot nog wel nader vastgesteld worden in welke mate een variërende windrichting invloed heeft op het slibtransport.

Het is op dit moment nog onduidelijk hoe groot daadwerkelijk de invloed is van het slibtransport op de doorzichtcondities in specifieke gebieden van het Markermeer. Het doorzicht lijkt in de meeste delen van het Markermeer vooral bepaald te worden door resuspensie van bodemmateriaal ten gevolge van windgolven. Of de bijdrage van slibtransport in sommige delen ook een rol kan spelen bij de optredende slibconcentraties en doorzichtcondities, moet nog nader worden bepaald. Ook als stroomgeleidende structuren een significant effect zouden hebben op de doorzichtcondities, wordt nog wel verwacht dat golfreductie (golfluwtewerking) noodzakelijk blijft om de benodigde doorzichtverbetering te halen.

De Hoornsche Hop lijkt een kansrijke locatie voor stroomgeleidende structuren gezien de van nature golfuwe ligging en het optredende stroombeeld bij de verschillende stationaire windcondities.

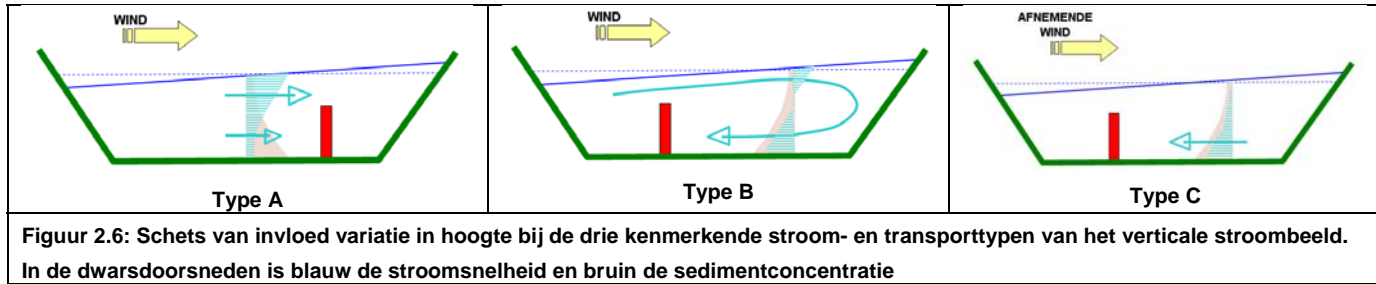
### 2.2.2 Vormgeving

Naast de functionele doelstellingen wordt de vormgeving van stroomgeleidende structuren bepaald door o.a. ecologische doelstellingen, landschappelijke en ruimtelijke inpassing, hydraulische belastingen, stabiliteit en funderingsmogelijkheden. De voorliggende studie richt zich echter alleen op functionele doelstellingen, met andere woorden: het effect op de slibconcentraties en doorzicht condities (hoofddoelstelling slibstudie, 1<sup>e</sup> V-thema NMIJ). De andere aspecten die de vormgeving mede bepalen worden vervolgens uitgewerkt in een latere fase van het project. Typen stroomgeleidende structuren waar aan gedacht kan worden zijn: slibschermen, dammen, damwanden, schotten, eilanden, enzovoorts. Functionele eisen ten aanzien van de vormgeving van een geleidingsstructuur betreffen de hoogte, stabiliteit, doorlatendheid, de lengte en de positionering.

#### *Hoogte*

De minimaal benodigde hoogte wordt vooral bepaald door de verdeling van het slibtransport over de verticaal (zie ook figuur 2.6). Type A is het meest representatief voor het stroombeeld in de Hoornsche Hop.





Zoals al in de voorgaande paragraaf is aangegeven is op het moment echter nog niet voldoende onderzocht wat de verhouding is tussen slibtransport aan de bodem en het slibtransport door de waterkolom. Wanneer het slibtransport aan de bodem relatief groot is, kan een lagere (onderwater)structuur al zorgen voor voldoende afbuiging van het slibtransport. Verwacht wordt echter dat vanwege de relatief lage stroomsnelheden en de sterke verticale menging, het transport via de gehele waterkolom plaats vindt en dat enkel structuren die zo goed als tot aan het wateroppervlak reiken voldoende effect hebben. Deze hypothese dient echter getoetst te worden door middel van modelstudie.

Lagere constructies kunnen bij de toepassing van openingen in stroomgeleidende structuren mogelijk ook een positieve rol spelen ten aanzien van de doorzichtcondities (Boderie & Hulsbergen, 2009). Bij hoge stroomgeleidende structuren kunnen de stroomsnelheden in de openingen namelijk sterk toenemen (afhankelijk of de openingen over de hele diepte zijn aangebracht), wat kan leiden tot een sterkere resuspensie van bodemmateriaal. Doordat lagere structuren ook uitwisseling toelaten over de structuur zelf, neemt de stroomsnelheid, en daarmee de resuspensie, ter plaatse van de opening af. Dit effect is waarschijnlijk enkel van belang bij relatief kleine luwtegebieden.

Als de hoogte van een stroomgeleidende structuur een duidelijke rol speelt voor de effectiviteit, is het van belang om ook de invloed van de introductie van een nieuw seizoensgebonden peil te onderzoeken. Dit kan gedaan worden door middel van modelberekeningen.

#### *Stabiliteit en doorlatendheid*



**Figuur 2.7: Toepassing slibschermen bij baggerwerkzaamheden**

Eisen die vanuit de functionaliteit aan de stabiliteit en de doorlatendheid van een geleidingsstructuur kunnen worden gesteld zijn: voldoende stabiliteit om de optredende stroomsnelheden te kunnen afbuigen en een dusdanige ondoorlatendheid van de structuur zelf dat geen slibtransport naar het luwtegebied zal optreden.

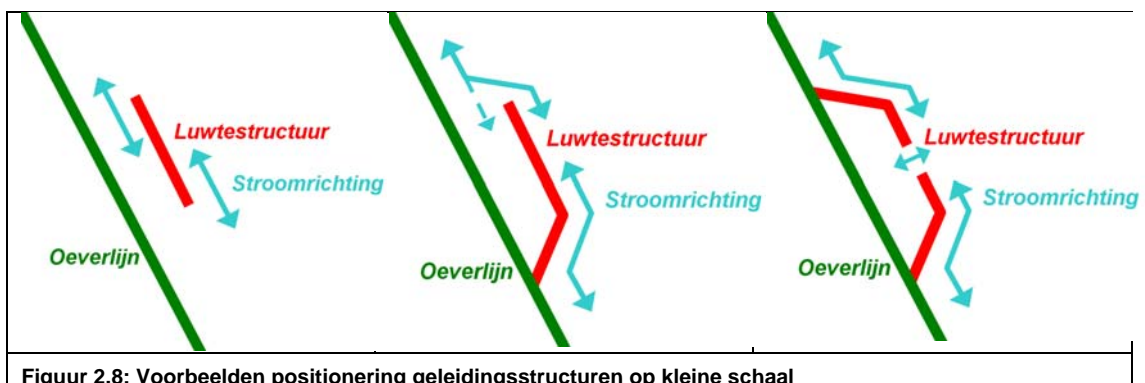
Aangezien de stroomsnelheden in het Markermeer relatief laag zijn is het misschien mogelijk om stroomgeleidende structuren uit te voeren als slibschermen (doeken), zoals toegepast bij baggerwerkzaamheden (Figuur 2.7). Deze variant wordt meestal toegepast als een tijdelijke maatregel en dit type is overwogen als alternatief voor de uitvoering van het veldexperiment. Door de vraagtekens ten aanzien van plaatsvastheid, afsluitbaarheid nabij de bodem en bestendigheid tegen ijsbelasting, is dit alternatief voor het veldexperiment afgefallen.

Of deze variant ook een gewenste/haalbare oplossing kan zijn voor de langere termijn dient nog nader te worden verkend, samen met een toonaangevende fabrikant. Naast flexibele plaatsvast slibschermen kan als geleidingsstructuur ook aan drijvende slibschermen worden gedacht, waarbij bijvoorbeeld een scherm als 'skirt' onder een drijvende constructie wordt opgehangen. De drijvende constructie kan dan vooral fungeren als golfbreker. Een dergelijke oplossing is wellicht minder gevoelig voor schade door ijsvorming en –belasting.

### 2.2.3 Lengte en positionering

De meest optimale positionering is afhankelijk van het stroombeeld in het betreffende zoekgebied. Langs de Noord-Hollandse kust (Hoornsche Hop en Waterland) is de stroming hoofdzakelijk parallel aan de oever (zie paragraaf 2.2.1). Stroomgeleidende structuren op kleine schaal of parallel aan de oeverlijn hebben daardoor zo goed als geen effect op het slibtransport.<sup>3</sup>

Wanneer één of beide zijden van de structuur aan de oever wordt verbonden wordt de stroming echter wel beïnvloed (zie figuur 2.8). Deze toepassing is vooral een goede aanvulling voor luwtegebieden waar in eerste instantie wordt ingestoken op verbetering van de doorzichtcondities door middel van verzwakking van de golfcondities. Hoe groot het secundaire effect van de geleiding op de doorzichtcondities is, kan per locatie worden bepaald door middel van modelberekeningen.



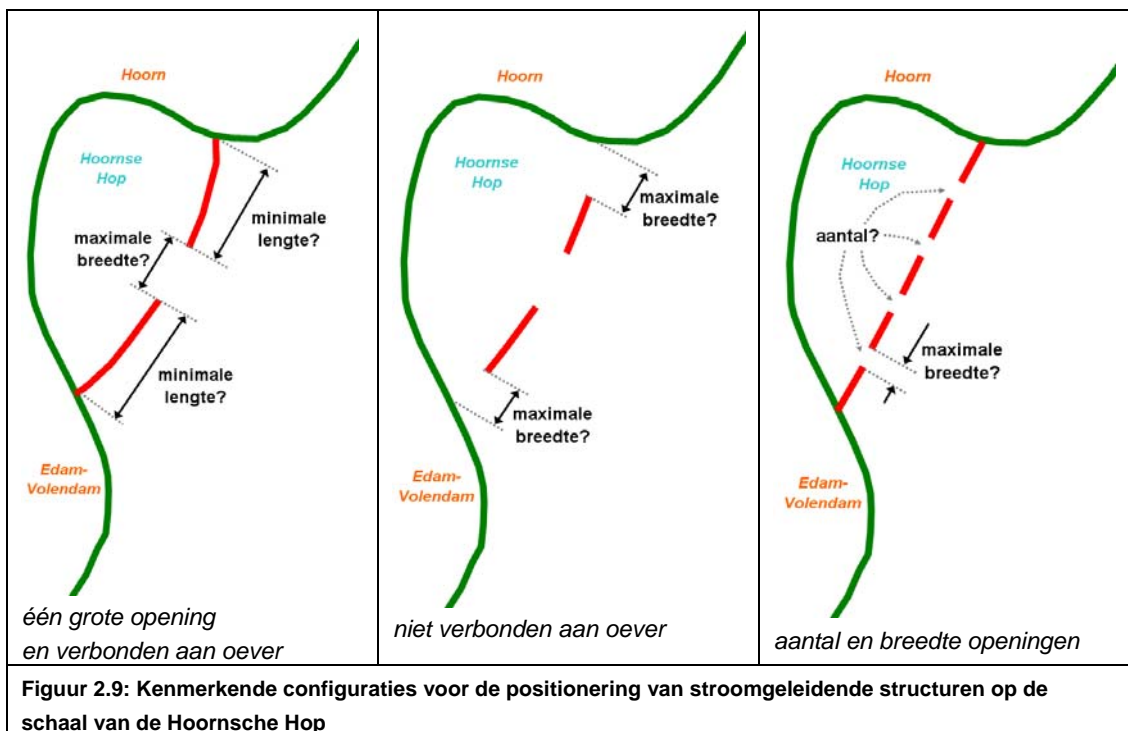
Figuur 2.8: Voorbeelden positionering geleidingsstructuren op kleine schaal

<sup>3</sup> Wanneer de structuur echter tevens een golfbrekende functie heeft, kan deze wél de doorzichtcondities in gunstige zin beïnvloeden. De combinatie van golfuwte en geleiding van mogelijke structuren wordt verder besproken in paragraaf 3.4.

Zoals aangegeven in figuur 2.5 lijkt het stroombeeld in de Hoornsche Hop ook op een grotere schaal kansen te bieden voor grotere stroomgeleidende structuren en een navenant gunstig effect op de doorzichtcondities. In figuur 2.5 is deze toepassing van stroomgeleidende structuren globaal aangegeven door middel van twee lange dammen die beide aan één zijde aan de oever zijn verbonden en zo één opening naar het luwtegebied over laten. Er zijn meerdere varianten mogelijk wat betreft de positionering en het aantal openingen naar het luwtegebied, wat vanuit andere doelstellingen en belangen in het gebied gewenst kan zijn. Hierbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan recreatie en ecologische verbindingen, maar ook aan waterkwaliteit. Wanneer het luwtegebied te stagnant wordt, kan dit leiden tot sterke algenbloei wat vervolgens juist weer het doorzicht verslechtert.

Figuur 2.9 toont drie kenmerkende configuraties voor mogelijke variatie in lengte en positionering. Onderscheidende aspecten hierbij zijn:

- Aantal en breedte toelaatbare/benodigde openingen;
- Al dan niet een verbinding met de oever.



Via modelstudie kan worden onderzocht welke varianten de hoofdcirculatie nog voldoende afkoppelen van het luwtegebied opdat de doelstellingen ten aanzien van verbetering doorzicht nog gehaald worden en tevens voldoende rekening wordt gehouden met de overige belangen in het gebied. Verder kunnen te grote openingen er toe leiden dat de hoofdcirculatie alsnog het luwtegebied binnendringt. Daarnaast kunnen de stroomsnelheden ter plaatse van openingen aanzienlijk toenemen wat door een sterkere resuspensie leidt tot slechtere doorzichtcondities dan bij een dichte structuur (Boderie & Hulsbergen, 2009).

Ook eventuele openingen tussen de oever en de stroomgeleidende structuren kunnen van invloed zijn op het uiteindelijk effect, omdat de hoofdstroming daar parallel aan de oeverlijn is en de stroomsnelheden hier het grootste zijn: als er een grote opening is tussen structuur en oever bestaat het risico dat de stroming daardoor niet voldoende wordt afgebogen.

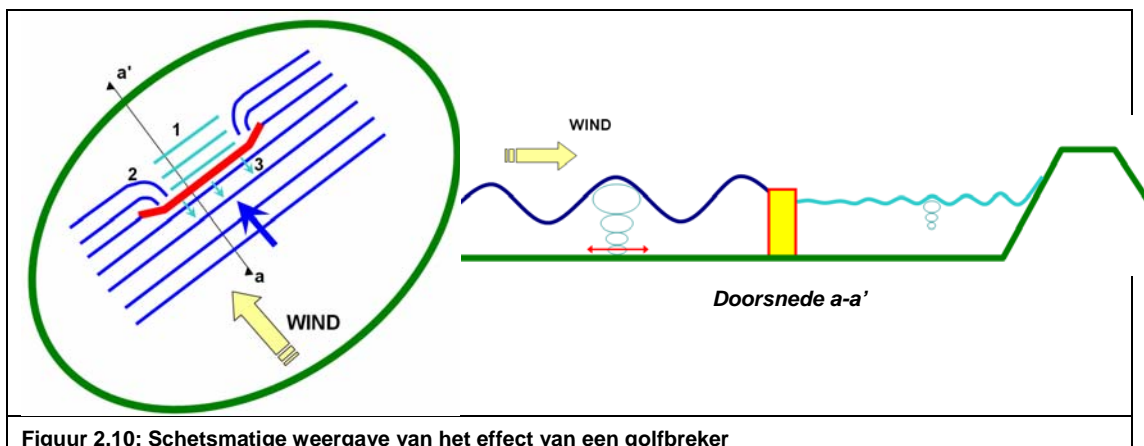
## 2.3 Golfbrekers

### 2.3.1 Werking

In ondiep water veroorzaken golven door hun orbitale beweging schuifspanningen aan de bodem. Wanneer deze schuifspanningen groter zijn dan een bepaalde kritische waarde leidt dit tot resuspensie van bodemmateriaal. Golfbrekers kunnen de golfhoogte verkleinen waardoor de golfwerking niet langer of in mindere mate resuspensie zal geven. Tevens zorgt de afname van golfdynamiek voor een toename van de sedimentatie.

In luwtegebieden direct achter golfbrekers wordt daarom naast een toename van het doorzicht ook aanslibbing verwacht. De mate van aanslibbing hangt samen met de grootte van het transport van slibrijk water van en naar het luwtegebied.

De effectiviteit van golfbrekers voor wat betreft golfdemping wordt bepaald door de vormgeving (geometrie en materiaal), lengte en positionering van de golfbreker en door de optredende golfcondities (golfkarakteristieken, frequenties en hoek van inval). De grootte van het gebied waarover het effect op de golfcondities doorwerkt is afhankelijk van de golfgroei over de gegeven strijklengte (zie figuur 2.10).



Figuur 2.10: Schetsmatige weergave van het effect van een golfbreker

De effectiviteit van golfbrekers wordt gekenmerkt door de afname van de golfdynamiek in het achtergelegen gebied. Dit is vooral zichtbaar door de afname van golfhoogtes. Het effect van golfbrekers op de golfcondities bestaat uit 3 fysische processen :

- Transmissie (1);
- Diffractie (2);
- Reflectie (3).

Van deze drie fysische processen is de golftransmissie het meest bepalend voor het uiteindelijke effect van de golfbreker. Golftransmissie vindt plaats wanneer een golfbreker de inkomende golf niet volledig breekt en daarmee golfenergie doorlaat in het achterliggende gebied.

Aan de uiteinden van een golfbreker kan daarnaast diffractie optreden. Diffractie zorgt voor een verspreiding van binnenkomende golfenergie in zijdelingse richting (lateraal) naar het luwtegebied. Bij golfreflectie wordt een deel van de golfenergie weerkaatst door de golfbreker. Het effect van reflectie wordt in deze studie als verwaarloosbaar verondersteld (WL | Delft Hydraulics, 2006 en Witteveen & Bos, 2005).

Wanneer transmissie en diffractie gelijktijdig optreden is het golfveld achter een golfbreker opgebouwd uit bijdragen van transmissie en diffractie. De interactie tussen de beide fysische processen kan worden bepaald met de transmissie-diffractie-coëfficiënt. Diffractie wordt in deze versie van de modellen echter niet meegenomen in de berekeningen. Verwacht wordt dat de invloed van diffractie in verhouding tot transmissie in de meeste gevallen gering zal zijn. Bij grotere openingen in de golfbrekers en kleinere lengtes van golfbrekers kan diffractie echter wel een rol gaan spelen. Bij de analyse van de resultaten van modelberekeningen wordt er daarom wel rekening mee gehouden.

Of een golfbreker de inkomende golven volledig breekt (transmissie=0) óf een bepaald deel van de golfenergie doorlaat hangt af van de vormgeving. De relatie tussen de vormgeving en de golftransmissie wordt besproken in paragraaf 2.3.2.

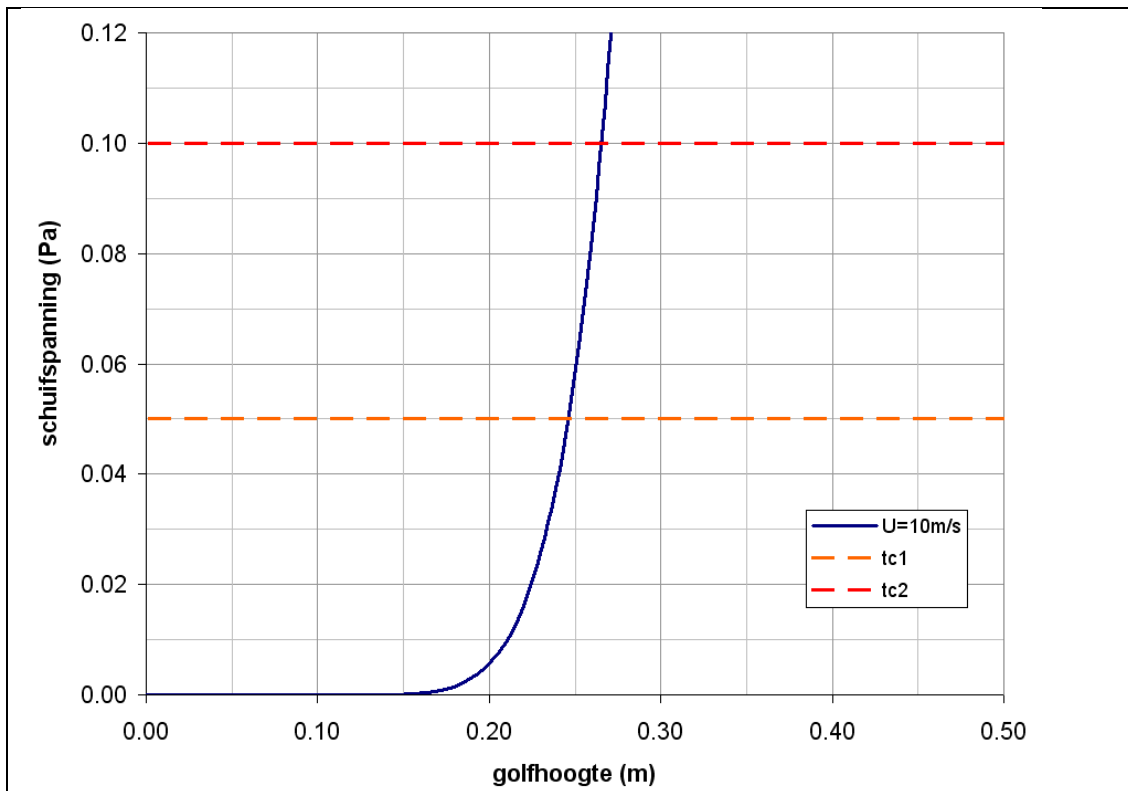
#### *Bodemschuifspanning en kritische golfhoogte*

Zoals eerder vermeld zorgen golven voor een schuifspanning aan de bodem welke kan leiden tot resuspensie van bodemmateriaal. Of er resuspensie optreedt, is afhankelijk van de schuifsterkte van het bodemmateriaal bij het begin van in suspensie gaan (uitgedrukt in kritische schuifspanning). Het Markermeer heeft een slibrijke kleibodem waardoor de kritische schuifspanning ( $\tau_c$ ) relatief laag is. In het slibmodel (Van Kessel et al, 2008), dat wordt toegepast in de NMIJ-studies, zijn twee slibfracties gedefinieerd, elk met een eigen kritische schuifsterkte en valsnelheid:

- Fractie 1:  $\tau_{c1} = 0.05$  Pa en  $w_{s01} = 2.31 \cdot 10^{-5}$  m/s;
- Fractie 2:  $\tau_{c2} = 0.10$  Pa en  $w_{s02} = 4.63 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Met behulp van de rekenmethode van Brettschneider en de lineaire golftheorie kunnen de golfhoogtes en schuifspanningen voor verschillende windcondities (windsnelheden) worden berekend. De aan de bodem optredende schuifspanningen zijn afhankelijk van de golfhoogte ( $H_s$ ), golflengte ( $L$ ) en golfperiode ( $T$ ). Deze golfkarakteristieken zijn afhankelijk van de windsnelheid en de fase van golfontwikkeling (golfgroei in de tijd en golfgroei bij toenemende strijklengte). Niettemin kan een praktische indicatie worden gegeven van de relatie tussen golfhoogte en optredende schuifspanning. Figuur 2.11 toont de resultaten bij een windsnelheid van 10 m/s en een constante waterdiepte van 3 m. Deze diepte kan als representatieve diepte voor het gebied langs de Noord-Hollandse Markermeerkust kan worden beschouwd, inclusief de Hoornsche Hop.

In figuur 2.11 zijn tevens de waarden voor de kritische schuifspanning van de twee slibfracties vermeld ( $\tau_{c1}$  en  $\tau_{c2}$ ). Uit de snijpunten met de grafieken kan worden afgeleid dat de kritische golfhoogte voor het optreden van resuspensie gemiddeld rond de 0.25 m ligt (tussen 0.20 en 0.30 m afhankelijk van de windcondities en kritische schuifspanning per fractie). Opgemerkt wordt dat deze indicatieve kritische golfhoogte alleen geldt voor een waterdiepte van 3 m.



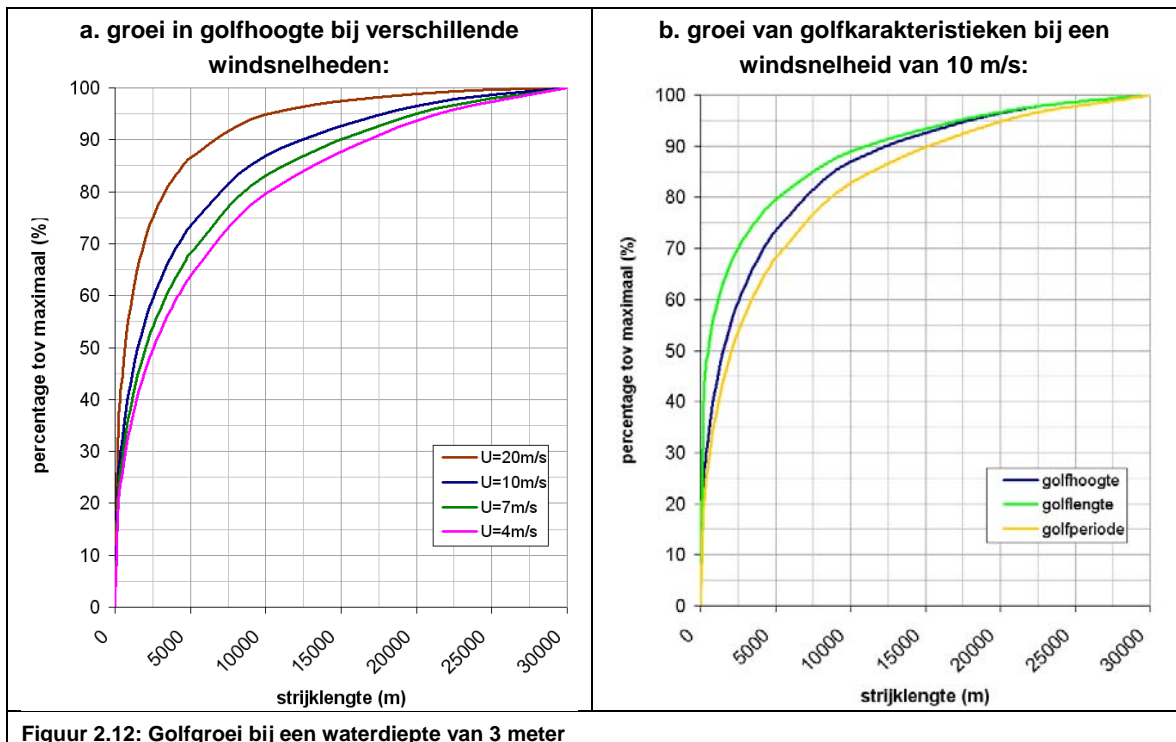
**Figuur 2.11:** Indicatie van relatie tussen golfhoogte en optredende bodemschuifspanning aan de westzijde van het Markermeer bij een windsnelheid van 10 m/s en een waterdiepte van 3 m

Aan de hand van de gemiddelde kritische golfhoogte ( $H_c$ ) kan globaal worden bepaald welke golfreductie benodigd is om resuspensie tegen te gaan. De golfreductie wordt bepaald door de vormgeving van de golfbreker. Daarnaast kan de gemiddelde kritische golfhoogte ook worden gebruikt om te bepalen hoe groot een luwtegebied kan zijn: hierbij wordt vastgesteld binnen welke afstand na de golfbreker de kritische golfhoogte weer wordt overschreden. Dit laatste wordt bepaald door de golfgroei achter de golfbreker (zie verder in dit rapport).

#### *Golfgroei achter een golfbreker*

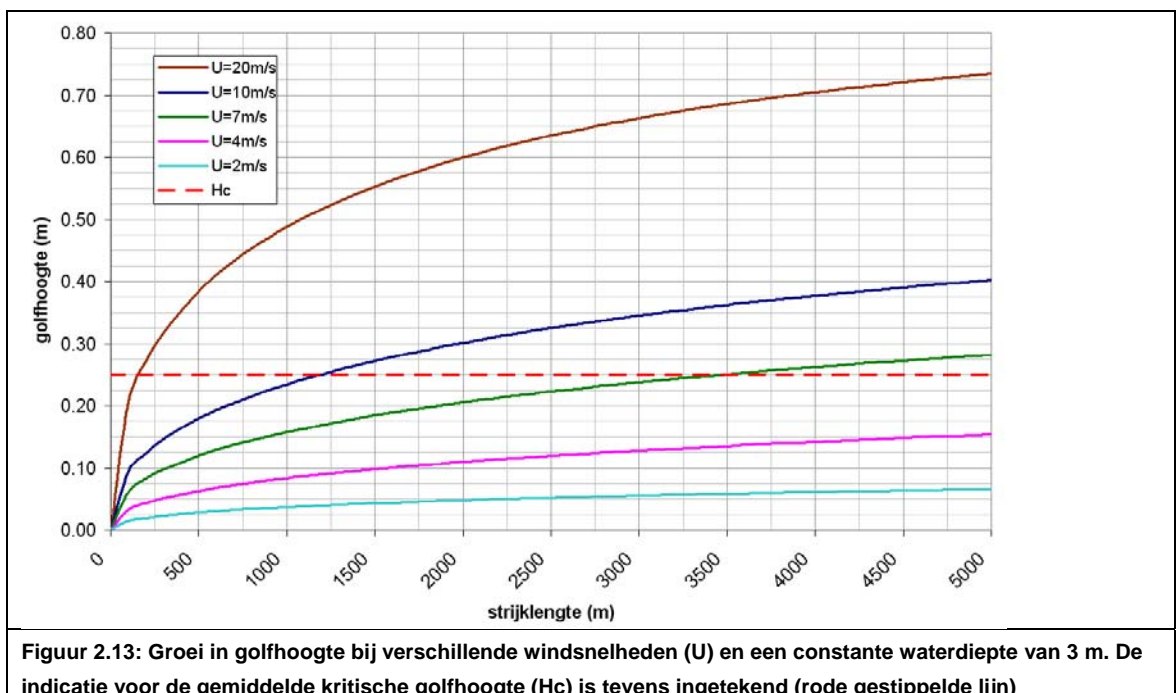
De grootte van het gebied waarover het effect van de golfbreker doorwerkt is afhankelijk van de mate van golfgroei in het achtergelegen luwtegebied. Bij een waterdiepte van 3 m is de golfgroei relatief sterk (Verheij et al, 2006) en dit zal dus een belangrijke rol spelen ten aanzien van het maximale bereik van het effect van golfbrekers en daarmee ook de grootte van het gebied waarbinnen de minimale verbetering van de doorzichtcondities wordt gehaald (Visser, 2007). Figuur 2.12a toont de groei in golfhoogten bij verschillende windsnelheden en een constante waterdiepte van 3 m. In figuur 2.12b is tevens voor dezelfde waterdiepte de groei van de golfkarakteristieken weergegeven bij een windsnelheid van 10 m/s. De golfkarakteristieken zijn berekend met behulp van de rekenmethodes van Brettschneider en de lineaire golftheorie.

Uit de figuren is op te maken dat de golven al weer bij relatief korte strijklengtes op 50% van de maximale waarde zitten. In het geval van een windsnelheid van 10 m/s is de golfhoogte binnen 1600 meter al weer op 50% van de maximale waarde. Bij hogere windsnelheden zijn de golven nog sneller volgroeid, bij lagere windsnelheden is hiervoor een grotere strijklengte nodig.



Figuur 2.12: Golfgroei bij een waterdiepte van 3 meter

Deze relatief snelle groei stelt een limiet aan de lengte van het luwtegebied waarover golfbrekers het minimaal gewenste effect op het doorzicht hebben. Bij een relatief korte lengte kunnen de golven al weer een dusdanige hoogte krijgen dat de schuifspanning aan de bodem de kritische waarde overschrijdt en er opnieuw sprake is van resuspensie. In figuur 2.12 is de gemiddelde kritische golfgroei ingetekend in de grafiek van de groei in golfhoogtes bij verschillende windsnelheden. De indicatieve kritische golfhoogte ( $H_c$ ) van 0.25 m is ook weergegeven in deze figuur.



Figuur 2.13: Groei in golfhoogte bij verschillende windsnelheden (U) en een constante waterdiepte van 3 m. De indicatie voor de gemiddelde kritische golfhoogte ( $H_c$ ) is tevens ingetekend (rode gestippelde lijn)

In figuur 2.13 is te zien dat bij een windsnelheid van 10 m/s de kritische golfhoogte en bijbehorende schuifspanning na circa 1200 m wordt overschreden. Bij een windsnelheid van 7 m/s gebeurt dit na circa 3500 m. Figuur 2.13 kan rechtstreeks worden toegepast voor berekening van de golfgroei achter golfbrekers met volledige golfreductie (transmissie=0). Dit is van belang voor de positionering van de golfbrekers.

Vanuit praktisch oogpunt kan het volgende als volgt worden geïnterpreteerd. Aannemende dat een Luwtestructuur met golfbrekende werking op enige kilometers uit de kust komt te liggen (dan wel dat een belangrijk deel ervan op een dergelijke afstand uit de kust ligt), wordt bij hoge windsnelheden de kritische golfhoogte voor resuspensie tussen de structuur en de kust zeker overschreden. Deze windsnelheden komen echter relatief weinig voor. De veelvuldiger optredende windsnelheden zijn lager en daarbij kan resuspensie worden voorkomen, zodat gemiddeld over een jaar of over een seizoen de slibconcentratie toch afneemt.

Een ander aspect is dat er golven pas over langere afstanden weer volledig aan zijn gegroeid. Dit blijkt uit figuur 2.12, waarin is te zien dat op korte afstand na de golfbreker de golfgroei snel gaat, maar dat deze op grotere afstand minder snel toeneemt. Zo is bijvoorbeeld op 10 km afstand de golf nog 80 % (bij  $u = 4$  m/s) tot 95 % (bij  $u = 20$  m/s) van de volledig ontwikkelde golf. Dit betekent dat er ook op grotere afstand van de golfbreker nog wel enige golfreductie optreedt, waardoor minder opwoeling van sediment zal optreden.

In voorgaande situaties is steeds uitgegaan van stationaire windrichtingen, terwijl ze in werkelijkheid in de tijd variëren en bovendien verschillende frequenties van voorkomen hebben. Deze variaties beïnvloeden niet alleen het algehele en lokale circulatiepatroon maar ook de richting van golfinval en daarmee de locatie van het golfvrije gebied ten opzichte van de golfbrekende constructie. Hierbij kan het golfvrije gebied zich aan de andere zijde van de golfbreker bevinden dan primair beoogd. Een gebied als luwtegebied aangegeven is daarmee niet geheel eenduidig: feitelijk is een gebied een luwtegebied voor de veelvoorkomende (significante) condities. Op de positionering van golfbrekers en het windklimaat wordt verder ingegaan in paragraaf 2.3.3.

#### *Aanslibbing*

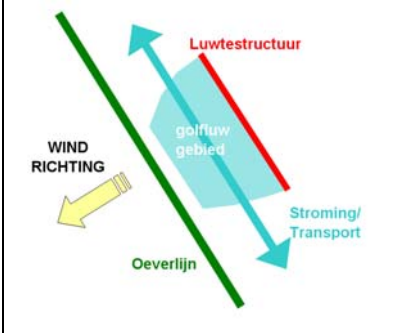
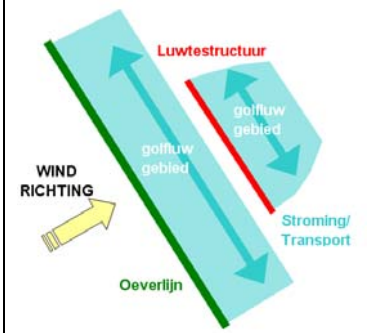
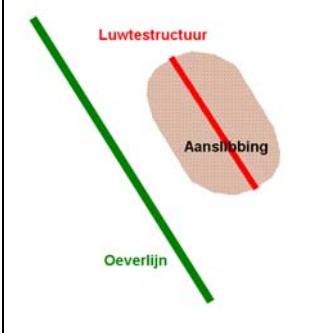
Voor beoogde Luwtestructuren langs de Noord-Hollandse Markermeerkust is het golfbrekende effect relevant voor meer oostelijke windrichtingen. Bij westelijke windrichtingen zal de structuur beschutting geven aan de meerzijde. Eén en ander is schematisch aangegeven in figuur 2.14a en 2.14b.

De afname van de golfdynamiek leidt tot een afname van resuspensie en een toename van de sedimentatie. Dit effect zorgt voor een aanslibbing in het golfvrije deel.

Aangezien het golfvrije deel vanwege de variërende windrichting van locatie kan veranderen, kan men aanslibbing verwachten aan beide zijden van de golfbreker.

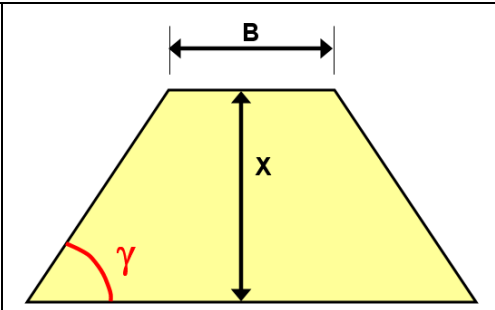
De aanslibbing zoals weergegeven in figuur 2.14c is echter vooral te verwachten in gebieden waar de invloed van stroming op de resuspensie gering is. Op locaties waar stroomsnelheden zorgen voor een bodemschuifspanning groter dan de kritische waarde, zal dit aanslibbing beeld wijzigen en meer diffuus worden.



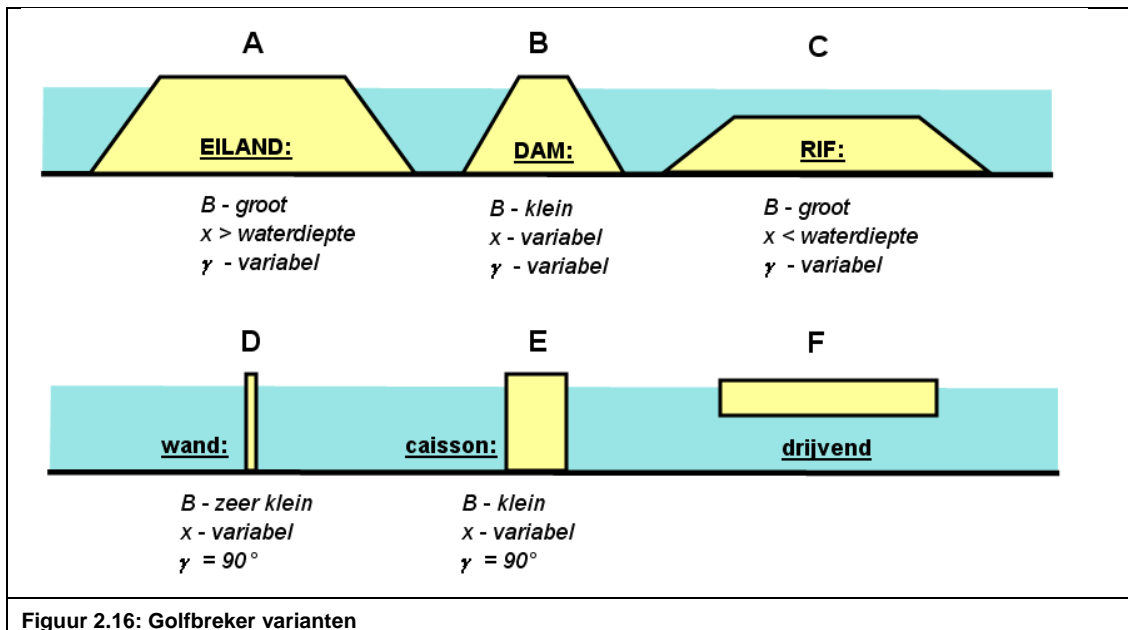
		
<p><b>Figuur 2.14a: Golfuwte en stroming bij noordoostenwind</b></p>	<p><b>Figuur 2.14b: Golfuwte en stroming bij zuidwestenwind</b></p>	<p><b>Figuur 2.14c: Mogelijke aanslibbing ten gevolge van golfuwte</b></p>

### 2.3.2 Vormgeving

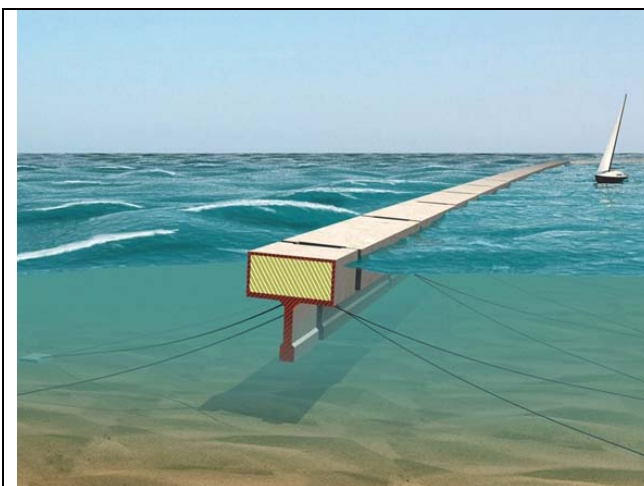
De meest elementaire vorm (geometrie) voor golfbrekers is de 'damvorm' (zie figuur 2.15). Grof gezegd bestaat de damvorm uit de volgende drie geometrische elementen:

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Damhoogte (<b>x</b>) of kruinniveau <b>X</b></li> <li>• Kruinbreedte (<b>B</b>)</li> <li>• Hoek van het talud (<math>\gamma</math>)</li> </ul>	
<p><b>Figuur 2.15: Drie geometrische elementen van de damvorm</b></p>	

Door te variëren met deze elementen kunnen de meeste 'golfbrekervarianten' (eilanden, dammen, riffen, caissons, wanden en schotten) schematisch worden weergegeven, zie figuur 2.16).



Variante F, de drijvende golfbreker, vormt een uitzondering op de meer traditionele golfbrekers. Drijvende golfbrekers zijn in Nederland uitvoerig getest aan de TU-Delft. Met behulp van computersimulatietechnieken en laboratoriumproeven is aangetoond dat de drijvende golfbrekers goed kunnen werken. Ze worden ook al op meerdere locaties wereldwijd gebouwd door het bedrijf Dutch Floating Breakwaters (Figuur 2.17). De demping van de drijvende golfbrekers blijkt hoog te zijn (90%) en is mogelijk een economische oplossing in vergelijking met de traditionele vaste golfbrekers. Ze zijn bovendien naar andere locaties te verplaatsen en kunnen eventueel worden voorzien van een langer doek of schot onder de constructie om een stroomgeleidend effect te bewerkstelligen. De effectiviteit van drijvende golfbrekers is vooral verbonden aan de relatie tussen de breedte van de golfbreker (B) en de golflengte ( $L_i$ ) van de inkomende golven.



**Figuur 2.17: Schets van drijvende golfbrekers (bron: Dutch Floating Breakwater Technology, 2004)**

Deze bureaustudie richt zich op de functionele eisen van een golfbreker ten aanzien van vermindering van slibconcentraties en daarmee het verbeteren van de doorzichtcondities (hoofddoelstelling V-thema verminderen slib).

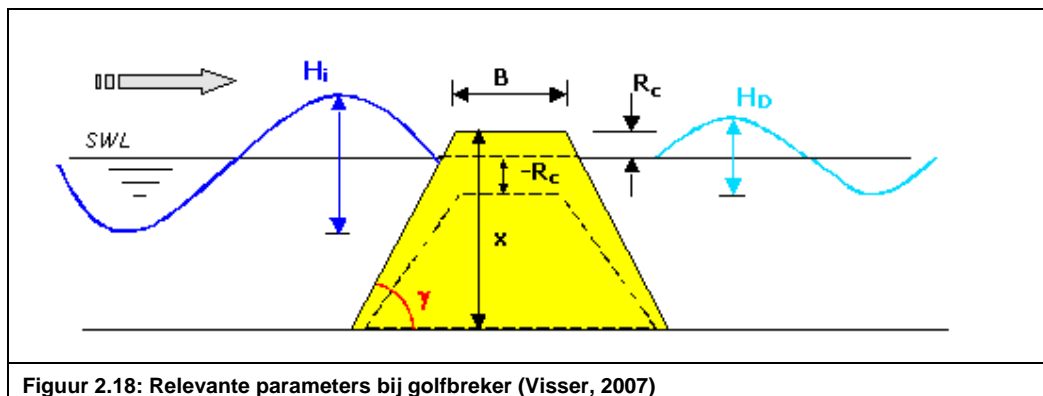
In dat kader is de minimaal benodigde golfreductie (en daarmee de maximale golftransmissie) van belang in relatie tot de vormgeving van de golfbreker. De verdere uitwerking en keuze van het ontwerp (bijvoorbeeld als dam, rif, wand of drijvend) wordt gedaan in een latere fase van het project. Hierbij zullen ook andere aspecten als kosten, bouwmogelijkheden, beheer en ecologische doelstellingen worden meegenomen. Wanneer de golfbreker bovendien een stroomgeleidende functie heeft zullen extra functionele eisen gelden (zie paragraaf 2.2 en paragraaf 2.4).

#### *Golfreductie en golftransmissie*

De grootte van 'golftransmissie' wordt beschreven door de transmissiecoëfficiënt ( $c_T$ ), die wordt uitgedrukt als de verhouding tussen de doorgelaten golfhoogte ( $H_D$ ) en de invallende golfhoogte ( $H_i$ ), ofwel de verhouding tussen de wortel uit de doorgelaten golfenergie ( $E_D$ ) en de inkomende golfenergie ( $E_i$ )<sup>4</sup>, zie ook figuur 2.18.

$$c_T = \frac{H_D}{H_i} = \sqrt{\frac{E_D}{E_i}} \quad (4.1)$$

Deze golftransmissiecoëfficiënt is afhankelijk van de geometrie en het materiaal van de golfbreker in relatie tot de golfhoogte van de inkomende golf. Rekenmethodes voor de transmissiecoëfficiënt zijn meestal opgesteld na analyse van meetgegevens uit laboratorium proeven met een bepaald type golfbreker. Aangezien er naast variatie in geometrie ook nog variatie in materiaal (permeabiliteit) mogelijk is, zijn gevonden methodes vaak verbonden aan allerlei randvoorwaarden voor toepasbaarheid.



<sup>4</sup> Deze formule geeft enkel de transmissie weer van de golfhoogte. De overige karakteristieken worden vervolgens berekend uit de doorgelaten golfhoogte. Er is echter verder onderzoek nodig om te bepalen of deze aanname correct is. Wellicht heeft de golfbreker ook invloed op de golfperiode en golflengte afzonderlijk. (NB: de bodemschuifspanning wordt bepaald door golflengte, de golfperiode en de golfhoogte)

In rekenmethodes voor golftransmissie bij de (traditionele) ondoorlatende golfbrekers worden de geometrische en hydrodynamische invloedsfactoren meestal samengevat in drie groepen, uitgaande van de 3 geometrische kenmerken van een dam (voor parameters zie figuur 2.18):

- Relatieve kruinhoogte:  $\frac{R_c}{H_i} = \frac{(x-h)}{H_i}$
- Relatieve kruinbreedte:  $\frac{B}{H_i}$
- Brekerparameter:  $\xi_0 = \frac{\tan \gamma}{\sqrt{s_0}} \rightarrow \text{met } s_0 = \frac{H_i}{L_i} = \frac{2\pi \cdot H_i}{g \cdot T^2}$

Waarin:

$R_c$  = kruinhoogte ten opzichte van gemiddelde waterstand [m]

$H_i$  = invallende golfhoogte [m]

$x$  = kruinhoogte ten opzichte van voet golfbreker [m]

$h$  = waterstand ten opzichte van voet golfbreker [m]

$B$  = kruinbreedte [m]

$\xi_0$  = brekerparameter [-]

$\tan \alpha$  = steilheid van talud [-]

$s_0$  = golfsteilheid [-] volgens:

$L_i$  = golf lengte [m]

$T$  = golfperiode [m]

$g$  = gravitatie constante [ $\text{m/s}^2$ ]

Voor verschillende methoden voor het bepalen van de golftransmissie wordt verwezen naar de EurOtop Manual (EurOtop, 2007).

In de modelstudie (Van Kessel et al, 2008), welke wordt uitgevoerd in het kader van NMIJ, wordt gebruik gemaakt van de rekenmethode van Goda (zoals ook vermeld in de SWAN-handleiding). Het voordeel van deze rekenmethode is dat deze kan worden toegepast op drie type golfbrekers: een verticale dunne wand, een caisson en een dam. Om dit mogelijk te maken heeft Goda twee constanten ( $\alpha$  en  $\beta$ ) in de formule verwerkt. De waarden van de constanten voor het betreffende type golfbreker zijn vastgesteld door middel van laboratoriumproeven.

Hierna wordt ingegaan op de rol van de kruinhoogte. Dit wordt geïllustreerd voor een damvormige golfbreker.

#### *Kruinhoogte*

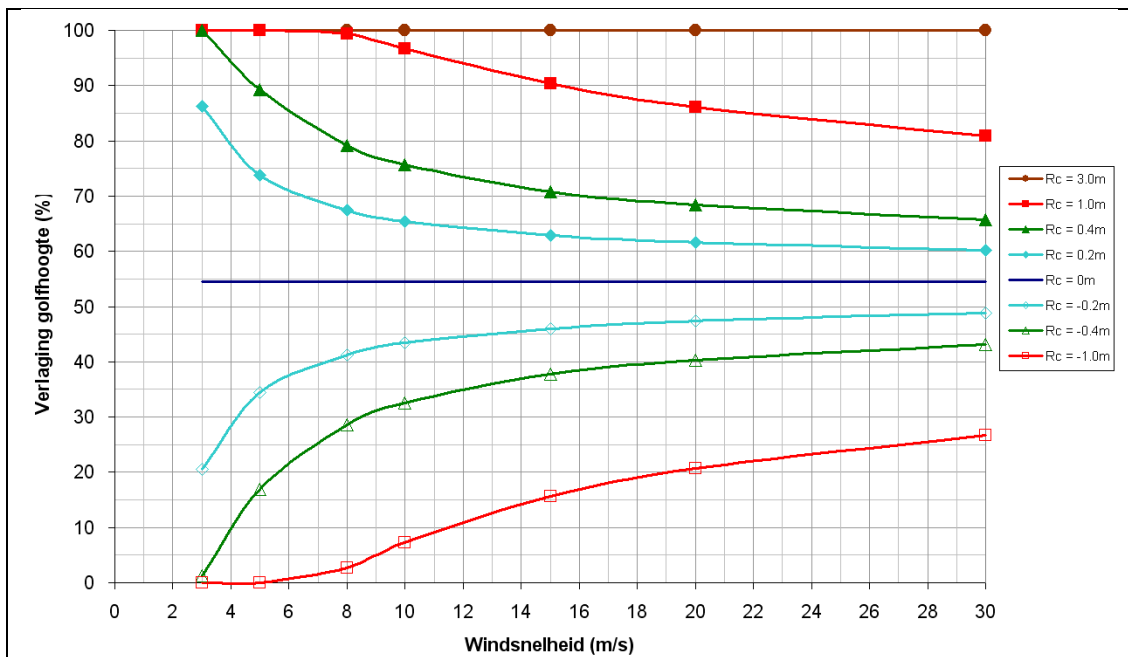
Uitgaande van ondoorlatende golfbrekers met een kleine kruinbreedte wordt de golftransmissie naar het achtergelegen gebied vooral bepaald door de verhouding tussen de hoogte van de inkomende golf ( $H_i$ ) en de kruinhoogte van de golfbreker ten opzichte van de waterspiegel ( $R_c$ ), waarbij een negatief getal aangeeft dat de kruin zich onder de waterspiegel bevindt. Algemeen gelden de volgende grenzen:

$$\frac{R_c}{H_i} > 2 \rightarrow \text{geen transmissie, golf wordt volledig tegengehouden}$$

$$\frac{R_c}{H_i} < -2 \rightarrow \text{maximale transmissie, golf wordt volledig doorgelaten}$$

Wanneer  $R_c$  groter is dan tweemaal  $H_i$ , wordt de golf volledig gebroken en wordt geen golfenergie doorgelaten. Het tegenovergestelde geldt voor een golfbreker met een negatieve  $R_c$  (dit betreft dus een 'onderwaterconstructie') van meer dan tweemaal  $H_i$ ; in dit geval zal de golf de golfbreker niet 'voelen' en wordt de golf volledig doorgelaten naar het achtergelegen gebied.

Met behulp van de rekenmethode van Goda is in een eerdere studie de invloed van de relatieve kruinhoogte voor een dam als golfbreker bij verschillende windsnelheden en een waterdiepte van 3 meter onderzocht (Visser, 2007). De resultaten zijn weergegeven in de figuren 2.19 en 2.20.

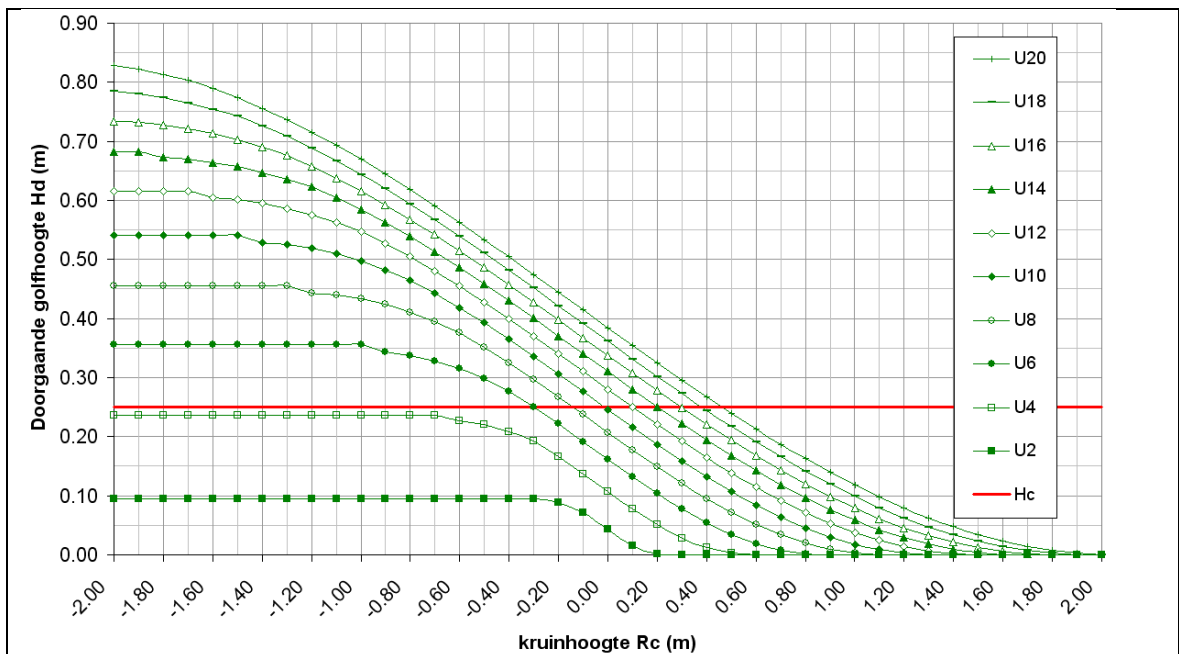


Figuur 2.19: Reductie in golfhoogtes bij verschillende windsnelheden en kruinhoogtes  $R_c$  (Visser, 2007)

In figuur 2.19 is het percentage golfhoogte verlaging af te lezen voor verschillende waarden van  $R_c$  (m) bij verschillende windsnelheden. Zoals verwacht geven golfbrekers met lagere kruinhoogtes ook een kleinere reductie in de golfhoogte en breken golfbrekers met een overhoogte van meer dan tweemaal de inkomende golfhoogte de golven volledig. Voor een dam met een kruinhoogte gelijk aan de waterspiegel ( $R_c=0$ ) is het percentage golfhoogte verlaging bij alle windsnelheden gelijk. Voor bovenwaterdammen ( $R_c$ =positief) neemt het percentage verlaging af bij hogere windsnelheden, terwijl dit percentage juist toeneemt bij onderwaterdammen ( $R_c$ = negatief). Dit laatste is te verklaren doordat bij kleinere windsnelheden de golfhoogten kleiner zijn waardoor deze de onderwaterdammen minder 'voelen'. Daarentegen ontstaan bij hogere windsnelheden grotere golfhoogten die bij een gelijkblijvende kruinhoogte meer golftransmissie zullen geven bij bovenwaterdammen.

Figuur 2.20 toont de absolute grootte van de doorgaande golfhoogte voor verschillende kruinhoogtes bij verschillende windcondities en een constante waterdiepte van 3 m. In de grafiek is tevens de gemiddelde kritische golfhoogte aangegeven zoals bepaald in paragraaf 2.2.1, zijnde 0,25 m.

Een indicatie van de minimaal benodigde kruinhoogte per windsnelheid kan via de grafiek worden bepaald. Echter, er dient rekening mee te worden gehouden dat achter de golfbreker de golf door windwerking weer aangroeit. Hierdoor is een grotere reductie nodig om over een groot gebied de resuspensie tegen te gaan, dan wanneer alleen in de directe omgeving van de golfbreker zou worden gekeken (Visser, 2007).



Figuur 2.20: Doorgaande golfhoogten voor verschillende kruinhoogtes ( $R_c$ ) bij verschillende windcondities ( $U$ ) en een constante waterdiepte van 3 m.

Uit figuur 2.20 kan worden opgemaakt dat, praktisch gezien, voor voldoende golfreductie (achter de golfbreker ver onder de 0,25 m) de golfbreker zeker boven de stilwaterlijn zal moeten uitsteken. Stel dat de toelaatbare doorgelaten golfhoogte nog 0,10 m bedraagt, dan ligt de benodigde kruinhoogte voor de relevante windsnelheden tussen de helft en de hele inkomende golfhoogte. Daarbij moeten nog de voorziene peilfluctuaties bij op worden geteld (in de toekomst 0,5 m), aannemende dat de dam ook goed moet blijven werken bij het hoogste peil. Dit betekent dat bij een significante golfhoogte van circa 0,5 m de damkruin tussen 0,75 en 1,00 m boven het laagste peil moet liggen.

Deze bevinding conflicteert met het uitgangspunt uit TMIJ, namelijk dat de structuren zo weinig mogelijk zichtbaar moeten zijn en bij voorkeur zelfs onder water dienen te liggen. Doorredenerend blijven er dan twee mogelijkheden over: a) een drijvende golfbreker en b) een golfbrekend rif, welke moet worden voorzien van bijvoorbeeld uitgestrekte rietlanden om ook voldoende golfdemping te kunnen realiseren tijdens hogere peilen. Overigens spelen ook nog andere factoren mee, zoals de kruinbreedte, de taludhelling en overige factoren. Deze worden hierna kort aangestipt.

### *Kruinbreedte*

Grotere kruinbreedtes (B) kunnen er voor zorgen dat de maximale reductie (transmissie=0) bij relatieve kruinhoogtes tussen 0 en 2 maal de invallende golfhoogte plaatsvindt. De kruinbreedte waarbij geen transmissie meer plaatsvindt, hangt af van de combinatie van de invallende golfcondities en andere geometrische factoren en zal van geval tot geval moeten worden berekend. Verwacht wordt dat bij eilanden met een kruinbreedte groter dan 20 meter geen transmissie meer plaatsvindt (Verheij, 2006).

Ook bij onderwater constructies leidt een grotere kruinbreedte tot een grotere reductie in golfhoogte; volledige reductie kan echter nooit worden bereikt. De maximaal haalbare reductie is afhankelijk van de waterdiepte boven de golfbreker ( $R_c$ ). Uit eerder onderzoek (Visser, 2007) is gebleken dat 90% van de maximaal haalbare reductie voor alle kruinhoogtes al binnen de eerste 10 m van de kruinbreedte werd gehaald. Voor de resterende demping, bij kruinbreedtes groter dan 10 m, bepaalt de waterdiepte boven het rif de doorgaande golfhoogte volledig.

### *Taludhelling*

De invloed van de taludhelling ( $\gamma$ ) bij dammen hangt, net als bij golfoploop op dijklichamen, af van de golfkarakteristieken van de inkomende golven: golfhoogte H, golflengte L en golfperiode T. Deze invloed wordt meestal beschreven door de brekerparameter ( $\xi_0$ ). De brekerparameter bevat zowel de geometrische invloed van de taludhelling als de hydrodynamische invloed van de golfsteilheid (H/L).

Uit resultaten van eerdere onderzoeksreeksen is af te leiden dat de invloed van taludsteilheid veel kleiner is dan de invloed van kruinhoogte en kruinbreedte. Waar de kruinhoogte  $R_c=0$  een verlaging in golfhoogtes van ongeveer 50% geeft, kan de invloed van de taludhelling per variant daar nog ca. 10% extra verschil in maken (Visser, 2007). Flauwere taludhellingen kunnen er echter wel toe leiden dat al bij kruinhoogtes kleiner dan  $2H_i$  de maximale reductie wordt bereikt. Een flauwer talud van 1:4 ten opzichte van een talud 1:2 heeft nog wel een merkbaar gunstige invloed en kan, voor situaties waar ten aanzien van zichtlijnen lagere kruinhoogtes gewenst zijn, een meerwaarde geven. Ook kunnen flauwere taludhellingen meer areaal aan ecologisch rijke landwaterzones bieden (hoofddoelstelling V-thema vergroten habitatdiversiteit). Varianten met flauwe taludhellingen zijn echter vaak wel economisch minder interessant omdat er relatief meer materiaal nodig is.

Bij onderwater constructies speelt de hoek van de taludhelling geen rol in de mate van transmissie.

### *Overige factoren*

Naast geometrische factoren kunnen echter nog andere factoren de golftransmissie beïnvloeden. In de tabel hieronder is een opsomming gegeven van alle factoren die een rol kunnen spelen bij golftransmissie.

**Tabel 2.1: invloedsfactoren golftransmissie**

Geometrische factoren:	Materiaal factoren:	Hydrodynamische factoren:
Relatieve kruinhoogte ( $R_c$ ) Kruinbreedte (B) Taludhelling ( $\square$ )	Doorlatendheid Ruwheid	Golfhoogte ( $H_i$ ) Golflengte ( $L_i$ ) Golfperiode ( $T_i$ ) Hoek van golfinval ( $\square$ )

Ten aanzien van de hydrodynamische factoren speelt naast de golfkarakteristieken (H, T en L) ook de hoek  $\beta$  waaronder de inkomende golven de golfbreker bereiken een rol in de mate van transmissie. De maximale transmissie treedt hierbij op bij golven die de golfbreker loodrecht naderen. Aangezien de hoek van inval afhankelijk is van de optredende windrichting, verschilt deze in de tijd. In de rekenmethode van Van der Meer (Rock Manual 2007) kan de invloed van de hoek van golfinval worden meegenomen in de berekening. De positionering van golfbrekers in relatie tot het windklimaat wordt besproken in paragraaf 2.3.3.

De derde en laatste categorie van invloedsfactoren bestaat uit de categorie 'materiaal factoren'. Hierbij gaat het voornamelijk om de doorlatendheid van de golfbreker en de ruwheid van het oppervlak van de golfbreker. De ruwheid is van invloed op de mate van golfoploop en overslag bij golfbrekers. Een hogere ruwheid, bijvoorbeeld stortsteen, geeft een grotere energiedissipatie waardoor minder van de golfenergie wordt doorgelaten. Daar staat tegenover dat de doorlatendheid van een golfbreker ook veroorzaakt dat een deel van de golfenergie 'door' (in tegenstelling tot 'over') de golfbreker doorgelaten wordt. Ten opzichte van een in geometrie gelijke golfbreker heeft een variant met een grotere permeabiliteit in dit opzicht een grotere golftransmissie.

In veel gevallen zal het effect van de ruwheid in verhouding tot het effect van kruinhoogte en kruinbreedte echter dusdanig klein zijn dat dit effect verwaarloosbaar is. In bijzondere gevallen, bijvoorbeeld bij toepassing van zeer grote breuksteen of golfbrekerelementen, zal dit effect wel moeten worden meegenomen.

In principe zou het percentage doorgelaten energie zo min mogelijk moeten zijn. Echter, voor bepaalde doelstellingen kan gekozen worden voor een variant met een hogere doorlatendheid. In dat geval kan de mate van permeabiliteit worden meegenomen in de berekeningen van de transmissiecoëfficiënt.

#### *Drijvende golfbrekers*

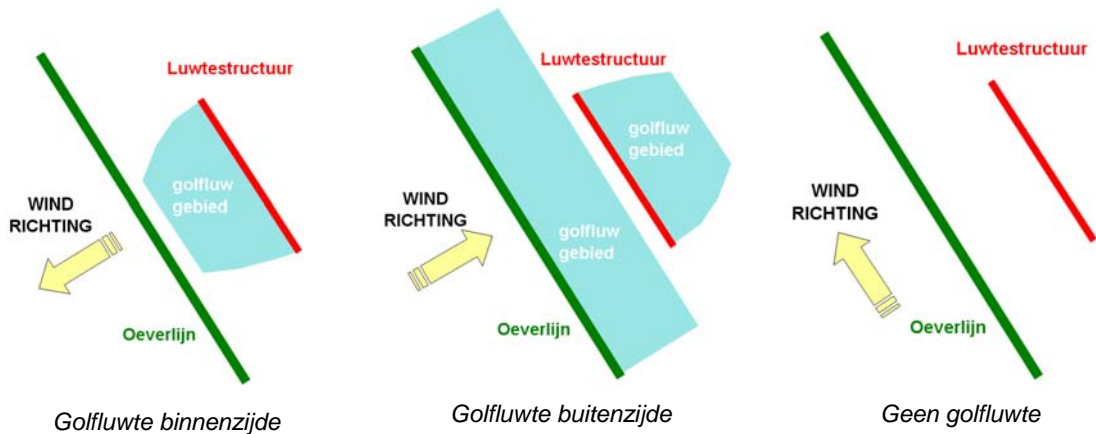
Goede rekenmethodes voor golftransmissie bij drijvende golfbrekers zijn nog niet beschikbaar. Wel zijn er veel experimenten voor drijvende golfbrekers uitgevoerd, bijvoorbeeld bij de TU-Delft. De effectiviteit van drijvende golfbrekers is vooral afhankelijk van de breedte en diepgang van deze constructies. Het is nog de vraag of dergelijke constructies kunnen worden mee-gemodelleerd in het slibmodel (Van Kessel et al, 2008).

Desondanks kunnen drijvende golfbrekers een kansrijk alternatief zijn voor de uiteindelijk te plaatsen Luwtestructuren, omdat hun golfdempende werking onafhankelijk is van peilfluctuaties en ook gemakkelijk naar andere locaties kunnen worden verplaatst. Bovendien kunnen ze dusdanig ontworpen worden dat ze nauwelijks zichtbaar zijn.

### 2.3.3 Lengte en positionering

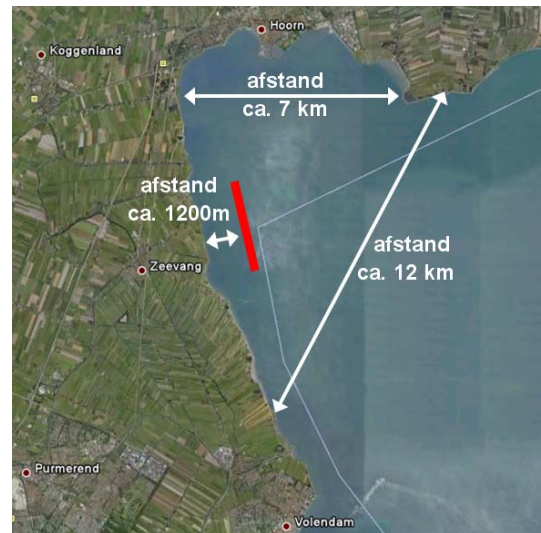
Het gebied waar daadwerkelijk golfluwte wordt ervaren is afhankelijk van de positie van de golfbreker ten opzichte van de optredende windcondities. Drie kenmerkende situaties zijn in figuur 2.21 schematisch weergegeven voor Luwtestructuren langs de Noord-Hollandse kust.





Figuur 2.21: golfluwte gebieden bij maatgevende windcondities

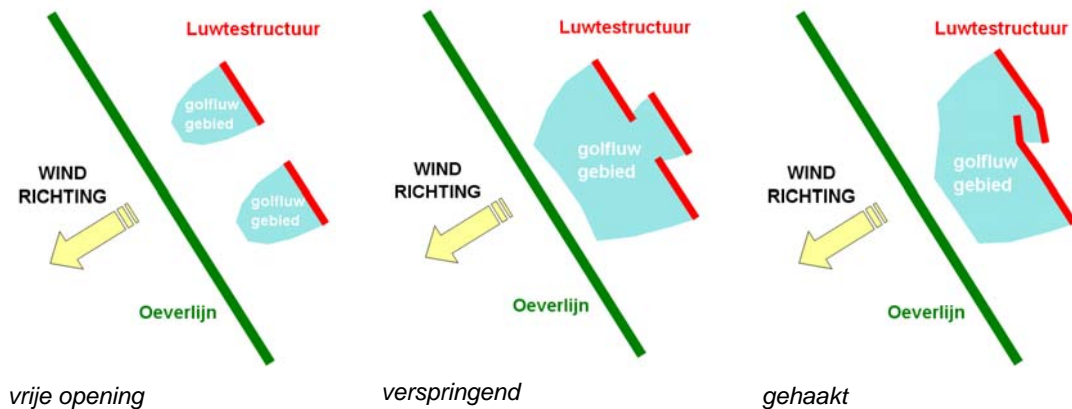
In figuur 2.21 zijn voor verschillende windcondities in blauw de gebieden aangegeven waar golfluwte optreedt. De zijgrenzen van het luwtegebied worden bepaald door de lengte van de Luwtestructuur en de invloed van diffractie. De lengte van het luwtegebied kan bepaald worden op basis van de afstand achter de golfbreker waarbinnen de doorgaande golf lager blijft dan de kritische golfhoogte voor resuspensie (gemiddeld rond de 0,25 m). De golftransmissie en de golfgroei in het gebied achter de golfbreker bepalen daarmee de maximale lengte van het golfluwe gebied. Het bepalen van deze kritische strijklengte bij verschillende windcondities en hoogtes van golfbrekers, is beschreven in paragraaf 3.3.1. Uitgaande van een maatgevende windsnelheid van 10 m/s (wordt minder dan 10% van het jaar overschreden), is de kritische strijklengte waarbinnen de kritische golfhoogte van 0,25 m wordt gehaald, ca. 1200 m, zie figuur 2.13. Om een idee te geven van afstanden binnen het zoekgebied is in figuur 2.22 een aantal kenmerkende afstanden weergegeven in een satellietfoto van Google Earth. Hierin is tevens een luwtestructuur getekend op 1200 m uit de kustlijn.



Figuur 2.22: Afstanden ten behoeve van beeldvorming situering luwtestructuren langs Noord-Hollandse Markermeerkust

### Openingen

Toepassing van openingen is wenselijk vanuit andere doelstellingen, maar kunnen daardoor het golfluwe effect van de golfbreker verlagen. Er zijn mogelijkheden om openingen een dusdanige vorm te geven dat er zo weinig mogelijk golfenergie wordt doorgelaten naar het luwtegebied, zie ter illustratie figuur 2.23, waarin 'vershoven' structuren zijn aangegeven.

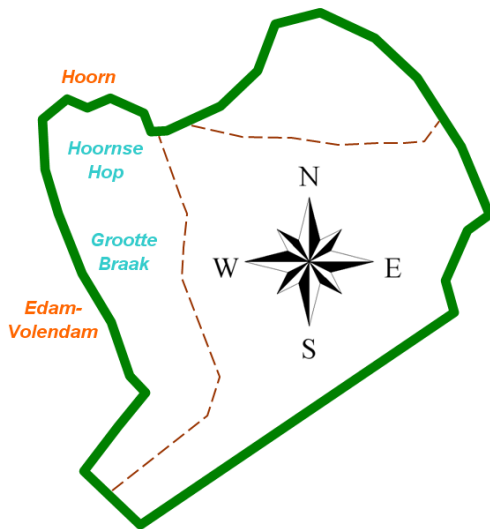


Figuur 2.23: Schematische werking van verschillende configuraties van luwtestructuren op de golfluwte

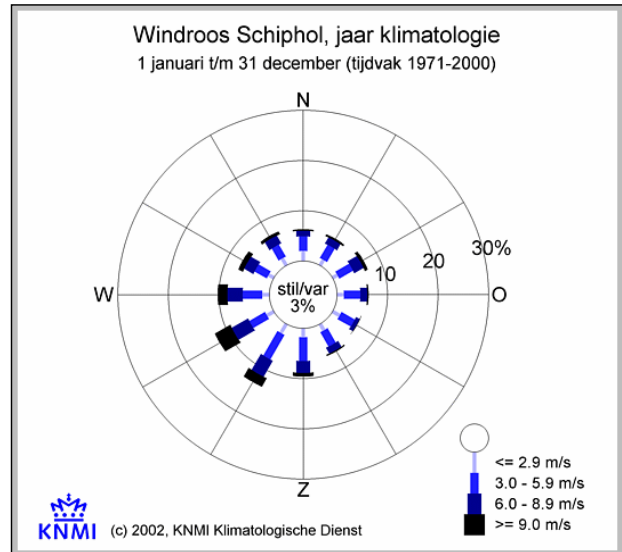
#### *Locatie en windcondities*

Aan de hand van windgegevens en de locatie van een potentieel luwtegebied kan worden bepaald vanuit welke windrichtingen de golfaanval voornamelijk plaatsvindt en gedurende welk percentage van het jaar dit het geval is. Uit de oriëntatie van de Noord-Hollandse kustlijn, in het zoekgebied heldere ondiepe zones, blijkt dat potentiële luwtegebieden voor deze kustzone voornamelijk onderhevig zijn aan golfaanval vanuit oostelijke en noordoostelijke richting (zie figuur 2.24a en 2.24b). Daarbij zorgt de Westfriese landpunt tussen Hoorn en Enkhuizen voor een relatief luwe ligging van de Hoornsche Hop voor de overheersende westelijke en noordelijke windrichtingen. De maatgevende windrichting ten aanzien van golfslag voor de oeverlijn tussen Hoorn en Edam (de Grootte Braak) is oost-noordoost (O-NO), en voor de Hoornsche Hop is dit zuidoost (ZO).

In figuur 2.24b is de KNMI-windroos weergegeven van het jaargemiddelde windklimaat ter plaatse van meetstation Schiphol voor de periode 1971 tot 2000. Deze windroos kan als representatief worden beschouwd voor het windklimaat van het Markermeer. Uit deze windroos kan de sterkte en frequentie van voorkomen van bepaalde windrichtingen worden afgeleid. Wind uit het ZO blijkt relatief weinig voor te komen en vanuit deze richting zijn ook de windsnelheden relatief klein. Hieruit blijkt inderdaad de huidige golfluwe ligging van de Hoornsche Hop. Wind uit NO komt vaker voor en kent ook iets hogere windsnelheden. De oeverlijn tussen Edam en Hoorn zal daardoor iets vaker sterkere golfaanval kennen. Wind uit west-zuidwestelijke richting komt duidelijk het meest frequent voor en kent ook de hoogste percentages aan grotere windsnelheden (lees: stormen). De Noord-Hollandse kust tussen Marken en Hoorn is daarmee relatief golfluw gelegen, echter in wat mindere mate als de Hoornsche Hop.

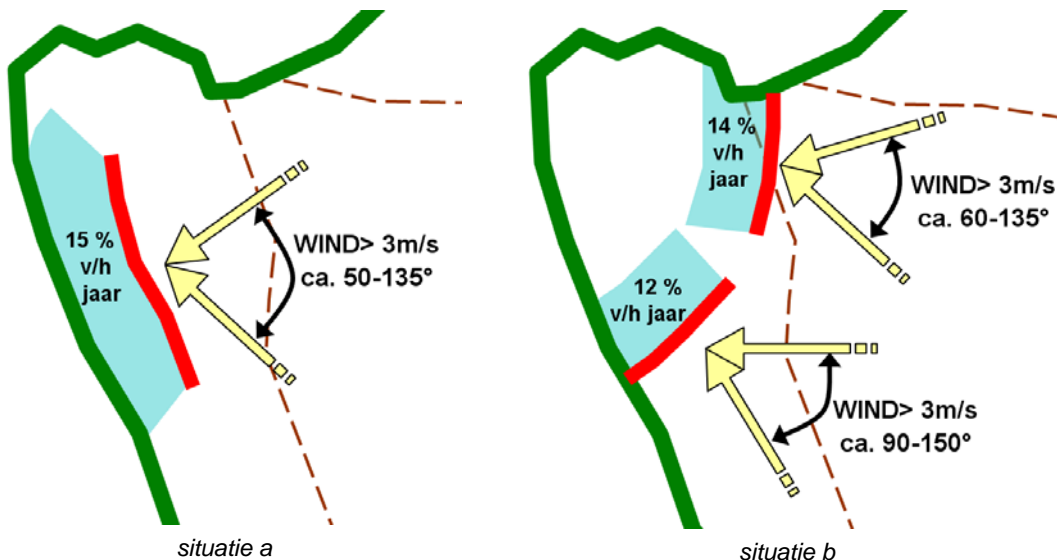


Figuur 2.24a: Oriëntatie Markermeer en zoekgebied luwtestructuren



Figuur 2.24b: Windroos Schiphol – jaargemiddelde 1971-2000 (bron KNMI)

Uitgaande van het windklimaat en de locatie van het zoekgebied kunnen twee lijnvormige gebieden worden onderscheiden voor de positionering van Luwtestructuren waarvoor de golfreducerende werking het meest optimaal is, zie figuur 2.25. De frequenties van voorkomen zijn afgeleid uit bij de windroos behorende frequentietabel voor de periode 1971-2000 voor het meetstation Schiphol.



Figuur 2.25: Percentage van het jaar dat golfbrekers golfuwte creëren aan binnenzijde van het luwtegebied

Uit figuur 2.25 kan worden afgeleid dat de golfreducerende werking van Luwtestructuren langs de Noord-Hollandse Markermeerkust maar in een klein deel van het jaar effectief is in de luwtegebieden zelf. Met het oog op de windfrequenties zijn Luwtestructuren parallel aan de Noord-Hollandse Markermeerkust het meest effectief, omdat wind uit noordoostelijke richting relatief meer voorkomt dan uit zuidoostelijke richting en hierbij doorgaans wat hogere windsnelheden optreden.

Overigens moet worden opgemerkt dat bij de Luwtestructuren uit figuur 2.25 gedurende een vrij groot deel van het jaar er wél golfreducerende werking zal optreden in een zone aan de meerzijde van de Luwtestructuren.

Dit raakt dus aan een interessante vraag: zijn deze Luwtestructuren *als golfremmende structuren* meer van belang voor zones aan de meerzijde ervan dan aan de kustzijde en is voor de kustzijde juist de functie *van stroomgeleidende structuur* meer van belang?

Omgekeerd gesteld: de Luwtestructuren uit figuur 2.25 zullen wat betreft golfwuwtewerking voor de kustzone maar weinig kunnen doen, omdat ze verkeerd georiënteerd zijn ten aanzien van de overheersende windrichtingen. De effectiviteit zal vooral moeten komen van stroomgeleiding. Daarenboven kan de golfbeschutting aan de meerzijde wél bijdragen aan een reductie van de slibconcentratie.

## 2.4 Luwtestructuren met golfwuwte werking en met stromingsluwte werking

### 2.4.1 Combinatie van golfwuwte en stromingsluwte

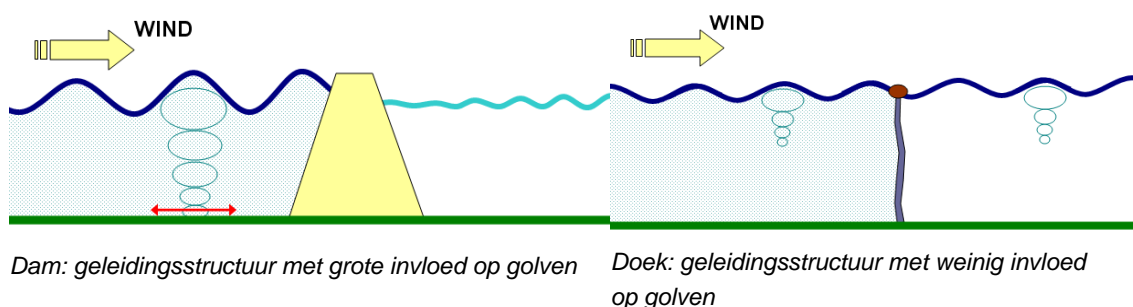
In de paragrafen 2.2 en 2.3 zijn de effecten van Luwtestructuren als afzonderlijke stroomgeleidende structuren en golfbrekers behandeld. Doorgaans zullen deze effecten echter gezamenlijk optreden, omdat de structuren om de ene functie goed te kunnen vervullen al gauw een invloed op de andere functie zullen hebben. Om deze redenen is er, binnen de NMIJ-studie, voor gekozen om golfbrekers en stroomgeleidende structuren niet als afzonderlijke maatregelen te behandelen: de Luwtestructuren zullen enerzijds zowel als golfbreker kunnen werken, waardoor ze golfwuwte verschaffen en anderzijds als stroomgeleidende structuur, waardoor slibstromen kunnen worden afgeleid.

### 2.4.2 Vormgeving: dubbelfunctie

Of een luwtestructuur een dubbelfunctie kan hebben hangt voornamelijk af van de vormgeving van de luwtestructuur. Twee aspecten van de vormgeving spelen daarbij een hoofdrol:

- Hoogte van de structuur;
- Materiaal en sterkte van de structuur.

In figuur 2.26 is schetsmatig weergegeven in hoeverre stroomgeleidende structuren golfdemping kunnen realiseren voor een starre en een volledig flexibele structuur. Golfwerking is het sterkst in het bovenste gedeelte van de waterkolom. Zoals beschreven in paragraaf 3.3.2 is de kruinhoogte en de plaatsvastheid van de constructie rondom de kruin het meest bepalend voor het golfreducerende effect.

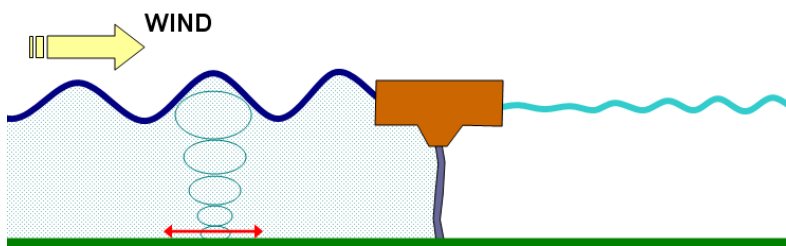


**Figuur 2.26: Schematisatie mogelijke invloed geleidingsstructuur op golven**

Stroomgeleidende structuren die tot hoog in de waterkolom rijzen, beïnvloeden daardoor naast de stroming ook de golven. Hoe groot dit effect is wordt vervolgens bepaald door de flexibiliteit en het materiaal van de structuur. Een ondoorlatende dam van grond en steen laat zo goed als geen golfenergie door, terwijl een flexibel slibscherm (doek) relatief veel golfenergie doorlaat.

Een Luwtestructuur die vooral moet functioneren als geleidingsstructuur heeft aan een hoogte tot maximaal de stilwaterlijn voldoende. Lagere geleidingsstructuren zijn mogelijk effectief in gevallen waar het slijbtransport voornamelijk in het onderste deel van de waterkolom plaatsvindt. Wanneer een structuur echter een dubbelfunctie dient te hebben, stelt met name de golfreducerende doelstelling de minimale randvoorwaarde aan de hoogte van de structuur (de kruin zal in de praktijk boven water moeten liggen). In de meeste gevallen zullen golfbrekers ook de stroming geleiden en/of blokkeren, doordat de structuur meestal vanaf de bodem tot boven de stilwaterlijn reikt. Door een optimale positionering in het lokale stroombeeld kunnen golfbrekers tevens functioneren als geleidingsstructuren.

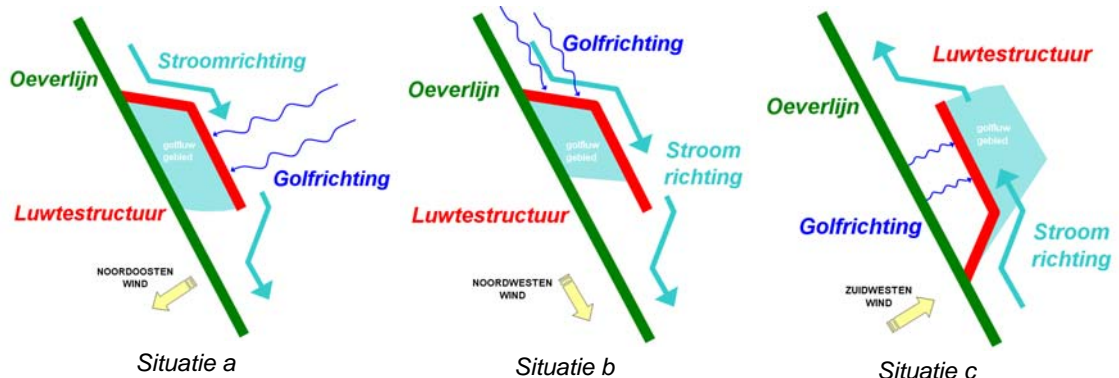
Luwtestructuren met een dubbele functie kunnen ook worden gecreëerd door het combineren van twee typen constructies. Een innovatief voorbeeld van een dergelijke combinatie zijn drijvende golfbrekers met daaronder (al dan niet) flexibele slibschermen, zie figuur 2.27.



Figuur 2.27: Drijvende golfbreker gecombineerd met slibscherm

### 2.4.3 Lengte en positionering: samengesteld effect

Aan de Noord-Hollandse Markermeerkust is de stroming hoofdzakelijk parallel aan de kustlijn en de maatgevende golfaanval komt voornamelijk uit oostelijke en noordoostelijke richting. Om de gecombineerde werking van stroomgeleidende structuren en golfbrekers op kleine schaal te illustreren is als voorbeeld figuur 2.28 opgenomen.



Figuur 2.28: schematisatie van het gecombineerde effect van golfbreker en geleidingsstructuur

In situatie a is de windrichting loodrecht op de kustlijn (NO-wind), met daarbij een naar het zuidoosten gerichte circulatiestroming. Het gedeelte van de Luwtestructuur ongeveer loodrecht op de kustlijn werkt als stroomgeleidende structuur. De Luwtestructuur parallel aan de kustlijn werkt primair als golfbreker en heeft ook een toegevoegde invloed op de stroming. De parallelle structuur zorgt er namelijk tevens voor dat de stroming na de loodrechte structuur niet direct terug buigt naar de kustlijn, maar evenwijdig blijft met de kustlijn.

In situatie b is de windrichting parallel aan de kustlijn (NW-wind). Het stroombeeld blijft ongewijzigd maar nu werkt de structuur loodrecht op de kustlijn juist als golfbreker en tevens als geleidingsstructuur. De parallelle structuur behoudt de toegevoegde werking als geleidingsstructuur maar werkt niet meer als golfbreker.

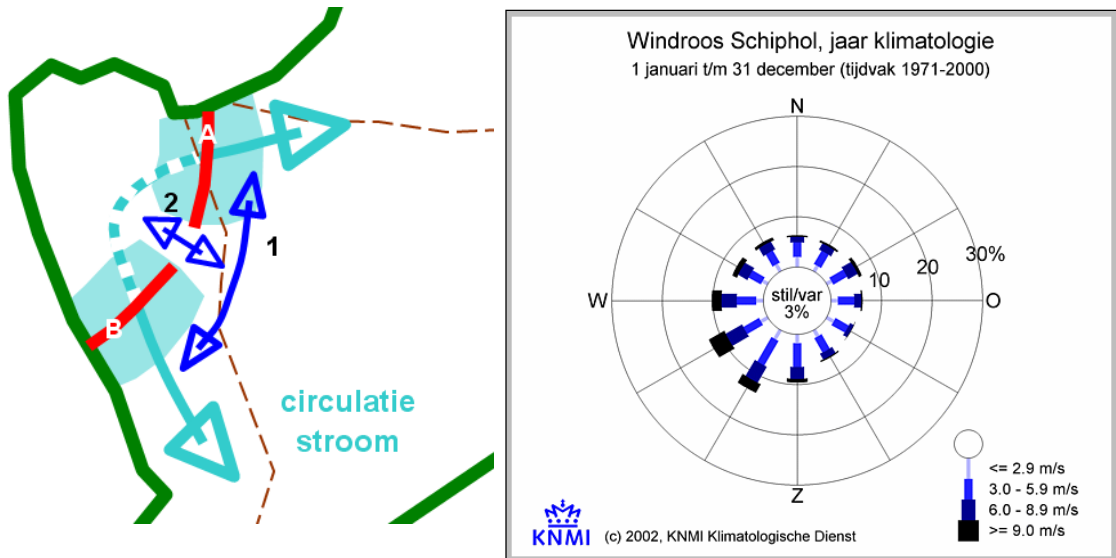
In situatie c, met een zuidwestelijke wind en een naar het NW gerichte circulatiestroming, wordt geen golfwvte aan de kustzijde gecreëerd, maar juist aan de meerzijde. De Luwtestructuur behoudt daarbij de werking van geleidingsstructuur.

Verder wordt opgemerkt dat bij een aansluiting aan de noordzijde, met een geometrie als in situatie a, er ook wel een zekere stroomgeleiding zal plaatsvinden (al is die minder effectief dan in de geometrie van situatie a), als de Luwtestructuur voldoende lengte heeft en deze niet te ver uit de kust zal liggen. Gezien de dominante circulatiestroming richting NW, ligt het wel voor de hand om een aansluiting te kiezen zoals in situatie c is geschetst en niet zoals in situatie a.

De gecombineerde werking van beide structuren uit figuur 2.28 zorgt voor een verlaging van de slibconcentraties in het water van het luwtegebied, en daarmee een verbetering van de doorzichtcondities in het luwtegebied. Deze verlaging wordt bereikt door zowel het tegengaan van resuspensie als het tegengaan van transport van slibrijk water naar het luwtegebied. De bijdrage van elk van beide processen op het verlagen van de slibconcentraties verschilt per locatie en is niet constant bij veranderende windcondities. Bij verschillende windrichtingen varieert de bijdrage van elk van de processen. In situatie a zou de golfwvte een grotere invloed kunnen hebben als het slibtransport. Bij ZW-wind, creëert de parallelle structuur geen golfwvte in het luwtegebied maar aan de meerzijde. De circulatiestroming is parallel aan de kust maar is nu tegengesteld en in NW richting.

Aan de hand van locatie en windfrequenties kan een globale inschatting worden gemaakt van de te verwachten bijdrage van elk van de twee processen. In het luwtegebied is verder aanslibbing te verwachten doordat de golfdynamiek en stroomsnelheden zijn afgenomen. Er treedt daardoor minder tot geen resuspensie meer op. Doordat het gebied wel verbonden blijft met de rest van het meer kan slibrijk water het luwtegebied nog wel binnen komen, waar het slib uit de waterkolom bezinkt. Aan de meerzijde van het luwtegebied langs de Luwtestructuur kan mogelijk ook aanslibbing plaatsvinden doordat bij sommige windrichtingen (rond de zuidwestelijke richting) ook dit deel golfwvte wordt. De stroomsnelheden nemen aan de meerzijde echter wel toe doordat de stroming om het luwtegebied wordt geleid. Mogelijk zorgt deze toename van stroomsnelheden juist weer voor een toename van de resuspensie (in elk geval van het transport). Modelberekeningen zullen moeten uitwijzen of aan de buitenzijde van het luwtegebied dan ook daadwerkelijk aanslibbing plaatsvindt.

In de Hoornsche Hop onderbreken de Luwtestructuren de circulatiestroming op een andere wijze, omdat de Luwtestructuren hier niet als parallelle structuren worden aangelegd. De stroomgeleiding vindt daarmee op andere wijze plaats, zie figuur 2.29, en de geleiding is voor beide stroomrichtingen effectief. Meer nog dan bij de parallelle Luwtestructuren, zal de golfreducerende werking beperkt zijn, omdat de Hoornsche Hop nog meer in de luwte ligt (zie ook de windroos, die in figuur 2.29 is herhaald). Wellicht is het golfuwte effect aan de meerzijde belangrijker.



Figuur 2.29: Samengesteld effect en dubbelfuncties luwtestructuren in Hoornsche Hop

### 3 RESULTATEN UIT EERDERE MODELSTUDIES

#### 3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de effecten van Luwtestructuren aangegeven op basis van eerder uitgevoerde (model)studies. Hierbij zijn alleen die studies vermeld die de afgelopen jaren hebben plaatsgevonden, omdat deze meest actuele kennis van de hydrodynamica en slibdynamiek in het Markermeer representeren. Oudere studies zijn wel interessant om het kennisproces te bestuderen, maar het interpreteren van de resultaten kan misleidend zijn en deze worden daarom hier niet behandeld.

De resultaten uit eerdere studies zijn in dit rapport samengevat. Hierdoor wordt een zo objectief mogelijk beeld verkregen van de effecten van Luwtestructuren. De problemen en lacunes die aan het licht komen uit deze eerdere studies zullen in het vervolgtraject van het NMIJ project sturend zijn voor verder modelonderzoek naar de werking van Luwtestructuren.

#### 3.2 Royal Haskoning – Januari 2006

Door Royal Haskoning is in 2006, in samenwerking met WL | Delft Hydraulics, een analyse gemaakt van de kennisleemten en een inventarisatie van maatregelen om het slibprobleem in het Markermeer op te lossen. In die studie kwam ook 'compartimentering' aan de orde. Het gaat daarbij niet om volledige compartimentering (d.w.z. volledig afgesloten delen) maar om een open compartimentering (structuren in het Markermeer die bepaalde delen afschermen maar niet afsluiten). In de studie is aangegeven dat het Markermeer kan worden gecompartmenteerd door middel van strekdammen of eilanden. Onderstaande tekst is voornamelijk letterlijk overgenomen uit deze studie (geplaatst tussen ' en ') en geeft de belangrijkste bevindingen weer.

##### 3.2.1 Compartimentering

'Compartimentering van het Markermeer is een "brongerichte" maatregel van permanente aard. Door aanleg van compartimenten wordt de strijklengte van de wind gereduceerd. Hierdoor neemt de golfactiviteit op het meer af. De reductie in de golfwerking leidt ertoe dat de mobiele sliblaag minder vaak en minder sterk opwoelt. De mobiele sliblaag zal meer tot rust komen en ook meer tijd krijgen om te consolideren. Hierdoor zal de slibconcentratie in het water afnemen en zal de helderheid van het meer toenemen'.

'Een neveneffect van compartimentering is dat de stromingspatronen in het Markermeer beïnvloed worden. Hierdoor zal het horizontale transport van stoffen (waaronder slib) afnemen. Ook dit zal waarschijnlijk een reducerend effect hebben op de slibconcentratie in het Markermeer. Hoewel dit niet het primaire effect is, zal compartimentering via deze weg wel degelijk bijdragen aan een toename van het doorzicht. Dit neveneffect is in de kwantitatieve onderbouwing van de dimensies van de maatregel verwaarloosd omdat hiervoor de inzet van een gedetailleerd 2D-model noodzakelijk is. De mogelijkheid dat stroomgeleiding een rol speelt is wel meegenomen bij de beoordeling van de indicatieve berekeningen in deze studie'.



Ook deze studie maakt dus onderscheid tussen het effect van stroomgeleiding en luwtewerking door golfreductie. Aangegeven wordt dat stroomgeleiding niet het primaire effect zou zijn: deze studie is dan ook voornamelijk gericht op het verminderen van de golfwerking door compartimentering. Compartimentering van het Markermeer kan op verschillende manieren. Globaal kunnen twee verschillende uitvoeringsmogelijkheden onderscheiden worden:

- aanleg van strekdammen;
- aanleg van eilanden met behulp van grondverzet.

Logischerwijs zijn ook allerlei combinaties van beide mogelijk. Deze twee uitwerkingen geven de uitersten aan.

Bij compartimentering rijst de vraag hoe groot de verschillende compartimenten in het Markermeer moeten zijn om het gewenste doorzicht te behalen. Deze vraag staat niet los van de vraag hoe hoog de compartimenteringswerken (dammen, eilanden) worden uitgevoerd. Een eiland levert bijvoorbeeld meer reductie van de golfhoogte op dan een onderwater rif. Hetzelfde geldt voor strekdammen: hoe hoger de strekdam, des te groter de reductie in golfhoogte. Verder leveren meerdere strekdammen een grotere reductie van de golfwerking dan een enkele, korte strekdam. Er is een schatting gemaakt van het aantal strekdammen/eilanden dat nodig is om het gewenste doorzicht te behalen. Bij de strekdammen is ook gekeken naar het effect van verschillende hoogten van de strekdam (onder water en ook boven water). Uit deze indicatieve berekeningen volgt dat met een halvering van de strijklengte in de dominante windrichtingen door middel van een eilandenrij of strekdam een reductie kan worden bereikt van ca. 50% in slibconcentratie. De hoogte van de strekdam moet minimaal op de gemiddelde waterlijn liggen en de minimaal benodigde kruinbreedte is 10 meter om de benodigde reductie in de golfhoogte te bereiken. Verder blijkt dat twee rijen eilanden of twee strekdammen (met dezelfde dimensies) de slibconcentratie verlaagt met ca. 60 - 70%.

De benadering bevat veel onzekerheden en ook een aantal conservatieve aannamen. Een belangrijke onzekerheid is dat de benadering 1D (ééndimensionaal) is en allerlei 2D-effecten niet in rekening zijn gebracht. Wij schatten in dat de benadering conservatief is omdat alleen het effect van een eilandenrij op de golven in rekening is gebracht terwijl het ook de circulatiestroming in het meer zal verminderen. Dit zal ook een positieve (verminderende) uitwerking hebben op de slibconcentratie.

Een reductie van 60% in de slibconcentratie in het Markermeer is noodzakelijk om het doorzicht met een factor 2 te verhogen. Volgens de indicatieve berekeningen zou dit impliceren dat de strijklengte met ca. een factor 3 verlaagd zou moeten worden door eilanden of strekdammen. Gelet op onzekerheden en de conservatieve benadering wordt halvering van de strijklengte in eerste instantie als voldoende beschouwd. Nadere verfijning met detailberekeningen is absoluut noodzakelijk om meer inzicht te krijgen in de mate van compartimentering om de benodigde reductie in de slibconcentratie te realiseren.

### 3.2.2 Strekdammen

Uit de indicatieve berekeningen blijkt dat halvering van de strijklengte in het meer noodzakelijk is om het doorzicht met een factor 2 te verhogen. Om met strekdammen (en ook eilanden) aan deze eis te voldoen kan in eerste instantie gedacht worden aan een noordwest-zuidoost georiënteerde strekdam in het meer. Deze ligging van de strekdam is gebaseerd op de gedachte dat wind het grootste deel van de tijd waait uit de windsector Zuid tot West (40%). Vanwege de vaargeul Amsterdam – Lelystad moet er in ieder geval een opening blijven tussen de strekdam en Zuidelijk Flevoland. De overige drie windsectoren hebben ongeveer een gelijk aandeel van 20%. Om ook deze windrichtingen af te schermen zal er nog een aantal aanvullende strekdammen nodig zijn. Hier wordt in eerste instantie uitgegaan van een totale lengte van de strekdammen van 25 kilometer. Qua geometrie is een minimaal talud van 1:2 en een minimale kruinbreedte van 10 meter nodig. Het kruinniveau moet ongeveer op waterlijn niveau liggen. De hoogte bedraagt dus ca. 4 meter. De kruinbreedte en kruinhoogte zijn nodig om een bijna volledige reductie van de golven te bewerkstelligen.

### 3.2.3 Eilanden

De lay-out van de eilanden is gebaseerd op dezelfde overwegingen als de strekdammen. De ligging van deze eilanden zou ongeveer dezelfde lijn kunnen volgen. In dit voorbeeld is uitgegaan van een keten van vijf verschillende eilanden van ca. 5 km lang en ca. 0,5 km breed. Uit de indicatieve berekeningen volgt dat met een dergelijke keten van eilanden een verhoging van het doorzicht met een factor 2 gehaald kan worden. Wel zijn deze berekeningen met veel onzekerheden omgeven. Bij verdere ontwikkeling dienen meer gedetailleerde berekeningen uitgevoerd te worden om de effectiviteit van deze maatregel te bepalen.

Uitgaande van een waterdiepte van 4 meter is voor deze eilanden ca. 50.000 m<sup>3</sup> grondverzet noodzakelijk. Deze hoeveelheid grond kan gewonnen worden door een deel van het Markermeer te verdiepen. Dit zou kunnen plaatsvinden door de westelijke zone van het meer af te graven. Dit levert extra winst op in termen van de verhoging van het doorzicht.

### 3.2.4 Aandachtspunten

Voor de hiervoor beschreven opties voor compartimentering op de schaal van het Markermeer gelden een aantal aandachtspunten:

- Een gevolg van compartimentering is de verandering van de verblijftijd van het water. In sommige zones zal deze wellicht toenemen, maar verwacht mag worden dat de verblijftijd in bepaalde hoeken van het meer ook langer zal worden omdat de doorstroming door de compartimentering afneemt. Dit kan negatieve consequenties hebben voor de waterkwaliteit in bepaalde zones van het meer. Dit aspect verdient voldoende aandacht bij de verdere uitwerking.
- De scheepvaart en de pleziervaart zullen hinder van compartimentering ondervinden. Enerzijds zal er sprake zijn van een verhoogd veiligheidsrisico voor de scheepvaart. Met name de strekdammen kunnen gevaarlijk zijn voor de schepen en boten op het meer. Ook speelt de veranderende stroming (en de stroming rondom de koppen van strekdammen) een rol. Anderzijds speelt ook het aspect van de bereikbaarheid van de havens langs het Markermeer.

Door compartimentering zal er sprake zijn van langere vaarroutes naar bepaalde havens. Beide aspecten zullen bij de verdere uitwerking nader bekeken moeten worden.

- Bij compartimentering zal overwogen worden om het benodigde zand te winnen in het Markermeer zelf. Een dergelijke aanpak reduceert de kosten en heeft – vanwege de verdieping – ook een bijkomend reducerend effect op de slibconcentratie. Verder kan bij de optie met eilanden een batenkant gerealiseerd worden door recreatie- en/of woonmogelijkheden te creëren op de eilanden. Deze mogelijkheden zullen bij verdere uitwerking nader beschouwd moeten worden.
- Een gunstig neveneffect van compartimentering is dat dit de veiligheid van de omliggende dijkeringen ten goede komt. De golfaanval en ook de waterstandsopzet bij de primaire waterkeringen zal door compartimentering reduceren.

### **3.3 WL | Delft Hydraulics - December 2007**

#### **3.3.1 Inleiding**

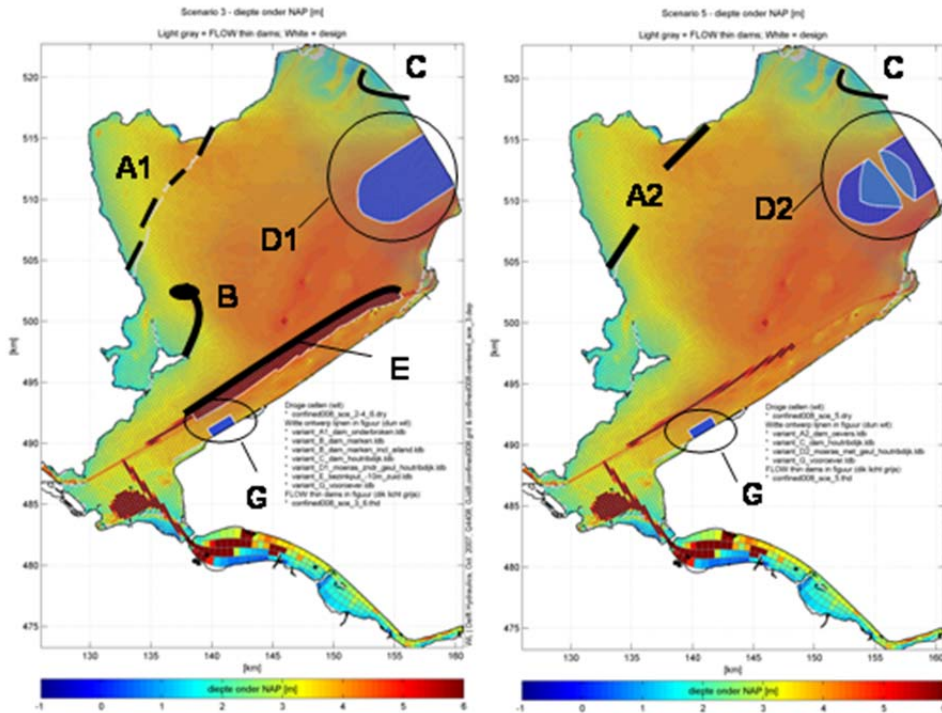
WL | Delft Hydraulics heeft in de jaren 2006/2007 opdracht gekregen van Rijkswaterstaat om een slibmodel te ontwikkelen voor het Markermeer, waarmee een evaluatie van verschillende scenario's aan inrichtingsmaatregelen uitgevoerd kan worden. De modelontwikkeling is uiteindelijk doorgelopen tot eind 2008. In het betreffende Deltares rapport (Van Kessel et al, 2008) is de uiteindelijke calibratie van het model vastgelegd.

Met eerdere versies van het model zijn al scenarioberekeningen uitgevoerd om de effecten van bepaalde maatregelen te bepalen, zo ook in de studie uit december 2007 (rapport Kuijper, 2007). De versie van het Delft3D model waarmee toen is gerekend is in meer detail beschreven in Hulsbergen, 2007. Omdat deze studie is uitgevoerd met een Delft3D versie waarvan het slibmodel nog niet was gekalibreerd kunnen de resultaten afwijken van studies die later hebben plaatsgevonden. In deze paragraaf worden de resultaten van de studie uit 2007 besproken die specifiek te maken hebben met Luwtestructuren.

De resultaten zijn opgesplitst naar zoekrichting in het Markermeer, conform de indeling binnen TMIJ:

- De Hoornsche Hop;
- Marken.

De scenario's die hierin een rol spelen zijn in figuur 3.1 weergegeven.



Figuur 3.1: Twee verschillende scenario's waarin verschillende maatregelen worden gecombineerd a) scenario Hoornse Barrière en b) scenario Hoornse dammen

Bij de uitgevoerde scenario-berekeningen zijn meerdere maatregelen gecombineerd in één scenario. Hierdoor is het lastig om per zoekgebied de afzonderlijke effecten te bepalen: cumulatieve effecten kunnen hierin een rol gaan spelen. De belangrijkste resultaten van beide scenario berekeningen zijn weergegeven in bijlage 1. Hieronder volgt een analyse welke direct is overgenomen uit het rapport.

### 3.3.2 Hoornsche Hop (zie ook figuur 4.1)

- 'De Hoornse Barrière (Scenario 3) werkt als een golfbreker. De gehalten zwevend stof in de Hoornsche Hop worden in vergelijking tot het basisscenario in beperkte mate gereduceerd bij alle windrichtingen. Het effect wordt echter ook beïnvloed door de aanwezigheid van de Markerbaai en andere maatregelen in het gepresenteerde scenario. Hierdoor is niet exact duidelijk hoe groot het effect van de golfbrekers zelf op de vermindering van het slibgehalte is;
- Bij de Hoornse Dammen (Scenario 5) neemt het zwevend stof gehalte af. Wederom fungeren de dammen als golfbrekers. De vrij grote opening tussen de dammen staat toe dat onder oostenwind opwoeling plaatsvindt van de toplaag.

Maatregelen die moeten leiden tot een verbetering van de helderheid in de Hoornsche Hop lijken hier in beperkte mate aan te voldoen. De dammen functioneren als golfbrekers. De golfbrekers zorgen voor een verlaging van de golfhoogte in het gebied achter de constructies waardoor resuspensie van sediment door golven wordt tegengegaan.

De Hoornse Trog (slibvangput) leidt ook tot lagere zwevend stof gehalten. Een lichte verbetering van het doorzicht is te verwachten. Of deze voldoende is om waterplanten te laten kiemen op plaatsen waar dat nu door de beperkte hoeveelheid licht die de bodem bereikt onmogelijk is, zal nader onderzocht moeten worden.

Behoudens in de uiteinden van de uitgediepte Hoornse Trog, treedt er, in vergelijking tot de referentiesituatie, niet of nauwelijks aanslibbing op in de Hoornsche Hop. In beide situaties (referentie en scenario) is er sprake van een netto jaarlijks transport van sediment vanuit de Hoornsche Hop naar de dieper gelegen delen in het oosten van het Markermeer. Hierbij moet de kanttekening geplaatst worden dat het model geen rekening houdt met sediment dat mogelijk door dichtheidsstromen wordt aangevoerd en dat een graduele toename van het percentage slib in de onderlaag (S2-laag) wel denkbaar is'.

Er dient te worden opgemerkt dat, hoewel in dit rapport de conclusie wordt getrokken dat de dammen als golfbrekers werken, dit niet expliciet duidelijk wordt uit de modelresultaten. In welke mate de twee hoofdprocessen, golfreductie en stroomgeleiding, hier afzonderlijk aan hebben bijgedragen is ook niet duidelijk.

### 3.3.3 Marken

Door de aanleg van een dam en een eiland voor Marken ontstaat een nieuwe baai die dieper is dan de huidige Gouwzee. De modelberekeningen laten zien dat de zwevend stof gehalten in de nieuw ontstane baai bij de meeste windrichtingen lager zijn dan in de uitgangssituatie. De nieuwe situatie wordt qua helderheid vergelijkbaar met die van de bestaande Gouwzee.

De nieuwe baai leidt ook tot een kleinere circulatiestroom in het Markermeer en kortere strijklengtes bij zuiden, zuidwesten en westenwind. Dit draagt bij aan een verbetering van de helderheid in het Markermeer als geheel.

Aanslibbing van fijn sediment (in de 'fluffy layer') in de baai is verwaarloosbaar omdat er zowel in de varianten met de baai als in de uitgangssituatie sprake is van een netto jaarlijks transport van sediment vanuit dit gedeelte van het Markermeer naar de dieper gelegen delen in het oosten van het Markermeer. Sediment wordt als het ware van de ondiepe bodem weggenomen en getransporteerd naar de diepere delen bij de dominante windrichtingen. Dit geldt waarschijnlijk niet voor de onderliggende laag.

Er dient te worden opgemerkt dat de geleidewerking bij de dammen bij Marken dus wel benoemd wordt als optredend effect, terwijl dit in het geval van de Hoornsche Hop niet specifiek wordt vermeld.

### 3.4 Deltares - December 2008

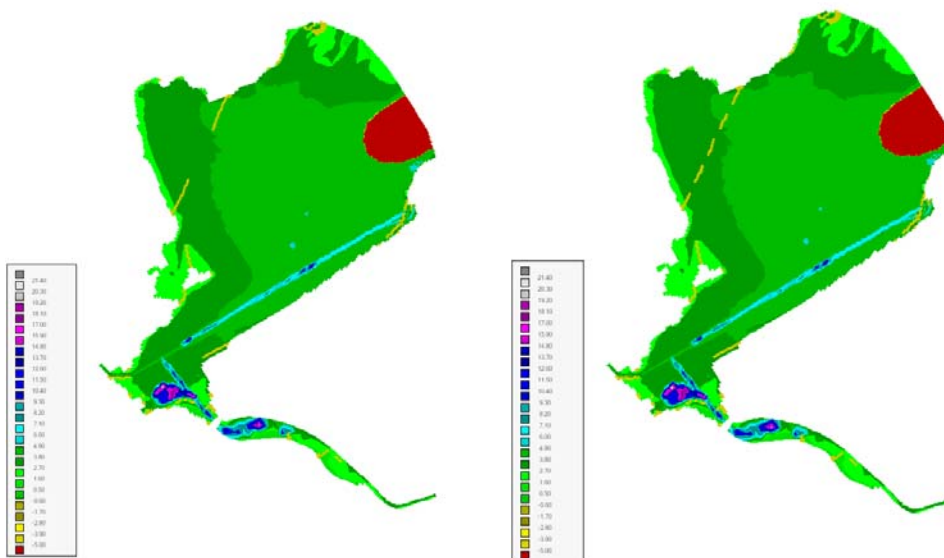
#### 3.4.1 Inleiding

Met het gekalibreerde Delft3D model van het Markermeer zijn eind 2008 door Deltares nieuwe scenario berekeningen uitgevoerd. In deze berekeningen zijn de verschillende maatregelen apart doorgerekend. Net als in de vorige paragraaf worden alleen de resultaten weergegeven voor de Luwtestructuren. De resultaten zijn wederom opgesplitst per zoekgebied in het Markermeer:

- De Hoornsche Hop;
- Marken.

#### 3.4.2 Hoornsche Hop

Voor dit zoekgebied zijn 2 varianten doorgerekend: Luwtedammen (scenario 6, Figuur 3.2a) en eilanden (scenario 7, Figuur 3.2b).



**Figuur 3.2: Hoogtekaarten a) Scenario 6 met luwtedammen; b) Scenario 7 met eilanden**

In scenario 6 zijn twee luwtedammen gecreëerd aan beide zijden van de Hoornsche Hop. In scenario 7 zijn de luwtedammen vervangen door eilanden die over de gehele lengte van de Hoornsche Hop zijn aangebracht. Ongeveer 25 % van de oorspronkelijke opening blijft bestaan. De belangrijkste resultaten van beide modelberekeningen zijn weergegeven in bijlage 2. Hieronder volgt een korte analyse welke is overgenomen uit het rapport.

'Het scenario met eilanden geeft een verlaging van de sedimentconcentratie in de waterkolom over het gehele gebied van de Hoornsche Hop. In de winterperiode daalt de gemiddelde concentratie van rond de 80-90 g/m<sup>3</sup> in de referentiesituatie naar rond de 50 g/m<sup>3</sup>.

Het scenario met luwtedammen laat lokaal, achter de dammen, ook een verlaging van de sedimentconcentratie zien. Het effect is echter minder groot dan bij de eilanden.

Direct aan de randen van het meer, vlak onder de westoever laat scenario 6 wel een lagere sediment concentratie zien, lager dan bij scenario 7.

De luwtedammen van scenario 6 geven een wisselend beeld van accumulatie en erosie van beide bodemlagen (patronen voor beide lagen zijn wel gelijk). Aan de luwte kant van de dammen (kant Hoornsche Hop) vindt voornamelijk accumulatie plaats (orde 2000 - 2500 g/m<sup>2</sup> in S2 en 100 g/m<sup>2</sup> in S1). Aan de punten van de dammen, meer richting het midden van het meer, treedt juist erosie op (orde 2000 tot 3000 g/m<sup>2</sup> in S2 en 200 – 300 g/m<sup>2</sup> in S1).'

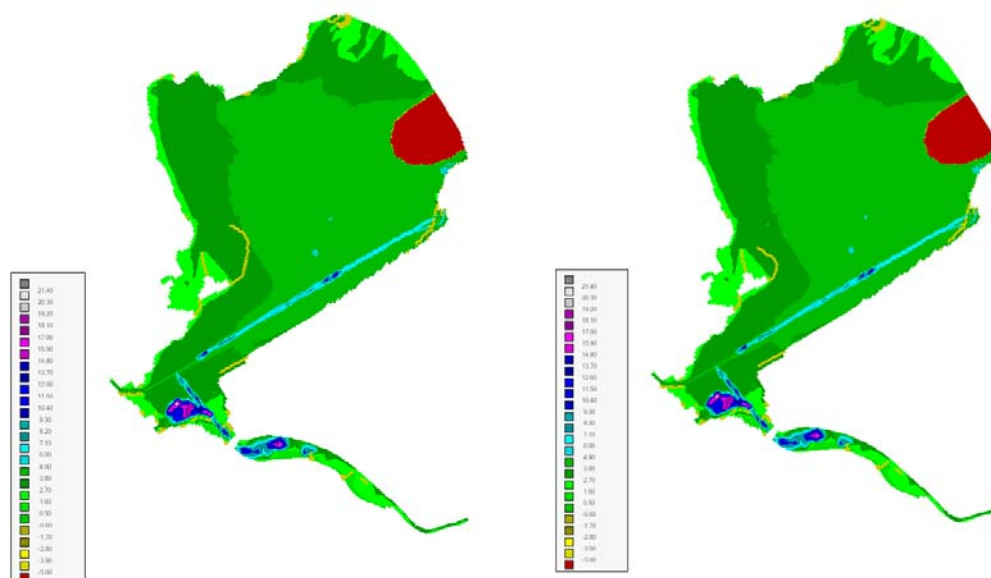
De vermindering van de slibconcentratie in de Hoornsche Hop is groter in het geval van eilanden dan in het geval van luwtedammen. Of dit effect wordt veroorzaakt door luwtewerking of stroomgeleiding is niet te bepalen aan de hand van deze modelresultaten. Verdere analyse op de resultaten is daarvoor gewenst.

De grootste golven in de Hoornsche Hop treden in de huidige situatie op bij ZO-wind. Dan kunnen de dammen/eilanden luwte creëren. Eerder is aangegeven dat na enkele kilometers de golven achter de dammen weer behoorlijk zijn aangegroeid, al is er ook op grotere afstand nog wel enige reductie. In de eerste kilometers achter de dammen is dan ook de grootste daling in sedimentconcentratie te zien, in combinatie met aanslibbing van de bodem. Een en ander kan ook mede veroorzaakt zijn door afbuiging van de stroming.

Bij de variant van de Luwtestructuren is tussen de structuren nauwelijks verlaging in concentratie te zien en ook geen aanslibbing. In dit gedeelte kunnen zowel de golven, als de stroming verder doordringen. Ook hieruit is het afzonderlijke effect van beide processen moeilijk te bepalen.

### 3.4.3 Marken

Ook voor dit zoekgebied zijn 2 varianten doorgerekend: een grote arm (scenario 4, Figuur 3.3b) en een kleine arm (scenario 5, Figuur 3.3a)



Figuur 3.3: Hoogtekaart a) Scenario 4, grote arm; b) Scenario 5, kleine arm

Het doel van de grote arm nabij het eiland Marken is primair om de grootschalige circulatie in het Markermeer te beïnvloeden. De dam creëert een luwtegebied vlakbij het eiland. De kleine arm moet een tweede Gouwzee creëren en volgt de 3 m waterdiepte contourlijn. Hierna zijn tekstdelen uit het betreffende onderzoek overgenomen.

#### *'Grote arm (scenario 4)*

- Voor de verlaging van de sedimentconcentratie in de waterkolom geeft scenario 4 betere resultaten dan 5. Ook het invloedsgebied van de grote dam van scenario 4 is duidelijk groter. De gemiddelde concentratie in de winterperiode daalt bij scenario 4 van ongeveer 80-90 g/m<sup>3</sup> tot rond de 50 g/m<sup>3</sup>. In het luwtegebied achter de dam daalt dit zelfs tot rond de 30 g/m<sup>3</sup>. Voor de kleine dam van scenario 5 worden deze grote veranderingen niet gehaald.
- Opvallend is verder dat de grote dam invloed heeft op een gebied rondom de hele dam (dus ook aan de meerzijde), terwijl de kleine dam alleen effect heeft in het luwtegebied, tussen de dam en het eiland Marken. De grote dam is op dat punt dus efficiënter.
- De grote dam geeft een wisselend beeld van accumulatie en erosie van slib in de S2 laag. Bij de punt van de dam vindt duidelijk erosie plaats uit de S1 en S2 lagen (orde 400 g/m<sup>2</sup> uit S1 en 3000 g/m<sup>2</sup> uit de S2, beide ten opzichte van de referentie). Ten oosten en westen van de grote dam accumuleert het slib voornamelijk in de S2 laag, met waarden van 2000 tot 3000 g/m<sup>2</sup>. In de S1 laag is de accumulatie beperkt.'

Wij merken op dat het tweede punt een aanwijzing kan zijn dat beïnvloeding van de grootschalige circulatiestroming de gunstige situatie kan veroorzaken. Omdat in beide scenario's golven ten oosten van de dam op vergelijkbare wijze zullen ontstaan, lijkt het verschil niet aan golfwerking toe te schrijven.

#### *'Kleine arm (scenario 5)*

- Bij de kleine dam accumuleert het slib alleen in de S2 laag (orde 2000 g/m<sup>2</sup>).
- In beide scenario's verandert het luwtegebied tussen de dam en het eiland Marken in een sedimentatiegebied. In de huidige situatie en de referentie situatie is dit een erosie-gebied, maar door de luwte die gecreëerd wordt, verandert dit in een sedimentatiegebied. Bij de punt van de dam ontstaat lokaal een erosiegebied. Zowel het invloedsgebied als de mate van sedimentatie is groter bij de grote dam dan bij de kleine dam.'

#### Aanslibbing in de Hoornsche Hop en nabij eiland Marken

De aanslibbing in de Hoornsche Hop en nabij het eiland Marken is een stuk lager dan in de slibputten. Voor zowel de Hoornsche Hop (scenario's 6,7 en 9, de putten alleen laten erosie zien) als het gebied nabij het eiland Marken is de sedimentatie in de orde 2-3 kg/m<sup>2</sup> per jaar. Bij een bulkdichtheid van 1400 kg/m<sup>3</sup> (iets hoger dan in de putten, omdat het slibmengsel waarschijnlijk dikker is) levert dit een aanslibbing in de orde van enkele mm's per jaar. De aanslibbing buiten de putten is in dit opzicht verwaarloosbaar ten opzichte van in de putten.

Direct achter de luwtedammen in de Hoornsche Hop en nabij het eiland Marken is de sedimentatie hoger (6 kg/m<sup>2</sup>), maximaal in de orde van 1 cm per jaar.

Opvallend is wel dat de gebieden van de Hoornsche Hop en nabij het eiland Marken in de huidige situatie een erosie gebied zijn (orde van enkele mm's tot 1 cm per jaar erosie). Door de inrichtingsmaatregelen verandert dit karakter van het gebied.

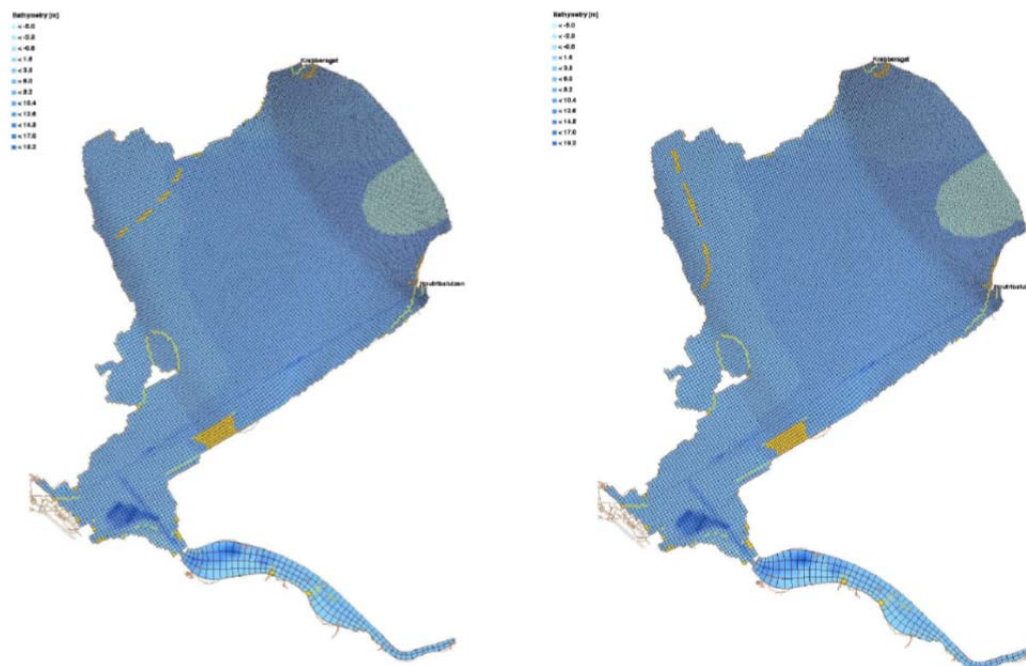


### Conclusies

- De effecten van de verschillende maatregelen zijn vooral lokaal zichtbaar. Het bestrijden van het troebelheidprobleem in het Markermeer is met deze maatregelen dus op lokale schaal effectief. Voor verbeteringen op de schaal van het totale Markermeer zal een combinatie van de maatregelen moeten worden gezocht.
- Voor de Hoornsche Hop: putten in combinatie met eilanden geven de beste resultaten. De putten alleen hebben geen afdoende effect. De eilanden alleen geven echter een marginaal minder beeld dan met putten erbij. Het aanleggen van putten en eilanden samen heeft echter voordelen bij de aanleg; de eilanden kunnen wellicht worden aangelegd met materiaal uit de putten. De Hoornsche Hop verandert in alle gevallen van een erosie gebied in een sedimentatie gebied, behalve bij het scenario met alleen de putten.
- Voor het eiland Marken: de grote arm heeft duidelijk meer effect en geeft een grote verlaging van de gemiddelde sedimentconcentratie in de waterkolom en een reductie van de tijd dan de tijd dat de mobiele S1 laag dikker is dan 1 mm. Het luwte gebied tussen de dam en het eiland Marken verandert van een erosiegebied in een sedimentatiegebied.
- Voor de maatregelen bij de Hoornsche Hop is lastig te bepalen of deze werken door het creëren van golfuwte of door stroomgeleiding. Bij Marken lijken de grote dammen meer effect te hebben door meer stroomgeleiding, maar dit zal, indien verder relevant, in een nadere analyse moeten worden bepaald.

## 3.5 Deltares – Juli 2009

Deltares heeft in 2009 opnieuw een aantal scenario berekeningen uitgevoerd, dit keer in het kader van het TMIJ (Genseberger en Boderie, 2009). Wederom zijn in deze berekeningen Luwtestructuren doorgerekend in de Hoornsche Hop en bij Marken. Twee varianten per deelgebied zijn hiervoor van belang. De lay-out van de varianten is in figuur 3.4 weergegeven.



Figuur 3.4: a) Scenario 1, eilanden diagonaal; b) Scenario 2, eilanden parallel aan westelijke oever

De belangrijkste kenmerken van deze varianten zijn.

Scenario 1:

- De eilanden in de Hoornsche Hop zijn diagonaal georiënteerd van west naar oost, met genoeg openingen bij de vaste wal in verband met de scheepvaart. De eilanden steken minder ver het Markermeer in dan in eerdere studies/ontwerpen en dit heeft daarom naar verwachting minder invloed op de slibstroming / gradiënt.
- De haak bij Marken. Dit is een kortere haak dan in eerdere studies/ontwerpen: de structuur is op deze manier niet zichtbaar vanaf de kust.

Scenario 2:

- De eilanden in de Hoornsche Hop zijn evenwijdig aan westelijke kust, met genoeg openingen bij de vaste wal in verband met de scheepvaart. Ten opzichte van scenario 1 steken de eilanden minder ver het Markermeer in en zullen daarom naar verwachting de slibtransporten minder beïnvloeden. Ze zorgen echter waarschijnlijk wel voor een betere golfuwte in een ondieper gebied (waardoor meer kans op ontwikkeling van waterplanten).
- De haak bij Marken is uitgevoerd met doorsteek naar het Markermeer ter hoogte van het Paard van Marken in verband met de scheepvaart. Deze doorsteek is nog niet eerder doorgerekend en betekent een betere doorstroming van het luwtegebied achter de dam. Dit is een kortere haak dan in eerdere studies/ontwerpen (om niet zichtbaar te zijn vanaf de kust).

De kenmerkende resultaten van deze twee scenario's zijn in de bijlage opgenomen.

De volgende uitkomsten vallen op:

#### Sediment concentratie

Beide varianten voor de eilanden bij de Hoornsche Hop verminderen de lokale hoeveelheid sediment (zowel maximaal over de zomer als maximaal en gemiddeld over het jaar). Echter, eilanden diagonaal van west naar oost hebben een groter effect op de globale sediment wolk in het Markermeer (scenario 1) dan eilanden evenwijdig aan de kust (scenario 2). Het ingesloten luwtegebied achter de dam is kleiner bij de evenwijdige eilanden. Het lijkt aannemelijk dat dit wordt veroorzaakt doordat de eilanden aan de kust de stroom minder goed wegleiden van de Hoornsche Hop, zodat er meer slibrijk water in dat gebied zal binnenstromen. In dat opzicht werken de eilanden diagonaal beter qua stroomgeleiding dan de eilanden parallel aan de kust. In het gebied van de Hoornsche Hop is bij de diagonale dammen dan ook een groter gebied te zien met sterke afname van de sedimentconcentratie.

Daar staat tegenover dat de eilanden parallel aan de kust goede luwtegebieden creëren langs de kust tussen Marken en de Hoornsche Hop. Dit is voornamelijk een gevolg van de beperkte afstand tot de kust waardoor golven niet meer sterk zullen aangroeien en van de stroomluwte die door de aaneenschakeling van de parallelle eilanden wordt gerealiseerd. Hierdoor neemt bij de parallelle eilanden de sedimentconcentratie dicht onder de kust sterk af, terwijl dat bij de diagonale eilanden bij de Hoornsche Hop niet het geval is voor dit kustgedeelte. Een belangrijke doelstelling van de maatregel is om de slibgradiënt te vergroten en met name langs de kust door verlaging van de slibconcentratie betere voorwaarden te creëren voor plantengroei. In dit opzicht scoren de parallelle dammen beter dan de diagonale dammen.

Bovendien worden aan de oostzijde van deze dammen goede condities geboden om extra vegetatiezones te realiseren.

Het sterke golfluwte effect is goed te zien aan de aanslibbing: in het gehele gebied achter de dammen vindt aanslibbing plaats. Bij de diagonale dammen is dit niet het geval.

Globaal nemen de maximale waarden in het jaar in scenario 1 af met 100 tot 150 mg/l en tijdens de zomer met 50 mg/l. Voor scenario 2 is dit 50 tot 100 mg/l tijdens het jaar, met maximaal 150 mg/l afname achter de dammen. Tijdens de zomer neemt de concentratie met 50 mg/l af. Voor de dammen neemt de concentratie echter toe met ongeveer 30 mg/l.

De haak bij Marken heeft alleen een gunstig effect op de sediment concentratie in het water dat zij omsluit. Door de lokale luwte achter de haak neemt de sediment concentratie maximaal af met 150 mg/l tijdens het jaar en maximaal 50 mg/l tijdens de zomer. Bij een doorsteek naar het Markermeer, zoals in scenario 2, is de vermindering van de sediment concentratie minder sterk. Dit is te verklaren door toevoer van water met een hogere sediment concentratie door de doorsteek. Langs de kust bij Marken ontstaat hierdoor een strook water waar de concentratie niet afneemt. Dit is niet het geval bij de gesloten dam.

#### Aanslibbing

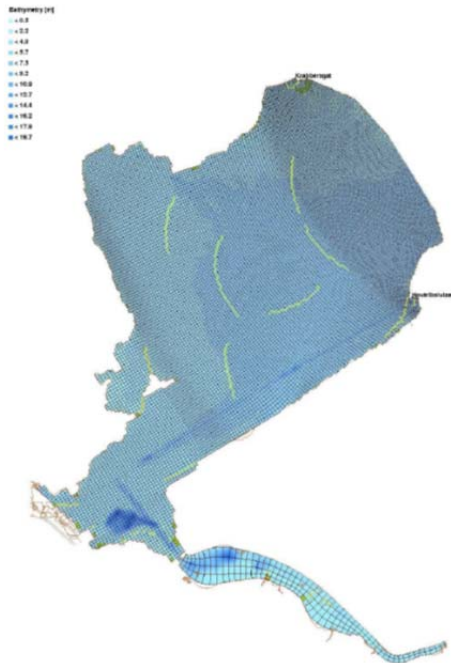
Bij beide varianten voor de eilanden bij de Hoornsche Hop is aan de kant van de eilanden het dichtst bij de vaste wal sprake van een toename van de hoeveelheid sediment op de bodem met 2 tot 6 kg/m<sup>2</sup>. Bij eilanden evenwijdig aan de vaste wal is deze toename, als een gevolg van de grotere luwtewerking, het grootst.

De haak bij Marken creëert een dusdanige luwte dat in het omsloten gebied veel sedimentatie optreedt. Bij een doorsteek naar het Markermeer (scenario 2) lijkt het gebied te gaan werken als slibvang, waardoor de sedimentatie nog groter is. Er wordt continu water met een hogere sediment concentratie vanaf het centrale, open deel van het Markermeer aangevoerd. Dit water komt achter de haak tot rust waarna het sediment neerzakt op de bodem. Dit kan een risico vormen voor het bevaarbaar houden van de route vanaf het Paard van Marken en is potentieel negatief voor de kans op de ontwikkeling van waterplanten.

### **3.6 Deltares – Januari 2010**

Door Deltares is begin 2010 een studie gerapporteerd waarin een alternatief voor bovenstaande scenario's met luwtedammen langs de kust is gezocht door compartimentering van het Markermeer door middel van 'strandstroken' (Genseberger, 2010), zie figuur 3.5. In een eerdere studie voor de Loosdrechtse plassen, bleek een dergelijk alternatief gunstig te werken ten opzichte van diepe putten. De diepe putten vangen namelijk wel sediment in, maar daarbuiten is maar weinig of geen afname van de slibconcentratie. Een alternatieven met strandstroken daarentegen beïnvloeden de strijklengte van de windgolven en geven daarmee een lagere resuspensie en pakken dus de bron aan.

In de studie van 2010 zijn de eerdere scenario's (Scenario 1 en 2) uit paragraaf 3.5 mede in beschouwing genomen, zodat een directe onderlinge vergelijking van de effectiviteit mogelijk is. Opgemerkt wordt dat het Alternatief met de strandstroken zonder Moeras is doorgerekend.



**Figuur 3.5: Alternatief met compartimentering door strandstroken (dammen) in het Markermeer**

De kenmerkende resultaten van deze doorgerekende situaties (Referentie, Scenario 1 en 2 en het Alternatief) zijn aan de hand van verschillende parameters bepaald. Hierbij is de hoeveelheid licht op de bodem als maat voor de concentratie genomen: zowel de gemiddelde lichtinval op de bodem in het voorjaar als in de zomer voor het gesimuleerde jaar 2006.

Uit de resultaten blijkt:

#### Sedimentconcentratie

De algehele grootschalige sedimentconcentratie neemt in het Alternatief sterk af en dit geldt voor het gehele Markermeer, inclusief de oeverzones van het meer. Zelfs in het IJmeer is deze afname merkbaar, terwijl dit bij de Scenario's 1 en 2 niet het geval is. Dit gunstige effect is zowel in het voorjaar als in de zomer merkbaar, zij het dat het effect in het voorjaar sterker is. Over het geheel genomen steekt het Alternatief dus met 'kop en schouders' uit boven de scenario's met de luwtedammen langs de Hoornsche Hop of langs de kust van de Hoornsche Hop tot Marken.

Wanneer echter alleen de oeverzone nabij de Noord-Hollandse kust in beschouwing wordt genomen, dan blijkt Scenario 2 met de parallelle dammen even goed te werken als de sterk doorgevoerde compartimentering. Dit is verklaarbaar doordat de strandstroken van de compartimentering niet dicht bij dit kustgedeelte zijn geplaatst en hier dus niet effectief zijn. De gunstige werking van het Alternatief langs deze kust komt vrijwel geheel vanwege de doorwerking van de algehele vermindering van de slibconcentratie in het Markermeer.

De ingreep in het Markermeer met de parallelle dammen is beperkt in effect van verlaging van slibgehalte ten opzichte van de ingrijpende compartimentering en de effectiviteit is daarmee voor de parallelle dammen als relatief groter te bestempelen.

#### Aanslibbing

Bij het Alternatief is sprake van een sterke aanslibbing in de luwte (globaal oostzijde) van de strandstroken en tevens aan de westzijde ervan tussen de meest noordwestelijke strook en het vaste land. Er is over een groot deel van het Markermeer sprake van aanslibbing. Die locaties waar ogenschijnlijke verdiepingen optreden, corresponderen met de aanslibbende zones in de referentie. Omdat de verdiepingen relatief zijn ten opzichte van de referentie is er in de 'blauwe gebieden' in feite weinig activiteit.

De algehele aanslibbing bij het Alternatief is vele malen groter dan die in Scenario's 1 en 2. Opgemerkt wordt hierbij dat de aanslibbing bij deze laatste scenario's onderling weinig verschilt.

## 4 BESTAANDE CONSTRUCTIES

### 4.1 Inleiding

In het Markermeer bestaan op het moment enkele constructies welke een geleidende werking hebben of een luwtewerking in het achterliggende gebied (Figuur 4.1).

In dit hoofdstuk wordt gekeken of er geschikte monitoringsgegevens zijn van bestaande constructies.



**Figuur 4.1: Enkele voorbeelden van Luwtestructuren in het Markermeer: linksboven dam langs de Oostvaardersdijk; rechtsboven 'Hockeysticks' langs de Houtribdijk; linksonder luwtedammen bij Marken; rechtsonder Naviduct en moeras**

## 4.2 Bestaande situaties

Door RWS is een voorzet gegeven van structuren waarvan mogelijk geschikte monitoringsgegevens bestaan:

- Dammen langs Houtribdijk;
- Hoeckelingsdam bij IJburg;
- Dam Oostvaardersdijk.

Al deze projecten zijn inmiddels uitgevoerd. In onderstaande alinea's wordt per object beschreven wat het doel is van de constructie en welke monitoring heeft plaatsgevonden.

### 4.2.1 Dammen langs de Houtribdijk

In 1992 is RWS IJsselmeergebied begonnen met de aanleg van vooroevers in de vorm van boogvormige dammen langs de Houtribdijk. Doelstelling van deze vooroevers is om de dijk te beschermen tegen golfslag en ijsgang; natuur zou daar eventueel op kunnen meeliften. Om dat natuur geen hoofddoel was, is vanaf de aanleg nauwelijks monitoring uitgevoerd naar de ecologische en fysische effecten van de vooroevers. In het laatste decennium is ecologie echter een belangrijkere rol gaan spelen in het beleid. Daarom is in 2006 een project uitgevoerd dat als doel had zoveel mogelijk kennis te vergaren over het effect van deze vooroevers bij de Houtribdijk. Hierbij is voornamelijk gekeken naar de effecten op de vispopulatie, waterplanten, Driehoeksmosselen en watervogels. Dit is gedaan door middel van monitoring van zowel biotische als abiotische componenten zoals doorzicht, extinctie en organische en anorganische stof. Ook zijn sedimentvallen uitgezet in het gebied. (Vooroevers Houtribdijk: toestand ecologie en waterkwaliteit. Noordhuis, 2007). Omdat in voorliggende studie wordt gekeken naar maatregelen om de slibgehalten te verminderen zullen alleen de conclusies van de invloed van de dammen (hier vooroevers genoemd) op de anorganische componenten, waterkwaliteit en sediment worden besproken. De conclusies uit het rapport (Vooroevers Houtribdijk, Noordhuis en van Schie, 2007) zijn hier direct weergegeven:

- 'Het gebied rond de vooroevers heeft een andere relatie met wind dan de overige delen van het Markermeer, enerzijds door de zandige bodem ter plaatse, anderzijds door de luwtewerking van de Houtribdijk bij oostenwind. Op windarme dagen met oostenwind is de helderheid daarom groter dan in het midden van het meer;
- De vooroevers hebben een luwtewerking bij zuidwestenwind, die tot uiting komt in een aanzienlijk grotere neerslag van sediment in sedimentvallen buiten de vooroevers. Dit sediment heeft een grote zandfractie en is daarom waarschijnlijk grotendeels ter plaatse opgewerveld en opnieuw gesedimenteerd;
- Achter de vooroevers lijkt in de diepere delen aan de kant van de vooroevers nieuw slib op de oorspronkelijke zandbodem te sedimenteren;
- Op dagen met veel wind vanuit het zuidwesten is het doorzicht achter de vooroevers waarschijnlijk groter dan daarbuiten;
- Op kalme dagen is het doorzicht binnen de vooroevers dicht langs de Houtribdijk groter, door verminderde golfaanval op de ondiepten langs de oever. Aan de kant van de vooroevers is het doorzicht gelijk aan het doorzicht op dezelfde afstand van de Houtribdijk buiten de vooroevers;
- Bij harde oostenwind zou het gebied binnen de vooroever troebeler kunnen zijn dan het gebied direct buiten de vooroever door opwerveling van slib binnen de vooroever (buiten de vooroever bestaat de bodem uit zandig materiaal).'

Uit bovenstaande kan geconcludeerd worden dat de luwtedammen, zoals ook bedoeld, zorgen voor luwte. Echter, ze zorgen ook voor sedimentatie van slib direct nabij de constructies. Bij bepaalde windrichtingen wordt dit slib gemakkelijk opgewerveld en zorgt hierdoor in het luwtegebied voor meer troebelheid dan in een situatie zonder luwtedam het geval zou zijn. Dit speelt voornamelijk omdat de bodem in dit gebied voornamelijk zandig is en het gesedimenteerde materiaal uit slib bestaat. Bij de locatiekeuze voor luwtedammen dient hier wel rekening mee gehouden te worden.

#### 4.2.2 Hoeckelingsdam

Ter compensatie van de aanleg van IJburg in het IJmeer heeft de gemeente Amsterdam een aantal natuurprojecten aangelegd. Eén hiervan is de in 2005 opgeleverde Hoeckelingsdam voor de kust van Waterland. De Hoeckelingsdam is 1,6 km lang en is inmiddels een populaire rust-, foerageer-, en broedplaats voor vogels (Plan Amsterdam, 2009).



Figuur 4.2: De Hoeckelingsdam voor de Waterlandse kust (Plan Amsterdam, 2009)

Bij de Hoeckelingsdam blijkt oeervegetatie niet goed tot ontwikkeling te komen doordat door de tweezijdige ontsluiting de dynamiek en slibaanvoer zo groot is dat het water achter de dam niet helder is (Deltares, 2009). In het kader van NMIJ wordt thans bestudeerd of er een mogelijkheid is om de dam aan de zuidzijde af te sluiten met een (tijdelijke) damwand van ongeveer 100 meter. De hypothese is dat dan de helderheid achter de dam aanzienlijk toe gaat nemen. Vervolgens kan monitoring plaatsvinden, zoals voorgesteld in het Monitoringplan.



#### 4.2.3 Dam Oostvaardersdijk

Dit betreft een dam van ongeveer 400 – 500 m. De dam heeft een tweeledige functie, namelijk recreatie en natuurontwikkeling. De recreatiefunctie betreft het bieden van een tussenhaven op het Markermeer voor de pleziervaart zodat gemakkelijker kleine stukken kan worden gevaren en een rustige plek kan worden gevonden bij verslechterend weer. Er zijn enkele overnachtingsplaatsen voor schepen. Aan de noordkant van het recreatiegebied is veen gestort aan de binnenzijde van de dam. Het is de bedoeling dat dit een natuurgebied wordt. Het is echter een klein en beperkt project. Mede daarom heeft hier geen intensieve monitoring plaatsgevonden. Er worden vogeltellingen gedaan en er is mogelijk nog enige andere ecologische monitoring maar zeker geen abiotische monitoring. Het project is ook nooit aangelegd om de waterkwaliteit te verbeteren en de slibhuishouding aan te passen.

#### 4.2.4 Luwtedam Gooi-Eemmeer

De luwtedam in het Gooi-Eemmeer betreft een vooroever aan de oostelijke zijde van de Stichtse brug. Ook deze vooroever is voornamelijk aangelegd in het kader van natuur. Hier is echter geen informatie van beschikbaar.

## 5 REFERENTIES

- Boderie, P. en Hulsbergen, R. (2009), Modelstudie Slibmaatregelen Eemmeer, Deltares rapport T1002026 (Q4524).
- CIRIA, CUR, CETMEF (2007). The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering, (2nd edition). C683, CIRIA, London
- EurOtop Manual (2007): Wave overtopping of Sea Defenses and Related Structures, Assessment Manual, [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com).
- Genseberger M. en Boderie P. (2009), Simulaties hydrodynamica & slibtransport scenario's Toekomstbeeld Markermeer, Deltares rapport 1200097.007.
- Grontmij (1994), Onderzoek naar aanvullende maatregelen om troebel water tegen te gaan – Relaties tussen diepte, strijklengte en helderheid.
- Hulsbergen, R. en Kuijper, M. (2007), Modelling slibhuishouding Markermeer, WL Delft Hydraulics rapport Q4408.00.
- Kessel, T. van, Boer, G. de, Boderie, P. (2008), Calibration suspended sediment model Markermeer, Deltares rapport Q4612.
- Kuijper, M. (2007), Scenarioberekeningen Markermeer, WL Delft Hydraulics rapport Q4408.50.
- Ledden, M. van, Gerrits, G.W.R., Kessel, T. van, Mosselman, E. (2006), Verdiepingsslag en maatregelen slibproblematiek Markermeer – Analyse kennisleemten en inventarisatie maatregelen, Royal Haskoning rapport 9R3456.A0.
- Noordhuis en van Schie (2007), Vooroevers Houtribdijk: toestand ecologie en waterkwaliteit 2006. Inventarisatie van waterplanten, watervogels, driehoeksmosselen, fysische en chemische parameters. RWS RIZA 2007-006
- Plan Amsterdam: De afronding van IJburg (2009), Vol. 2. Dienst Ruimtelijke Ordening Gemeente Amsterdam.
- Samenwerkingsverband Toekomstagenda Markermeer IJmeer (2009), Toekomstbeeld Markermeer IJmeer – Natuurlijk ontwikkelen.
- TAW (2002): Technisch rapport golfoploop en golfoverslag bij dijken, Technische Advies Commissie voor de waterkeringen, mei 2002
- Verheij, H.J. (2006): IJsselmeer zoekt verdieping, WL-rapport Q4087.00. WL | Delft Hydraulics, Delft
- Visser, K.P. (2007), Golfbrekers in het Markermeer, synergie voor veiligheid en ecologie, afstudeerscriptie, Hogeschool van Amsterdam & Rijkswaterstaat IJG
- Vijverberg, T. (2008) Mud dynamics in the Markermeer – Silt traps as a mitigation measure for turbidity, MSc Thesis, Technische Universiteit Delft.

Vijverberg, T. en Boderie, P. (2008), Analyse scenarioberekeningen Markermeer, Deltares rapport Q4613.

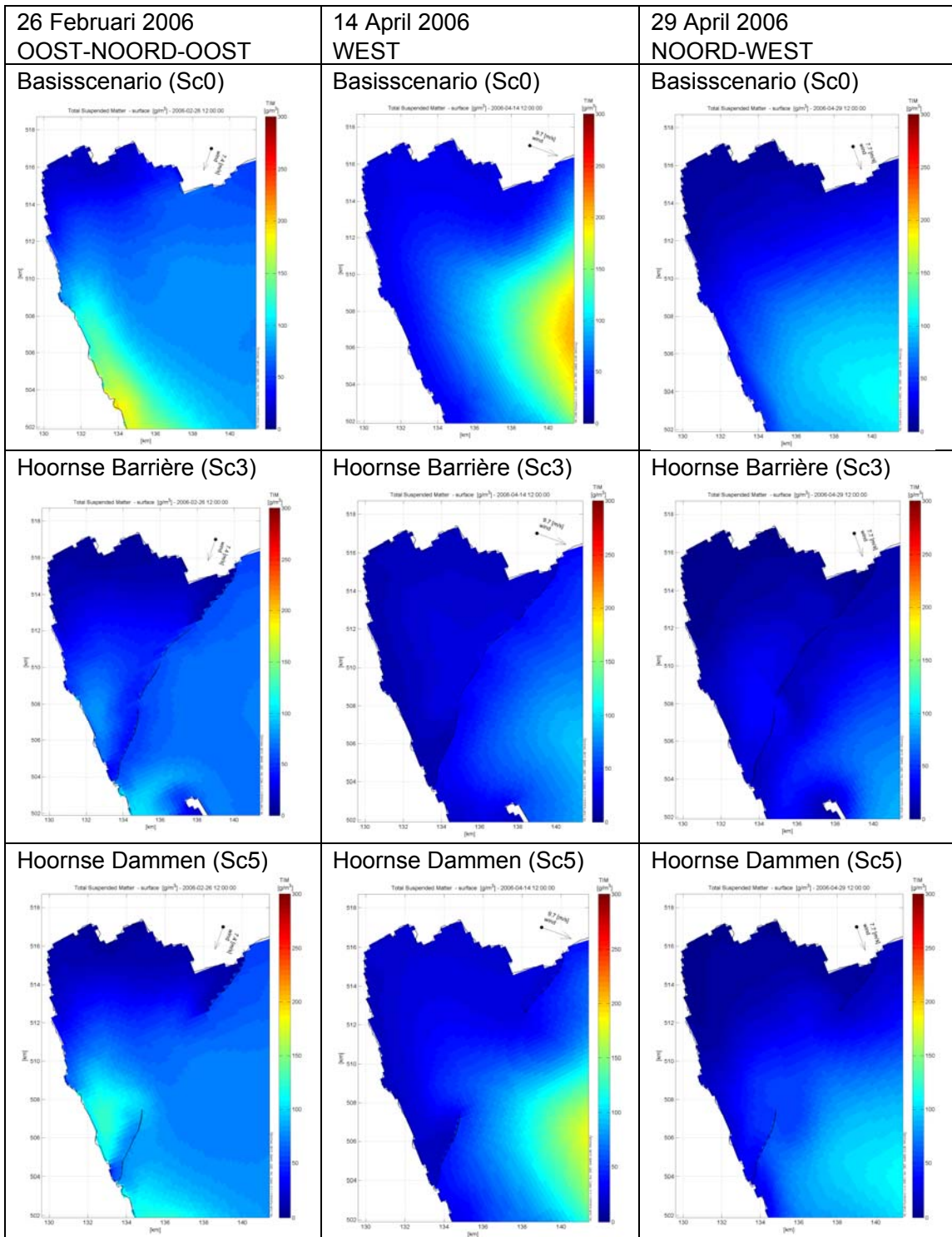
Vijverberg, T., Winterwerp, J.C., Aarninkhof, S.G.J. and Drost, H. (2010), Near-bed fine sediment dynamics in a shallow lake and its implication for the design of hydraulic works, Ocean Dynamics – special issue: INTERCOH conference proceedings 2009.

Wal, van der, M. en Chaves (2009): Hoeckelingsdam, Assistentie Projectbureau IJburg, Deltares, project 1002039.

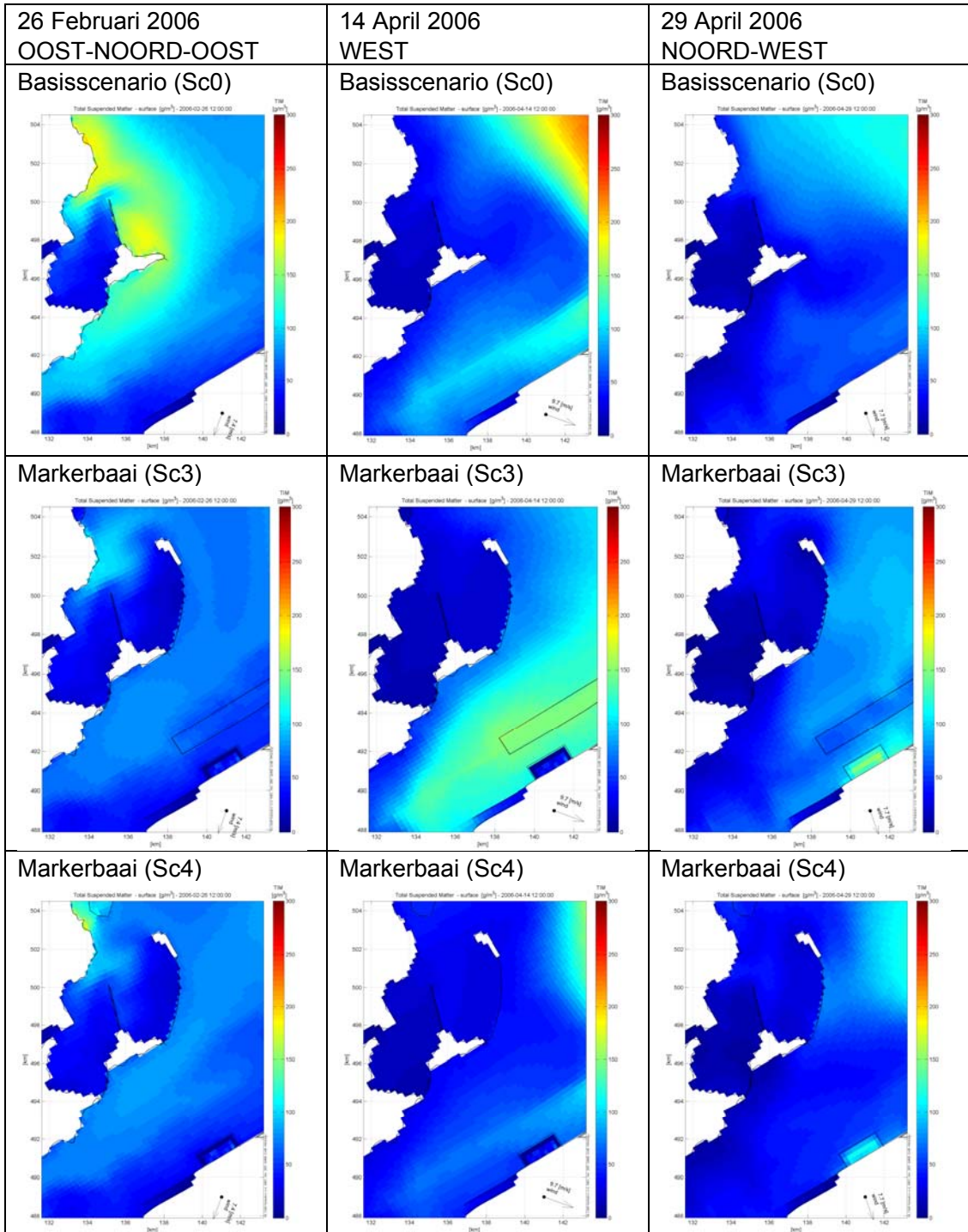
WL | Delft Hydraulics & Witteveen + Bos (2005): Productieberekeningen Hydraulische Randvoorwaarden 2006, IJburg en de Eem, WL-rapport Q4008.00.

**Bijlage 1**  
**Resultaten Delft3D berekeningen december 2007**

## Hoornsche Hop



**Marken**

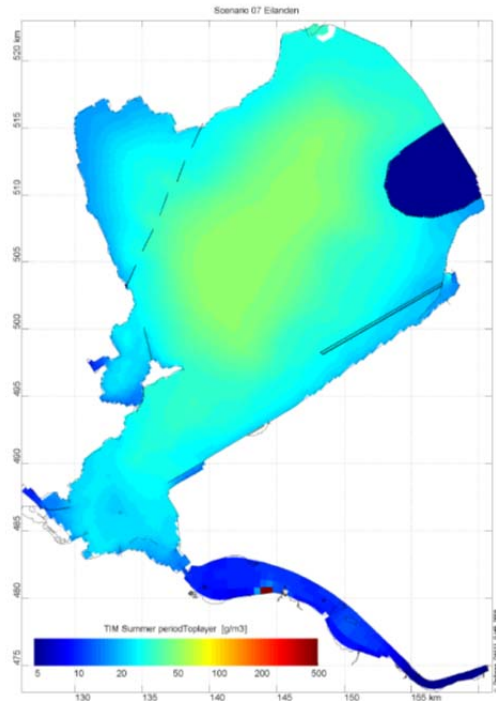
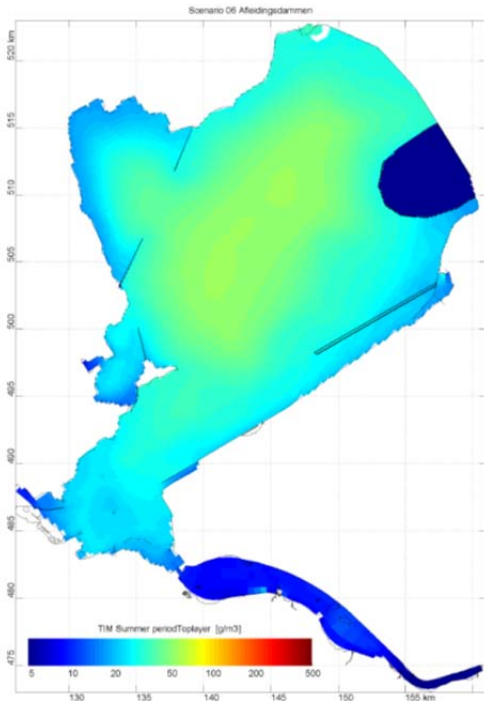


## **Bijlage 2**

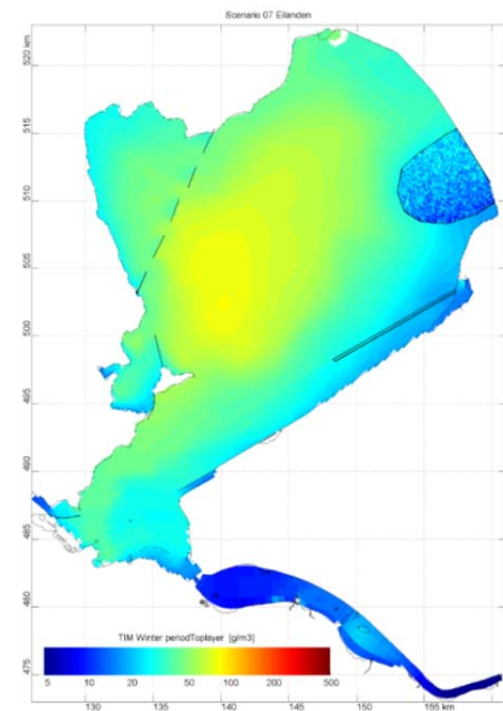
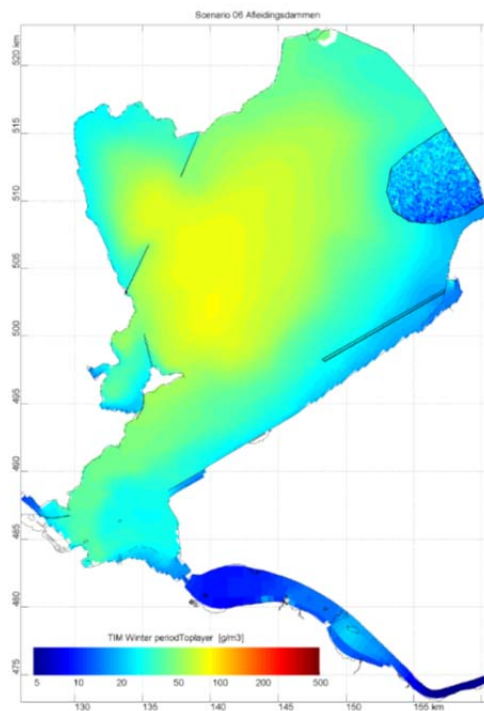
### **Resultaten Delft3D berekeningen juli 2009**

## Hoornsche Hop

### Sediment concentratie

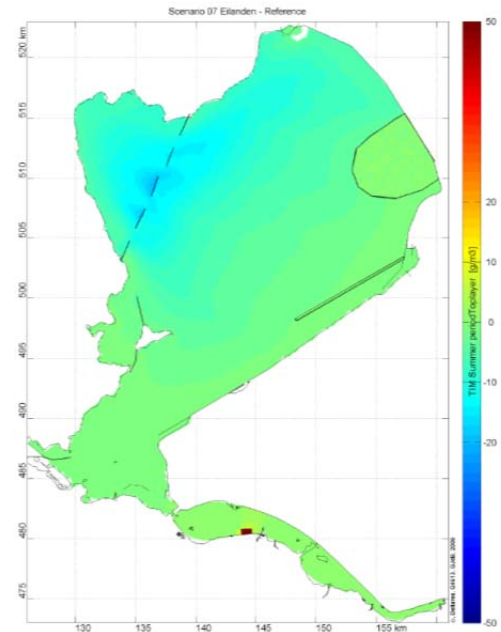
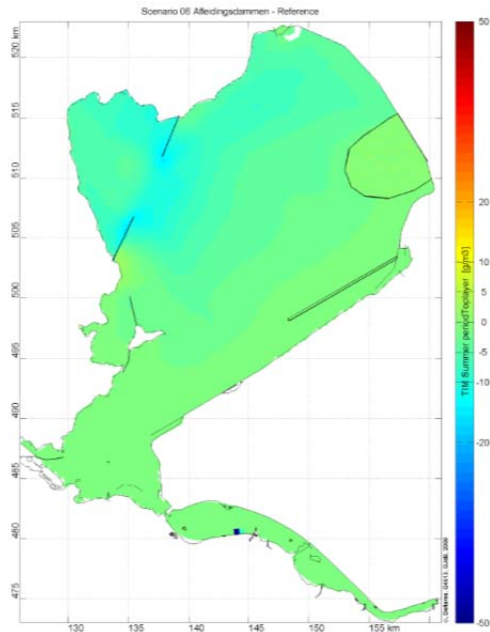


### Gemiddeld slibconcentratie zomer, waterkolom

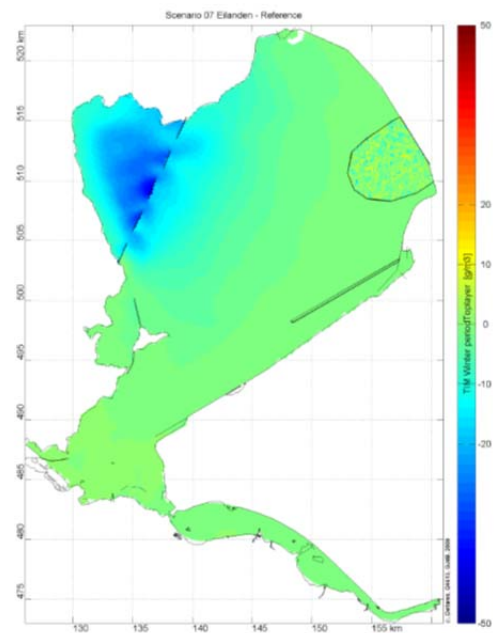
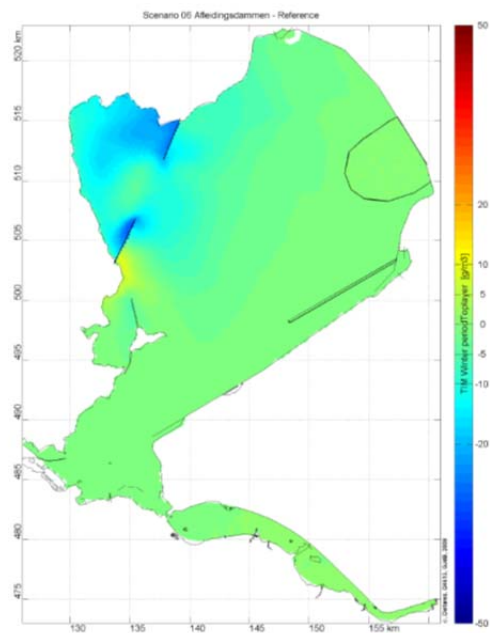


### Gemiddeld slibconcentratie winter, waterkolom



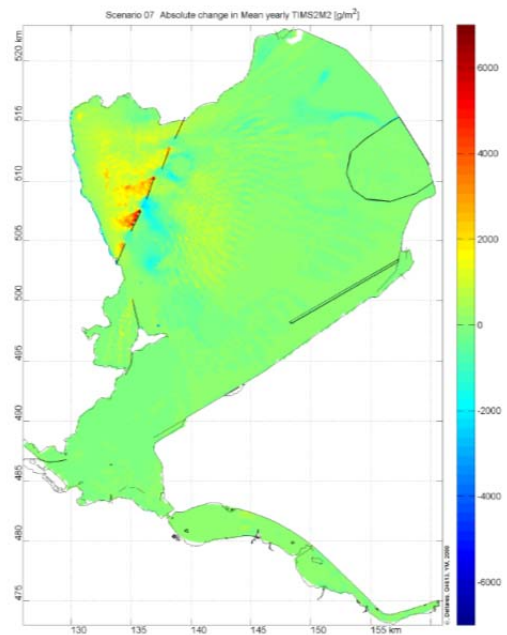
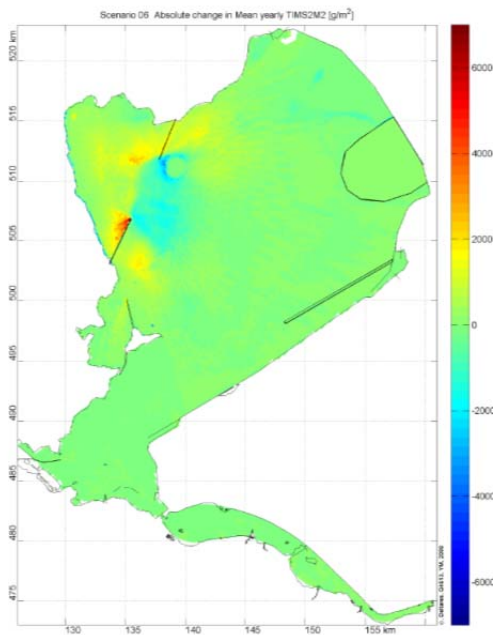


Gemiddeld slibconcentratie zomer, waterkolom. Verschil tov ref (= met moeras)

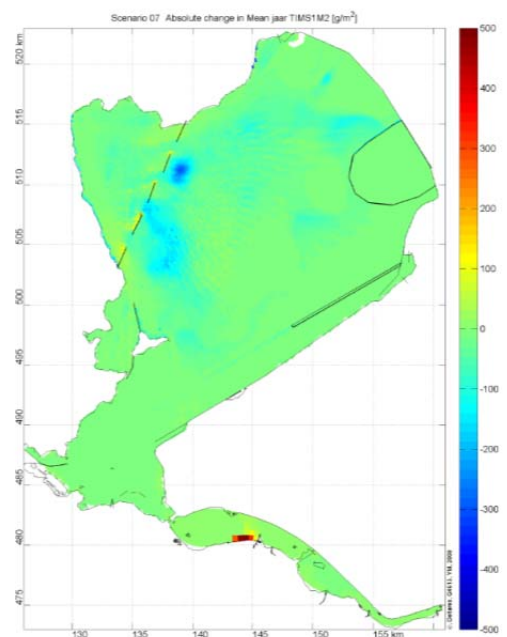
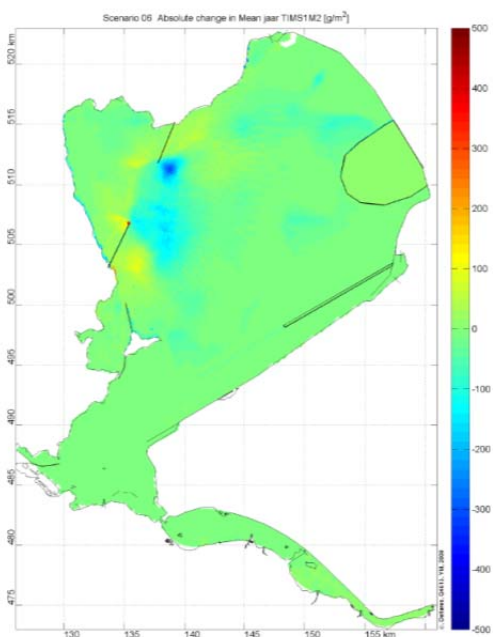


Gemiddeld slibconcentratie winter, waterkolom. Verschil tov ref (= met moeras)

## Aanslibbing



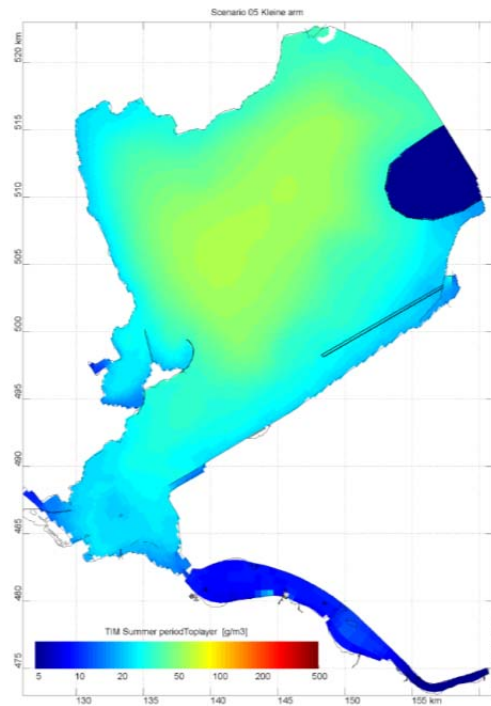
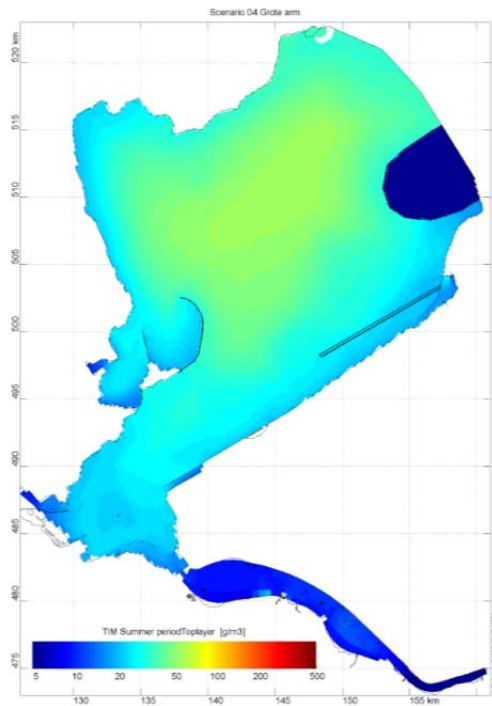
## Jaargemiddelde waarden s2 laag, verschil met ref



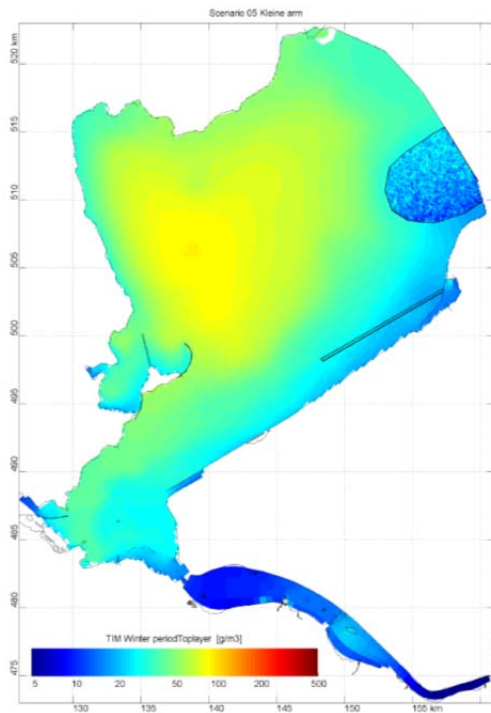
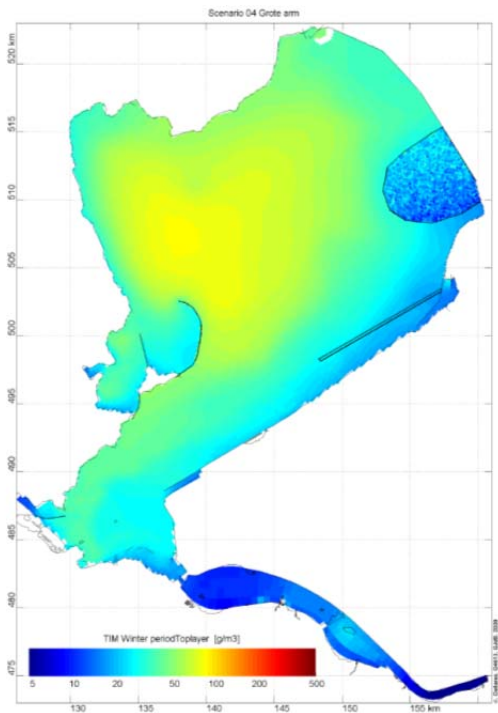
## Jaargemiddelde waarden s1 laag, verschil met ref

**Marken**

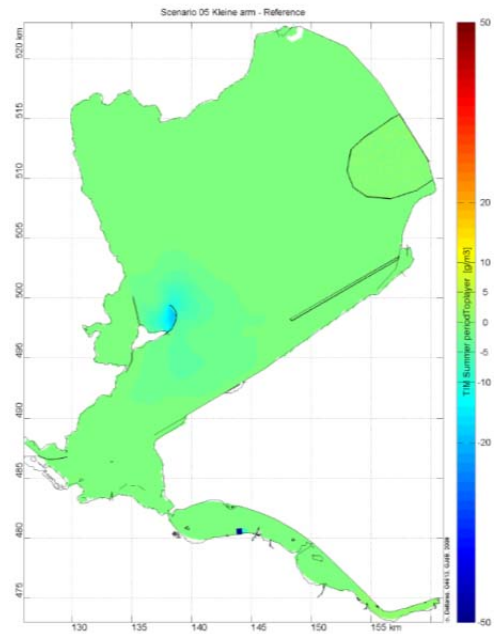
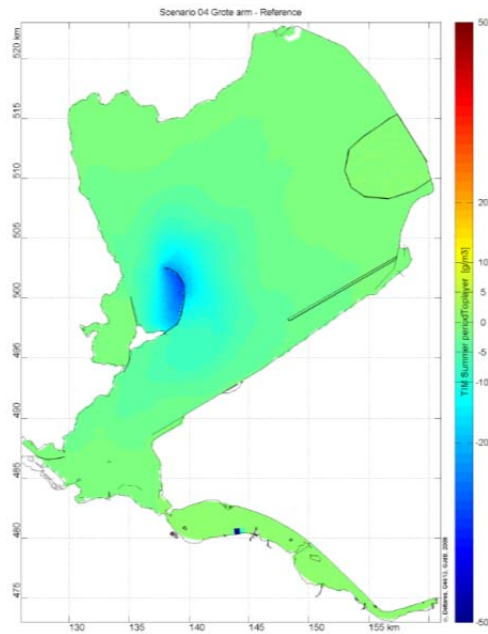
Sedimentconcentratie



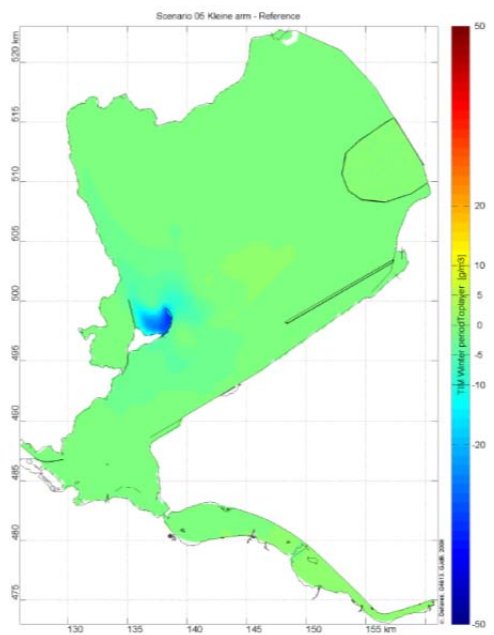
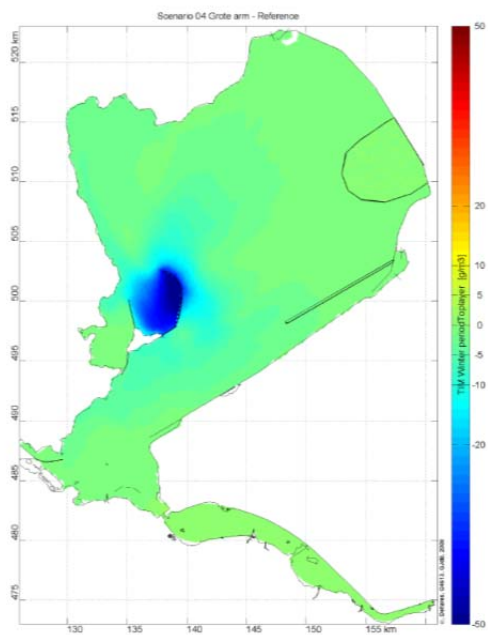
**Gemiddeld slibconcentratie zomer, waterkolom**



**Gemiddeld slibconcentratie winter, waterkolom**

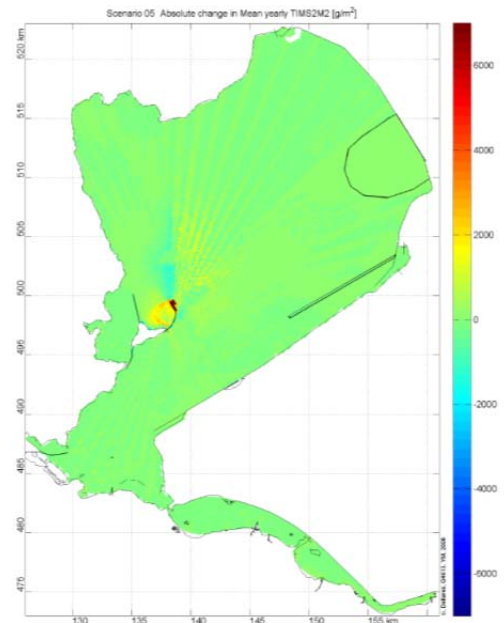
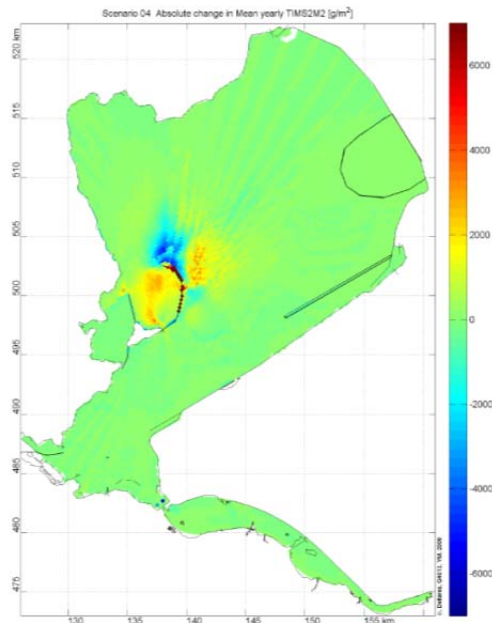


Gemiddeld slibconcentratie zomer, waterkolom. Verschil tov ref (= met moeras)

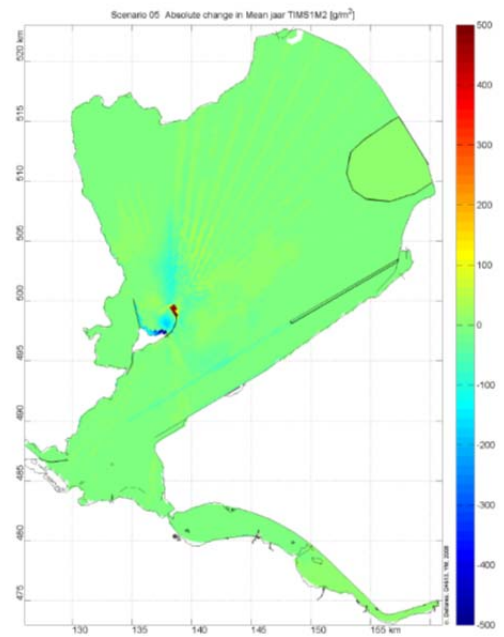
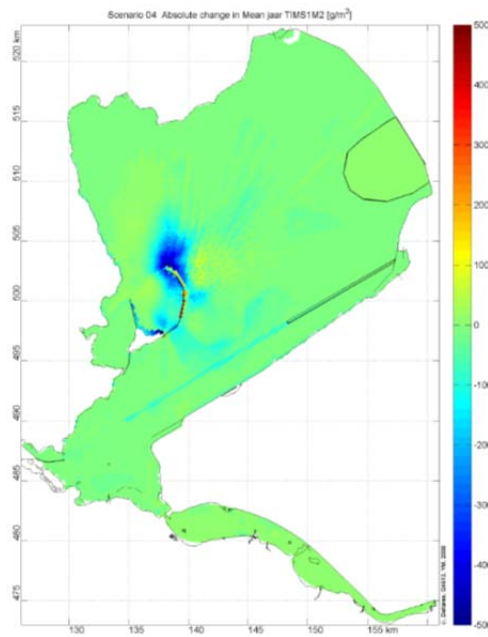


Gemiddeld slibconcentratie winter, waterkolom. Verschil tov ref (= met moeras)

## Aanslibbing



### Jaargemiddelde waarden s2 laag, verschil met ref

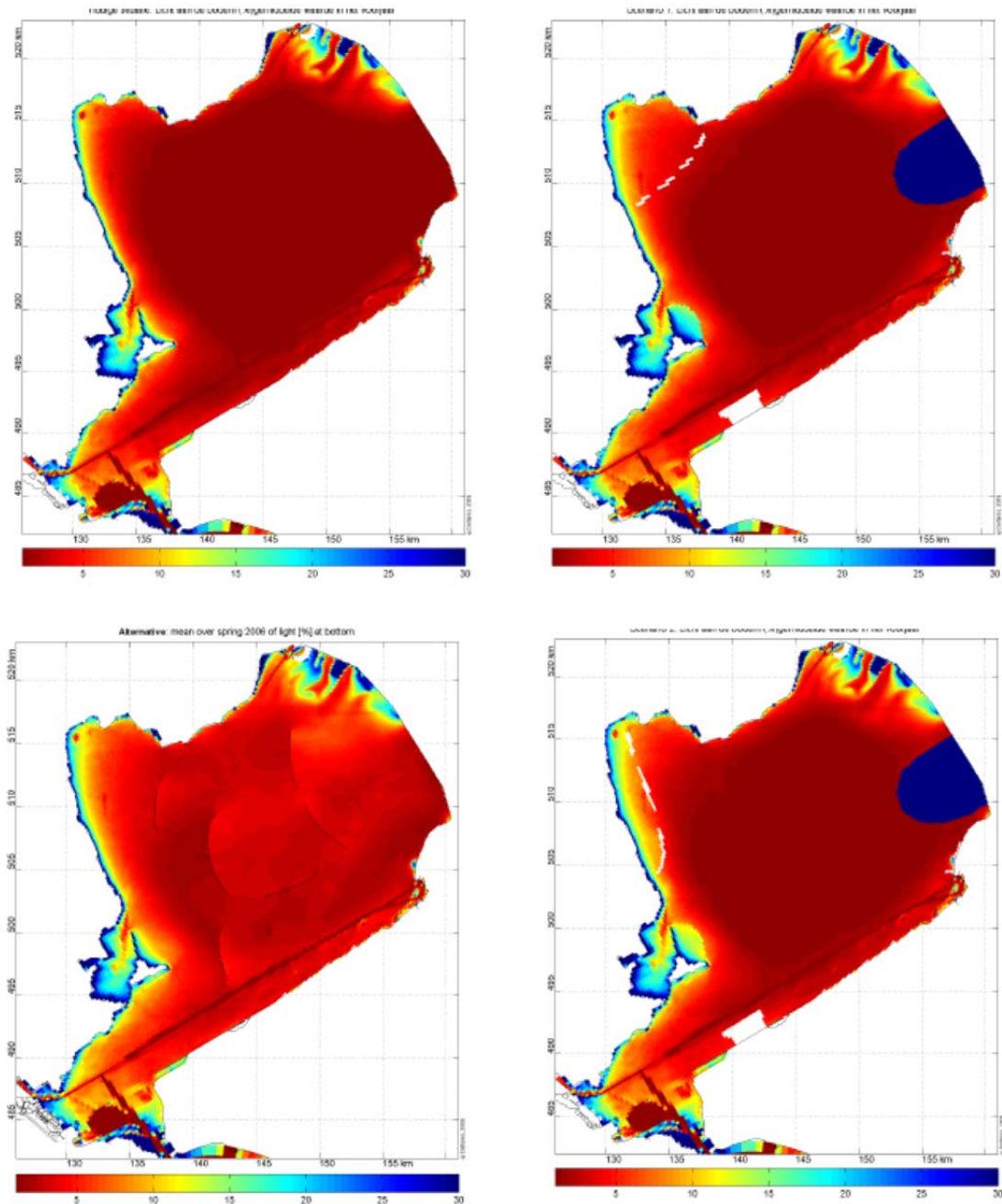


### Jaargemiddelde waarden s1 laag, verschil met ref

## **Bijlage 3**

### **Resultaten Delft3D berekeningen januari 2010**

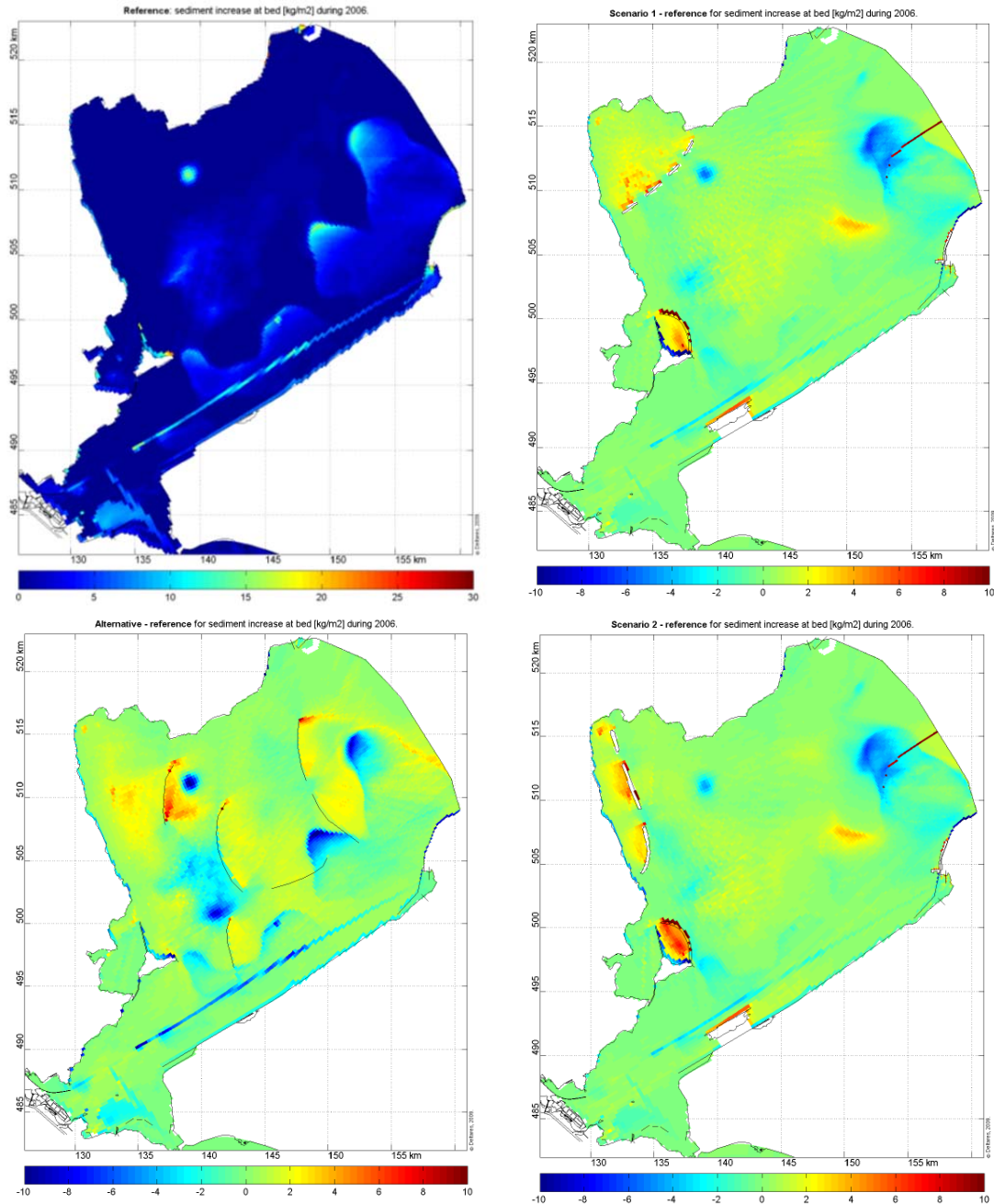
Sedimentconcentratie: hoeveelheid licht [%] op de bodem, gemiddeld over het voorjaar



**Vergelijking van de vier situaties:**

- Linksboven:      Referentie  
 Rechtsboven:    Scenario 2 met de diagonale dammen  
 Linksonder:      Alternatief met de strandstroken  
 Rechtsonder:    Scenario 1 met de parallelle dammen

Relatieve aanslibbing ten opzichte van Referentie in  $\text{kg/m}^2$  voor het simulatiejaar 2006  
(bij de Referentie is de absolute aanslibbing weergegeven)



**Vergelijking van de vier situaties:**

Linksboven: Referentie  
 Rechtsboven: Scenario 2 met de diagonale dammen  
 Linksonder: Alternatief met de strandstroken  
 Rechtsonder: Scenario 1 met de parallelle dammen