



Erosie-remmende maatregelen voor het behoud van vogeleilanden in het Grevelingenmeer

Een theoretische verkenning naar toepasbaarheid van onderwaterriffen als erosieremmende maatregel

Auteur: Brenda Walles

Wageningen University &
Research rapport C082/22

Erosie-remmende maatregelen voor het behoud van vogeleilanden in het Grevelingenmeer

Een theoretische verkenning naar toepasbaarheid van onderwaterriffen als erosie-remmende maatregel



Auteur: Brenda Walles

Wageningen Marine Research
Yerseke, December 2022

Wageningen Marine Research rapport nr. C082/22

Keywords: *Grevelingenmeer, erosie, riffen, oesters, biodiversiteit, Nature-based solutions.*

Opdrachtgever: Staatsbosbeheer Provinciale Eenheid Zuid-Holland
T.a.v.: mevrouw M. de Gast
Postbus 2
3800 AA Amersfoort

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/582003>
Wageningen Marine Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

Wageningen Marine Research is ISO 9001:2015 gecertificeerd.

Foto omslag: Brenda Walles

© Wageningen Marine Research

Wageningen Marine Research, instituut
binnen de rechtspersoon Stichting
Wageningen Research, hierbij
vertegenwoordigd door
Drs. ir. M.T. van Manen, directeur
bedrijfsvoering

KvK nr. 09098104,
WMR BTW nr. NL 8113.83.696.B16.
Code BIC/SWIFT address: RABONL2U
IBAN code: NL 73 RABO 0373599285

Wageningen Marine Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor
gevolg schade, noch voor schade welke voortvloeit uit toepassingen van de
resultaten van werkzaamheden of andere gegevens verkregen van Wageningen
Marine Research. Opdrachtgever vrijwaart Wageningen Marine Research van
aanspraken van derden in verband met deze toepassing.
Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag weergegeven en/of
gepubliceerd worden, gefotokopieerd of op enige andere manier gebruikt worden
zonder schriftelijke toestemming van de uitgever of auteur.

A_4_3_1 V32 (2021)

Inhoud

Inhoud	3
Samenvatting	5
1 Inleiding	7
1.1 Achtergrond	7
1.2 Aanleiding	8
1.3 Doel	10
1.4 Afbakening	10
1.5 Beperkingen	10
1.6 Leeswijze	12
2 Nature-based solutions	13
3 Interactie tussen golven en onderwaterstructuren	14
3.1 Golven in ondiep water	14
3.2 Afmetingen	14
3.2.1 Hoogte	14
3.2.2 Lengte	15
3.2.3 Breedte	16
4 Locatiebepaling voor golfremmende structuren op de Slikken van Flakkee	17
4.1 Uitgangspunten	17
4.1.1 Helling	17
4.1.2 Waterstand	17
4.1.3 Golfhoogte	18
4.2 Locatiebepaling	18
4.2.1 Aanleg hoogte oesterrif	18
4.2.2 Afstand tot vogeleiland	19
4.3 Locatiebepaling bij invoering van getij	20
5 Biodiversiteit	23
6 Structuren	24
6.1 Oesterriffen	24
6.2 Mosselbanken	24
6.3 Xiriton-structuren	24
6.4 BESE-kratten	25
6.5 Reefballs	25
6.6 Layered cakes	25
6.7 Variatie in aanleg	26
7 Advies	27
8 Monitoringsactiviteiten	28
8.1 Morfologie	28
8.1.1 Hoogte metingen	28
8.1.2 Golfmetingen	28
8.1.3 Sedimentsamenstelling	28

8.2	Ecologie	28
8.2.1	Rif ontwikkeling	28
8.2.2	Biodiversiteit op het rif	29
8.2.3	Bodemdieren	29
8.2.4	Vogels	29
8.2.5	Vissen	29
9	Kwaliteitsborging	31
	Literatuur	32
	Verantwoording	33

Samenvatting

Staatsbosbeheer heeft een toekomstvisie opgesteld om de kenmerkende Deltanatuur in het Grevelingenmeer te versterken. Het is de bedoeling om een samenhangend geheel van vegetatie- en kustbroedvogeleilanden, hoogwatervluchtplaatsen, intergetijdengebied en een rijk onderwaterleven te realiseren. Decennialange kennis van de aanleg van vogeleilanden in de Zuidwestelijke Delta heeft geleerd dat zonder bescherming deze eilanden snel verdwijnen als gevolg van erosie. Binnen deze studie verkennen we of verdedigingswerken, rond deze vogeleilanden, gemaakt kunnen worden met meer natuurlijke materialen (onderwaterriffen). Deze verdedigingswerken moeten zorgen voor erosiebescherming, maar ook de biodiversiteit bevorderen.

Traditioneel bestaan verdedigingswerken uit harde structuren (dijken of stenendammen). In het afgelopen decennium is er echter een verschuiving gaande naar meer ecosysteem gebaseerde verdedigingswerken, gebruikmakend van natuurlijke habitatten zoals duinen, mangroves, schorren, zeegrasvelden, schelpdierbedden en koraalriffen. Kennis over het toepassen van habitatten als verdedigingswerken loopt echter achter op die van kunstmatige verdedigingswerken. Het toepassen van natuurlijke verdedigingswerken vereist kennis over: waar deze habitatten erosie verminderen en bescherming bieden; evenals ecologische gegevens, zoals soortafhankelijke habitatseisen, levenscyclus, populatiedynamiek en lange-termijn persistentie. Deze kennis is noodzakelijk om locaties te identificeren waar habitatten succesvol geïmplementeerd kunnen worden als erosie-remmende maatregelen.

Oesterriffen worden steeds meer erkend voor de rol die ze spelen in kustbescherming en het behoud van estuariën intergetijdennatuur. Het gebruik van deze biobouwer is gebaseerd op hun natuurlijke capaciteit om golven te dempen en erosie te verminderen, in combinatie met de potentie om hun eigen habitat te onderhouden. Het gebruik van biogene structuren ten opzichte van traditionele harde structuren kan verschillende voordelen hebben: (1) middels natuurlijke, groeiende structuren erosie verminderen; (2) het faciliteren en stimuleren van biodiversiteit.

Staatsbosbeheer heeft een ontwerpschets gemaakt voor een achttal eilanden voor de Slikken van Flakkee. Op basis van bodemprofielen en heersende golfcondities hebben we uitgerekend of onderwaterriffen als erosie-remmende maatregelen kunnen fungeren voor het behoud van deze eilanden. Er zijn drie verschillende bodemprofielen te onderscheiden. Een bodemprofiel van 1 op 500m (helling = 0.002), 1 op 1000m (helling = 0.001) en 1 op 5000m (helling = 0.0002). Golfhoogtes zijn gemiddeld 6cm, variërend tussen de 0 en 20cm. De hoogte van een rif bepaalt bij welke waterstand golven breken, dissiperen of geblokkeerd worden. Echter, de top van een rif wordt beperkt tot een waterstand welke meer dan 60% van de dag onder water staat, zodat oesters voldoende kunnen eten. Het Grevelingenmeer heeft een stagnant waterpeil, maar door peilvariatie dienen we rekening te houden met de laagste waterstand, het zomerpeil (-0.26m NAP). Uitgaande van een gemiddelde golfhoogte van 6cm, vindt dieptelimitatie plaats bij waterdieptes kleiner dan 20cm. Om jaarrond golven te reduceren adviseren we een rif met een maximale aanleghoogte van -0.30m NAP aan te houden.

Het is belangrijk om te bepalen op welke afstand riffen van het eiland af kunnen liggen om erosie-remmend te werken. Hoe ver het effect van golfdemping achter een rif strekt wordt voor een belangrijk deel bepaald door de dempende werking van het rif zelf, maar ook door het hoogtprofiel van de bodem. Een 10cm hoog rif dient binnen 150m van het eiland aangelegd te worden om erosie-remmend te werken bij een bodemprofiel van 1 op 500, terwijl deze afstand verdubbelt (300m) bij een bodemprofiel van 1 op 1000. Naarmate de helling van de bodem flauwer is, des te verder effecten van de golf-dempende structuur kunnen strekken. Echter, bij een bodemprofiel van 1 op 5000 komt een rif dermate ver van het eiland te liggen (1000km) om nog voldoende onder water te kunnen blijven staan. Over deze afstanden kunnen windgolven opnieuw opbouwen en is het gebruik van riffen zinloos.

De afmeting van een structuur is cruciaal wanneer deze als hoofddoel heeft om erosieve krachten, in dit geval golven, te verminderen. De lengte, breedte en hoogte van een rif bepalen in verschillende mate

het golf reducerend vermogen. Hogere riffen zullen resulteren in een langere periode van verminderde golfhoogtes en dus meer kalme omstandigheden achter het rif. De lengte van een rif speelt een rol bij golfdiffractie en directionele spreiding. Golven kunnen het gebied achter het rif binnen dringen door rond het rif te gaan als gevolg van diffractie. In de Oosterschelde treedt golfdiffractie op tot een afstand van 6 tot 9 m van de hoekpunt van een structuur. Riffen moeten lang genoeg zijn om te compenseren voor diffractie. Omdat golven uit verschillende hoeken komen als gevolg van veranderende windrichtingen, verandert de lijzijde van het rif van positie, waardoor het effect van het rif diffuser wordt. Directionele verspreiding is belangrijk voor kleine en grote riffen, terwijl diffractie voornamelijk een randeffect is en daarom alleen belangrijk voor kleine riffen. De breedte van een rif kan belangrijk zijn voor golfpenetratie door de structuur en golfdissipatie door wrijving. Golfdissipatie door wrijving zal echter naar verwachting klein zijn, omdat de breedte slechts een paar golflengten zal bedragen. De breedte van het rif zal naar verwachting een ondergeschikte rol spelen omdat het breken van golven op het rif wordt beschouwd als het dominante mechanisme.

Riffen dienen niet alleen erosie te remmen maar ook een positieve bijdrage te leveren aan biodiversiteit. Het aanbrengen van een rif op een kale zandbodem zorgt per definitie al voor een verhoging van de lokale biodiversiteit. De biodiversiteit kan nog verder verhoogd worden door bepaalde elementen (holtes, overhang, etc.) in het rif op te nemen. Het aanleggen van riffen leidt niet per definitie tot biodiversiteit verhoging in het systeem. Zo kan clustering van de reeds aanwezige biodiversiteit optreden. Voor soorten die riffen gebruiken als leefruimte, waardoor hun overlevingskans vergroot, kunnen riffen wel tot een verhoging van dichtheden en biomassa leiden. Structuren kunnen ook als "stepping stone" fungeren en verspreiding van inheemse, maar ook invasieve, soorten stimuleren.

Wereldwijd wordt er op verschillende schalen en met verschillende doelen geëxperimenteerd met de implicatie van biogene structuren in het marine milieu. Om als erosie-remmende maatregel te werken moet de vestiging van biobouwers gestimuleerd worden op de gewenste locatie. Middels het aanbrengen van vestigingssubstraat kan een kick-start gegenereerd worden. Verder moeten structuren een bepaalde stabiliteit hebben zodat ze de dimensie behouden die nodig is om erosie-remmend te werken. Oesterriffen zijn een voor de hand liggende erosie-remmende structuur. Als kick-start worden schanskorven gevuld met schelpenmateriaal gebruikt. Jaarlijkse rekrutering zorgt ervoor dat het rif in een zelfvoorzienende structuur verandert. Op dit moment wordt er ook geëxperimenteerd met Xiriton-structuren, een CO₂-neutraal equivalent van hard substraat vergelijkbaar met beton. Het voordeel van Xiriton is dat het voor een groot deel gemaakt kan worden met gebiedseigen materialen. Echter staat het gebruik van Xiriton nog in de kinderschoenen.

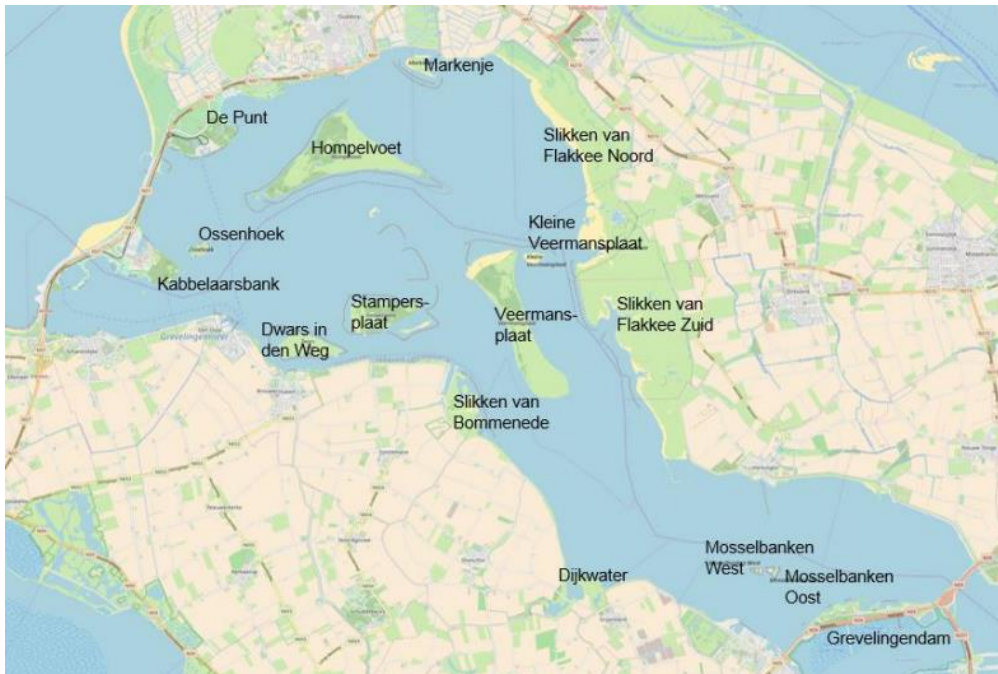
De meeste, tot nu toe, aangelegde erosie-remmende structuren bestonden uit simpele geometrische ontwerpen, zoals rechthoeken, overeenkomend met de geometrie van traditionele golfbrekers. Natuurlijke ecosystemen zijn veel heterogener van structuur. Numerieke modellen tonen aan dat heterogene structuren voordelen zouden hebben over homogene (rechthoekige) structuren. Echter ontbreekt het momenteel aan veld validatie. Middels pilots kan getest worden welke configuratie (homogene (rechthoekige) of heterogene structuren) effectiever is als erosie-remmende maatregel.

In deze studie hebben we de aspecten benoemd die van belang zijn om de toepasbaarheid van onderwaterriffen als erosie-remmende maatregel voor het behoud van vogeleilanden in het Grevelingenmeer te kunnen onderzoeken. Dit is een eerste theoretische verkenning op basis van een aantal aannames (bodemprofiel en golfhoogtes). Voor het daadwerkelijk aanleggen van onderwaterriffen zijn veldmetingen van belang om met de juiste positionering te bepalen.

1 Inleiding

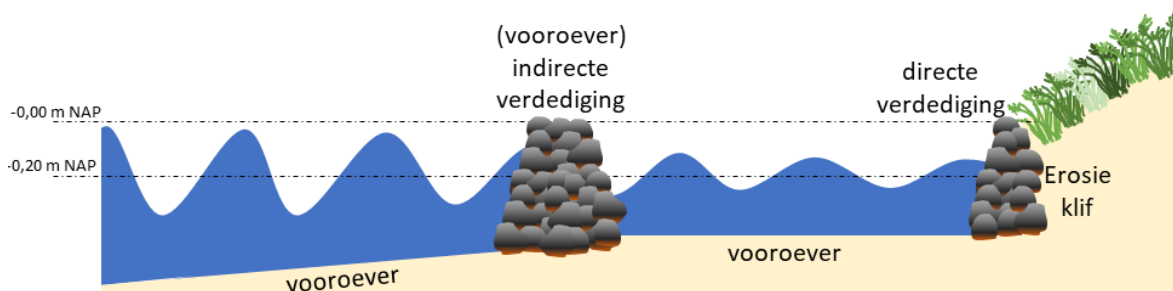
1.1 Achtergrond

Het Grevelingenmeer (14.000 ha) is een voormalige estuarium welke door de aanleg van de Grevelingendam (1965) en de Brouwersdam (1971) veranderde in een afgesloten meer met de bathymetrie van een estuarium met diepe geulen en ondiepe wateren. De voormalige slikken en platen vielen droog en veranderden in eilanden zoals de Hompelvoet en Veermansplaat en langs de randen ontstonden flauw aflopende oevers zoals de Slikken van Flakkee (Figuur 1-1). Door de sluiting verdween de getijstroom in dit voormalige estuarium en viel daarmee ook de opbouwende werking van de getijstrooming weg. Het resultaat was dat alleen nog de afbrekende werking van golven overbleef en de randen van de permanent drooggevallen gebieden gingen eroderen. Door de erosie kalven oevers af en komen Natura 2000 instandhoudingsdoelstellingen in gevaar. Verstoring van sedimentaanvoer en afvoer zoals in het Grevelingenmeer is niet uniek. Ook in de Oosterschelde heeft de afbrekende werking door golven de overhand.



Figuur 1-1 Het Grevelingenmeer met de belangrijkste gebieden.

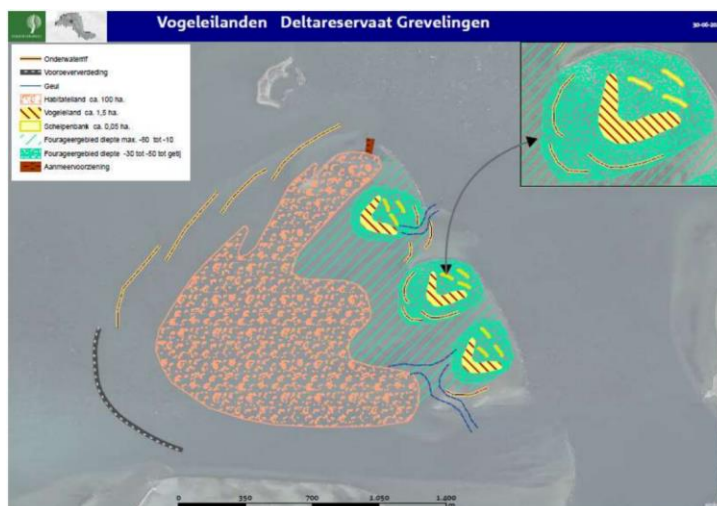
Erosie in het Grevelingenmeer wordt tegengegaan middels oeververdedigingen. Er zijn twee typen oevers te onderscheiden: flauwe oevers zonder steilrand en steile oevers met een steil erosieklijf(je). Het grootste deel van de oevers wordt verdedigd. Afhankelijk van de oever zijn verdedigingswerken ca. 5m uit de oeverlijn geplaatst (directe verdediging bij korte steile vooroevers), 50 tot 100m uit de oeverlijn geplaatst op een diepte van ca. -1m NAP (indirecte-/vooroeververdediging bij flauwere oevers) of is gebruik gemaakt van een combinatie van beide (Figuur 1-2). De directe verdediging bestaat meestal uit een pakket stortsteen tot grof grind (bij gecombineerde verdediging). De vooroeververdediging bestaat uit 10m brede en 180m lange grove stortsteen dammen met openingen van 20m voor de verversing van het water. Beide verdedigingen steken ongeveer 20cm boven het waterpeil (-0.20m NAP) uit. De indirecte vooroeververdedigingen hebben geleid tot duidelijke afname in de verplaatsing van de oeverlijn echter is in de loop van de tijd gebleken dat achter de vooroeververdediging nog altijd sprake was van ongewenste erosie van de oeverlijn en zijn directe verdedigingswerken aangelegd om de oever beter te stabiliseren. Alleen gebieden met zeer flauwe oevers hebben helemaal geen oeververdediging, zoals de slikken van Flakkee.



Figuur 1-2 gecombineerde oeververdedigingswerken in het Grevelingenmeer.

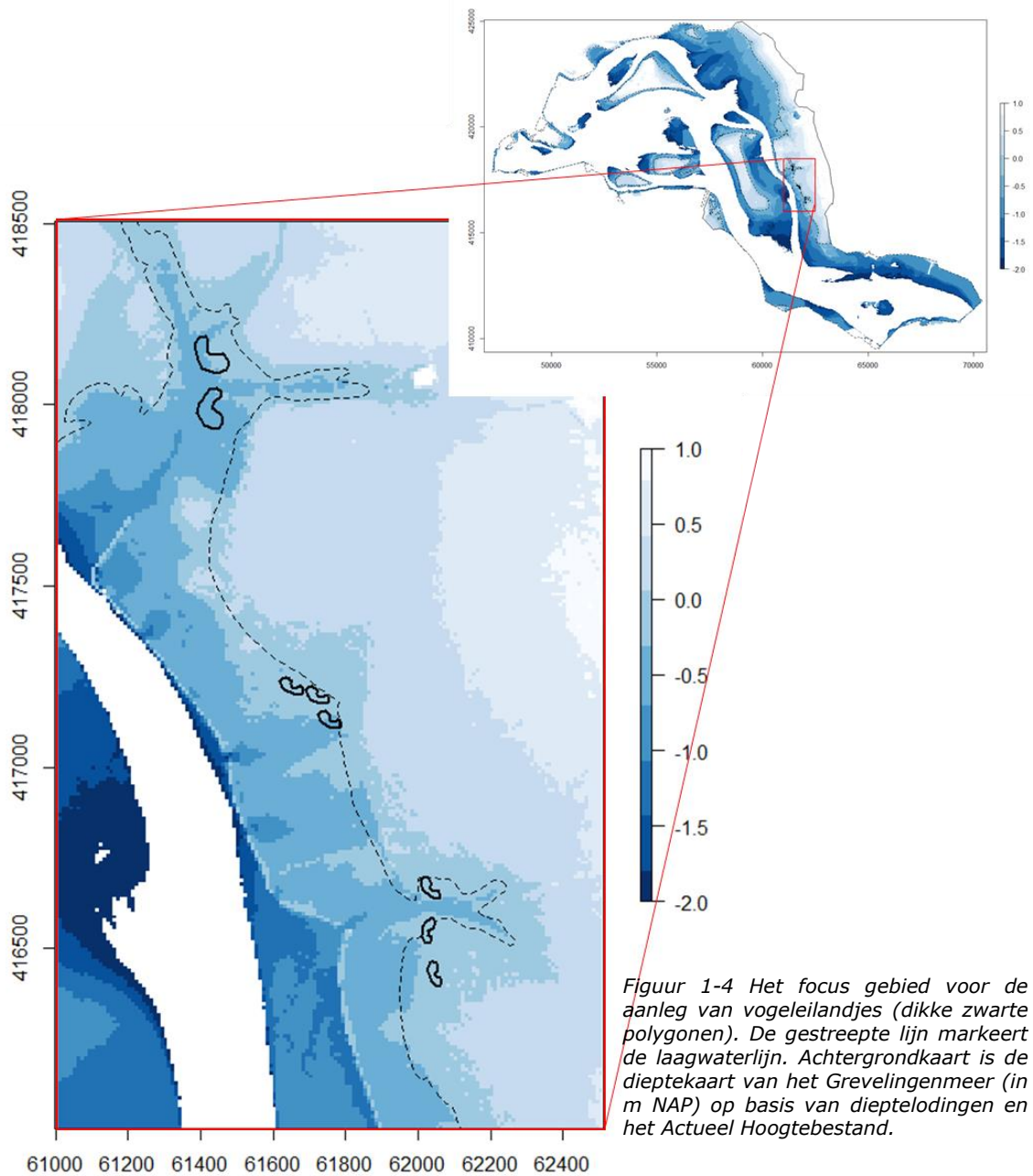
1.2 Aanleiding

Staatsbosbeheer heeft een toekomstvisie opgesteld om de kenmerkende Deltanatuur in het Grevelingenmeer te versterken, mede met het oog op de toekomst wanneer mogelijk een beperkt getij ingevoerd gaat worden (Terlouw en Lammerts, 2021). Het is de bedoeling om een samenhangend geheel van vegetatie- en kustbroedvogeleilanden, hoogwatervluchtplaatsen, intergetijdengebied en een rijk onderwaterleven te realiseren. Met het project 'Versterking onderwater- en bovenwaternatuur Grevelingen' had Staatsbosbeheer de gelegenheid om een klein stukje van deze visie te realiseren en kennis op te doen om toekomstige maatregelen efficiënter uit te kunnen voeren. Echter heeft het project door omstandigheden een andere invulling gekregen. Van origine had Staatsbosbeheer de aanleg van een boemerangvormig eiland met een oppervlakte van ongeveer 1.5ha. beoogd, met noordoostelijk daarvan een drietal schelpenbanken (Figuur 1-3). De drie eilanden zouden dienen als broedeilanden voor verschillende (pionier)kustbroedvogels. Het omliggende gebied zou ondiep water worden dat diende als foerageergebied en - bij introductie van beperkt getij - zich kon ontwikkelen tot intergetijdengebied. Decennialange kennis van de aanleg van vogeleilanden in de Zuidwestelijke Delta en specifiek in het Grevelingenmeer heeft geleerd dat zonder bescherming tegen erosie deze eilanden snel weer verdwijnen. Dit geheel zou dus moeten worden beschermd door het aanleggen van erosie-remmende maatregelen. Erosie-remmende maatregelen die men reeds gebruikt tegen de afkalving zijn het aanbrengen van een laag kleischelpen aan de erosieve kant, vooroevers verondiepen, of extra zand ruggen (30-40cm boven het gemiddelde waterpeil) aanleggen. Echter zijn dit allemaal maatregelen die onderhoud behoeven. Traditioneel bestaan de oeververdedigingen in het Grevelingenmeer uit harde verdediging van materialen zoals basalt. Binnen dit project wenste Staatsbosbeheer extra kennis op te doen door te experimenteren met de aanleg van verdedigingswerken rond de vogeleilanden waarbij gebruik gemaakt wordt van meer natuurlijke materialen (onderwaterriffen). Deze verdedigingswerken moeten zorgen voor erosiebescherming, maar ook de biodiversiteit onder water bevorderen. Het aanleggen van structuren op de huidige kale bodem heeft mogelijk een faciliterend effect op waterflora (zeegras) en -fauna (bodemdieren, vissen en vogels) en draagt hierdoor bij aan KRW doelstellingen. Staatsbosbeheer had een schetsontwerp gemaakt voor een combinatie van vegetatie- en vogeleilanden voor een locatie ten noorden van de huidige Stampersplaat (Figuur 1-3). Echter is het project door omstandigheden vertraagd en gewijzigd en ligt de focus nu op het realiseren van eilanden bij de slikken van Flakkee (Figuur 1-4).



Figuur 1-3 Schetsontwerp aanleg vogeleilanden ten noorden van de huidige Stampersplaat

De slikken van Flakkee hebben vanwege de flauwe oevers geen tot nauwelijks directe oeververdediging. Wel is er indirecte oeververdediging aanwezig langs het zuidelijke deel van de Slikken van Flakkee. Figuur 1-4 toont het gebied waar Staatsbosbeheer vogeleilandjes wenst aan te leggen in combinatie met onderwaterriffen als natuurlijke vooroeververdediging.



Staatsbosbeheer heeft Wageningen Marine Research gevraagd te adviseren over de aanleg van onderwaterriffen ten behoeve van erosiebescherming van kustbroedvogeleilanden en de vergroting van de biodiversiteit. Daarnaast is Wageningen Marine Research gevraagd een monitoringsplan op te stellen waarmee na aanleg onderzoek kan plaatsvinden naar de ontwikkeling van de onderwaterriffen en het functioneren van de riffen als erosiebescherming.

Dit onderzoek vindt plaats in het kader van het project E5411007 LIFE-IP C3-6 Restoring Tidal Nature Grevelingen. De resultaten van het onderzoek zijn input voor het project 'Versterking onderwater- en bovenwaternatuur Grevelingen'.

1.3 Doel

Het doel van deze studie is het theoretisch verkennen van toepassingsmogelijkheden van onderwaterriffen als erosie-remmende maatregel voor het behoud van vogeleilandjes op de slikken van Flakkee. Deze studie is vierledig:

1. Het beschrijven van processen die ten grondslag liggen aan de werking van erosie-remmende maatregelen in ondiep water.
2. Het schetsen van een palet aan mogelijke structuren welke erosie-remmend en/of biodiversiteit faciliterend en stimulerend werken.
3. Adviseren hoe (pilot)riffen aan te leggen in het beoogde gebied.
4. Opstellen van een lijst van monitoringsactiviteiten

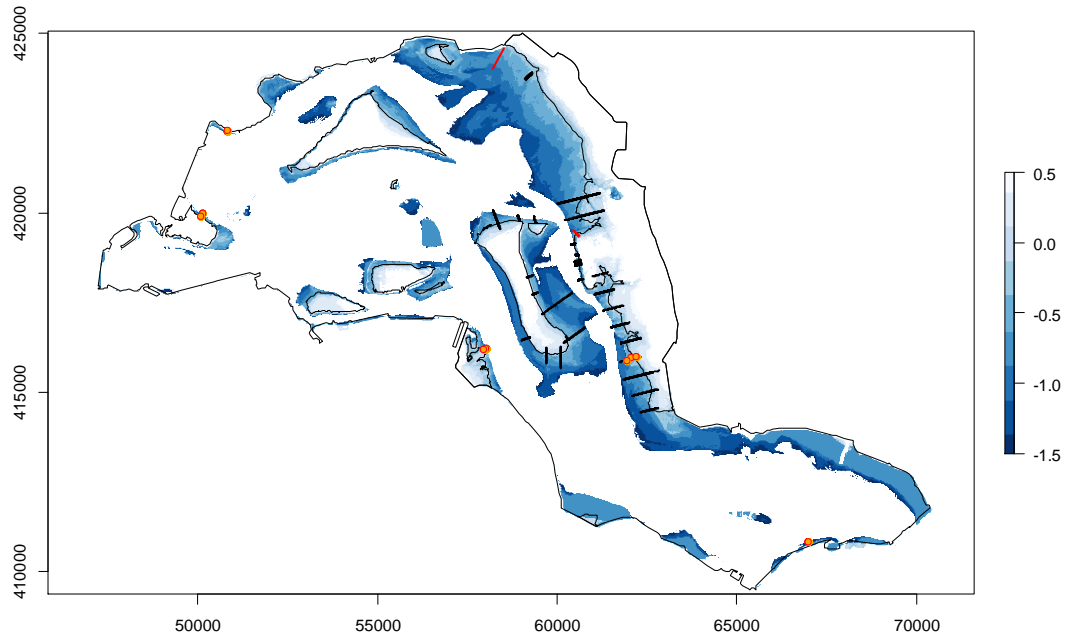
1.4 Afbakening

Het rapport is een theoretische verkenning over de inzet van erosie-remmende maatregelen rond vogeleilandjes in het Grevelingenmeer. Het geeft een onderbouwing welke processen belangrijk zijn om mee te nemen in de ontwerpfase. Er ligt nog geen definitief plan voor de vogeleilandjes op de slikken van Flakkee. Wanneer deze er wel is, kan aan de hand van deze voorstudie in combinatie met gerichte veldmetingen de exacte locatie en dimensionering van structuren bepaald worden. Ook dient er in de ontwerpfase een monitoringsplan opgesteld te worden. Dit rapport geeft geen monitoringsplan maar een onderbouwing van monitoringsactiviteiten met het oog op functioneren van de structuren en kennisontwikkeling.

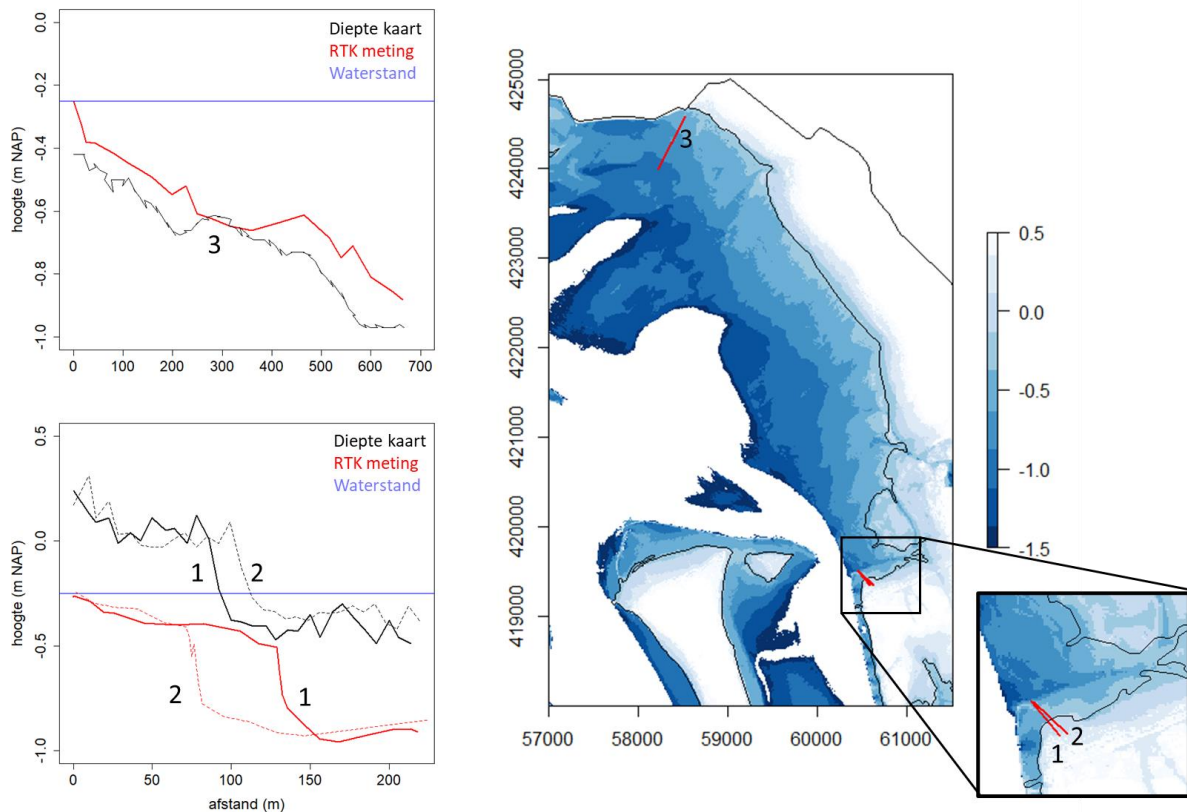
1.5 Beperkingen

Om uit te kunnen rekenen welke dimensies een structuur moet hebben om golf-dempend te werken is kennis nodig over de lokale bathymetrie en golfcondities. In 2018 is een bathymetrie kaart opgesteld voor het Grevelingenmeer in het kader van de Scenariostudie natuurperspectief Grevelingenmeer (Tangelder *et al.* 2018). Een belangrijke beperking van deze kaart is de onzekerheid van het verloop van het hoogteprofiel van de ondiepe oevers tussen -0.20 en -1.50 m NAP. De oevers zijn geïnterpoleerd op basis van dieptelodingen en het Actueel Hoogtebestand (AHN). In een later stadium van het bovengenoemde project zijn gedetailleerde hoogteprofielen van de ondiepe zone langs een aantal transecten in het Grevelingenmeer door Rijkswaterstaat ter beschikking gesteld (Figure 1-5, zwarte lijnen). Deze geven een beeld van de nauwkeurigheid van de oeverprofielen. De profielen laten op sommige raaien een goede overeenkomst zien, op andere wijken ze duidelijk af (Tangelder *et al.* 2018). Op 4 juli 2022 hebben we in het kader van dit project ook transecten gemeten. Ook deze wijken duidelijk af van de dieptekaart (Figuur 1-6). In deze theoretische studie gaan we, ondanks de afwijkingen, uit van de dieptekaart uit de studie van Tangelder *et al.* (2018). In een ontwerpfase richting realisatie is het van belang te werken met geactualiseerde, gebiedsdekkende oeverprofielen.

In het eerste kwartaal van 2019 zijn op vijf locaties golfcondities gemeten (Figuur 1-5) , door de Hogeschool Zeeland in het kader van het project "Spelen met Strooming". Golfloggers stonden voor en achter steenbestortingen. In deze studie gaan we uit van golfcondities gemeten op de zuidelijke slikken van Flakkee aan de voorzijde van de steenbestorting. Golfcondities op de geplande locaties van vogeleilandjes kunnen mogelijk afwijken van deze gemeten golven, maar zullen wel in de goede orde van grootte zitten. Ook voor deze parameter geldt dat lokale metingen wenselijk zijn gedurende de ontwerpfase richting realisatie.



Figuur 1-5 Dieptekaart van het Grevelingenmeer (in m NAP) op basis van dieptelodingen en het Actueel Hoogtebestand. De zwarte lijnen zijn RTK raaien gemeten door RWS. De rode lijnen zijn RTK raaien gemeten binnen dit project (zie ook Figuur 1-6). De oranje stippen geven locaties weer waar golfmetingen uitgevoerd zijn in 2019.



Figuur 1-6 Drie diepteprofielen op basis van de dieptekaart (zwarte lijnen) uit 2018 (Tangelder et al. 2018) en RTK metingen (rode lijnen) uitgevoerd op 4 juli 2022. Ingemeten diepteprofielen 1 en 2 liggen ~40cm lager dan diepteprofielen op basis van de dieptekaart. Diepteprofiel 3 juist ligt ~10cm hoger.

1.6 Leeswijze

In dit rapport staan we in hoofdstuk 2 stil bij het gebruik van biogene structuren als kustverdediging ook wel bekend als nature-based solutions. Hoofdstuk 3 gaat in op golven, golf-gedreven erosie en hoe de dimensie van een structuur interactie vertoont met golven. In hoofdstuk 4 schetsen we hoe riffen toegepast kunnen worden op de Slikken van Flakkee, rekening houdend met lokale omstandigheden. Daarnaast blikken we vooruit op toepassing mogelijkheden in het geval van getij in het Grevelingenmeer. Aan de hand van een aantal voorbeelden leggen we in hoofdstuk 5 uit hoe je biodiversiteit kunt verhogen door complexiteit aan de structuur toe te voegen. Hoofdstuk 6 staat stil bij materiaal keuzes en in hoofdstuk 7 geeft we advies op basis van de aspecten benoemd in alle voorgaande hoofdstukken die van belang zijn voor de toepassing van onderwaterriffen als erosie-remmende maatregel. Hoofdstuk 8 geeft een lijst van monitoringsactiviteiten welke gewenst zijn om het succes van een structuur als erosie-remmende maatregel, en biodiversiteit versterker op te volgen.

2 Nature-based solutions

Erosie vormt wereldwijd een probleem voor kustsystemen. Golven en stroming zijn dominante factoren die resuspensie en transport van sediment veroorzaken wat leidt tot erosie. Middels structuren kunnen de erosieve krachten van golven en stroming gedempt worden. Traditioneel bestaan dit soort structuren uit harde verdedigingswerken zoals dijken of stenendammen. Hoewel traditionele verdedigingswerken in sommige situaties essentieel zijn, is de aanleg en onderhoud hiervan duur. Daarnaast kunnen negatieve neveneffecten optreden zoals versterkte erosie, verslechterde waterkwaliteit, het blokkeren van natuurlijke opbouwende processen, en het verstoren van natuurlijke gradiënten die bij land-waterovergangen horen. In het afgelopen decennium is er een verschuiving gaande naar een meer ecosysteem gebaseerde kustverdediging met integratie van natuurlijke habitatten zoals duinen, mangroves, schorren, zeegrasvelden, schelpdierbedden en koraalriffen. Deze soorten staan bekend als biobouwers. Biobouwers zijn soorten die hun leefmilieu kunnen veranderen. Habitats zoals oesterriffen, mosselbedden en zeegrasvelden zijn biobouwers die golven kunnen dempen en daarmee erosie kunnen afremmen. Golfdemping ontstaat doordat golven weerstand ondervinden als ze de structuur passeren. Belangrijk deel van de golfdemping is de verminderde waterdiepte over de structuur waardoor golven eerder gedempt worden. Kennis over het toepassen van natuurlijke verdedigingsstructuren loopt echter achter op die van kunstmatige verdedigingswerken. Het toepassen van natuurlijke verdedigingsstructuren vereist kennis over: waar deze habitatten erosie verminderen en bescherming bieden; evenals ecologische gegevens, zoals soortafhankelijke habitatseisen, levenscyclus, populatiedynamiek en lange-termijn persistentie. Deze kennis kan gebruikt worden om plaatsen te identificeren waar habitatten succesvol geïmplementeerd kunnen worden.

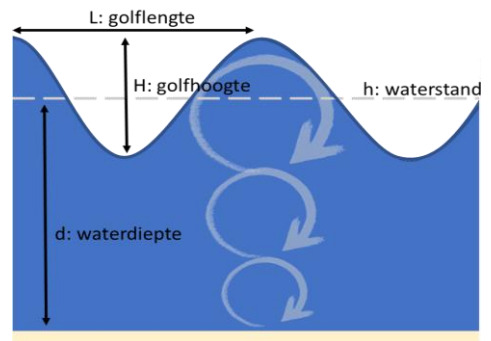
Oesters maken riffen en worden als biobouwers steeds meer erkend voor hun bijdrage aan kustbescherming en het behoud van estuariën intergetijdennatuur. Het gebruik van deze biobouwer is gebaseerd op hun natuurlijke capaciteit om golven te dempen en erosie te verminderen, in combinatie met de potentie om hun eigen habitat te onderhouden. Het gebruik van biogene structuren kan verschillende voordelen hebben: (1) het verminderen van erosie door gebruik te maken van natuurlijke, groeiende, structuren; (2) het faciliteren en stimuleren van biodiversiteit.

3 Interactie tussen golven en onderwaterstructuren

De dominante eroderende kracht in het Grevelingenmeer zijn wind-gedreven golven. Golven kunnen sediment in suspensie brengen, waarna stroming het losgewoelde sediment weg transporteert. Het eroderende effect van golven is diepte afhankelijk. Als de bodem te diep is voor de heersende golven, kunnen golven de bodem nauwelijks in beweging brengen en zal de erosie nagenoeg nul zijn. Alleen grote golven, als gevolg van een zware storm bijvoorbeeld, zouden wel tot erosie kunnen leiden. Door structuren aan te leggen die golven blokkeren, breken of dempen kan erosie verminderen of helemaal stoppen. Een verdedigingswerk veroorzaakt een plotselinge verondieping van de bodem, waardoor de bodem achter deze werken buiten bereik van de verminderde golven komt te liggen. Zodra de invloed van golven op de bodem verdwijnt stopt het eroderende proces. Met dit doel zijn de reeds aanwezige stenen dammen aangelegd in het Grevelingenmeer. In dit hoofdstuk gaan we in op de theoretische achtergrond die nodig is om het effect van structuren op golven beter te begrijpen. Deze inzichten helpen bij het ontwerpen van golfdempende structuren.

3.1 Golven in ondiep water

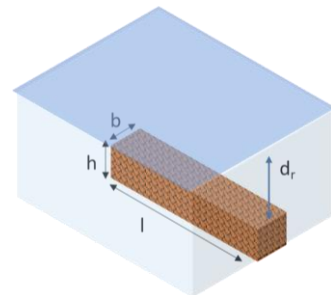
Het focus gebied in het Grevelingenmeer kan gekarakteriseerd worden als ondiep water. In ondiep water wordt een groot deel van de karakteristieke eigenschappen van golven bepaald door de waterdiepte waarin de golven zich voortplanten. Voordat we verder gaan geven we een overzicht van algemene begrippen en parameters, welke toegelicht worden in Figuur 3-1. De waterstand (h) is de gemiddelde waterhoogte en de waterdiepte (d) is de afstand tussen de waterstand en de bodemhoogte. Golfhoogte (H) is de afstand van een golfdal tot een golftop en de afstand tussen twee golftoppen (of golfdalen) is de golflengte (L). Golven zorgen voor een ronddraaiende beweging van deeltjes, ook wel orbitaalbeweging genoemd. Wanneer er een obstakel binnen de orbitaalbeweging aanwezig is (bijvoorbeeld een toenemende bodemhoogte, of een rif) neemt de energie van een golf af.



Figuur 3-1 Schematische weergave van golven en bijbehorende begrippen.

3.2 Afmetingen

De afmeting van een rif is cruciaal wanneer deze als hoofddoel heeft om erosieve krachten, in dit geval golven, te verminderen. De lengte (l), breedte (b) en hoogte (h) van een rif bepalen in verschillende mate het golf reducerend vermogen. Op basis van opgedane kennis rond kunstmatige en natuurlijke oesterriffen lichten we kort toe hoe deze parameters golven beïnvloeden.

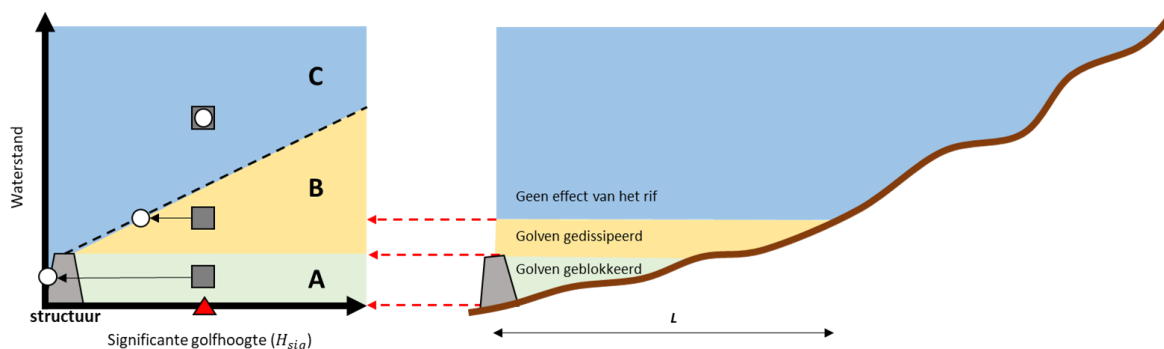


3.2.1 Hoogte

De belangrijkste parameter is de hoogte (h) van een rif. Deze bepaalt de mate van golfdemping. We leggen het belang van hoogte uit aan de hand van veldmetingen aan oesterriffen in een systeem met getij.

Golfdemping aan de lijzijde van een rif hangt af van de hoogte van de inkomende golf (H_{sig}) en de waterdiepte boven het rif (d_r) (Wiberg *et al.* 2019). Rekening houdend met een variabele waterstand kunnen drie verschillende situaties of zones worden geïdentificeerd (Figure 3-2). Bij waterstanden lager dan het rif worden inkomende golven geblokkeerd of gereflecteerd (Zone A). Als gevolg hiervan zullen er geen of kleine (waarschijnlijk als gevolg van golfdiffractie rond het rif) golven ontstaan aan de lijzijde van het rif. Bij hogere waterstanden passeren golven het rif zonder energie te verliezen (Zone C). Bij waterstanden die net hoger zijn dan het rif (kleine waterdieptes bovenop het rif), zullen golven breken of dissiperen (Zone B). De overgang tussen Zone B en C wordt bepaald door de dieptelimitatie van golven. Deze dieptelimitatie houdt in dat de significante golfhoogte ($H_{sig,lij}$) aan de lijzijde maximaal $H_{sig,lij} = \gamma_r d_r$ kan zijn, waarbij d_r de waterdiepte boven het rif is en γ_r een diepte-bepercingscriterium. Afhankelijk van de waterstand en inkomende golfhoogte worden de golven aan de lijzijde verlaagd tot een dieptebeperkte golfhoogte (de scheidingslijn tussen zone B en C) of blijven ze gelijk aan de inkomende golven (Figuur 3-2, links). Golfdissipatie door golfbrekers wordt in verschillende studies besproken, zie bijvoorbeeld d'Angremond *et al.* (1996) of Van der Meer *et al.* (2005). De formulering voor riffen is vergelijkbaar met golfbrekers, waarvoor een waarde van $\gamma_r = 0.35-0.4$ werd voorgesteld door d'Angremond *et al.* (1996) en van de Meer *et al.* (2005).

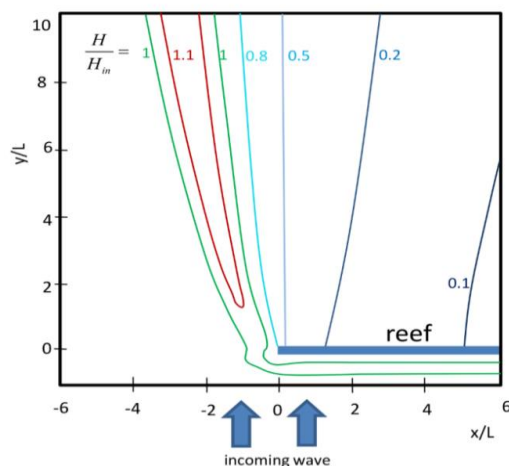
In een systeem met getij beïnvloedt rifhoogte de periode waarin golven worden gedissipeerd, gebroken of geblokkeerd door het rif. Hogere riffen zullen resulteren in een langere periode van verminderde golfhoogten en dus meer kalme omstandigheden achter het rif. De bathymetrie van het gebied bepaalt vervolgens over welke afstand golfdempende processen doorwerken op de morfologie (Figure 3-2, rechts). Hoe steiler de bodem, hoe korter de afstand.



Figuur 3-2 Links: De relatie tussen waterstand en significante golfhoogte H_{sig} . Afhankelijk van de waterstand en inkomende golfhoogte (grijze vierkantjes) neemt de lijwaartse golf (witte rondjes) af tot nul in zone A, vermindert tot de dieptebeperkte golfhoogte (stippellijn) in zone B of blijft gelijk in zone C. Rechts: De afstand L waarover golven geblokkeerd en gedissipeerd worden voor een bepaalde significante golfhoogte (rode driehoek links) bij variabele waterstanden.

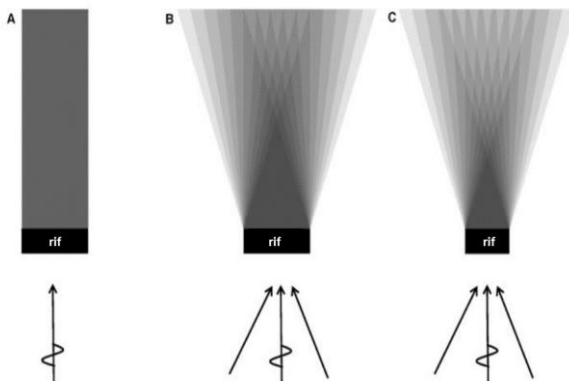
3.2.2 Lengte

Golven dringen ook het gebied achter het rif binnen door rond het rif te gaan als gevolg van diffractie. Dit is vergelijkbaar met de ontwikkeling van golven rond golfbrekers in haveningangen. Voor de eenvoud beschouwen we een situatie met een horizontale bathymetrie en een rif. Het golfpatroon kan dan worden bepaald met de Sommerfeldvergelijking, zie Holthuijsen (2007) voor meer details. Figuur 3-3 toont een schets van de Sommerfeld-oplossing voor golven loodrecht op het rif en de golfhoogtes aan de lijzijde van een rif (gebaseerd op Holthuijsen 2007). Aan de lijzijde, ver van de punt, worden alle golven gedempt. Enige invloed is aanwezig over een afstand van vijf golflengtes vanaf de punt ($x=5L$). Op een afstand twee tot drie keer de golflengte vanaf de punt ($x=2L$) is 20% van de golfhoogte nog steeds aanwezig. De golfhoogte is iets verhoogd voor kleine negatieve afstanden. Als vuistregel kan worden gesteld dat randeffecten door diffractie



Figuur 3-3 Schets van de contouren van de relatieve golfhoogten aan de lijzijde van een rif (Getekend na Holthuijsen 2007, fig. 7.13). De golven komen van onderen, het rif ligt op $y=0$ en $x>0$. De contouren geven de verhouding aan tussen de lokale golfhoogte (H) en de hoogte van de inkomende golf (H_{in}) (Wallis *et al.* 2015).

optreden bij afstanden die korter zijn dan 3x de golflengte ($x < 3L$). Golflengtes in de Oosterschelde zijn 2-3 m. Golfdiffractie treedt op tot een afstand van 6 tot 9 m van de punt. Dit impliceert dat vooral kleine riffen sterk zullen worden beïnvloed door diffractie.



Figuur 3-4 Grafische weergave hoe golven uit verschillende richtingen afbuigen achter een rif. A) Het effect van het rif voor golven vanuit het zuiden; B) Het effect van een rif voor golven uit verschillende richtingen zuidwest tot zuidoost; C) Vergelijkbaar als B, maar met een korter rif. Merk op dat in werkelijkheid de lijnen niet recht zullen zijn, maar naar binnen gebogen als gevolg van golfdiffractie (Walles et al. 2015).

Golven kunnen ook de lijzijde bereiken door variatie in de richting van de golf ten opzichte van het rif. Omdat golven uit verschillende hoeken komen als gevolg van veranderende windrichtingen, verandert de lijzijde van het rif van positie, waardoor het effect van het rif diffuser wordt. Deze directionele spreiding wordt geïllustreerd in Figuur 3-4. Effecten van diffractie worden niet overwogen in deze illustratie. Figuur 3-4A geeft de situatie weer voor alleen golven uit het zuiden (unidirectionele golven). Figuur 3-4B toont het effect van directionele spreiding. Er is een kerngebied (driehoekig in dit geval) dat dezelfde golfreductie heeft, zoals gevonden in het geval van unidirectionele golven. Het rif beschermt dit kerngebied tegen golven van alle richtingen. Bovendien kan een gebied worden geïdentificeerd dat alleen wordt beïnvloed door golven uit een specifieke richting. Het effect in

die regio is kleiner. Het verkleinen van de lengte van het rif resulteert in een kwadratische vermindering van het totale beïnvloede gebied, omdat niet alleen de basis van de driehoek afneemt, maar ook de hoogte van de driehoek. Om het gecombineerde effect van diffractie en directionele spreiding te bepalen, is numerieke modellering vereist. Het heeft de voorkeur om een waveresolving model toe te passen zoals SWASH (Zijlema et al., 2011). Opgemerkt moet worden dat directionele verspreiding het beïnvloede gebied voor kleine en grote riffen beïnvloedt, terwijl diffractie voornamelijk een randeffect is en daarom alleen belangrijk voor kleine riffen.

3.2.3 Breedte

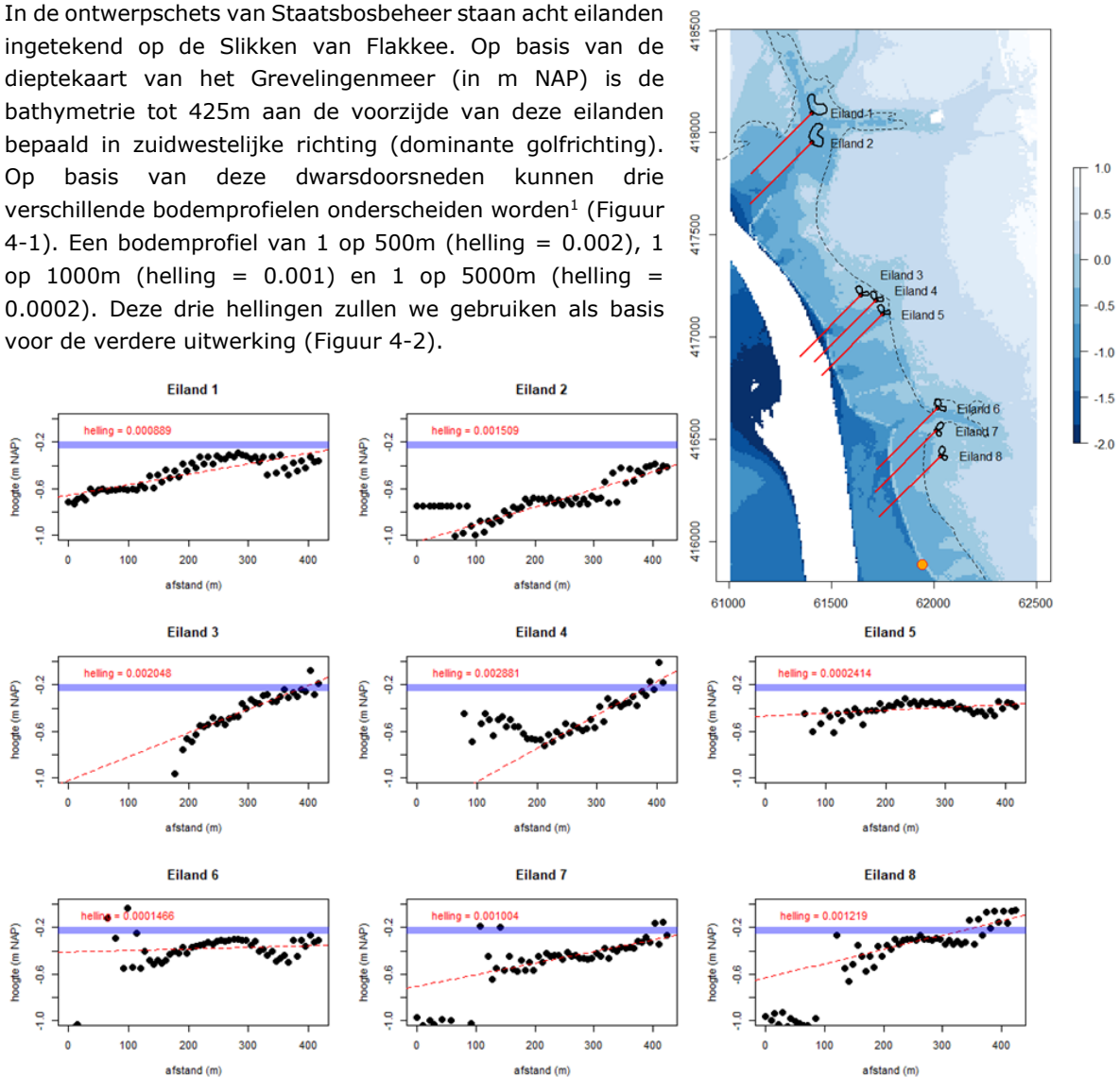
De breedte van een structuur kan belangrijk zijn voor golfpenetratie door de structuur en golfdissipatie door wrijving. Wanneer we een grote breedte over hoogteverhoudingen hebben, is het onwaarschijnlijk dat golfpenetratie door de structuur significant is. Dit volgt direct uit de empirische formuleringen voor golfbrekers van Van der Meer et al. (2005). Golfdissipatie door wrijving zal naar verwachting ook klein zijn, omdat de breedte slechts een paar golflengten zal bedragen. Alleen voor zeer brede structuren, zoals mosselbanken, wordt verwacht dat bedwrijving een rol zal spelen (Donker et al., 2013). Het breken van golven op een structuur wordt beschouwd als het dominante mechanisme. De breedte van de structuur zal daarom naar verwachting een ondergeschikte rol spelen.

4 Locatiebepaling voor golfremmende structuren op de Slikken van Flakkee

4.1 Uitgangspunten

4.1.1 Helling

In de ontwerpsschets van Staatsbosbeheer staan acht eilanden ingetekend op de Slikken van Flakkee. Op basis van de dieptekaart van het Grevelingenmeer (in m NAP) is de bathymetrie tot 425m aan de voorzijde van deze eilanden bepaald in zuidwestelijke richting (dominante golfrichting). Op basis van deze dwarsdoorsneden kunnen drie verschillende bodemprofielen onderscheiden worden¹ (Figuur 4-1). Een bodemprofiel van 1 op 500m (helling = 0.002), 1 op 1000m (helling = 0.001) en 1 op 5000m (helling = 0.0002). Deze drie hellingen zullen we gebruiken als basis voor de verdere uitwerking (Figuur 4-2).



Figuur 4-1 Overzichtskaart met de geplande vogeleilanden op de Slikken van Flakkee. Per eiland is in zuidwestelijke richting de bathymetrie bepaald over een lengte van 425m aan de hand van de dieptekaart (rode lijnen). De oranje stip in het zuiden toont de locaties waar golfmetingen uitgevoerd zijn in 2019. De grafieken geven de verkregen bathymetrie weer. De rode stippellijn toont de helling voor het gebied nabij de eilanden, de blauwe balk toont het zomer (-0.26m NAP) en middenpeil (-0.20m NAP).

4.1.2 Waterstand

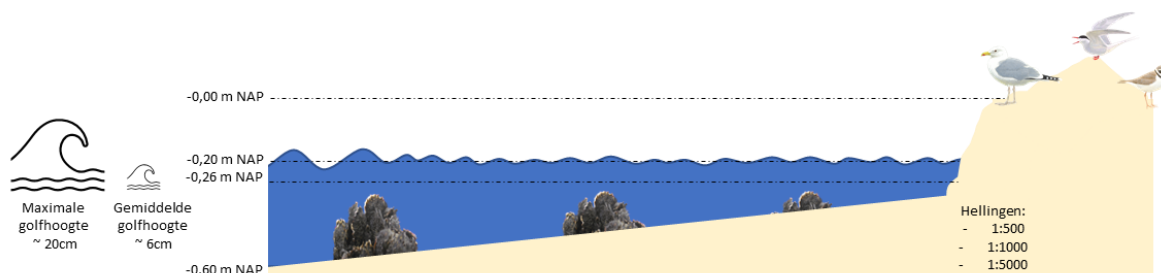
Oesters eten door middel van het filtreren van algen uit het water. Het is van belang dat ze minimaal 60% van de dag onder water staan (Wallis et al. 2016a). Het Grevelingenmeer heeft een middenpeil van -0.20m NAP, maar in werkelijkheid vertoont dit peil schommelingen. In het broedseizoen (april-juli)

¹ De bodemprofielen gemeten op 4 juli 2022 (zie Figuur 1-6) hebben een helling van 1:500 (diepteprofiel 1 en 2) en 1:1000 (diepteprofiel 3).

wordt het peil verlaagd tot -0.26m NAP zodat kale delen ontstaan waar kustbroedvogels op kunnen broeden. In de periode september-februari wordt het middenpeil gestuurd op -0.16m NAP gedurende drie perioden van drie weken. Peilvariatie kan ook optreden als gevolg van windopzet of verlaging. Het peil mag gedurende het hele jaar fluctueren tussen -0.10m NAP en -0.30m NAP, maar hierbij wordt wel zo goed mogelijk het zomer- en winterpeil nagestreefd. Voor de overleving van een structuur gemaakt van oesters dienen we rekening te houden met de laagste waterstand en dat is het zomerpeil van -0.26m NAP (Figuur 4-2).

4.1.3 Golfhoogte

Als uitgangspunt voor golfcondities gebruiken we in 2019 gemeten golfhoogtes door de Hogeschool Zeeland in het kader van het project "Spelen met Strooming". Golflogger 34 (Figuur 4-1) stond op de zuidelijke slikken van Flakkee aan de voorzijde van de steenbestorting. Helaas beschikken we niet over de gemeten golfhoogtes achter de steenbestorting. In deze studie nemen we dan ook de golven aan de voorzijde als uitgangspunt. De gemiddelde golfhoogte gemeten tussen 20 januari en 27 maart 2019 bedroeg 0.06m en varieerde tussen de 0 en 0.2m (Figuur 4-2).



Figuur 4-2 Overzicht van uitgangspunten. Drie verschillende hellingen (1:500, 1:1000 en 1:5000), zomerpeil (-0.26m NAP) als bovengrens en een gemiddelde significante golfhoogte van 6cm.

4.2 Locatiebepaling

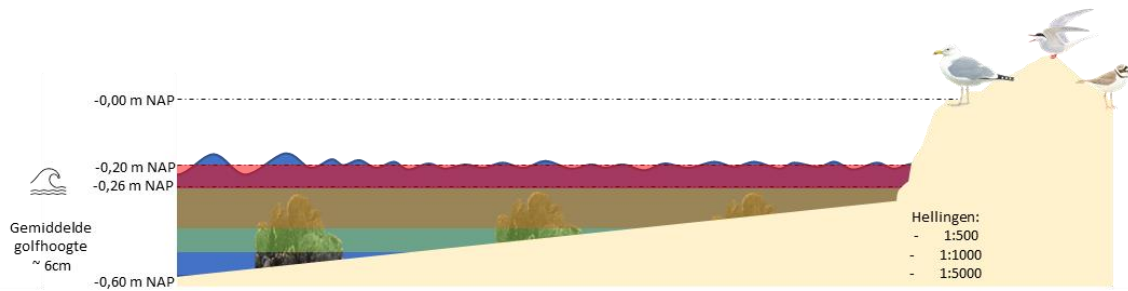
Door riffen niet direct tegen het vogeleiland aan te leggen maar ruim ervoor kan ook het voorliggende gebied profiteren van de erosie-remmende werking van een rif. Het is belangrijk om te bepalen op welke afstand structuren van het eiland af kunnen liggen zonder dat de effectiviteit te veel afneemt. Hoe ver het effect van golfdemping strekt achter een rif wordt voor een belangrijk deel bepaald door de dempende werking van het rif zelf, maar ook door het hoogteprofiel van de bodem. Naarmate de helling van de bodem flauwer is, des te verder effecten van de golfdempende structuur kunnen strekken.

4.2.1 Aanleg hoogte oesterrif

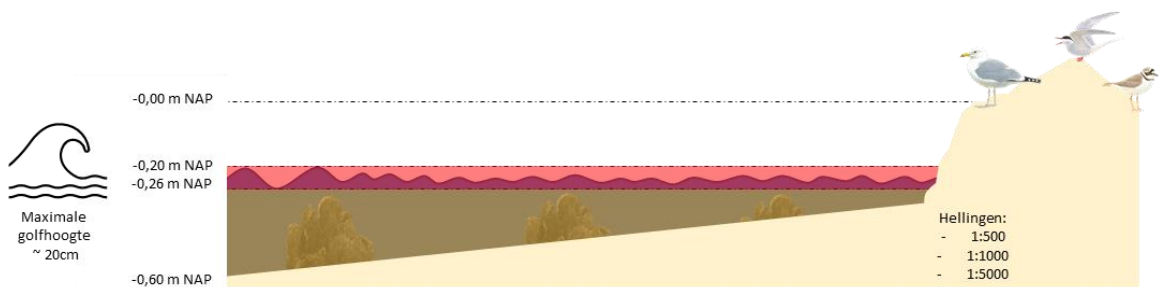
Golven in ondiep water ervaren een dieptelimitatie wanneer ze in aanraking komen met de bodem. In de literatuur spreekt men van een bovengrens voor de verhouding golfhoogte (H) en waterstand (h) voor ondiep water van $H/h = 0.55$ (Nelson 1994). Echter op basis van veldmetingen in de Oosterschelde vinden we een diepte-bepercingscriterium (γ_r) van $H/h = 0.3$ voor oesterriffen. Omdat we in deze studie niet geïnteresseerd zijn in dieptelimitatie op zandbodems maar op (ruwe)riffen, gebruiken we in deze theoretische benadering de waarde 0.3 verkregen uit ongepubliceerde veldmetingen. Om het verschil weer te geven tussen 0.55 en 0.3 staat in bijlage 1 de situatie voor $H/h = 0.55$ uitgewerkt.

Uitgaande van een gemiddelde golfhoogte van 6cm, vindt dieptelimitatie plaats bij waterdieptes (d) kleiner dan 20cm ($0.06/0.20 = 0.3$). Dit houdt in dat de top van een rif maximaal 20cm onder het zomerpeil (-0.26m NAP) kan liggen om golven te beïnvloeden gedurende het broedseizoen (april-juli) en 20 cm onder het middenpeil (-0.20m NAP) gedurende de rest van het jaar. Gedurende het broedseizoen zou de top van een rif tussen de -0.26 en -0.46m NAP moeten liggen om golf dempend te werken, terwijl de rest van het jaar de top tussen de -0.20 en -0.40m NAP moet liggen. Om jaarrond effectief te zijn moet de top van een rif in beide situaties onderwater staan. Een waterstand tussen de -0.26 en -0.40m NAP zou volstaan (Figuur 4-3). Dit is echter 0 tot 14cm onder het wateroppervlak gedurende het broedseizoen. Wisselende waterstanden, vooral lager dan het zomerpeil kan leiden tot het droogstaan van de top van de structuur waardoor de bovenste oesters niet kunnen eten en dood gaan. Voor grotere

golven (20cm) vindt dieptelimitatie plaats bij waterdieptes (d) kleiner dan 66cm ($0.20/0.66 = 0.3$). Figuur 4-4 toont dat hetzelfde rif bij deze golfhoogte over een grotere waterdiepte effect heeft op de golven. De situatie in Figuur 4-3 is echter leidend voor de aanleg van een rif en resulteert in een hele kleine bandbreedte waarin de top van het rif moet liggen. Het is te adviseren om een hoogte tussen de -0.30 en -0.35m NAP aan te houden als aanleg hoogte.



Figuur 4-3 range waarin de top van een rif moet liggen om gemiddelde golfhoogtes van 6cm te kunnen dempen gedurende het zomerpeil (oranje+groen), middenpeil (rood+oranje) en jaarrond (oranje).



Figuur 4-4 range waarin de top van een rif moet liggen om gemiddelde golfhoogtes van 20cm te kunnen dempen gedurende het zomerpeil (oranje+groen), middenpeil (rood+oranje) en jaarrond (oranje).

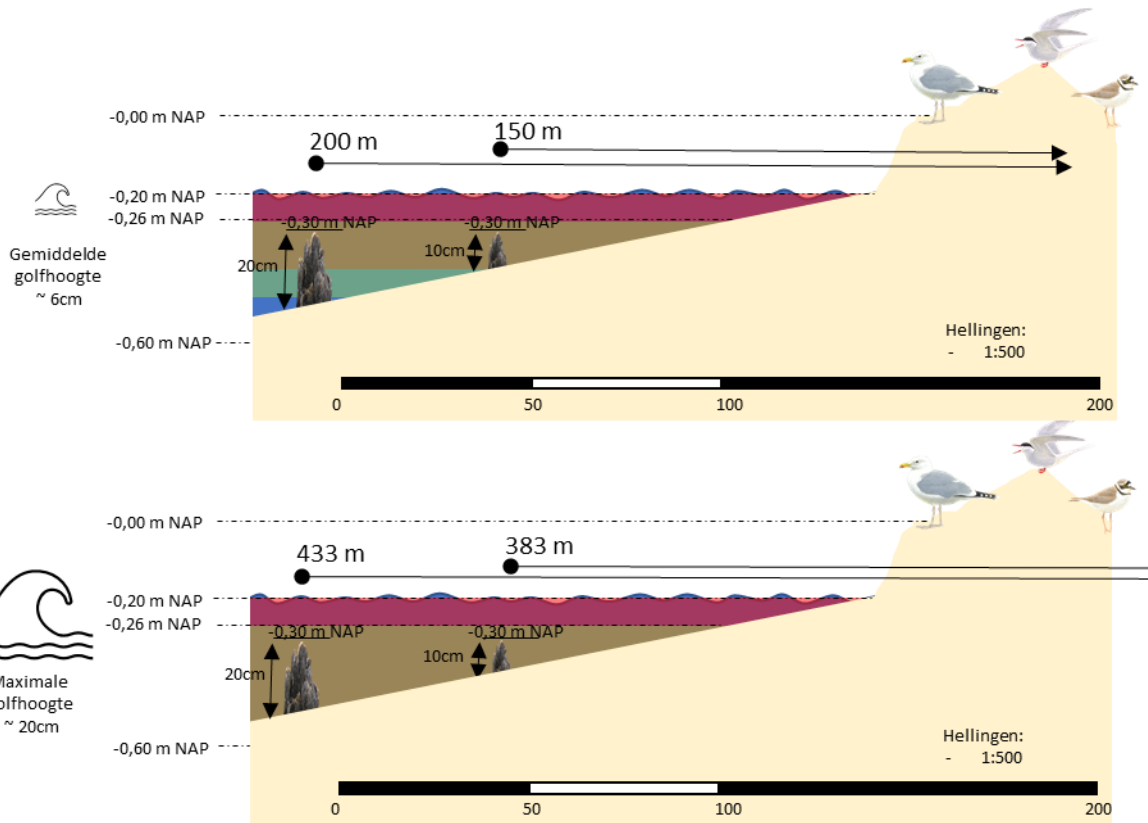
4.2.2 Afstand tot vogeleiland

De helling van het gebied is bepalend voor de afstand waarover golfdemping optreedt. Deze afstand kan berekend worden aan de hand van de volgende formule:

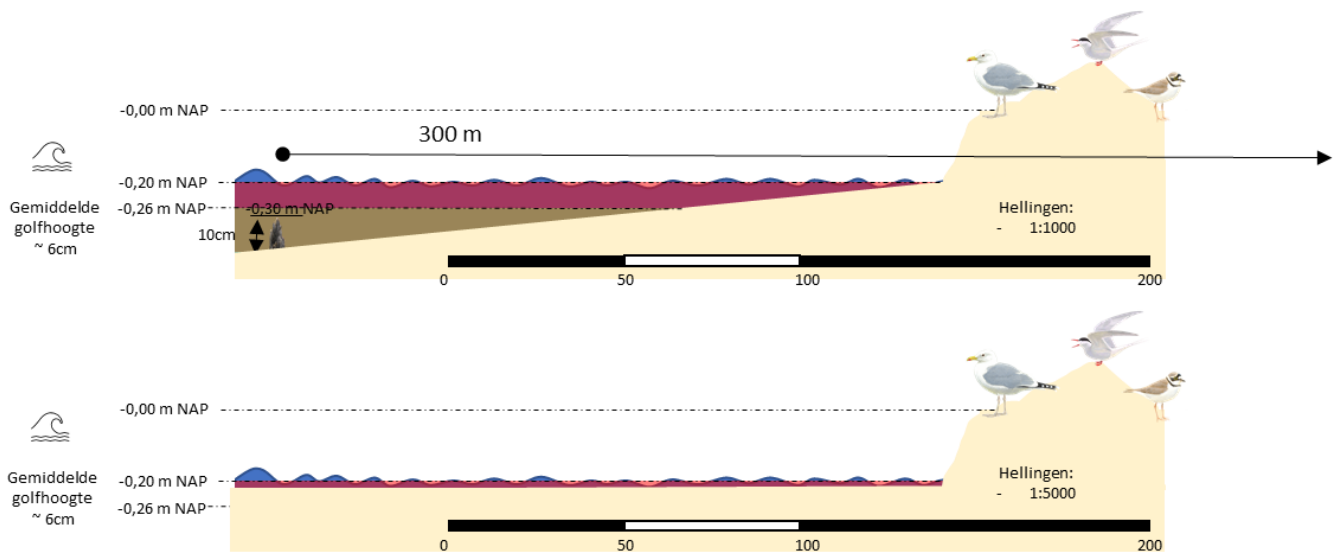
$$L = \frac{h_{reef} + \frac{H_{sig}}{\gamma}}{helling}$$

Waarbij L de lengte in meters is, h_{reef} de hoogte van het rif, H_{sig} de significante golfhoogte in het gebied (hierboven noemen we dit de gemiddelde golfhoogte), γ de dieptelimitatie waarvoor een waarde van 0.3 verkregen was uit veldmetingen en $helling$ de helling van het gebied is.

Als we uitgaan van een 10cm hoog rif, met een aanleghoogte tot -0.30m NAP, zien we bij een helling van 1 op 500 golfdemping tot 150m achter het rif onder gemiddelde (6cm) golfcondities en tot 383m achter het rif onder extreme (20cm) golfcondities (Figuur 4-5). Voor dieper gelegen riffen van 20cm, met dezelfde aanleghoogte tot -0.30m NAP, treedt golfdemping op tot 200 en 433m achter het rif onder gemiddelde en extreme golfcondities respectievelijk. Wanneer de helling van de bodem 1 op 1000 is heeft een 10cm rif nog altijd demping tot 300 meter achter het rif onder gemiddelde golfcondities (Figuur 4-6). Bij een bodem van 1 op 5000 treedt golfdemping op tot 1500 meter achter het rif. Echter bevindt een 10cm hoog rif zich 1000m van het vogeleiland om voldoende onder water te kunnen blijven staan. Over deze afstanden kunnen windgolven weer opbouwen en is het gebruik van riffen zinloos.



Figuur 4-5. Golfdemping bij een helling van 1:500 voor riffen van 10cm en 20cm met een rifhoogte van -0,30m NAP, onder gemiddelde golfcondities (boven) en extreme golfcondities (onder).

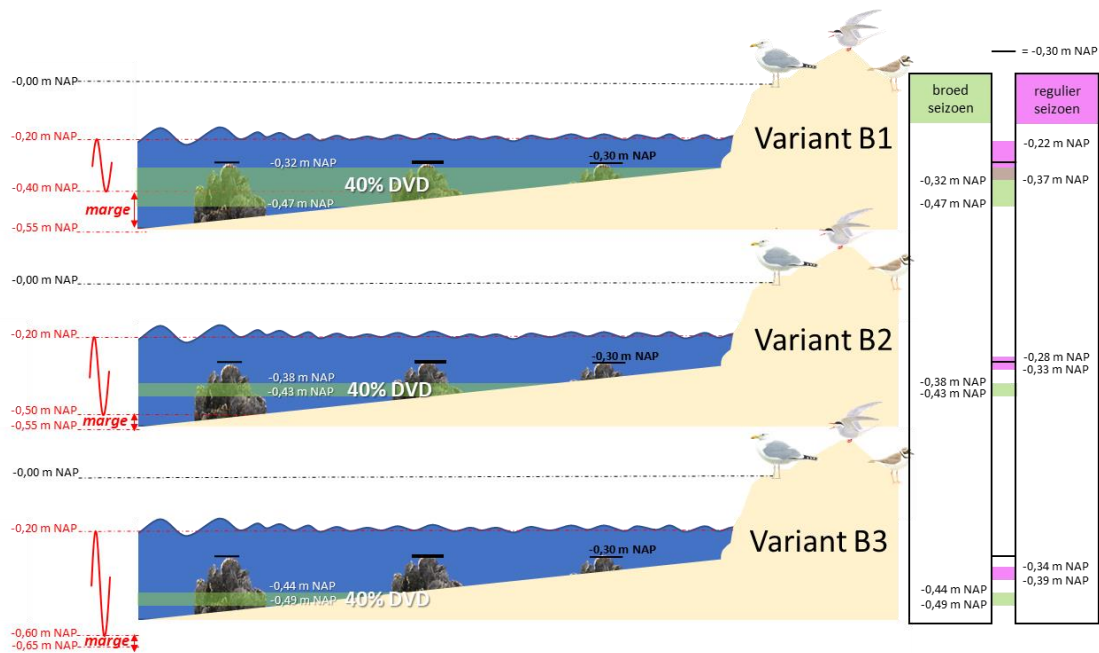


Figuur 4-6 Golfdemping bij een helling van 1:1000 (boven) en 1:5000 (onder) voor riffen van 10cm met een rifhoogte van -0,30m NAP, onder gemiddelde golfcondities. Het rif bij een helling van 1:5000 bevindt zich 1000m van het vogeleiland af en staat daardoor niet weergegeven.

4.3 Locatiebepaling bij invoering van getij

In de toekomst is het de bedoeling dat het Grevelingenmeer getij krijgt via een doorlaatmiddel in de Brouwersdam. In deze paragraaf geven we een doorkijk naar het functioneren van riffen in het geval van getij. Er zijn een aantal getijdenscenario's die momenteel onderzocht worden. In deze studie gaan we uit van variant B1, B2 en B3. Bij variant B1, B2 en B3 wordt een getij van respectievelijk 20, 30 of 40cm gehandhaafd. Deze varianten hebben een absolute bovengrens waar nooit overheen gegaan mag worden. Deze is -0,10m NAP gedurende het reguliere seizoen en -0,20m NAP gedurende het

broedseizoen (1 april – 16 juli). Om een gemiddelde getijslag van 20, 30 of 40cm te kunnen handhaven heeft RWS wat extra ruimte nodig. De ondergrens ligt bij B1 en B2 op -0.45m NAP en bij B3 op -0.55m NAP gedurende het reguliere seizoen en op -0.55m NAP en -0.65m NAP gedurende het broedseizoen. Door deze ondergrens ontstaat er een marge van 15cm voor variant B1 en een marge van 5cm voor variant B2 en B3. Deze marge is enorm in variant B1 (15cm marge op 20cm getij) waardoor er een grote schommeling in droogvalduur kan optreden.

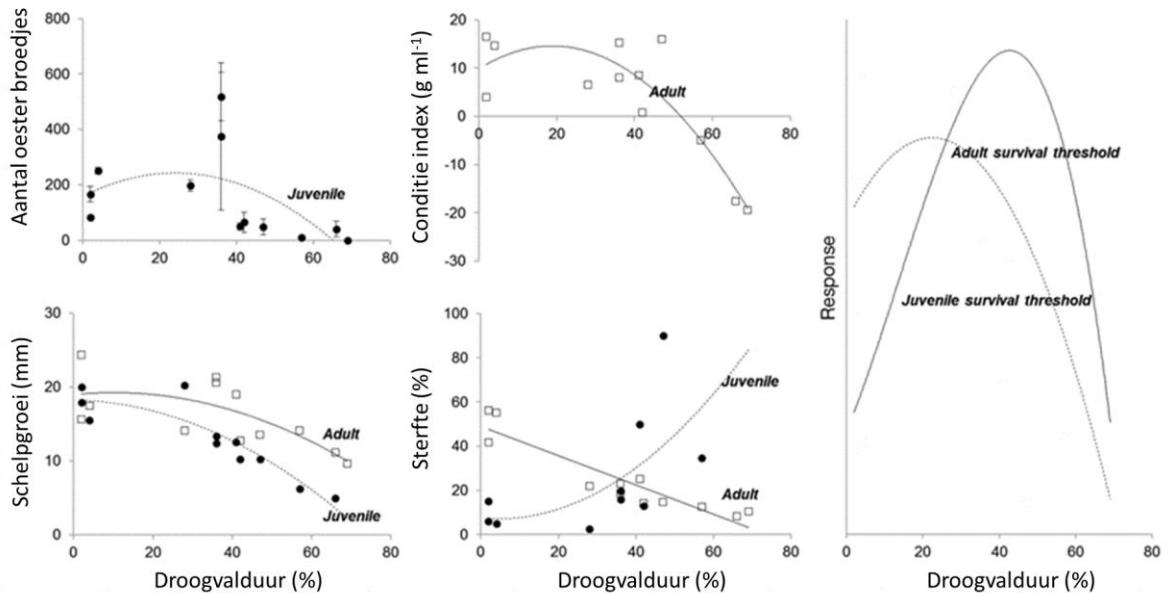


Figuur 4-7 overzicht van waterstanden in een situatie met 20 (variant B1), 30 (variant B2) of 40cm (variant B3) getij. Hoogwater is -0,20m NAP tijdens het broedseizoen. Links: De groene balk geeft de hoogste en laagste waterstanden weer die corresponderend met een droogvalduur van 40%. Bij B1 zit hier een marge van 15cm in, bij B2 en B3 een marge van 5 cm. De riffen geven de advies hoogte van -0.30m NAP in de huidige situatie weer. Rechts: per variant worden de hoogste en laagste waterstanden voor 40% droogvalduur weergegeven tijdens het broed seizoen (groen: 1 april-16 juli) en het regulier seizoen (roze).

In paragraaf 4.2.1 hebben we voor het huidige peilbeheer een aanleg hoogte tussen de -0.30 en -0.35m NAP geadviseerd. Terwijl riffen in de huidige situatie permanent onderwater moeten staan, dienen we in een situatie met getij rekening te houden met het aantal uur dat riffen droogvallen. Zoals reeds aangegeven is het van belang dat oesters minimaal 60% van de dag onder water staan (droogvalduur van maximaal 40%) om voldoende voedsel te kunnen eten (Wallis *et al.* 2016a). In Figuur 4-7 geven we de waterstanden weer die corresponderen met 40% droogvalduur voor de drie varianten. Hierin nemen we de marges per variant mee en gaan we uit van het peilbeheer gedurende het broedseizoen. Bij een getij van 20cm (variant B1) liggen de riffen met een aanleghoogte van -0.30m NAP in de range van waterstanden met 40% droogvalduur gedurende het reguliere seizoen (Figuur 4-7 rechts), maar liggen ze, afhankelijk van de marge, net iets – tot veel langer droog tijdens het broedseizoen. Deze riffen hoeven niet per definitie dood te gaan omdat oesters tot hoog in het intergetijdengebied kunnen voorkomen (Wallis *et al.* 2016c). Ze zullen echter wel stress ondervinden. Figuur 4-8 laat zien dat de response curves voor volwassen oesters en juveniele oesters van elkaar verschillen, waarbij volwassenen beter om kunnen gaan met langere droogvalduren ten opzichte van juveniele oesters. Door een toename in droogvalduur neemt de conditie index (een mate van de hoeveelheid vlees in de schelp) van oesters af. De oesters zullen door de langere droogvalduur gedurende het broedseizoen meer stress ondervinden door de verkorte tijd waarin ze dagelijks hun eten tot zich kunnen nemen en naar verwachting vermageren. Ze zullen naar verwachting niet direct dood gaan omdat we juist een afnemende sterfte zien bij toenemende droogvalduur. Er zal naar verwachting voldoende rekrutering van juveniele oesters (oesterbroedjes) zijn, omdat dit plaats vindt gedurende de zomermaanden wanneer het reguliere peil gehandhaafd wordt (een window of opportunity). De juveniele oesters hebben tot 1 april de tijd om te groeien en op te vetten, voordat ze in april langer droog komen te liggen gedurende het broed seizoen. Het is echter onbekend of deze, nog net geen jaar oude, juveniele oesters om kunnen gaan met deze verandering in droogvalduur. Bij een getij van 30cm zien we ook een verschil tussen het broedseizoen en regulier seizoen, waarbij de top van het rif in de range van 40%

droogvalduur ligt gedurende het reguliere seizoen en een langere droogvalduur ondervindt gedurende het broedseizoen. Bij een getij van 40cm ligt de 40% droogvalduur grens een stuk lager dan de geadviseerde aanleghoogte van de riffen in zowel het broedseizoen en reguliere seizoen.

In alle getijvarianten ondervinden lage riffen, gelegen nabij het vogeleiland, over de volledige verticaal stress terwijl de hogere, dieper gelegen, riffen maar deels boven 40% droogvalduur komen te liggen. Hierdoor blijft de structuur bij de dieper gelegen riffen in stand, maar is de top kwetsbaar, terwijl de ondiepere riffen volledig kunnen verdwijnen. Situatie B2 lijkt het gunstigste voor de rif ontwikkeling, gezien de kleine marge in getijvariatie en de gunstige omstandigheden voor nieuwe aanwas van juveniele oesters.



Figuur 4-8 response curves van volwassen en juveniele (broedjes) oesters ten opzichte van droogvalduur (Walles et al. 2016c)

5 Biodiversiteit

De structuren voor de vogeleilanden dienen niet alleen erosie te remmen maar ook een positieve bijdrage te leveren aan biodiversiteit. Het aanbrengen van een structuur op kale zandbodems zorgt per definitie al voor een verhoging van de lokale biodiversiteit als gevolg van een toename van habitat volume en schuil mogelijkheden, cruciaal voor soortenaantallen (Gratwicke and Speight, 2005). Oesterriffen hebben in het algemeen een hogere biodiversiteit (Green en Crowe, 2014; Wijsman *et al.* 2008) omdat ze functioneren als broedplaats en lege schelpen beschutting bieden voor andere organismen (Summerhayes *et al.* 2009).

Biodiversiteit kan echter nog verder verhoogd worden door bepaalde elementen in de structuur op te nemen. Denk hierbij aan holtes, overhang, etc. De mate van toename is echter afhankelijk van de structuur. Structuren met meer schuilplaatsen faciliteren bijvoorbeeld meer vis aantallen en biomassa (Hylkema *et al.* 2020). Figuur 5-1 toont het verschil in vis dichtheden en biomassa's voor drie kunstmatige structuren en een kale zeebodem (control) in de Nederlandse Cariben. Layered cakes (zie paragraaf 6.6) hadden de hoogste vis dichtheden en biomassa's. Reefballs (zie paragraaf 6.5) en Rock piles daarentegen hadden met twee keer meer schuilvolume toch minder vis. Deze schuilplaatsen waren groter, waardoor deze niet gebruikt werden door de kleinere vissoorten. Door de interne hole ruimte van reefballs op te vullen kunnen vis aantallen toenemen (Sherman *et al.* 2002), wat het belang van de dimensies van schuilplaatsen demonstreert.

Dichtheid 9.6 ± 7.0 ind.
Biomassa 309 ± 273 g



Dichtheid 15.5 ± 8.3 ind.
Biomassa 459 ± 273 g



Dichtheid 36.7 ± 14.3 ind.
Biomassa 1434 ± 1287 g



Control:
Dichtheid 3.1 ± 3.7 ind.
Biomassa 35 ± 78 g

*Figuur 5-1 Vis dichtheden en biomassa voor drie verschillende kunstmatige habitats (reefballs, pile of rocks, layered cakes) en een controle gebied (Hylkema *et al.* 2020).*

Het aanbrengen van structuur op kale zandbodems leidt echter niet per definitie tot biodiversiteit verhoging in het systeem, maar tot verplaatsing binnen het systeem (Gratwicke and Speight, 2005). Sommige soorten zoeken misschien bescherming of foerageer habitat, waardoor lokaal clustering van de reeds aanwezige biodiversiteit ontstaat. Andere soorten daarentegen gebruiken structuren als leefruimte of zetten eieren af op het substraat waardoor hun overleving vergroot, wat tot verhoging van dichtheden en biomassa kan leiden. Structuren kunnen ook ongewenste soorten aantrekken. Ze kunnen als "stepping stone" dienen voor soorten om nieuwe gebieden te bereiken. Hierdoor kunnen inheemse, maar ook invasieve soorten zich uitbreiden.

6 Structuren

Wereldwijd wordt er op verschillende schalen en met verschillende doelen geëxperimenteerd met de implementatie van biogene structuren in het marine milieu. Om als erosie-remmende maatregel te werken moet de vestiging van biobouwers gestimuleerd worden op de gewenste locatie. Middels het aanbrengen van vestigingssubstraat kan een kick-start gegenereerd worden. Verder moeten structuren een bepaalde stabiliteit hebben zodat ze de dimensie behouden die nodig zijn om erosie-remmend te werken (zie hoofdstuk 3). Zo zullen losse oesters zonder enige vorm van bescherming hoogte verliezen of misschien wegspoelen waardoor het doel niet gerealiseerd wordt. Hieronder zetten we verschillende materialen op een rijtje welke ingezet kunnen worden als erosie-remmende maatregel.

6.1 Oesterriffen

Oesterriffen zijn een voor de hand liggende structuur als een levende biogene erosie-remmende structuur het doel is. Ze dempen golven door de plotselinge afname in waterdiepte over het rif en hebben door hun ruwheid een groot golf-dempende effect. Verder bieden ze geschikt vestigingssubstraat voor oesterlarven. Door jaarlijkse rekrutering, waarbij oesterlarven zich vast cementen aan schelpmateriaal, groeit de structuur en wordt deze sterker (Wallis *et al.* 2016b). Middels schanskorven gevuld met schelpmateriaal kan op de gewenste locatie substraat aangeboden worden. Belangrijk tijdens de aanlegfase is de dikte van de schanskorf. Deze dient minstens 5 jaar mee te gaan zodat oesters de kans krijgen om van losse schelpen een stabiel rif te maken. In de Oosterschelde is sinds 2009 ervaring opgedaan met de aanleg van negen oesterriffen, op basis van schanskorven gevuld met schelpmateriaal, op drie verschillende locaties (Slikken van Viane, de Val en de Oesterdam). Het schelpmateriaal moet grof genoeg zijn zodat ze niet uit de schanskorf kunnen spoelen. Tevens is het gebruik van schelpen van de beoogde soort te adviseren omdat dat een grotere aantrekkingskracht heeft op de settelende larven (Diederich, 2006; Tamburri *et al.*, 2007; Troost, 2009). In de Oosterschelde zijn schanskorven noodzakelijk om stabiel substraat te kunnen garanderen, maar misschien is dit minder noodzakelijk in het Grevelingenmeer gezien de geringe dynamiek in dit systeem. Een gebied, afgerasterd (hekjes) en tot de nok gevuld met schelpen zou in theorie stabiel genoeg kunnen zijn om substraat te bieden voor oesterlarven. Echter heb je dan minder variatie (holtes, overhang, etc.) in het rif, iets wat biodiversiteit zou kunnen stimuleren.

6.2 Mosselbanken

Mosselbanken kunnen net als oesterriffen een erosie-remmende werking hebben. Echter is hun golfdempende werking kleiner dan die van oesters gezien hun geringe hoogte en door een lagere ruwheid van hun oppervlak. Mosselen vormen banken doordat individuele mosselen zich middels byssusdraden vasthouden aan soortgenoten en andere harde substraten. In tegenstelling tot oesters zijn mosselen mobiel. Hierdoor kan niet gegarandeerd worden dat mosselen blijven liggen zoals ze aangelegd zijn. Ook een aanleghoogte van 10-20cm is moeilijk te garanderen omdat ze niet boven op elkaar willen liggen wegens voedselcompetitie.

6.3 Xiriton-structuren

Op dit moment wordt er geëxperimenteerd met Xiriton-structuren (Figuur 6-1). Xiriton is een CO₂-neutraal equivalent van hard substraat (<https://www.acroniq.nl>) vergelijkbaar met beton. Het voordeel van Xiriton is dat het voor een groot deel gemaakt kan worden met gebiedseigen materialen. Zo worden natuurlijke vezels zoals lokaal aanwezig riet of slijkgras gebruikt als een soort betonijzer om stevigheid te geven aan het materiaal. Ook sediment en schelpmateriaal kan in het gebied zelf gewonnen worden waar de structuren geplaatst gaan worden. Verder is het mogelijk om verschillende samenstelling van

Xiriton te maken van permanent substraat tot een substraat dat na verloop van tijd uiteenvalt en weer opgaat in zijn omgeving. De eigenschappen van verschillende Xiriton samenstellingen (recepturen) worden momenteel getest op o.a. verwerking en aangroei door biofouling.



Figuur 6-1 Voorbeelden van experimenten met Xiriton-structuren (foto's: J. van Belzen)

6.4 BESE-kratten

Er zijn meerdere experimenten en pilots uitgevoerd met BESE-kratten gemaakt van biologisch afbreekbaar plastic (van Belzen et al. 2020). Dit materiaal breekt slecht af in het marine milieu maar is wel zodanig fragiel dat kleine stukjes zich verspreiden in het systeem. Naar verwachting kan dit materiaal geen langdurig erosie-remmende dienst leveren. Daarom is het niet te adviseren om dit materiaal te gebruiken.

6.5 Reefballs

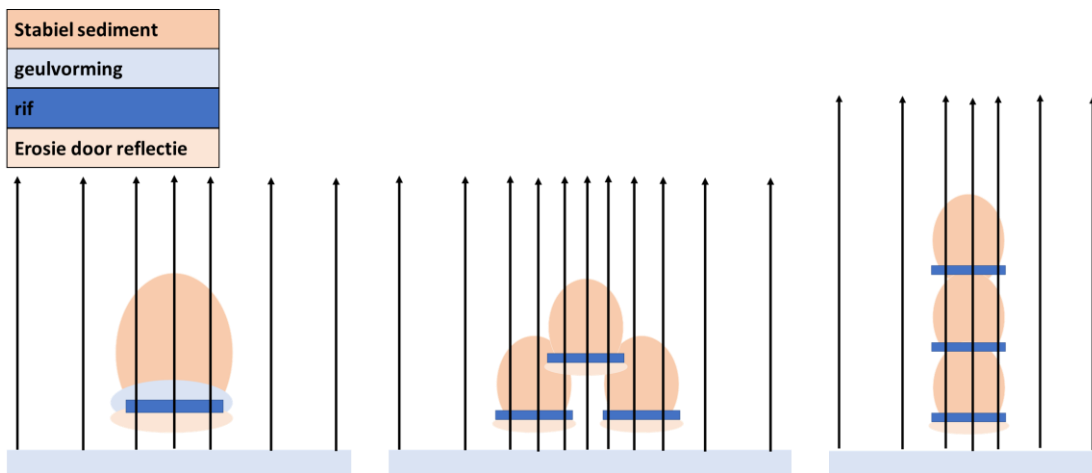
Reef balls® (Figuur 5-1) worden wereldwijd toegepast in restauratie projecten (reefballfoundation.org). Meestal met het doel om biodiversiteit te verhogen (Hylkema et al. 2021). Reef balls hebben een diameter van 90 cm, een hoogte van 60 cm, en wegen 300-450 kg per stuk. Ze bestaan uit beton, een gebiedsvreemd materiaal. Het effect van reef balls op visgemeenschappen is veel bestudeerd. Studies hebben aangetoond dat meer schuilplekken creëren in reef balls, door beton blokken in het centrale deel te plaatsen, of meer gaten erin te boren tot een verhoging van vis dichtheden en soortenrijkdom leidt. Reef balls zijn te groot (90cm) qua dimensie ten opzichte wat nodig is op de slikken van Flakkee (10-20cm).

6.6 Layered cakes

Layered cakes zijn van beton gemaakte schijven die op elkaar geplaatst worden (Figuur 4-1). Hierdoor bieden ze beschutting voor vissen. Hun werking als golfdempende maatregel is echter nog niet onderzocht, maar ze tonen wel hoe biodiversiteit verhoogd kan worden. Gezien de geringe hoogte die nodig is op de Slikken van Flakkee is het gebruik van layered cakes minder realistisch voor golfdemping. Een betere toepassing zou het plaatsen van layered cakes zijn in diepere delen om de lokale biodiversiteit te verhogen. Als Xiriton stevig genoeg is om layers in de water kolom te kunnen maken, zou dit een interessante vervanger kunnen zijn voor het beton dat nu nodig is om layered cakes te maken.

6.7 Variatie in aanleg

De, tot nu toe, aangelegde erosie-remmende structuren bestonden uit simpele geometrische ontwerpen, zoals rechthoeken, overeenkomend met de geometrie van traditionele golfbrekers. Natuurlijke ecosystemen zijn veel heterogener van structuur. Van Belzen en Bouma (2022) tonen middels numerieke modellen aan hoe heterogene structuren de stabiliteit en veerkracht van een systeem bevorderen. Bij de oesterriffen in de Oosterschelde zien we bijvoorbeeld dat de 200 meter lange rechthoekige (homogene) structuren waterstroming blokkeert waardoor een geul ontstaat achter de structuur wat leidt tot verhoogde erosie direct achter het rif. In theorie zouden kleine structuren, in een ruimtelijk patroon (Figuur 6-2) minder water blokkeren en daardoor minder erosie laten zien direct achter de structuur. Ook een cascade aan structuren zou erosie-remming kunnen versterken. Het gebruik van meerdere kleine riffen in plaats van een 200m lange structuur is volgens de modellen te adviseren, dit is echter nog niet in het veld gevalideerd. Door kleiner structuren te gebruiken zouden processen als golfdiffractie en directional spreading dominantier kunnen zijn. Middels pilots kan getest worden welke configuratie (homogene (rechthoekige) of heterogene structuren) effectiever is als erosie-remmende maatregel. Deze pilots kunnen kennis genereren over de best werkende configuratie voor het beschermen van vogeleilanden en andere gebieden.



Figuur 6-2. Homogeen (links), heterogeen (midden) en cascade (rechts) structuren kunnen verschillende effecten hebben op hun omgeving.

7 Advies

In deze studie hebben we de aspecten benoemd die van belang zijn om de toepasbaarheid van onderwaterriffen als erosie-remmende maatregel voor het behoud van vogeleilanden in het Grevelingenmeer te kunnen onderzoeken. Dit is een eerste theoretische verkenning op basis van een aantal aannames (bodemprofiel en golfhoogtes). Voor het daadwerkelijk aanleggen van onderwaterriffen zijn veldmetingen van belang om de juiste positionering te bepalen.

Op basis van de bovenstaande beschouwing zou een structuur van 10cm op minder dan 150m afstand tot een vogeleiland al voldoende golfdemping kunnen bieden om erosie-remmend te werken in een gebieden met een flauwe helling (1:500). In een gebieden met een zeer flauwe helling (1 op 5000) is het gebruik van riffen zinloos omdat de afstand tot het eiland te groot wordt, rekening houdend met een levend rif.

Gezien de geringe dynamiek in het Grevelingenmeer zou een berg schelpen, gestort tussen hekjes (zodat het op zijn plek blijft liggen en de juiste hoogte behoudt) al voldoende kunnen zijn voor de aanleg van een oesterrif. Het is te adviseren om schelpen uit het systeem te gebruiken, bij voorkeur Japanse oesters omdat dit rekrutering van deze soort versterkt. Japanse oesters vormen, in tegenstelling tot platte oesters, riffen. Bij voorkeur bestaat een deel van het schelpenmateriaal uit levende individuen zodat het rif al groeit voordat rekrutering plaats vindt gedurende de zomermaanden. Daarnaast zou geëxperimenteerd kunnen worden met een mix van platte en Japanse oesters. Platte oesters vormen geen riffen, maar misschien faciliteert een oesterrif van Japanse oesters wel in settlement substraat waardoor de platte oesterpopulatie zich kan uitbreiden.

De afmetingen van riffen zouden vergelijkbaar kunnen zijn als de reeds gebruikte structuren in de Oosterschelde. Echter tonen model studies aan dat de configuratie van je structuur effect heeft op je erosie-remmende werking. Het gebruik van meerdere kleine riffen in plaats van een 200m lange structuur is volgens de modellen te adviseren, dit is echter nog niet in het veld gevalideerd. Middels pilots kan getest worden welke configuratie effectiever is als erosie-remmende maatregel. Deze pilots kunnen kennis generen over de best werkende configuratie voor het beschermen van vogeleilanden en andere gebieden.

Het gebruik van Xiriton structuren is ook interessant gezien deze voor een groot deel uit gebiedseigen materiaal gemaakt worden. Xiriton hard uit onder water, waardoor het op locatie gemaakt zou kunnen worden. Het gebruik van Xiriton staat echter nog in de kinderschoenen.

Om biodiversiteit te verhogen zijn holtes en overhang belangrijk. Echter is dit moeilijk te realiseren voor 10cm hoge structuren. Je zou een constructie dieper in het systeem kunnen aanleggen die alleen als doel heeft om de biodiversiteit te verhogen. Door lokale clustering van bijvoorbeeld vissen, in de buurt van je golfdempende riffen, stimuleer je misschien predatie op soorten die van het rif gebruik maken, zoals krabben. Daarnaast zijn de vissen weer interessant voer voor enkele broedvogels.

8 Monitoringsactiviteiten

Na aanleg van vogeleilanden en onderwaterriffen is het van belang om te monitoren in hoeverre de onderwaterriffen in stand blijven en zich ontwikkelen en in hoeverre ze bijdragen aan de erosiebescherming van de broedvogeleilanden en de biodiversiteit beïnvloeden. Hiermee wordt kennis vergaard voor toekomstige ontwikkelingen en beheermaatregelen. Hieronder staan monitoringsactiviteiten benoemd die van belang zijn voor het opvolgen van de ontwikkeling van de riffen en het functioneren van de riffen als erosie-remmende maatregel. Deze lijst is waarschijnlijk niet compleet. Afhankelijk van de doelstelling kunnen mogelijks nog andere monitoringsactiviteiten benoemd worden.

8.1 Morfologie

8.1.1 Hoogte metingen

Morfologische veranderingen in het gebied kunnen middels RTK raaien gemonitord worden. Met een dGPS kan op vooraf vastgestelde raaien (transecten) de hoogte ingemeten worden. Middels interpolatie tussen de raaien kan een gebiedsdekkende hoogtekaart verkregen worden. Deze metingen dienen het gebied rond de riffen te meten van enkele meters voor het rif tot en met het vogeleiland. Ook een referentie gebied meten is van belang om het effect van de riffen te kunnen onderscheiden van algemene trends in de omgeving. Het vogeleiland dient ook opgemeten te worden om te zien hoe deze verandert over de tijd en welke processen hier ten grondslag liggen (golferosie, winderosie, etc.). Deze metingen moeten voor en na aanleg plaatsvinden. Bij voorkeur 4 keer per jaar zodat het effect van verschillende seizoenen in beeld gebracht kan worden. Tijdens de lente en zomer kan bijvoorbeeld een lichte sedimentatie optreden terwijl in de winter erosie dominant kan zijn als gevolg van stormen.

8.1.2 Golfmetingen

De effectiviteit van een onderwaterrif kan gemeten worden door golven te meten voor en achter het rif. Door een transect van golfmeters (druksensoren) in te zetten kan inzicht verkregen worden tot hoe ver golfdemping optreedt achter het rif.

8.1.3 Sedimentsamenstelling

Als gevolg van de aanleg van onderwaterriffen kan verrijking van de bodem optreden door de faeces en pseudofaeces van oesters. Middels sediment monsters kan inzicht verkregen worden in veranderingen van de sedimentsamenstelling over de tijd. Dit is interessant omdat bodemdieren anders reageren op slikrijkere bodems.

8.2 Ecologie

8.2.1 Rif ontwikkeling

De aangelegde structuur vormt substraat voor vestiging van oesters. Door jaarlijks in de winter op een vast oppervlak het aantal broedjes te tellen wordt informatie verkregen over vestigingssucces. Wanneer tevens alle levende oesters binnen een kwadrant opgemeten wordt kan overleving over de jaren opgevolgd worden. Gezien de structuur permanent onder water staat is het zinvol om voor aanleg na te denken hoe het rif te bemonsteren. Misschien dat kooien in het rif geplaatst kunnen worden die op verschillende momenten eruit gehaald kunnen worden en geanalyseerd.

8.2.2 Biodiversiteit op het rif

Biodiversiteit op het rif is moeilijk te meten. Kwalitatief kan bekeken worden welke soorten voorkomen, maar aantallen zijn moeilijk te meten omdat de meeste mobiele soorten vluchten tijdens de monsternamen. Middels eDNA zou een beeld van de lokale biodiversiteit verkregen kunnen worden. Door dit voor aanleg en tot enkele jaren na aanleg op te volgen kan ontwikkeling over de tijd gemeten worden. Kolonisatie zal voor een aantal soorten direct na aanleg plaatsvinden terwijl andere soorten er langer over doen voordat ze de structuren bereiken. Door het eerste jaar met een hogere frequentie te meten kan inzichtelijk gemaakt worden hoe lang soorten nodig hebben om een structuur te vinden.

8.2.3 Bodemdieren

De veranderde hydrodynamiek en toevoeging van faeces en pseudofaeces aan het systeem kan voor veranderingen in de bodem zorgen. Middels steekbuizen kan gekeken worden of de bodemdiergemeenschap verandert na aanleg van onderwaterriffen.

8.2.4 Vogels

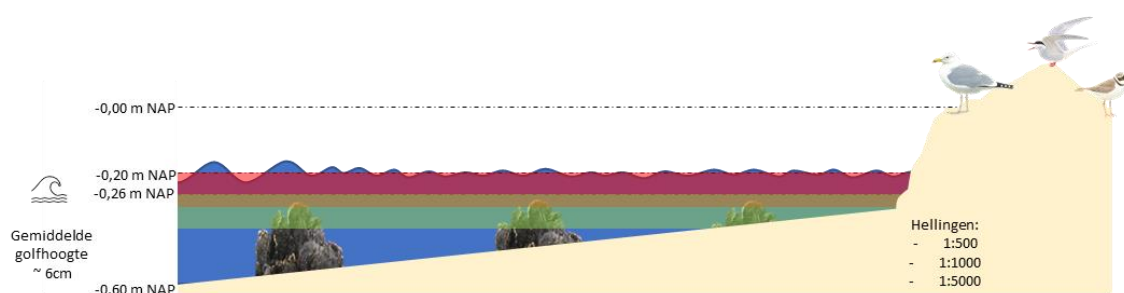
Vogels maken gebruik van de vogeleilanden, maar kunnen ook foerageren rond de onderwaterriffen. Door vogeltellingen uit te voeren, waarbij we kijken naar de soorten die het eiland gebruiken en soorten die rond de riffen foerageren kunnen we een link leggen tussen de biodiversiteit op de onderwaterriffen en vogels.

8.2.5 Vissen

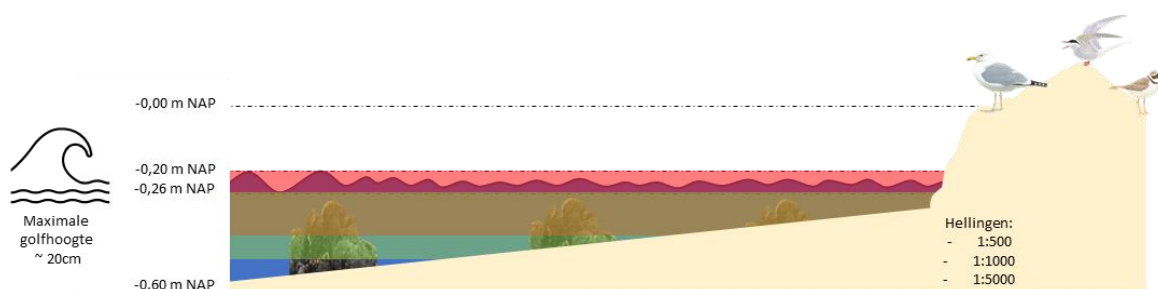
Vissen in de buurt van de onderwaterriffen zouden middels netten gevangen kunnen worden. Dit is echter een momentopname en niet alle soorten worden even goed gevangen met een bepaald net. Middels eDNA zou het gebruik van onderwaterstructuren door vis inzichtelijk gemaakt kunnen worden. Bij de Universiteit van Wageningen wordt momenteel een visbox ontwikkeld. Deze neemt video en audio opnames en bij veranderingen worden eDNA monsters genomen om zo een zo goed mogelijk beeld te krijgen van de soorten die een gebied bezoeken.

Bijlage 1 dieptelimitatie van golven

Uitgaande van een gemiddelde golfhoogte van 6cm, vindt dieptelimitatie plaats bij waterdieptes (d) kleiner dan 11 cm ($0.06/0.11 = 0.55$). Dit houdt in dat de top van een rif maximaal 11cm onder het zomerpeil (-0.26m NAP) moet liggen om golven te beïnvloeden gedurende het broedseizoen (april-juli) en 11 cm onder het middenpeil (-0.20m NAP) gedurende de rest van het jaar. Gedurende het broedseizoen zou de top van een rif tussen de -0.26 en -0.37m NAP moeten liggen om golf dempend te werken, terwijl de rest van het jaar de top tussen de -0.20 en -0.30m NAP moet liggen. Om jaarrond effectief te zijn moet de top van een rif in beide situaties onderwater staan. Een waterstand tussen de -0.26 en -0.30m NAP zou volstaan (Figuur 4-3). Dit is echter 0 tot 4cm onder het wateroppervlak gedurende het broedseizoen. Wisselende waterstanden, vooral lager dan het zomerpeil kan leiden tot het droogstaan van de top van de structuur waardoor de bovenste oesters niet kunnen eten en dood gaan. Voor grotere golven (20cm) vindt dieptelimitatie plaats bij waterdieptes (d) kleiner dan 36cm ($0.20/0.36 = 0.55$). Figuur 4-4 toont dat hetzelfde rif bij deze golfhoogte over een grotere waterdiepte effect heeft op de golven. De situatie in Figuur 4-3 is echter leidend voor de aanleg van een rif en resulteert in een hele kleine bandbreedte waarin de top van het rif moet liggen.



Figuur 8-1 range waarin de top van een rif moet liggen om gemiddelde golfhoogtes van 6cm te kunnen dempen gedurende het zomerpeil (oranje+groen), middenpeil (rood+oranje) en jaarrond (oranje).



Figuur 8-2 range waarin de top van een rif moet liggen om gemiddelde golfhoogtes van 20cm te kunnen dempen gedurende het zomerpeil (oranje+groen), middenpeil (rood+oranje) en jaarrond (oranje).

9 Kwaliteitsborging

Wageningen Marine Research beschikt over een ISO 9001:2015 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem. De organisatie is gecertificeerd sinds 27 februari 2001. De certificering is uitgevoerd door DNV.

Literatuur

- d'Angremond K., van der Meer, J.W. & Jong, R. J. d. Wave transmission at low crested structures. *Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE*, 3305-3318 (1996).
- van Belzen, J., Bouma, T.J. & Ysebaert, T. Blue Carbon in het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. NIOZ Report 2020-03. NIOZ Royal Netherlands Institute for Sea Research: Yerseke. 63 pp (2020)
- Diederich, S. High survival and growth rates of introduced Pacific oysters may cause restrictions on habitat use by native mussels in the Wadden Sea. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **328**: 211-227 (2006)
- Green, D. S., & Crowe, T. P. Context-and density-dependent effects of introduced oysters on biodiversity. *Biological Invasions*, **16**(5), 1145-1163 (2014).
- Gratwicke, B. & Speight, M.R. The relationship between fish species richness, abundance and habitat complexity in a range of shallow tropical marine habitats. *Fish Biology* **66**: 650-667 (2005).
- Holthuijsen, L.H. Waves in oceanic and coastal waters, Cambridge University Press (2007).
- Hylkema, A., Hakkaart, Q.C.A, Reid, C.B., Osinga, R., Murk, A.J. & Debrot, A.O. Artificial reefs in the Caribbean: A need for comprehensive monitoring and integration into marine management plans. *Ocean and Coastal Management* **209**: 1-10 (2020)
- Nelson R.C. Depth limited design wave heights in very flat regions. *Coastal Engineering* **23**: 43-59 (1994).
- Sherman et al 2002 Sherman, R. L., Gilliam, D.S., Spieler, R.E. Artificial reef design: void space, complexity, and attractants. *ICES Journal of Marine Science* **59**: 196-200 (2002)
- Summerhayes, S. A., Bishop, M. J., Leigh, A. & Kelaher, B. P. Effects of oyster death and shell disarticulation on associated communities of epibiota. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **379**(1-2), 60-67 (2009).
- Tamburri, M.N., Zimmer, R.K., Zimmer, C.A. Mechanisms reconciling gregarious larval settlement with adult cannibalism. *Ecological Monographs* **77**: 255-268 (2007).
- Tangelder M., Janssen J., Nolte A., Walles B., Wijsman J. & Ysebaert T. Scenariostudie natuurperspectief Grevelingenmeer. Wageningen Marine Research Wageningen UR (University & Research centre), Wageningen Marine Research rapportnummer C021/18, 164 blz. (2018)
- Terlouw, S. & Lammerts, C. Op weg naar de veerkrachtige delta van de toekomst. Natuurwinststrategie Deltanatuur - casus Grevelingen. Staatsbosbeheer (2021). Troost, K. Pacific oysters in Dutch estuaries. Causes of success and consequences for native bivalves., Department of Marine Biology, the Netherlands. University of Groningen, the Netherlands. (2009)
- van der Meer, J. W., Briganti, R., Zanuttigh, B. & Wang, B. Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change. *Coastal Engineering* **52**: 915-929, doi:<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.09.005> (2005).
- Wiberg, P. L., Taube, S. R., Ferguson, A. E., Kremer, M. R. & Reidenbach, M. A. Wave Attenuation by Oyster Reefs in Shallow Coastal Bays. *Estuaries and Coasts* **42**: 331-347, doi:10.1007/s12237-018-0463-y (2019).
- Wijsman, J.W.M., Dubbeldam, M. & van Zanten, E. Wegvisproef Japanse oesters in de Oosterschelde. Eindrapportage, Wageningen IMARES rapportnummer C063/08, 95 blz (2008).
- Walles, B., Fodrie, F.J., Nieuwhof, Sil, Jewell, O.J.D., Herman, P.M.J. & Ysebaert, T. Guidelines for evaluating performance of oyster habitat restoration should include tidal emersion : Reply to Baggett et al. *Restoration Ecology* **24**: 4-7 (2016a).
- Walles, B., Salvador de Paiva, J., van Prooijen, B., Ysebaert, T. & Smaal, A. The ecosystem engineer *Crassostrea gigas* affects tidal flat morphology beyond the boundary of their reef structures. *Estuaries Coasts*, 1-10 (2015).
- Walles, B., Troost, K., Ende, D. van den, Nieuwhof, S., Smaal, A.C. & Ysebaert, T. From artificial structures to self-sustaining oyster reefs. *Journal of Sea Research* **108**:1-9 (2016b).
- Walles, B., Smaal, A.C., Herman, P.M.J., Ysebaert, T. Niche dimension differs among life-history stages of Pacific oysters in intertidal environments. *Marine Ecology Progress Series* **562**: 113 – 122 (2016c).
- Zijlema, M., Stelling, G. & Smit, P. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering* **58**: 992-1012 (2011).

Verantwoording

Rapport C082/22

Projectnummer: 4313100152

Dit rapport is met grote zorgvuldigheid tot stand gekomen. De wetenschappelijke kwaliteit is intern getoetst door een collega-onderzoeker en het verantwoordelijk lid van het managementteam van Wageningen Marine Research

Akkoord: Jildou Schotanus
Onderzoeker

Handtekening:



Datum: 1 december 2022

Akkoord: Dr. Ir. T.P. Bult
Director

Handtekening:



Datum: 1 december 2022

Wageningen Marine Research
T: +31 (0)317 48 70 00
E: marine-research@wur.nl
www.wur.nl/marine-research

Wageningen Marine Research levert met kennis, onafhankelijk wetenschappelijk onderzoek en advies een wezenlijke bijdrage aan een duurzamer, zorgvuldiger beheer, gebruik en bescherming van de natuurlijke rijkdommen in zee-, kust- en zoetwatergebieden.

Bezoekers adres:

- Ankerpark 27 1781 AG Den Helder
- Korringaweg 7, 4401 NT Yerseke
- Haringkade 1, 1976 CP IJmuiden



Wageningen Marine Research is onderdeel van Wageningen University & Research. Wageningen University & Research is het samenwerkingsverband tussen Wageningen University en Stichting Wageningen Research en heeft als **missie**: 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'
