



Pilot zandige vooroever Houtribdijk

Business case zandige voorlanden



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



Contact

Spuiboulevard 210,
3311 GR Dordrecht
+31 78 6111 099
info@ecoshape.nl
www.ecoshape.nl

Samenvatting

Kader

De pilot voorlandoplossing Houtribdijk was expliciet gericht op het sneller en beter onderbouwd kunnen realiseren van zandige versterkingswerken voor met name de belastingomstandigheden in de grotere meren. De (tussen)resultaten van deze pilot zijn inmiddels toegepast in zowel lopende als komende projecten van het HoogWaterBeschermingsProgramma (HWBP). Voorbeeld van zo'n project is de versterking van de Markermeerdijken tussen Hoorn en Edam, waarvan een deel van de versterkingsooplossing bestaat uit een zandige versterking (de zogenaamde oeverdijk). Ook is de kennis die in deze pilot is opgedaan gebruikt voor de dimensionering van de zandige versterking van het westelijke deel van de Houtribdijk en de zandige buitenranden van de Marker Wadden.

Rapportages

In aanvulling op de meer technische basisrapportages zijn in het kader van de pilot ook een aantal guidelines opgesteld. Een aan het thema 'opschaling' gerelateerde uitwerking inzake de Business Case Zandige Voorlanden is het onderwerp van deze rapportage.

Voorliggende rapportage

Dit rapport is opgebouwd met de kennis die is ontwikkeld in de pilot Voorlandoplossing Houtribdijk en kijkt ook naar de wijze waarop de Houtribdijk op dit moment met zand wordt versterkt. De nadruk ligt dan ook op het IJsselmeergebied. Daarnaast wordt globaler gekeken naar mogelijke toepassingen in het Benedenrivierengebied en de Wadden.

Uitwerking

Geconcludeerd wordt dat een zandig voorland een alternatief voor conventionele vormen van dijkversterking kan zijn, als aan een aantal voorwaarden wordt voldaan.

Een zandig voorland kan een alternatief zijn voor dijken met een kruinhoogtetekort of een zwakke bekleding. Voor piping biedt een zandig voorland echter geen oplossing. In geval van macro-instabiliteit kan worden gedacht aan een duin-voor-dijk oplossing.

Onder typische omstandigheden worden zandige voorlanden kosteneffectief voor waterdiepten tot ongeveer 2,5 meter. Locatie-specifieke omstandigheden kunnen enige variatie op deze grenswaarde aanbrengen. Zo is bij een lagere aansluithoogte op de dijk een navenant grotere waterdiepte mogelijk, maar op plaatsen met veel zetting van de ondergrond juist niet.

Zandige voorlanden zijn alleen interessant in combinatie met een nabije zandwinput (< 5 km). Dit kan voor kleinere versterkingstrajecten een bestaande put zijn. Als er een nieuwe put nodig is, is dat alleen zinvol als een langer traject met zand wordt versterkt, vanwege de bijkomende kosten voor onderzoek en vergunningaanvraag.

De oriëntatie van een zandig voorland is bij voorkeur loodrecht op de dominante golfinval. In deze situaties speelt golfreductie een grote rol, maar blijft erosie als gevolg van netto langstransport beperkt. Dit zijn onder andere trajecten die op het zuidwesten zijn gelegen. Ook op meer luw gelegen trajecten is de inzet van een zandig voorland mogelijk, omdat dan het langstransport beperkt is en daarmee ook het onderhoud. De potentiële golfreductie door het zandig voorland is dan wel kleiner.

De bijdrage van een zandig voorland aan recreatie en natuurontwikkeling kan plaatselijk aanzienlijk zijn. De baten hiervan, in de vorm van vermeden kosten, leiden evenwel niet of zelden tot cofinanciering van een zandig voorland. De realisatie van een zandig voorland op plaatsen met een aanwijzing als habitatrichtlijngebied kan leiden tot significante negatieve effecten, die de inzet van een zandig voorland niet toelaten. Ook kan het leiden tot aanzienlijke extra kosten, vanwege verplichte natuurcompensatie. Dit speelt niet tot minder in vogelrichtlijngebieden.

Het goed op elkaar afstemmen van deze variabelen vraagt om een integraal ontwerpproces, waarbij slim met grond en natuurbeheerdoelstellingen wordt omgegaan, en waarbij van een natuur-positieve insteek wordt uitgegaan. De aanleg van voorlanden schept mogelijkheden, maar vraagt ook ruimte die vaak al wordt gebruikt of is bestemd. Ook van belang is de zeggenschap van de waterkeringbeheerder over het zandige voorland. Er moeten immers garanties worden geboden dat het voorland aanwezig blijft en ook bij maatgevende condities zijn beschermende functie kan blijven vervullen.

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	3
Inhoudsopgave	5
1 Inleiding	7
1.1 Kader.....	7
1.2 Overzicht rapportages	7
1.3 Opbouw rapport.....	7
1.4 Totstandkoming.....	7
2 Variabelen in de Business Case	8
2.1 Toepassingsmogelijkheden met een BC benadering	8
2.2 Zandig voorland, en oude en nieuwe normering	8
2.3 Business Case ; zandig voorland versus harde dijk	10
2.4 Bijkomende baten en cofinanciering.....	11
2.5 Voorlanden en Natura 2000-gebieden.....	11
2.6 De relatie met de beschikbaarheid van grond	12
3 Deelgebieden.....	13
3.1 Zandige voorlanden als alternatief	13
3.2 Het opstellen van de Business Case	13
3.3 IJsselmeergebied	14
3.3.1 Situatie.....	14
3.3.2 Perspectief voor toepassing in het IJsselmeergebied	17
3.4 Benedenrivierengebied.....	18
3.5 Waddengebied	19
4 Conclusies.....	21
Referenties	22
Bijlage A - IJsselmeergebied	24
1 Zandig voorland Pilot en asfaltoverlaging Houtribdijk	24
1.1 Kenmerken pilot en Houtribdijk	24
1.2 Overstap naar overstromingskans	25
1.3 Typen zandige versterkingen IJsselmeergebied	26
1.4 Vergelijking hard en zandig.....	27
2 Zachte versterking Houtribdijk	27
2.1 Kenmerken van het ontwerp duin tegen dijk	27
2.2 Belangrijke kosten variabelen	28
2.3 Kosten zandig voorland en asfaltoverlaging.....	30
3 Harde versterking Houtribdijk	31
3.1 Kenmerken asfaltoverlaging.....	31
3.2 Kenmerken versterking met stenen.....	33
4 Vergelijking duin tegen dijk en overlaging Houtribdijk.....	34

5	Vergelijking met andere typen zandig voorland.....	36
5.1	Gekozen oplossing.....	36
5.2	Kosten van onderhoud.....	38
5.3	Effect van baten.....	39
6	Conclusies situatie Houtribdijk.....	40
6.1	Inleiding.....	40
6.2	Kosten-effectiviteitsvergelijking situatie Houtribdijk (duin tegen dijk).....	40
6.3	Bijkomende baten situatie Houtribdijk.....	42
6.4	De ontwikkeling van een Business Case.....	43
7	Extrapolatie naar andere trajecten IJsselmeergebied.....	43
7.1	Versterkingsopgave.....	43
7.2	Kansrijkheid op basis van potentiële golfreductie.....	46
7.3	Kansrijkheid op basis van waterdiepte en beschikbaarheid van zand.....	46
7.4	In vergelijking met andere vormen van versterking.....	47
7.5	In geval van bijkomende baten.....	47
Bijlage B - Benedenrivierengebied		49
1	Inleiding.....	49
1.1	Algemene karakteristiek.....	49
1.2	Versterkingsopgave.....	49
1.3	Status als Natura 2000-gebied.....	50
1.4	Beschikbaarheid van grond.....	52
2	De Business Case.....	52
Bijlage C - Intergetijdegebieden		54
1	Inleiding.....	54
1.1	Algemene karakteristiek.....	54
1.2	Versterkingsopgave intergetijdegebied.....	55
1.3	Mogelijke potentiële trajecten.....	56
1.4	Status als habitatrichtlijn gebied.....	57
1.5	Beschikbaarheid van grond.....	59
2	Inzet van voorlanden/kwelders.....	59
2.1	Bestaande voorbeelden.....	59
2.2	Mogelijke vormen van een kweldervoorland.....	60
3	Kosten en baten van kweldervoorland.....	62
3.1	De kosten.....	62
3.2	De baten.....	64
3.3	De Business Case.....	64

1 Inleiding

1.1 Kader

De inmiddels afgeronde pilot voorlandoplossing Houtribdijk, bestaande uit de aanleg van een proefsectie met een voor de dijk gelegen zandaanvulling inclusief monitoringsprogramma, data-analyse en het opstellen van toets- en ontwerptools, was expliciet gericht op het bijdragen aan het sneller en beter onderbouwd kunnen realiseren van zandige versterkingswerken voor met name de belastingomstandigheden voor de grotere meren. De (tussen)resultaten van deze pilot hebben hun toepassing reeds gevonden in zowel lopende en komende HWBP-projecten. Voorbeeld daarvan is de dijkversterking van de Markermeerdijken tussen Hoorn en Edam waarvan een deel van de versterkingsoplossing bestaat uit een zandige versterking (de zogenaamde oeverdijk). Ook is de in de pilot opgedane kennis gebruikt voor de dimensionering van de zandige versterking van het westelijke deel van de Houtribdijk en de zandige buitenranden van de compartimenten van de Marker Wadden.

1.2 Overzicht rapportages

In aanvulling op de meer technische basisrapportages zijn in het kader van de pilot ook een aantal guidelines opgesteld. In een eerder stadium zijn hiertoe reeds guidelines voor vergunningen en aanleg opgeleverd. Als afronding van het project komen ook een guideline Beheer en Onderhoud (EcoShape/Deltares, 2018a), een guideline Ontwerp en beoordeling van dijk-voorlandssystemen (EcoShape/HKV, 2018) en een notitie inzake de Business Case Zandige vooroevers (EcoShape/RHDHV, 2018) beschikbaar.

Deze laatste, aan het thema 'Opschaling' gerelateerde uitwerking, is het onderwerp van de voorliggende rapportage. Dit rapport is opgebouwd vanuit de kennis die ontwikkeld is met de pilot van EcoShape bij de Houtribdijk en kijkt daarbij ook naar de wijze waarop de Houtribdijk op dit moment met zand wordt versterkt. De nadruk ligt daarom ook op het IJsselmeergebied. Daarnaast wordt globaler gekeken naar de Wadden en het benedenriviereengebied.

1.3 Opbouw rapport

In aanvulling op de in de hoofdtekst gepresenteerde uitwerkingen zijn meer details over de genoemde drie gebieden samengebracht in de bijlagen van deze rapportage.

In Hoofdstuk 2 wordt eerst ingegaan op de inzet van een zandig voorland voor de situatie van de pilot en de Houtribdijk. Hierbij wordt gekeken naar de oplossing zoals die nu wordt gerealiseerd bij de versterking van de Houtribdijk, alsmede andere typen van zandige versterking die als voorland kunnen worden aangeduid. Een voor de bestaande dijk gebouwd duin die dient als nieuwe primaire kering valt buiten de scope van dit rapport.

Vanuit de situatie Houtribdijk wordt de mogelijke toepassing in het IJsselmeergebied verkend en vervolgens wordt ingegaan op de toepassing van kwelders in het intergetijdegebied, en vooral de Wadden, en van gorsen in het benedenriviereengebied, en vooral de situatie Haringvliet. De resultaten van deze uitwerkingen zijn samengebracht in Hoofdstuk 3 van deze rapportage. In de bijlagen bij deze rapportage is de toepassing van voorlanden voor deze deelgebieden nog verder uitgewerkt.

Tot slot zijn in Hoofdstuk 4 de voornaamste conclusies van deze uitwerkingen samengebracht.

1.4 Totstandkoming

Dit rapport is opgesteld door J. Fiselier (RHDHV). De review werd verzorgd door H. Senhorst (RWS) en H. Steetzel (Arcadis). Laatstgenoemde was als projectmanager van de Pilot Houtribdijk ook verantwoordelijk voor het uniformeren van de verschillende guidelines.

2 Variabelen in de Business Case

2.1 Toepassingsmogelijkheden met een BC benadering

Sedert enkele jaren wordt aan de Houtribdijk onderzoek gedaan naar de inzet van een zandig voorland als een manier om de dijk te versterken. De hiervoor opgezette pilot van EcoShape heeft veel waardevolle informatie opgeleverd aangaande de werking van een dergelijke type voorland.

Dit rapport gaat in op de toepassingsmogelijkheden voor (zandige) voorlanden. Er wordt daarbij een Business Case (BC) benadering gevolgd. Hierbij wordt in brede zin gekeken naar de kosten, de variabelen die deze kosten bepalen alsmede naar de baten van het inzetten van een dergelijke oplossing vooral voor natuur en recreatie.

De invalshoek is daarbij de hoogwaterveiligheid, met eventueel meekoppelen van andere functies en eventuele kostendragers.

2.2 Zandig voorland, en oude en nieuwe normering

Conventionele dijken zijn (meestal) steil, bekleed met stenen en hebben een kruinhoogte die veelal nog maar een beperkte golfoverslag toelaat bij maatgevende condities. Werd in het verleden 0,1 tot 1 l/s/m¹ toelaatbaar geacht voor een gronddijk, tegenwoordig wordt ook al ontworpen op 5 tot 10 l/s/m¹. Door golfploop is de kruinhoogte ver boven ontwerppeil gelegen.

Conventionele dijken kennen overigens meerdere faalmechanismen. De kruin kan onvoldoende hoog zijn, de bekleding niet sterk genoeg, het dijklichaam kan instabiel zijn, of er is een kans op ondermijning door piping. De versterking van een bestaande dijk vraagt vrijwel altijd een aanpassing van het dwarsprofiel en vaak ook een nieuwe bekleding. Beide aanpassingen zijn duur en ook een kleinere aanpassing leidt daarbij al tot aanzienlijke kosten.

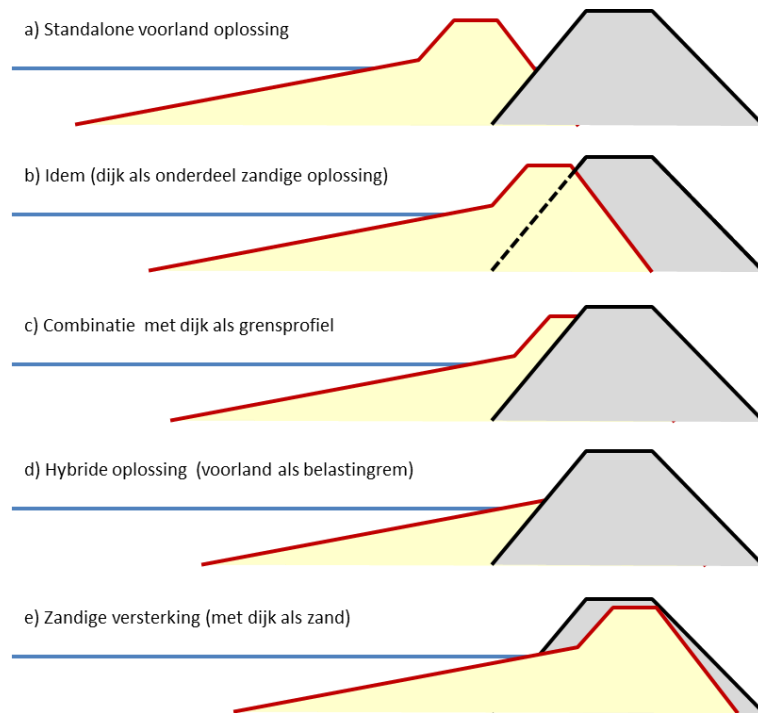
Door het steile talud is sprake van een onnatuurlijke abrupte overgang van land naar water. Een van nature aanwezige gradiënt in waterplanten en oevervegetatie ontbreekt daarbij dan ook. Wel kan de steenbestorting aan de voet van de dijk van belang zijn als paaihabitat voor bijvoorbeeld Spiering, en als rustplaats voor andere vissoorten, waaronder de Rivierdonderkop, hoewel deze laatste beschermde soort al grotendeels lijkt te zijn verdrongen door de Kaspische Grondel.

Een zandig voorland is een flauw oplopende oever waarop golven geleidelijk breken. De oever biedt, ingeval van beperkte golfaanval, een goede ondergrond voor de ontwikkeling van water- en oevervegetatie. Aanpassingen die nodig kunnen zijn vanwege strengere normen, nieuwe inzichten en dergelijke kunnen eenvoudig worden doorgevoerd door zand bij te plaatsen. De veel flauwere oever vraagt wel veel zand. Afhankelijk van de ligging kan ook het benodigde onderhoud, in de vorm van zandsuppleties, aanzienlijk zijn.

Zandige voorlanden zijn er in verschillende vormen (zie Figuur 1). Zo kan er voldoende zand worden aangelegd om te voorkomen dat de golven het oorspronkelijke talud van de dijk raken. Deze 'duin tegen dijk' oplossing is het uitgangspunt voor de zandige versterking van het westelijke deel van de Houtribdijk. Men kan ook een waterkerend duin voor de bestaande kering plaatsen (afbeelding a) in figuur). Dit is een oplossing die in de vorm van de zogenaamde oeverdijk gestalte krijgt voor de kust van Noord-Holland.

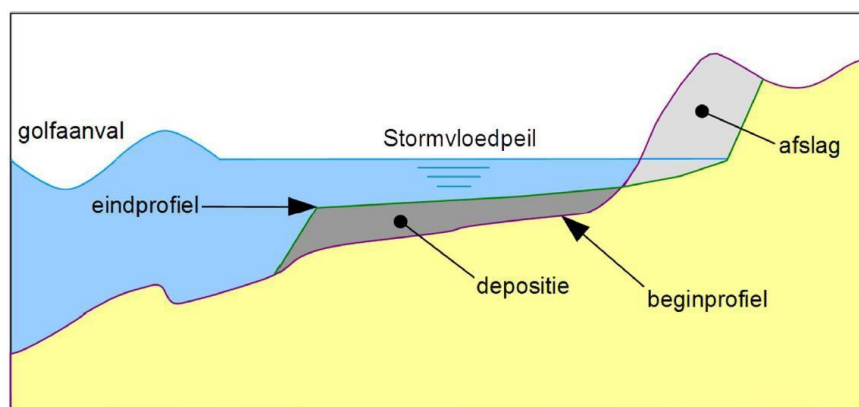
In voornoemde vormen doet het zand al het werk, in de zin dat zand het enige contactvlak met de golven vormt. Men kan echter ook een hybride oplossing ontwerpen waarbij het zandig voorland vooral dient voor een voldoende reductie van de golfaanval, dusdanig dat een in principe te lage kruin niet hoeft te worden opgehoogd, of een te zwakke steenbekleding niet hoeft te worden vervangen. De gevraagde golfreductie door het zand is in het geval van een hybride oplossing kleiner en daarom is ook minder zand nodig om deze oplossing te kunnen realiseren. Voorwaarde is wel dat de bekleding op de al aanwezige dijk, voldoende reststerkte heeft. In dit geval wordt gesproken van een golfreducerend voorland (afbeelding d) in Figuur 1).

Business Case Zandige Voorlanden



Figuur 1 Verschillende typen versterking met zand. (Uit: Pilot voorlandoplossing Houtribdijk. Ontwerp, uitvoering, monitoring en resultaten, EcoShape 2018).

Al deze voorbeelden gaan uit van het oude normeringsdenken, waarin de integriteit van de dijk, als grondlichaam, en ook van de steenbekleding, gewaarborgd dient te zijn. In de huidige normering wordt gekeken naar de kans op falen, in de zin dat gekeken wordt naar een doorbraak van het dijklichaam. Het wegslaan van de bekleding en de erosie van het dijklichaam zijn in principe toegestaan, voor zover dat niet leidt tot een vroegtijdige doorbraak. In de huidige normering doet de grond van het dijklichaam dus mee in het bepalen van de positie van de afslaglijn gedurende maatgevende condities (zie Figuur 2). Achter deze afslaglijn dient een restvolume aanwezig te zijn dat doorbraak in principe nog kan voorkomen. Aangezien het volume in een bestaande dijk al aanzienlijk kan zijn, kan met wat extra zand in de vorm van een voorland vaak al een volledige oplossing met de gevraagde maximale kans op falen worden gemaakt. Deze hybride wordt aangeduid als 'duin in dijk'.



Figuur 2 Schematisch figuur voor met de afslaglijn in een dwarsprofiel met een duin (Deltares, 2015).

De ultieme 'duin in dijk' (afbeelding e) in Figuur 1) heeft geen zandig voorland nodig, omdat het volume in de bestaande dijk al afdoende is.

Er is echter geen ervaring en ook geen consensus aangaande dit type. Bovendien moeten veel aannames worden gedaan voor wat betreft de reststerkte van de bekleding, de eigenschappen van het kernmateriaal, de invloed van interne structuren, zoals bijvoorbeeld een keileemwand, op de afslag. Daarbij is het bovendien mogelijk dat het

tekort aan zand overeen kan komen met wat aan voorland aanwezig zou moeten zijn ingeval wordt uitgegaan van een golfreducerend voorland. Voor dit rapport is daarom niet meer naar een 'duin in dijk' type gekeken.

Bij het bepalen van de Business Case voor een zandig voorland is de functie van het voorland, als waterkerend duin, als afslagzone voor de dijk, als hybride voor het voldoende verlagen van de golfhoogte of als aanvullend volume om een doorbraak te voorkomen dus essentieel.

Welke type het beste past hangt overigens niet alleen af van de overgang van de oude naar de huidige normering. Een waterkerend duin kan nog steeds een voor de hand liggende oplossing zijn, ingeval er sprake is van grote macro-instabiliteit van het bestaande dijklichaam. Een hybride vorm is misschien minder passend als sprake is van bekleding van waterasfaltbeton aan het einde van zijn levensduur en met erg hoge onderhoudskosten. Een duin in dijk oplossing ligt niet voor de hand als er kans is op het afschuiven van het gehele dijklichaam, dus ingeval macro-instabiliteit het belangrijkste faalmechanisme is.

2.3 Business Case ; zandig voorland versus harde dijk

De Business Case voor een zandig voorland is relevant als een zandig voorland een betere oplossing is dan het regulier (hard) versterken van de bestaande dijk. Een betere oplossing kan een zandig voorland zijn dat kosten-efficiënter is voor het waarborgen van de veiligheid, maar ook een zandig voorland dat misschien wel even duur of zelfs iets duurder is, maar daarnaast nog aanvullende maatschappelijke baten heeft, ook als die niet direct tot een vermindering in de kosten van aanleg en onderhoud leiden.

De kosten van een zandig voorland worden vooral bepaald door de waterdiepte, het maximaal benodigde niveau van het voorland, de oriëntatie op het inkomende golfveld en de beschikbaarheid van zand op korte afstand en daarmee de kosten per m³ ophoogmateriaal. De bandbreedte in kosten voor een zandig voorland tussen de meest gunstige en meest ongunstige locatie is meer dan een factor 10. Ook de kosten die voor een conventionele versterking moeten worden gemaakt kennen een grote bandbreedte, maar deze is wel veel minder groot.

Het vereiste niveau van het voorland hangt vooral af van de minimaal vereiste golfreductie in relatie tot de ontwerpwaterstand. Bij een 'duin in dijk' wordt aangesloten op de ontwerpwaterstand, bij een hybride kan deze daar ver onder liggen. Schuin invallende golven kunnen leiden tot meer erosie, maar als een zandig voorland onder de waterlijn kan worden aangelegd dan kunnen de onderhoudskosten sterk worden beperkt, omdat dan jaargemiddelde golfcondities dan tot veel minder langstransport leiden.

Uit het voorstaande komt ook naar voren dat er altijd sprake is van een vergelijking met een conventionele oplossing. De huidige status van de dijk en de belangrijkste faalmechanismen en daaruit voortvloeiende conventionele wijze van versterking spelen evengoed een rol. Er zijn situaties waarin de conventionele versterking van een bestaande dijk, maar een verhoudingsgewijs beperkte ingreep vereist. In de meeste gevallen is dat echter niet zo, en leidt een beperkte aanpassing al dat aanzienlijke kosten.

Mede door het laatste is het ook zinvol te kijken naar de kans op hernieuwde aanpassingen en daarmee samenhangende kosten. Gezien onze ervaring met dijkversterkingen is deze kans groot in geval dijken welke aan het randje, sober en doelmatig worden ontworpen en dus elk nieuw inzicht of aanscherping van de norm al om een aanpassing vraagt. Zo zijn er in Nederland vrijwel geen dijken die hun gehele technische levensduur zonder een enkele ingreep uitdienen. De kans is ook weer groter op plaatsen waar de voorspelling van hydraulische condities onzeker is, bijvoorbeeld omdat zij afhangt van onzekerheden in zeespiegelstijging of rivierafvoer, of sterk bepaald wordt door een ingewikkelde combinatie van onzekerheden. Een voorbeeld van het laatste is bijvoorbeeld de grote rol die de stormduur speelt in het maatgevende ontwerppeil in het benedenriviereengebied.

Een zandig voorland is makkelijk aan te passen, een kwaliteit die dus zwaarder weegt op plaatsen waar er grotere onzekerheden gelden ten aanzien van de eisen die aan een kering in de toekomst nog zullen worden gesteld. Er zijn echter ook vormen van versterking die veel robuuster zijn dan nodig, zoals een asfaltoverlaging. Een asfaltoverlaging bestaat uit een laag breuksteen, orde 0,35 meter dik, waarbij de ruimte tussen de stenen wordt volgegoten met gietasfalt. Deze vorm van bekleding vraagt om een minimale laagdikte, wat doorgaans een dijk oplevert die zeer robuust is en die ook geen aanpassing behoeft bij enigszins zwaardere hydraulische randvoorwaarden. Het overlagen met asfalt kan echter alleen boven de waterlijn. Een met asfalt overgoten dijk is

daarom afhankelijk van een deugdelijk functionerende teenbestorting en deze laatste kan dan ook de zwakkere schakel zijn. Evenzo is een asfaltdijk wel bestand tegen een stootje, maar bij een te lage kruin kan de overslag van water op den duur het kritieke punt zijn en om een verhoging van de kruin of omvangrijke waterhuishoudkundige maatregelen in het achterland vragen. Bij een dam, zoals de Houtribdijk, speelt dit minder, want bij overslag belandt water gewoon in het achterliggende meer.

Al met al zijn er dus veel variabelen die bepalen of een zandig voorland de betere oplossing is en veel van deze variabelen zijn bovendien erg plaatsspecifiek. Het is in deze verkenning van het perspectief van een zandig voorland als veiligheidsoplossing evenwel niet mogelijk al deze variabelen in beeld en in verband met elkaar te brengen. De beschrijving van de Business Case is daarom beperkt tot de belangrijkste variabelen.

Dat zijn aan de zijde van de zandige oplossing:

- 1) de *functie* (duin voor dijk, afslaglijn voor dijk, hybride of duin in dijk),
- 2) de voor de dijk aanwezige *waterdiepte* omdat deze bepalend is voor het volume dat moet worden aangebracht en de kosten van het zand, die weer afhangen van de nabijheid van een zandinput en de opbouw van de ondergrond.
- 3) de aangenomen *taludhelling of minimale breedte* die het voorland moet hebben om golven afdoende te laten breken.
- 4) Daarnaast speelt ook de mogelijke verplichting van natuurcompensatie een grote rol en of handig kan worden gecombineerd met *andere functies*.

Aan de zijde van conventionele oplossing wordt vooral gekeken naar het type harde versterking (asfaltoverlaging of stenen) en of daarbij ook de teenbestorting als belangrijke kostenpost moet worden meegenomen.

2.4 Bijkomende baten en cofinanciering

Een zandig voorland kan bijkomende baten hebben, als recreatiestrand of als bijdrage aan Natura 2000- en KRW-doelen, doordat land-water overgangen worden aangelegd.

De bijkomende baten kunnen substantieel zijn uitgedrukt in vermeden kosten, als mag worden verondersteld dat een recreatiestrand of dat land-waterovergangen ook zouden worden aangelegd los van de dijkversterking. De vermeden kosten kunnen orde 1/3-deel tot de helft van de totale kosten bedragen. Als deze vermeden kosten kunnen worden ingeboekt als cofinanciering dan is een zandig voorland op veel meer locaties een meer kosteneffectieve oplossing dan een conventionele harde versterking.

De praktijk leert echter dat er vrijwel nooit sprake is van een cofinanciering vanuit andere functies (recreatiestrand, Natura 2000 of KRW) aan de versterking, maar dat deze cofinanciering vooral wordt ingezet om aanvullende inrichting mogelijk te maken, zoals een ontsluiting en parkeervoorzieningen, of voor extra natuur. Dit kan ertoe leiden dat op plaatsen waar een zandig voorland een maatschappelijke betere oplossing vormt, daar toch niet voor kan worden gekozen, als er geen formele cofinanciering vanuit andere functies beschikbaar komt, en het budget van het HoogWaterBeschermsProgramma (HWBP) leidend is voor de keuze van de meest sobere en doelmatige en dus meest kosteneffectieve oplossing.

2.5 Voorlanden en Natura 2000-gebieden

In het Waddengebied en ook in andere intergetijdegebieden kan met de aanleg van een kwelder of het deels verhogen van het bestaande kwelderniveau op meerdere plaatsen een kosteneffectieve oplossing worden gevonden. Echter alle intergetijdegebieden vallen onder de Natura 2000-habitatrichtlijn. Verhoging van bestaande kwelders of de aanleg van nieuwe kwelders leidt tot negatieve effecten, c.q. verlies van beschermde habitats. Er moet daarom altijd rekening worden gehouden met een compensatieverplichting, bij voorkeur binnendijs. Ook bestaat de kans dat een alternatief waarbij een kwelderwal of nieuwe kwelder wordt aangelegd formeel niet door de ADC-toets komt, omdat er redelijke alternatieven voor versterking, in de vorm van een conventionele versterking, beschikbaar zijn die niet tot negatieve effecten op beschermde habitats leiden.

Deze situatie doet zich ook voor op veel plaatsen in het benedenrivierengebied. Zo zijn de bestaande voorlanden van het Haringvliet ook allemaal onder de Habitatrichtlijn gebracht. Een aanpassing van dit voorland met oog op

een grotere golfreductie, bijvoorbeeld door ophogen of door het aanleggen van meer bos, leidt tot verlies aan beschermde, meestal vochtige habitats. Ook in dit geval is er sprake van een compensatieverplichting maar ook van het risico dat een aanpassing van bestaande beschermde voorlanden niet door een ADC-toets kan komen, omdat er redelijke alternatieven beschikbaar zijn. Dit betekent dat in eerste instantie moet worden gekeken naar de aanleg van voorlanden op plaatsen waar deze nog niet aanwezig en beschermd zijn. Dit leidt op veel plaatsen wel tot grote kosten, omdat de aanleg veelal op dieper water plaats moet vinden en waarschijnlijk ook afdoende beschermd moet worden.

In het IJsselmeergebied is sprake van een aanwijzing als Natura 2000-vogelrichtlijn gebied. Deze aanwijzing biedt meer mogelijkheden, omdat er in formele zin geen sprake is van beschermde habitats. Alternatieven met zandige voorlanden, die per saldo de foerageermogelijkheden van beschermde vogels vergroten, zijn dan wel mogelijk. Een uitzondering vormen de voorlanden langs de Friese kust, die wel onder de habitatrichtlijn zijn gebracht. Wel moet ook bij een aanwijzing als Vogelrichtlijn tijdens de aanleg rekening worden gehouden met beperkingen die worden opgelegd aan de uitvoering, o.a. vanwege de mogelijke verstoring van ruiende vogels of migrerende vleermuizen. Deze beperkingen kunnen leiden tot aanzienlijke kostenverhogingen, bijvoorbeeld omdat niet 24/7 gewerkt kan worden of bepaalde perioden helemaal zijn uitgesloten.

2.6 De relatie met de beschikbaarheid van grond

De realisatie van een zandig voorland vraagt veel grond voor de aanleg. De prijs van zand is daarom een doorslaggevende factor. Uit de analyses blijkt dan ook dat voor het IJsselmeergebied een zandwinning binnen enkele kilometers van het werk als een voorwaarde kan worden gezien voor het krijgen van een kosteneffectieve oplossing. Als de grond van verder moet komen, nemen de kosten al gauw met een factor drie toe, en is een zandig voorland zelden nog de meest kosteneffectieve oplossing. In het IJsselmeergebied ligt bruikbaar zand onder een Holocene deklaag van meerdere meters dikte. Deze deklaag is niet geschikt voor het bouwen van een voorland, maar wel voor natuurontwikkeling.

Ook in het Waddengebied is de beschikbaarheid van goedkope klei in de directe nabijheid van het werk doorslaggevend. Ook als de goedkopere categorie 2 klei van elders moet worden aangevoerd is het ophogen van een bestaande kwelder altijd duurder dan een conventionele oplossing. Er zijn beperkt mogelijkheden om klei direct van de bestaande kwelder te winnen, bijvoorbeeld daar waar de kwelder ook vanuit natuurbeheersoogpunt te hoog is gelegen en daarom is vergrast. Een andere mogelijkheid is het gebruik van klei door het afgraven van achter de dijk gelegen landbouwgrond. Vooral als hiermee een inrichting kan worden verkregen die een zeer rendabele vorm van brakwaterlandbouw of aquacultuur mogelijk maakt, of vrijwel kostenneutraal tot de vereiste natuurcompensatie kan leiden, ontstaan kansen voor de inzet van kwelders. Het aanleggen van nieuwe kwelders op dieper water is altijd duurder dan een conventionele oplossing. Dit komt vooral doordat vanwege de flauwe taluds meteen erg veel volume nodig is. Het stimuleren van kwelderaangroei op plaatsen waar een kwelder al in ontwikkeling is, biedt ook kansen voor een kosteneffectieve realisatie. Wel is hiervoor geduld nodig en moet zich een situatie voordoen waarbij de kwelder op hoogtij niveau voldoende is om verdere versterking onnodig te maken.

Voor intergetijdengebieden geldt dat een kosteneffectieve realisatie in principe mogelijk is als met stimuleringsmaatregelen de kwelder aan kan aanslibben tot op het gewenste niveau. Dit kost minder en heeft minder effecten op het natuurlijk milieu. Voorwaarde is wel dat gedurende de gehele levenscyclus kan worden voldaan aan de veiligheidseisen. Dit is in principe mogelijk als het kweldervoorland voor wat betreft de huidige voorwaarden voldoende hoog ligt en de toekomstige randvoorwaarden een kwelderniveau nodig maken die nog steeds onder het natuurlijke aanwasniveau is gelegen. Ook vraagt dit een toetsing aan een trendmatig verloop van de hydraulische randvoorwaarden, iets wat nu zeker niet gangbaar is.

3 Deelgebieden

3.1 Zandige voorlanden als alternatief

In de pilot van EcoShape is een zandige versterking in de vorm van een in zand aangelegd voorland beproefd voor de Houtribdijk als voorbeeld voor soortgelijke versterkingen in het IJsselmeergebied. In projectverband moet een zandig voorland gezien worden als een alternatief voor conventionele vormen van versterking, zoals een versterking met stenen of een asfaltoverlaging van een bestaande dijk.

Als onderdeel van de BwN Pilot EcoShape is ook gekeken of en onder welke voorwaarden een zandige vooroever c.q. versterking een alternatief vormt voor een conventionele versterking. Er is daarbij gekeken naar mogelijkheden voor toepassing in verschillende situaties:

- **Voor het IJsselmeergebied**, dit is de situatie van de grote meren, waarin sprake is van vaste peilen, een toename van de golfhoogte die gelijk opgaat met opwaaiing en ook een wind-gedreven circulaire stroming en transport. Dit is de situatie die in de BwN Pilot EcoShape is bekeken. Het is bovendien een gebied waarin zandige oplossingen op dit moment ontbreken en er weinig kennis is over het morfologisch gedrag, de mogelijke interactie tussen vegetatie en golfklimaat en ook over de mogelijke bijdrage van de vegetatie in de reductie van golven.
- **Voor intergetijdegebieden**, dit is een situatie met getij, waarbij al dan niet natuurlijke kwelders aanwezig zijn die in hoogte kunnen groeien tot net voorbij hoog water. Kwelders leiden tot golfreductie door de diepte beperkende werking van het hoger gelegen voorland wat nog wordt versterkt door de aanwezige kweldervegetatie. Of en in welke mate een kwelder een alternatief kan vormen voor een conventionele versterking hangt sterk af van de vraag of een kwelder tijdens maatgevend hoogwater leidt tot voldoende golfreductie of dat ze, ter voorkoming van een versterking van een dijk, eigenlijk hoger moet zijn gelegen.
- **Voor het benedenrivierengebied**, dit is vooral de situatie voor Haringvliet en Hollands Diep, maar ook de Noordwaard, waar bij hoogwater sprake is van een groot water oppervlak zodat ook de golf mede bepalend is voor het ontwerp van de dijk, vooral de kruinhoogte. De van nature aanwezige voorlanden zijn vaak oude kwelders, nabij de riviermonding, en gorsen en uiterwaarden meer stroomopwaarts. De hoogte van deze natuurlijke voorlanden is veel lager dan de ontwerpwaterstand tijdens maatgevende condities. De mogelijke inzet van natuurlijke voorlanden berust hier maar beperkt op de natuurlijke maaiveldhoogte en is vooral afhankelijk van opgaande vegetatie, zoals wilgen in een griend. Ook hier geldt dat het maaiveld verder kan worden opgehoogd, zoals ook is gedaan voor bijvoorbeeld het wilgenbos in Fort Steurgat, maar dat dit eigenlijk alleen goed mogelijk is op plaatsen waar dit niet tot opstuwung van de maatgevende afvoer leidt.

De nadruk in de voorliggende uitwerking ligt op zandige voorlanden, zoals deze thans worden ingezet voor de zandige versterking van de Houtribdijk. In intergetijdegebieden en in het benedenrivierengebied gaat het om voorlanden in klei, zoals kwelders en gorsen.

3.2 Het opstellen van de Business Case

De Business Case voor een (zandig) voorland wordt in HWBP verband vooral bepaald door de kosten (effectiviteit) van de oplossing in vergelijking met een gelijkwaardige conventionele dijkversterking. In het geval van het IJsselmeergebied gaat het daarbij om een versterking van een dijk met een stenen bekleding. Een (zandig) voorland kan afhankelijk van locatie, luwte en vorm van uitvoering ook bijkomende (potentiele) baten voor recreatie en natuur hebben. Deze baten worden in hoofdzaak kwalitatief beschouwd, maar kunnen soms ook op basis van vermeden kosten in Euro's worden gewaardeerd. Er zijn echter ook situaties waar de aanleg van een voorland tot extra kosten kan leiden vanwege vereiste natuurcompensatie.

De Business Case voor een (zandig) voorland kan voor een dijk met een veiligheidsprobleem dus op verschillende wijzen sluitend worden gemaakt:

- **Een (zandig) voorland is de meest kosteneffectieve oplossing voor de gevraagde versterking van de dijk.** Dit blijkt uit een vergelijking op basis van een raming, zoals de SSK (Standaard Systematiek Kostenraming), waarbij gekeken wordt naar initiële investeringen en levensloop kosten (LCC), doorgaans over een periode van 100 jaar. Een dergelijke LCC analyse wordt doorgaans gedaan door de kosten van onderhoud en eventuele herbouw over een langere periode mee te nemen. In een verdergaande analyse kan daarbij ook rekening worden gehouden met het functioneren van een oplossing onder meerdere toekomstscenario's en hun invloed op onderhoud en herbouw.
- **Een (zandig) voorland is de meest kosteneffectieve oplossing voor een combinatie van (beleids)doelstellingen,** waaronder naast waterveiligheid o.a. ook bijdragen aan recreatie en natuur. Ook dit kan blijken uit een raming omdat in geval van de andere (beleids)doelstellingen in dit geval sprake kan zijn van concrete financiële bijdragen op basis van vermeden kosten, ofwel de kosten die anders gemaakt moeten worden om deze andere (beleids)doelstellingen te kunnen halen. Voor individuele financiële bijdragen vanuit verschillende beleidslijnen worden daartoe vaak een afzonderlijke BC opgesteld, om te zien of de investeringen te rechtvaardigen zijn. In dit geval biedt een versterking met zand vaak de mogelijkheid om andere doelen te realiseren tegen lagere kosten.
- **Een (zandig) voorland is de maatschappelijk meest gunstige oplossing voor een combinatie van (beleids)doelstellingen.** Dit kan bijvoorbeeld blijken uit een MKBA, waarin een totaal beeld van kosten en baten wordt opgesteld, zonder dat voor alle geïdentificeerde baten ook zicht is op concrete financiële bijdragen, of vermeden kosten. Zo kunnen ecologische en waterkwaliteitsdoelen worden gediend, zonder dat daar concrete investeringen door andere partijen tegenover staan.
- **Een zandig voorland is de maatschappelijk meest gunstige oplossing voor een combinatie van publieke en private doelstellingen.** In aanvulling op het voorgaande is nu ook sprake van private partijen die investeren op grond van meestal een bedrijfseconomische analyse. Dit kan mogelijk de exploitatie van een winput zijn, maar ook het uitbaten van een horeca voorziening op of nabij een voor recreanten aantrekkelijke zandige vooroever. Het is mogelijk dat daarbij in aanvulling op een sober veiligheidsontwerp, aanpassingen worden gedaan zodat ook deze baten kunnen worden gegenereerd.

Uit het voorgaande blijkt dat een Business Case voor een zandig voorland in verschillende vormen kan worden opgesteld. De haalbaarheid van een (zandig) voorland kan in enkele gevallen dus door veel meer variabelen worden bepaald dan louter en alleen de bouw- en onderhoudskosten.

In principe is sprake van een vergelijking tussen verschillende alternatieven, een zandig voorland en een meer gangbare, conventionele wijze van versterken. De faalmechanismen waarop de dijk is afgekeurd spelen hierbij een grote rol, omdat deze mede de aard en ook kosten van een conventionele wijze van versterken bepalen. Deze faalmechanismen bepalen ook of een voorland een integrale of gedeeltelijke oplossing bieden voor de veiligheidsopgave.

3.3 IJsselmeergebied

3.3.1 Situatie

De EcoShape pilot vormt vooral een voorbeeld voor een zandig voorland in het IJsselmeergebied. Een zandige vooroever kan in het IJsselmeergebied een alternatief zijn voor conventionele dijkversterking om meerdere redenen.

Er zijn situaties waar een zandige vooroever een meer kosteneffectievere oplossing vormt. Dit is het geval waar de waterdiepte klein en het zand tegen lage kosten beschikbaar is en het verwachte onderhoud beperkt, maar waar conventionele versterking toch een omvangrijke en dure ingreep vormt. Uit de Business Case komt naar voren dat de zandprijs hierin een zeer grote rol speelt en dat in de meeste gevallen een zandig voorland als duin tegen dijk alleen kosteneffectiever kan zijn in geval er een zandwinput op korte afstand van het werk beschikbaar is. Mocht een hybride oplossing mogelijk zijn met een dito kleiner zandvolume dan is een zandig voorland eerder de meest

kosteneffectieve oplossing ook in geval van een iets grotere waterdiepte. Een put op korte afstand, of eventueel ook een te verdiepen vaargeul, is dan nog steeds nodig, om de zandprijs voldoende laag te houden.

IN KOSTEN ASFALT OVERLAGING					
		Diepte [m]			
		5	4	3	2
Directe kosten Euro/m					
Alleen asfalt overlaging	A	963	963	963	963
Asfalt en teenbestorting	B	1643	1558	1488	1348
Idem met deel hergebruik	C	1411	1355	1309	1217
IN EQUIVALENT VOLUME ZAND UITGEDRUKT (bij verschillende zandprijzen)					
Directe kosten/m3	1,25	A	770	770	770
		B	1314	1246	1190
		C	1129	1084	973
	2,5	A	385	385	385
		B	657	623	595
		C	565	542	524
	6	A	160	160	160
		B	274	260	225
		C	235	226	203
BENODIGD VOLUME ZANDIG VOORLAND ALS DUIN TEGEN DIJK					
Onderhoud	5	m3/m/j	100	100	100
Volume nodig		m3/m	1121	850	561
Uitgaande van een dijk met een kruinhoogte van 6,5 meter, een teen tot 3,5 meter beneden peil.					
Een zandig talud van 1 op 32, een ontwerpwaterstand van 2 meter boven peil en 15 tot 30% toeslag voor zetting e.d.					

Tabel 1 De directe kosten voor een asfaltoverlaging en een aanpassing van de teenbestorting bij verschillende waterdiepte en ook uitgedrukt in het volume aan zand dat bij verschillende zandprijzen, daarvoor gekocht kan worden. Daarnaast een schatting van het volume aan zand dat nodig is voor de aanleg van het zandige profiel uitgaande van beperkt onderhoud. De tabel is gebaseerd op een schematisch ontwerp zoals omschreven. Kleurencode: dondergroen zandig voorland goedkoper, licht groen zandig voorland in dezelfde orde van kosten.

In Tabel 1 zijn een asfaltoverlaging en een zandig voorland met elkaar vergeleken. Als variabelen zijn gebruikt de waterdiepte en de zandprijs. Deze laatste hangt af van de plaats van de winput en welke kosten gemaakt moeten worden om deze te ontsluiten.

Alleen als het zand goedkoop is, kan een zandige versterking, type duin tegen dijk, kosteneffectiever zijn dan een asfaltoverlaging in geval ook de teenbestorting moet worden vervangen. Als vervanging van de teenbestorting niet nodig is of er kan veel breuksteen worden hergebruikt, dan is een asfaltoverlaging waarschijnlijk ook in dit geval bij grotere waterdiepte kosteneffectiever. Bij een zandprijs van 6 Euro/m³, dus ingeval zand van ver moet worden gehaald, is een zandig voorland, type duin tegen dijk, niet de meest kosteneffectieve oplossing.

We treffen bijna overal in het IJsselmeergebied eerst een Holocene deklaag aan. Een directe kostprijs van 1,25 Euro/m³ voor het aanbrengen van zand, rechtstreeks met een cutter of steekzuiger, is daarom niet reëel, omdat deze kostprijs exclusief de kosten voor het verwijderen van de Holocene deklaag is. De minimale kostprijs ligt eerder op 2 tot 2,5 Euro/m³. Bij een kostprijs van 2,5 Euro/m³ is een zandige vooroever alleen nog goedkoper als de waterdiepte voor dijk niet groter is dan 3 meter en ook de verwachte zetting en inpassing van het volume beperkt zijn, c.q. niet veel extra volume en kosten vragen. Dit is in feite de situatie op het Enkhuizerzand waar de waterdiepte grotendeels tussen de 2 en 3 meter schommelt en ook de zetting op de meeste plaatsen beperkt is.

Als alle dekgrond effectief kan worden ingezet op korte afstand ten behoeve van natuurontwikkeling, dan zou men de daarmee samenhangende kosten kunnen zien als vermeden (maatschappelijke) kosten, en vormt de lagere zandprijs met 1,25 Euro/m aan directe kosten, de basis voor de vergelijking. In dat geval vormt een zandig voorland (duin tegen dijk) een goed alternatief ook bij een grotere waterdiepte. Dit is een valide redenering als er al natuur of KRW maatregelen zijn geïdentificeerd en begroot, die als onderdeel van de versterking kunnen worden gerealiseerd. Voor enkele van dit type maatregelen, zoals de aanleg van land water overgangen, geldt dat een aanleg in combinatie met versterking ook tot lagere realisatiekosten zal leiden.

Als zand niet nabij gewonnen kan worden, bijvoorbeeld omdat geen vergunning kan worden verkregen, zoals mogelijk op het IJsselmeer, dan is een asfaltoverlaging altijd goedkoper ook als de teenbestorting moet worden aangepast.

In voornoemd voorbeeld is uitgegaan van beperkt onderhoud, iets wat reëel is omdat het tracé op het Enkhuizerzand niet erg ongunstig is gelegen. Daarbij wordt in het ontwerp van de zandige versterking van de HRD dijk ook gebruik gemaakt van vooroeverdammen die het onderhoud ook aan de Markermeerzijde fors beperken. Bij een forse toename van het onderhoud verliest een zandige vooroever het ook op ondieper water van een asfaltoverlaging ook als een vervanging van de teenbestorting nodig is.

De diepte blijkt een doorslaggevende variabele naast de zandprijs. Dit komt mede doordat bij een toenemende diepte de teenbestorting niet evenredig meer toeneemt, omdat deze maar tot een bepaalde diepte wordt doorgezet.

Nu is een asfaltoverlaging een erg kosteneffectieve oplossing die niet altijd om landschappelijke of andere redenen gewenst is. Het vervangen van de bestaande bekleding door een gezette steenbekleding is veel duurder. In geval deze vergelijking wordt gemaakt dan is ook tot een waterdiepte van 4 meter een zandige versterking in potentie kosteneffectiever onder voorbehoud dat zand in de directe omgeving kan worden gewonnen en het onderhoud c.q. de erosie van het profiel niet te groot is.

Andere overwegingen of bijkomende redenen om te kiezen voor een zandige vooroever hebben te maken met de bijdrage die een zandig voorland kan leveren aan natuur en recreatie. De bijdrage aan natuur bestaat uit land-waterovergangen maar ook wat de inzet van Holocene klei, die vrijkomt bij lokale zandwinning, aan natuurontwikkeling mogelijk maakt. Voor Markermeer en IJsselmeer geldt dat deze vorm van natuurontwikkeling nodig wordt geacht om de Natura 2000-beheerdoelstelling van deze wateren te halen. Ook de zandwinning kan daarin een bijdrage leveren, als slibvang en als koel water refugium voor vissen in warme zomers. Voor het Markermeer is dit beleidsmatig verankerd in TBES (ToekomstBestendigEcoSysteem).

De kaderrichtlijn water (KRW) vraagt ook om land-waterovergangen voor het halen van de goede ecologische toestand van deze meren. In theorie is daarom sprake van aanzienlijke vermeden kosten die qua orde grootte tot 1/3-deel van de kosten van een zandig voorland bepalen ingeval van een duin-tegen-dijk oplossing. In het geval van een hybride oplossing kan meer dan de helft van de aanlegkosten als vermeden kosten worden aangemerkt. Dit is de theorie, in de praktijk zijn deze vermeden kosten niet altijd beschikbaar als bijkomende financiering, omdat ze niet zijn gebudgetteerd, of alleen maar worden aangewend als aanvullende investeringen, als de keuze voor een zandige oplossing al is gemaakt. Dit laatste kan er toe leiden dat op basis van kostenoverwegingen, bijvoorbeeld in HWBP-verband, gekozen wordt voor een harde versterking, terwijl op basis van vermeden kosten in natuurontwikkeling toch een zandig voorland meer voor de hand kan liggen. In die zin is het van belang dat nut en noodzaak van nodige land water overgangen afdoende is onderkend, en hun inzet gekwantificeerd en bij voorkeur ook al gebudgetteerd zijn.

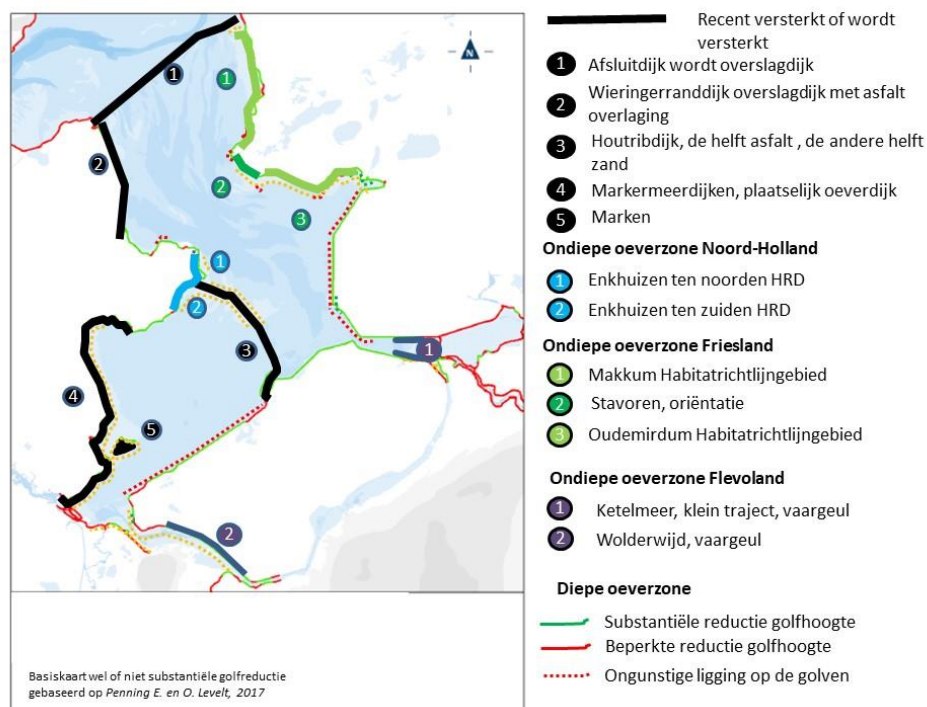
Zandige vooroevers hebben de vorm van een strand op plaatsen waar de golfaanval te groot is voor de ontwikkeling van oevervegetatie. Natuurstranden vormen een bijzonder en zeldzaam habitat om het Markermeer waar specifieke vogelsoorten kunnen foerageren. Deze vogelsoorten zijn echter in Natura 2000-verband meestal niet aangewezen als beheersdoel. Een strand heeft ook recreatieve waarde, vooral als dit binnen bereik van de stad is gelegen, of anderszins goed is ontsloten. Ook in dit geval kan sprake zijn van vermeden kosten, ingeval een dergelijk strand ook los van de versterking aangelegd zou worden, en dus een optie voor cofinanciering. Deze is in het kader van de versterking van de Houtribdijk ook verkend, maar resulteerde niet in de keuze voor een zandige versterking met stranden nabij Lelystad. Door de waterdiepte in combinatie met de ongunstige oriëntatie op de golven was een zandige oplossing hier veel duurder dan een harde versterking. Op andere plaatsen, met een gunstige oriëntatie op de golven, zoals bij de uitwerking van de oeverdijk nabij Hoorn, kan dit wel mogelijk zijn. Echter ook in dit geval geldt dat deze meerwaarde zelden leidt tot een directe bijdrage in de kosten van versterking en dat de cofinanciering zich eerder richt op de bekostiging van de ontsluiting en recreatieve voorzieningen.

Een zandige oever is gemakkelijk aan te passen aan een eventuele verandering in hydraulische randvoorwaarden. Als deze toenemen, volstaat een kleine ophoging van het profiel met zand. Bij een conventionele oplossing met een harde bekleding is dan al vaak een veel duurdere ingreep nodig. Een uitzondering vormt de versterking met een asfaltoverlaging. Deze is zeer robuust en volstaat nog steeds ook bij een forse toename in hydraulische condities, onder voorwaarde dat ook de teenbestorting voldoende robuust is. Wordt de Business Case opgesteld in vergelijking met een asfaltoverlaging, dan heeft een zandige oplossing in de zin van aanpasbaarheid geen duidelijke voordelen. Doet men een vergelijking met een bekleding met stenen, dan kan dit wel een rol spelen.

3.3.2 Perspectief voor toepassing in het IJsselmeergebied

Op dit moment wordt gewerkt aan de Houtribdijk en aan de Markermeerdijken. Naar verwachting levert de 4^e toetsingsronde nieuwe opgaven op in het IJsselmeergebied. Waar de te versterken trajecten zijn gelegen is nu nog niet duidelijk, want deze toetsronde loopt nog en deze vindt zijn afronding in de periode 2020-2023.

De consequentie analyse laat zien dat vooral de dijken langs Flevoland mogelijk een kruinhoogtetekort hebben. Een reductie van de golf door een zandig voorland kan dan een oplossing bieden. Deze dijken liggen echter wel op diep water en hebben een ongunstige oriëntatie op het golfveld, waardoor mogelijk rekening moet worden gehouden met fors onderhoud. Bij een beperkt kruinhoogtetekort kan waarschijnlijk worden volstaan met een hybride met een minder groot zandvolume, die mogelijk al voldoet bij een ligging beneden NAP. Vooral bij een ligging beneden de NAP-1 meter zijn naar verwachting de onderhoudskosten ook veel beperkter. Het beperken van de onderhoudskosten is in dit geval bepalend voor het perspectief van een zandige oplossing.



Figuur 3 Indicatie kansrijke trajecten voor toepassing van (zandige) voorlanden.

Als wordt uitgegaan dat de meest kansrijke locaties of op ondiep water zijn gelegen (bij voorkeur minder dan 2,5-3 meter, inclusief zetting) of op plaatsen zijn gelegen waar de reductie van de golfhoogte, door een zandig voorland, een forse bijdrage kan leveren of (als derde optie) op lange rechte sectie zijn gelegen met beperkt langstransport met oog op onderhoud, dan leidt dit tot het volgende beeld:

- **Recent versterkt of wordt versterkt.** de Afsluitdijk wordt als overslagdijk versterkt en de Wieringerrandmeerdijk is met asfalt versterkt. Deze zijn in hoofdzaak op dieper water gelegen, dus de mogelijkheden voor de inzet van een zandig voorland zijn dan al kleiner. De dijkversterkingen op de ondiepere delen voor de Noord-Hollandse kust en het Enkhuizerzand worden deels al met een zandig voorland (Houtribdijk) of met een oeverdijk (Markermeerdijken) versterkt. Op deze trajecten wordt dus vaak al gebruik gemaakt van zandige voorland en is er geen perspectief op nieuwe toepassingen.
- **Ondiepe oeverzone Noord-Holland.** De dijken aan ondiep water voor de Noord-Hollandse kust zijn dus grotendeels al (recent) versterkt. Een uitzondering vormen van enkele trajecten aan weerszijden van de Houtribdijk nabij Enkhuizen op de uitlopers van het Enkhuizerzand. Het traject ten noorden van de Houtribdijk ligt daarbij gunstiger want minder op de wind.

- **Ondiepe oeverzone Friesland:** voor de Friese kust zijn dijken ook aan ondieper water gelegen. De meeste van deze ondiepten zijn aangewezen als habitatrichtlijn gebied. Er moet daarom een onderscheid worden gemaakt naar:
 - *Trajecten met een aanwijzing als habitatrichtlijngebied:* de waterdiepte is hier al zeer klein voor de dijk, vaak minder dan 1 meter, waar door het ophogen van het voorland weinig zand kost. Echter dit is alleen mogelijk als significant negatieve effecten kunnen worden uitgesloten en dit zal van geval tot geval moeten worden bekeken. Het gaat om de trajecten bij Makkum en Oudemirdum.
 - *Trajecten zonder een aanwijzing als habitatrichtlijngebied:* de waterdiepte is hier vaak wat groter waardoor kranswervelden en andere vormen van watervegetatie vaak ontbreken. Ook op deze trajecten kan men een voorland met maar weinig volume realiseren. Dit betreft o.a. het traject bij Stavoren. Nadeel hier is de gekromde kust en beperkte lengte waarover een zandig voorland zou kunnen worden ingezet.
- **Ondiepe oeverzone om Flevoland:** langs de randmeren komen enkele dijktrajecten voor die op ondiep water zijn gelegen. De mogelijke bijdrage van een zandig voorland aan de golfreductie is hier relatief beperkt. De nabij gelegen vaargeul kan de aanleg bemoeilijken of onmogelijk maken. Er zijn misschien mogelijkheden aan de aan het Eemmeer, Gooimeer en Wolderwijd.
- **Diepe oeverzone:** dit betreft trajecten waar de waterdiepte groter is dan 2,5 meter. Het gaat dan om een groot deel van de dijken om Flevoland en de Noordoostpolder. Veel van deze trajecten zijn ook ongunstig op de wind gelegen. De mogelijke inzet van een voorland hangt hier vooral af van de potentiële golfreductie van een enigszins lager gelegen voorland. Hierover bestaat nog een zekerheid. De op vele plaatsen langs Flevoland gelegen vaargeul is al wel grotendeels op diepte gebracht. In eerdere schetsen van TBES zijn ook ondiepten voor de dijk ter hoogte van de Oostvaarderplassen aangegeven, als een van de maatregelen voor het verbeteren van het ecosysteem functioneren van het Markermeer. Deze eerdere ideeën zijn niet beleidsmatig verankerd. Het is dus maar de vraag of via deze weg expliciete meerwaarde mogelijk is, die ook een kostendrager kan zijn.

Voorwaarde hierbij is wel dat het zand voor de aanleg lokaal kan worden gewonnen. Dit kan in het Markermeer door bij grotere volumes een eigen zandwininput te regelen of ook door plaatselijk nog gebruik te maken van de nieuwe zandwinputten die als gevolg van de aanleg van Marker Wadden en de versterking van de Houtribdijk zijn ontstaan. De meest westelijk gelegen put kan mogelijk ook de oever van Noord-Holland nog zand leveren. Het is dit moment nog niet duidelijk of ook op het IJsselmeer een zandwininput kan worden ontsloten, voor de aanleg van een zandige versterking.

In Bijlage A van deze rapportage is een nadere uitwerking gegeven voor het IJsselmeergebied.

3.4 Benedenrivierengebied

De situatie in het benedenrivierengebied is ten opzichte van het IJsselmeergebied anders. De golven zijn kleiner dan langs de oevers van IJsselmeer en Markermeer maar het ontwerppeil is daarentegen verhoudingsgewijs hoog (orde 2,5 tot 3,0 meter), want valt samen met een hoge rivierafvoer. De van nature aanwezige gorsen en voormalige kwelders zijn in dit gebied verhoudingsgewijs laag gelegen, op orde NAP+1 meter. De buitendijkse inter-getijdegebieden liggen hoger tot NAP+2 meter.

Wil men met een vooroever de golfslag flink terugbrengen dan zal men of het maaiveld van de gorsen flink moeten ophogen of men moet vertrouwen op de reductie van golven door bosaanplant. Het bij Fort Steurgat aangelegde wilgenbos is een goed voorbeeld van hoe dat zou kunnen. Voor de aanplant van wilgen is de huidige maaiveldhoogte waarschijnlijk voldoende. Wel kan ook de aanleg van een wilgenbos leiden tot negatieve natuureffecten, omdat het bestaande habitat daarmee ingrijpend wordt veranderd. Op deze mogelijkheid wordt verder niet verder ingegaan.

Ook voor het benedenrivieren geldt dat nog onduidelijk is of en waar verdere versterking van de dijken in de nabije toekomst nodig kan blijken. Mocht dat het geval zijn, dan zijn er meerdere plaatsen waar op een bestaande vooroever een daarvoor geschikt (wilgen)bos kan worden aangelegd en actief beheerd. De consequentieanalyse

laat echter zien dat belangrijke faalmechanismen voor piping en macro-instabiliteit zullen zijn en niet de kruinhoogte.

Zoals eerder opgemerkt zijn de aanwezige voorlanden aangewezen onder de habitatrichtlijn. Het is daarom niet zeker of een verhoging van een bestaand habitat wel wordt toegestaan. De eventuele natuurcompensatie vraagt een nieuw gelijkwaardig voorland op een gemiddelde hoogte van circa NAP+1 meter, vergelijkbaar aan de hoogte van de huidige buitendijkse gebieden. Bij een waterdiepte van NAP-2 meter is er dan ten minste 3 meter klei nodig. Bij een minimale ophoging van het voorland van 50 meter, zal ten minste ook een vergelijkbare breedte aan compensatie gors moeten worden aangelegd. De kosten per meter bedragen dan in directe kosten, bij 10 tot 20 Euro/m³ klei, in de orde van 1.500 tot 3.000 Euro/meter. Hierbij komen dan nog de kosten voor een vooroeverbescherming voor het nieuwe gors, bijvoorbeeld in de vorm van een breukstenendam. Gezien de waterdiepte moet al gauw rekening worden gehouden met directe kosten in de orde van 1.500 Euro/meter. De totale (directe) kosten van natuurcompensatie bedragen dan al orde 3.000 Euro/meter tot 4.500 Euro/meter en zijn daarmee de grootste kostenpost. De kosten liggen mogelijk ook al hoger dan die van de vermeden dijkversterking. Alleen het ophogen van een bestaand voorland met 1 meter klei, kost orde 500 tot 1.000 Euro/meter.

Ophefing gors met klei	Bestaande gors			Geen gors			Natuurcomp
Ontwerppeil [NAP+ m]	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
Huidig niveau voor de dijk	1	1	1	-2	-2	-2	-2
Hoogte golf [m]	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Hoogte gors nabij dijk (nieuw)	1	1,2	1,5	0,2	0,5	1	1
Benodigde kruin bij hoogte voorland [NAP+m]	4,5	4,3	4	5,3	5	4,5	4,04
Kruin nu [NAP+m]	4,5	4,5	4,5	5,5	5,5	5,5	6
Verwachte golf bij niveau gors	0,8	0,7	0,55	1,2	1,05	0,8	
Kosten per m3 nabij	10	10	10	10	10	10	10
Kosten ophoging	0	110	275	1210	1375	1650	1650
Kosten per m3 veraf	20	20	20	20	20	20	20
Kosten ophoging (zonder nat.comp/oeverbes.)	0	220	550	2420	2750	3300	3300
Kosten natuurcompensatie	0	4980	4980	0	0	0	0
Kosten vooroeverbescherming	0	0	0	1500	1500	1500	1500
Totale directe kosten (klei 20 Eur.m3)	0	5200	5530	3920	4250	4800	4980
Totale directe kosten (klei 11 Euro/m3)	0	5090	5255	2710	2875	3150	3150
Totale direct kosten gecombineerd	0	2510	2675				
Totale directe kosten (klei 11 Euro/m3)	0	1630	1713				
Grens conventionele versterking orde 2000 Euro/m directe kosten							

Tabel 2 Indicatieve kosten berekening voor situaties met een voorland (gors) en zonder voorland bij NAP-2 meter waterbodem en verschillende hoogten voor het voorland. De vereiste natuurcompensatie is gezet op een hoog van NAP+1 meter. Bij bestaand voorland/gors zijn kosten voor natuurcompensatie meegenomen, bij situaties zonder voorland/gors zijn de kosten van een oeverbescherming meegenomen. In het gecombineerde voorstel zijn de kosten voor ophoging van situaties met een gors opgesteld bij de kosten voor het realiseren van een golfremmend voorland op NAP+1 m dat tevens dient als natuurcompensatie.

Het loont daarom om de compensatie te zoeken op plaatsen waar met een nieuw gors ook een dijkversterking kan worden voorkomen. Als bijvoorbeeld de conventionele dijkversterking orde 2.500 Euro (directe kosten)/meter kost, dan is het ophogen van een gors met natuurcompensatie weliswaar duurder, en het aanleggen van een nieuw voorland ook, maar de combinatie kan goedkoper zijn. Als evenveel gors wordt opgehoogd als nieuw wordt aangelegd, dan zijn de (directe) kosten gemiddeld per meter in de orde van 1.750 tot 2.250 Euro/meter.

De conclusie zou daarom kunnen zijn dat het ophogen van een gors een mogelijke Business Case kan opleveren als:

- Deze de ADC-toets kan doorstaan en geen natuurcompensatie vraagt, of
- Deze natuurcompensatie kan worden gecombineerd met de aanleg van een gors waarmee op een naburig traject een dijkversterking kan worden voorkomen.
- Dit naburige traject een niet te diep voorland heeft, omdat bij een grotere diepte de kosten van aanleg fors toenemen, en er ook anderszins voldoende ruimte is om orde 50 meter breed gors aan te kunnen leggen.

In Bijlage B van deze rapportage is een nadere uitwerking gegeven voor het Benedenrivierengebied.

3.5 Waddengebied

Op dit moment wordt in het Waddengebied aan een omvangrijke versterkingsopgave gewerkt. Een grote lengte aan Waddenzeedijken moet worden versterkt. Er loopt een POV Waddenzeedijken waarin gekeken wordt naar de wijze waarop kwelders kunnen worden meegenomen in de toetsing en waarin ook gekeken wordt naar alternatieve vormen van dijkversterking, zoals de dubbele dijk en de brede dijk.

Gelijk aan de situatie in het IJsselmeergebied kan de inzet van een vooroever, in dit geval bestaande uit kwelders, op veel plaatsen een volwaardige en ook kosten-efficiëntere oplossing bieden dan een conventionele versterking. Soms zal een bestaande kwelder, als ook de golfremmende werking van de kweldervegetatie mag worden meegeteld, afdoende kunnen blijken om een versterking van de dijk te voorkomen. In modellen wordt vaak uitgegaan van een golfhoogte/diepte verhouding van 0,5. Als het effect van de kweldervegetatie wordt meegeteld kan dit zakken naar 0,4 of zelfs nog lager.

Ophoging kwelder met klei	Kwelder tot max peil			Kweldernok boven HW		
Ontwerppeil [NAP+ m]	5	5	5	5,5	5,5	5,5
Hoog tij, max. niveau kwelder [NAP+xm]	2	2	2	2	2	2
Hoogte golf [m]	2	2	2	2	2	2
Hoogte kwelder nabij dijk [NAP+m]	-1	0,9	1,5	-1	0,9	1,5
H/h	2	2	2	2	2	2
Benodigde kruin bij huidige kwelder hoogte [NAP+m]	9,0	9,0	8,5	9,5	9,5	9,5
Kruin nu [NAP+m]	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Kruinhoogte tekort [m]	1,0	1,0	0,5	1,5	1,5	1,5
Maximale toelaatbare golf huidige kruin [m]	1,5	1,5	1,5	1,3	1,3	1,3
Benodigde kwelder hoogte [m]	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0
Inclusief kosten natuurcompensatie ad 20 Euro/m2						
Totale directe kosten (klei 20 Eur.m3)	26000	6620	3500	28400	9020	5900
Totale directe kosten (klei 11 Euro/m3)	15200	4541	2825	16520	5861	4145
Totale directe kosten (klei 6 Euro/m3)	9200	3386	2450	9920	4106	3170
Inclusief kosten natuurcompensatie ad 5 Euro/m2						
Totale directe kosten (klei 20 Eur.m3)	24500	5120	2000	26900	7520	4400
Totale directe kosten (klei 11 Euro/m3)	13700	3041	1325	15020	4361	2645
Totale directe kosten (klei 6 Euro/m3)	7700	1886	950	8420	2606	1670
Grens conventionele versterking orde 2000 Euro/m directe kosten						

Tabel 3 Een vergelijking op directe kosten uitgaande van verschillende hoogten voor het voorland en verschillende kosten voor klei en verschillende kosten voor natuurcompensatie. Uitgangspunt is een natuurlijke gradiënt tot hoogwater van 1 op 200 en 1 op 40 voor een kweldernok, c.q. een ophoging van het achterste deel van de kwelder en een minimale breedte van 100 meter voor het achterste hoogste deel van de kwelder. Daarbij is uitgegaan van een verhouding tussen diepte en golfhoogte van 0,5.

Eerste vergelijking op basis van directe kosten laten het volgende zien:

- Als er geen kwelder aanwezig is, zijn de kosten erg hoog vanwege het grote volume dat nodig is voor de aanleg van een kwelder. Zelfs als er goedkoop grond aanwezig is, blijft dit een dure oplossing. Het benodigde volume hangt wel sterk af van de hellingshoek die wordt aangenomen voor de aanleg van de kwelder. In de berekeningen is uitgegaan van 1 op 200, dit is zelfs steiler dan wat van nature voorkomt.
- Maar ook in het geval een kwelder aanwezig is kunnen de kosten nog vrij omvangrijk zijn vooral als moet worden voorzien in dure natuurcompensatie.
- Zodra ook de kosten voor natuurcompensatie sterk terug vallen wordt het opheffen van een kwelder een kosteneffectievere oplossing, die vooral bij de inzet van lokale klei veel goedkoper kan zijn dan een conventionele dijkversterking.

Als ook rekening mag worden gehouden met de golfremmende reductie door kweldervegetatie dan neemt de benodigde kwelderhoogte fors af en daarmee ook de kosten.

In Bijlage C van deze rapportage is een nadere uitwerking gegeven voor het Intergetijdegebied in meer algemene zin.

4 Conclusies

Samenvattend kan een zandig voorland een alternatief voor conventionele vormen van dijkversterking als aan een aantal voorwaarden wordt voldaan. Deze zijn:

- Zandig voorland kan een alternatief zijn voor dijken met een kruinhoogtetekort of een zwakke bekleding. Voor piping biedt een zandig voorland geen oplossing. In geval van macro-instabiliteit kan nog worden gedacht aan een duin voor dijk oplossing.
- Onder typische omstandigheden worden zandige voorlanden kosteneffectief voor waterdiepten tot 2,5 meter. Locatie-specifieke omstandigheden kunnen enige variatie aanbrengen op deze grenswaarde. Zo is bij een lagere aansluithoogte op de dijk een navenant grotere waterdiepte mogelijk, maar op plaatsen met veel zetting van de ondergrond juist niet.
- Zandige voorlanden zijn alleen interessant in combinatie met een nabije zandwininput (< 5 km). Dit kan voor kleinere te versterken trajecten een bestaande put zijn. In het geval een nieuwe put nodig is, kan dat alleen als een langer traject met zand wordt versterkt, vanwege de bijkomende kosten voor onderzoek en vergunning-aanvraag.
- De oriëntatie is bij voorkeur loodrecht op de dominante golfval. In deze situaties speelt golfreductie een grote rol, maar blijft erosie als gevolg van langstransport beperkt. Dit zijn o.a. trajecten die op het zuidwesten zijn gelegen. Ook op meer luw gelegen trajecten is de inzet van een zandig voorland mogelijk, omdat dan het langstransport beperkt is en daarmee ook het onderhoud. De potentiële golfreductie door het zandig voorland is dan wel kleiner.
- De bijdrage van een zandig voorland aan recreatie en natuurontwikkeling kan plaatselijk aanzienlijk zijn. De baten hiervan, in de vorm van vermeden kosten, leiden evenwel niet of maar zelden tot cofinanciering van een zandig voorland.
- De realisatie van een zandig voorland op plaatsen met een aanwijzing als habitatrichtlijn gebied kan leiden tot significante negatieve effecten, die de inzet van een zandig voorland niet toelaten of kunnen leiden tot aanzienlijke extra kosten vanwege verplichte natuurcompensatie. Dit speelt niet tot minder in vogelrichtlijn-gebieden.

Het goed op elkaar afstemmen van deze variabelen vraagt om een integraal ontwerpproces, waarbij slim met grond en natuurbeheerdoelstellingen wordt omgegaan en waarbij van een natuur-positieve insteek wordt uitgegaan. De aanleg van voorlanden schept mogelijkheden, maar vraagt ook ruimte die vaak al wordt gebruikt of is bestemd. Ook van belang is de zeggenschap van de waterkeringbeheerder, dan wel de garanties die kunnen worden geboden dat het voorland aanwezig blijft en ook bij maatgevende condities zijn functie kan blijven vervullen.

Referenties

Deltares (2015). Fenomenologische beschrijving faalmechanismen WTI. Rapportage 1220078-000-GEO-0010, 15 december 2015, definitief.

EcoShape (2018). Pilot voorlandoplossing Houtribdijk. Ontwerp, uitvoering, monitoring en resultaten.

EcoShape/Deltares (2018). BwN pilot Houtribdijk - Guideline beheer en onderhoud.

EcoShape/HKV (2018). BwN pilot Houtribdijk - Ontwerp en beoordeling van dijk-voorlandsystemen.

EcoShape/RHDHV (2018). BwN pilot Houtribdijk - Business Case zandige vooroever.

Loon-Steensma J.M. van en H.A. Schelfhout (2013): Gevoeligheidsanalyse Innovatieve Dijken Waddengebied. Een verkenning naar de meest kansrijke dijkconcepten voor de Waddenkust.

Loon-Steensma, J.M. van; H.A. Schelfhout, N.M.L. Eernink en M.P.C.P. Paulissen, 2012a. Verkenning Innovatieve Dijken in het Waddengebied; Een verkenning naar mogelijkheden voor innovatieve dijken in het Waddengebied. Wageningen: Alterra (Alterra-rapport 2294).

Loon-Steensma, J.M. van, A.V. de Groot, W.E. van Duin, B.K. van Wesenbeeck, en A.J. Smale, 2012b. Zoekkaart Kwelders en Waterveiligheid Waddengebied; Een verkenning naar locaties in het Waddengebied waar bestaande kwelders of kwelderontwikkeling mogelijk kunnen bijdragen aan de waterveiligheid. Wageningen: Alterra (Alterra rapport 2391).

Loon-Steensma, J.M. van en H.A. Schelfhout, 2013. Pilotstudie Groene Dollard Dijk; Een verkenning naar de haalbaarheid van een brede groene dijk met een flauw talud en een voorland van kwelders. Wageningen: Alterra (Alterra rapport 2437).

Maaskant B. & H. Knoeff (2016): Consequentieanalyse Nieuwe Normering & WBI2017.

Penning E., O. Levelt Quickscan effect vegetatie in voorlanden op golfbelasting. Deltares rapport 2017.

BIJLAGEN

Bijlage A - IJsselmeergebied

1 Zandig voorland Pilot en asfaltoverlaging Houtribdijk

1.1 Kenmerken pilot en Houtribdijk

Of een zandige vooroever een aantrekkelijk alternatief kan zijn voor het waarborgen van de veiligheid in het IJsselmeergebied wordt beschouwd vanuit de situatie van de EcoShape pilot aan de Houtribdijk (HRD). Belangrijke kenmerken van de pilot en de HRD voor het stellen van een Business Case en het extrapoleren naar andere situaties zijn:

- **Er is sprake van een bestaande primaire kering/dijk.** De Business Case richt zich daarom op een vergelijking tussen een conventionele versterking, met een groot aandeel harde dijkbekleding en een (zachte) versterking met zand van een bestaande dijk.
- **De uitgangssituatie van de dijk speelt een grote rol in de Business Case voor een zandige vooroever.** De redenen van afkeuren bepalen de vorm en kosten van een conventionele versterking, maar zijn ook van invloed op het ontwerp van een zandige vooroever. In het geval van de HRD is een onvoldoende sterke bekleding het belangrijkste faalmechanisme, maar er zijn ook deeltrajecten waar de kruin onvoldoende hoog is. Voor de helft van de dijk is gekozen voor een versterken met een asfaltoverlaging als overslagbestendige dijk. Omdat de dijk al aan beide kanten met is bekleed en ook tussen twee wateren ligt maakt dat een overslagbestendige dijk een eenvoudige oplossing is.
- **De HRD pilot ligt in het Markermeer.** De ontwikkeling van het profiel en daarmee ook het volume aan zand dat voor een zachte versterking nodig is, hangt daarmee samen. De schatting van het benodigde volume wordt gedaan op basis van de lokale bodemligging, de profielontwikkeling in de pilot aangevuld met rekenregels zoals die voor de zandige versterking van de HRD zijn opgesteld. Deze laatste regels maken ook onderdeel uit van de 'guideline ontwerp' zoals deze ook in het kader van deze EcoShape pilot zal worden opgesteld.
- **Het Markermeer en IJsselmeer zijn zoet.** De eventuele bijdrage van (oever)vegetatie aan profielontwikkeling en onderhoud is ook wat dat betreft wezenlijk anders als aan de zandige kust, temeer omdat ook de hydraulische belasting (golfaanval) hier natuurlijk anders is. Omdat over de (belasting-reducerende) bijdrage van vegetatie op een zandige ondergrond in maatgevende situaties nog geen duidelijkheid bestaat, wordt alleen gekeken naar de mogelijke bijdrage van oevervegetatie aan het beperken van het de onderhoudssuppleties en de kosten die samenhangen met het vegetatiebeheer.
- **De ondergrond van het Markermeer bestaat, afgezien van het Enkhuizerzand zelf, uit klei op zand.** Deze ondergrond is aanwezig onder grote delen van het IJsselmeer. Dit betekent dat er ten behoeve van de lokale winning van zand in een project ook altijd Holocene klei moet worden verplaatst, voordat met zand kan worden versterkt. Op andere plaatsen kan de beschikbaarheid van zand anders zijn. De beschikbaarheid van zand en de afstand tot het werk is van grote invloed op de kosten.
- **De pilot en zandige versterking van de HRD zijn gelegen op een zettingsgevoelige ondergrond.** Deze zetting bepaalt mede het volume aan zand dat nodig is voor de versterking. De zetting kan kleiner maar ook veel groter zijn dan is gemeten in de pilot. In vergelijking met andere delen van het IJsselmeergebied is de zetting van de pilot en ook voor de versterking van de HRD op het Enkhuizerzand verhoudingsgewijs klein. De zetting hangt ook samen met de reeds aanwezige voorbelasting door de dijk en de aanwezigheid van een zand-cunet onder de dijk.

Bij het opstellen van een Business Case worden de voornoemde variabelen meegenomen in een algemene beoordeling. Naast voornoemde variabelen zijn er ook project- en locatie-specifieke variabelen die van invloed zijn op het ontwerp, de kosten en de baten van een zandig voorland (en een asfaltoverlaging voor de HRD), zoals:

- **De toestand van de dijk zelf.** Zo moet in het geval van de HRD ook de aanwezige teenbestorting worden verzwaard, wat een groot deel van de kosten uitmaakt van het alternatief met een asfaltoverlaging.
- **Ecologie.** Verstoringgevoelige vogels bepalen deels de mate waarin efficiënt kan worden doorgewerkt. Ook kan het zijn dat het zandige profiel tot effecten leidt op de aanwezige natuurwaarden, die moeten worden gecompenseerd binnen het ontwerp. Zo is in geval van de HRD voorzien in een compensatie van waterplantvelden door een verplaatsing van hier aanwezige hockeysticks. Hockeystick is de geuzennaam voor

een aantal luwtedammen die aan de Markermeerzijde voor de dijk zijn gebouwd en die bedoeld zijn om de effecten van ijsgang op de dijk en daarmee op de provinciale weg te voorkomen. Achter deze dammen is een golfvrije zone aanwezig waar zich waterplanten hebben kunnen ontwikkelen.

- **Medegebruik.** Op de HRD is een weg en een fietspad gelegen, die in de versterking van dijk worden meegenomen. Deze zijn mede van invloed op het ontwerp, maar ook op de gewenste normstelling voor de dijk in de huidige normering. De oude normering ging uit van het behouden van integriteit van het gehele dijkprofiel, waarmee ook de functie van de dijk als onderliggend talud voor bijvoorbeeld een weg afdoende gewaarborgd was. In de huidige normering wordt gekeken naar falen bij maatgevende condities (UGT). Echter in geval van een weg kan niet worden toegestaan dat kleinere stormen al leiden tot zoveel afbraak van het talud dat ook de weg niet gehandhaafd kan blijven (BGT). Een (belangrijke) weg op een dijk bepaalt, vooral bij grotere dijklichamen die niet gemakkelijk falen, al gauw de minimale normstelling. Het ontwerp van een zandig voorland hangt in dit geval mede af van de reststerkte van de bekleding in relatie tot de voor andere functies en ook het onderhoud acceptabele schade bij storm.
- **Landschappelijke inpassing.** Voor HWBP projecten wordt een landschappelijk ontwerp en programma van eisen opgesteld die tot ontwerpaanpassingen en aanvullende kosten leiden. Op zich heeft elk versterkingsproject, ook een conventionele harde versterking, met dit soort kosten te maken, maar de hoogte van deze kosten verschillen van project tot project.
- **De Houtribdijk is een dam tussen twee wateren.** Een asfaltoverlaging levert in principe een overslagdijk op. Overslag is in geval van een dam, tussen twee wateren, vrijwel niet van invloed op het peil in de achterliggende wateren. Bij een dijk met daarachter land, zoals langs de Friese, Flevolandse en Noord-Hollandse kust, kan overslag in beperkte mate toelaatbaar zijn of om extra maatregelen vragen.

Van doorslaggevend belang voor de kosten van een zandig voorland zijn de kosten van het zand. De kosten van het zand zijn afhankelijk van de aanwezigheid van winbaar zand in de ondergrond en de afstand van een winput tot aan het werk. De projecten die nu met zand worden aangelegd of in voorbereiding zijn, zoals Marker Wadden en de versterking van de Houtribdijk maken gebruik van een lokale winning op 2 tot 6 km van het werk. De kosten zijn vanwege de korte transportafstanden veel lager dan als het zand van elders uit bijvoorbeeld een commerciële zandexploitatie moet worden gehaald. Uit analyse blijkt dat de beschikking over een lokale winput kan haast worden gezien als een randvoorwaarde voor de aanleg van een kosteneffectief zandig voorland.

Veel plaats-specifieke variabelen zijn niet aan de orde op andere locaties, of juist wel maar op een andere manier. Deze variabelen worden wel besproken maar niet in het kostenbeeld opgenomen. Een vergelijking op kosteneffectiviteit wordt gedaan op basis van een standaard ontwerp voor de harde versterking en de zandige versterking.

Het resultaat is een algemene vergelijking op kosten en andere (kwaliteits)criteria, waarbij aan de hand van de (water)diepte, beschikbaarheid/kosten van zand en hydraulische variabelen een vergelijking plaatsvindt.

1.2 Overstap naar overstromingskans

Gangbaar was om een dijk te toetsen op een scala aan faalmechanismen en af te toetsen als bijvoorbeeld de bekleding onvoldoende sterk was of de kruin onvoldoende hoog. In de huidige normering wordt gekeken naar de doorbraakkans ofwel het falen van de dijk die tot een daadwerkelijke inundatie leidt van het achtergelegen land. Met dit laatste is veel minder ervaring en de vraag is ook hoe van geval tot geval daartoe aannames en sommen gemaakt moeten worden. De Houtribdijk tussen Trintelhaven en Enkhuizen wordt nog op basis van de oude normering met zand versterkt. Dit betekent niet alleen dat gekoerst wordt op een 1 op 10.000 per jaar veiligheidsnorm, maar ook dat wordt gewerkt met een 'duin-tegen-dijk' ontwerp, waarbij de afslaglijn bij maatgevende condities de dijkbekleding niet raakt (zie ook Figuur 1 in Paragraaf 2.2).

Voor dijken kan een doorbraakkans worden bepaald door gebruik te maken van een afslagsom, in de veronderstelling dat er geen reststerkte aanwezig is in de bekleding van de dijk. De kern van de dijk wordt dan als grond/zandlichaam gezien. Op grond hiervan wordt bepaald of versterking nodig is, in de zin dat daarmee een doorbraak kan worden voorkomen. Dit is in principe pas het geval als er landwaarts van het maatgevende afslagpunt geen restprofiel meer aanwezig is. Dit is ook de wijze waarop de Houtribdijk in de consequentieanalyse nieuwe norm is getoetst op de kans op doorbraak, waarbij is gekeken naar een mogelijke doorbraak vanaf de

Markermeer- en IJsselmeerszijde. De reststerkte van de bekleding, zandasfalt en waterbouwasfalt op einde levensduur, is in het geval van de Houtribdijk zeer gering en amper aanwezig. Dit is mede te verklaren vanwege het vermeend tijdelijke karakter van de met name de constructie van de Markermeerszijde van de dijk. Wel is het zo dat in de kern van de Houtribdijk nog een keileemkade aanwezig is, die een functie had bij de aanleg. Ook ligt voor de dijk een teenbestorting met zware stenen. Aan beide zijden, de keileemkade en de teenbestorting, is bij het uitvoeren van de afslagberekeningen geen sterkte toegekend. Er is dus robuust gerekend, mede omdat niet duidelijk is hoeveel reststerkte mag worden toegekend aan bekleding en kleikades.

Een zandig voorland valt veel kleiner uit als ook het volume van de dijk wordt meegerekend. Er hoeft dan alleen maar ontbrekende volume aan het dijklichaam te worden toegevoegd, in plaats van dat enkel de zandige versterking de afslaglijn voor de bestaande dijk moet houden. Onderstaande tabel laat zien dat het volume van een zandig voorland bij een (aansluit)hoogte van 1 meter, 20 tot 30 % minder is dan bij een (aansluit)hoogte van 2 meter, wat op het zuidwestgelegen trajecten in het Markermeer vaak het toetspeil is. Het (theoretisch maximale) verschil tussen een aansluiting op NAP+2 meter en een voorland op NAP-1 meter is een factor 2 tot 4 afhankelijk van de waterdiepte. De combinatie waterdiepte en aansluiting geeft zelfs een bandbreedte van meer dan een factor 10.

Profiel (1 op 32)					
Zetting en inpassing (15%)					
Waterdiepte		5	4	3	2
Hoogte voorland	2	942	702	500	334
	1	700	500	334	206
	0	500	334	206	114
	-1	334	206	114	58
Profiel 50 meter breed en 1/26 aflopend talud					
Zetting en inpassing (15%)					
Waterdiepte		5	4	3	2
Hoogte voorland	2	1059	836	638	467
	1	836	638	467	321
	0	638	467	321	202
	-1	467	321	202	108

Tabel 1 Volumes zandige vooroevers op basis van een 1 op 32 profiel en 40 m³ slijtlaag, en op basis van een 50 meter voorland dat met een 1 op 26 profiel afloopt naar de bodem en een slijtlaag van 40 m³. Kleuren geven klassegrenzen in volume omvang aan (<400; 400-700; >700 m³).

1.3 Typen zandige versterkingen IJsselmeergebied

Voor zandige versterkingen kan onderscheid worden gemaakt naar volgende typen (zie ook Figuur 1 in Paragraaf 2.2):

- **Zandig voorland dat vooral de golven reduceert, voldoende om met de bestaande bekleding en hoogte van de dijk toe te kunnen.** Dit is een mogelijke oplossing die kan werken als de bekleding enige reststerkte heeft en de kruin een hoogtetekort heeft. In het geval van de HRD was sprake van een waterasfaltbeton bekleding die zijn einde levensduur had bereikt. Een dergelijk oplossing lag daarom, in het licht van de oude normering, niet voor de hand.
- **Een duin tegen een dijk, waarbij zoveel volume wordt aangebracht dat de maatgevende afslaglijn de dijk en daarmee de bekleding niet raakt.** Deze zandige oplossing werkt in geval een dijk is afgekeurd op hoogte, bekleding en vaak ook op macro-instabiliteit. Dit is het ontwerp uitgangspunt voor de zandige versterking van de Houtribdijk.
- **Een duin voor een dijk, in dit geval wordt met zand een nieuwe primaire kering voor de bestaande kering gezet.** Deze oplossing wordt toegepast als sprake is van grote problemen met de macrostabiliteit van de dijk of als men de bestaande dijk om andere redenen, zoals cultuurhistorische waarden, wil behouden. Voorbeelden hiervan zijn de oeverdijk voor de Markermeerdijk en de Hondsbossche en Pettemer Zeewering, als ook de versterking van de Prins Hendrikdijk op Texel.

- **Een duin in een dijk, waarbij ook het volume in de dijk mee doet in de berekeningen van het afslag-volume.** Deze zandige oplossing kan werken als daarbij onderhoud en overige functies van en op de dijk geen probleem vormen, zoals de aanwezigheid van een provinciale weg.

Met de huidige normering ligt een 'duin in dijk' ontwerp eerder voor de hand. Echter een 'duin in dijk' ontwerp kan ook bij niet-maatgevende condities al leiden tot schade aan en vervorming van het talud, waardoor bijvoorbeeld ook frequent extra onderhoud nodig kan zijn. In het geval van de HRD ligt op de dijk ook een belangrijke provinciale weg, de verbinding tussen Lelystad en Enkhuizen. De (economische) schade aan deze provinciale weg kan sterk oplopen als de weg tijdelijk moet worden gesloten voor verkeer. Bij afsluiting is al direct sprake van aanzienlijke economische schade. Omdat ook de bekleding einde levensduur is, is al gauw sprake van een risico dat ook de weg aanzienlijke schade oploopt bij een forse storm. Voor het ontwerp van een zandige versterking moet dus eigenlijk worden gekeken naar de toelaatbare faalkans van het dijktaalud in relatie tot alle functies van de dijk zoals voornoemde weg. Bij het bepalen van deze faalkans moet ook rekening worden gehouden met toelaatbare schade en daarmee samenhangend onderhoud. Bij een bekleding einde levensduur wordt het onderhoud erg omvangrijk als vanwege andere functies ook het talud intact moet blijven. Deze bekleding zal dan ook meestal worden vervangen, ondanks dat er geen sprake is van een niet toelaatbare kans op falen.

Van welke type zachte versterking kan worden uitgegaan is dus erg plaatsspecifiek en hangt mede af van het gebruik van de dijk, of schade aan de bekleding kan worden geaccepteerd en bijvoorbeeld ook of er sprake is van cultuurhistorische waarden. Al deze variabelen kunnen daarom ook van invloed zijn op de Business Case, want ze bepalen mede de kosten van een zandig voorland. In termen van volumes en kosten is een 'duin in dijk' oplossing de goedkoopste versie van een zachte versterking. Heel bepalend voor de Business Case is dus of uitgaande van de huidige normering een 'duin in dijk' oplossing mogelijk is. In het geval van de Houtribdijk was dat vanwege de provinciale weg en een bekleding zonder reststerkte niet mogelijk.

In het ontwerp van de zandige versterking van de Houtribdijk zijn ook vooroeverdammen aan de Markermeerzijde opgenomen. Deze dienen echter alleen voor het beperken van het onderhoud en het realiseren van een golf-luwe zone ten behoeve van natuurontwikkeling. De ontwerpeis van deze vooroeverdammen gaat uit van een 1 op 50 per jaar storm. In principe is het mogelijk een vooroeverdam zo te construeren dat deze ook stand houdt bij maatgevende condities. In dat geval hoeft de zandige versterking minder zwaar te worden uitgevoerd. De kosten voor een voor maatgevende condities gedimensioneerde vooroeverdam zijn echter groot. Als er voldoende herbruikbare breuksteen vrijkomt bij versterking van de dijk met een voldoende zware steenklasse dan kan de aanleg van een dergelijke maatgevende vooroeverdam een mogelijkheid zijn. Breuksteen kan bijvoorbeeld vrijkomen uit de teenbestorting omdat deze met zand wordt afgedekt en daarmee zijn functie verliest.

1.4 Vergelijking hard en zandig

Bij de Business Case HRD wordt gekeken naar de vergelijking tussen een zandig voorland en het alternatief van een asfaltverlaging, aangezien deze is gekozen als oplossing voor de HRD tussen Trintelhaven en Lelystad. Er wordt daarbij gekeken naar zowel het verschil in kosten als het verschil in kosten en baten. Bij de laatste wordt ook gekeken naar de baten die een zandige vooroever heeft, die niet of in mindere mate door het alternatief van een asfaltverlaging worden gegenereerd. Het is ook mogelijk om naar een conventionele versterking met zetsteen te kijken. Deze is doorgaans een stuk duurder dan een asfaltverlaging, wat mede de reden is dat de laatste vorm van versterking steeds vaker gekozen wordt.

2 Zachte versterking Houtribdijk

2.1 Kenmerken van het ontwerp duin tegen dijk

De kenmerken van een zachte voorlandoplossing van het type 'duin tegen dijk' voor de HRD zijn:

- **Een aansluithoogte op ontwerppeil, of iets daarboven.** Bij deze aansluithoogte bereikt de golf in principe nooit het (bovenliggende) talud van de dijk. De ontwerpwaterstand is van invloed op het volume dat nodig is.
- **Een volume aan zand voldoende voor het compenseren van de afslag bij maatgevende condities.** Dit volume is afhankelijk van de golfhoogte, golfrichting, deels ook stormduur, de (mediane) korreldiameter (D50) van het zand en vooral ook van het rekenmodel dat wordt toegepast, inclusief de wijze waarop met de gradiënt in het langstransport rekening wordt gehouden. Dit volume kan op verschillende manieren worden bepaald.

Voor de versterking van de HRD is gekozen voor een combinatie van een afslagmodel (Duros+) en langstransportformules op basis van de formuleringen van Van Rijn. Bij inzet van andere modellen zoals XBeach, kunnen de effecten van het dwars- en langstransport in principe in een keer worden berekend.

- **Een extra onderhoudsvolume nodig voor de compensatie van geleidelijk optredende verliezen.** Dit volume is afhankelijk van het golfveld, en dan met name qua oriëntatie van de dijk maar ook de plaatsing van het onderhoudsvolume in het dwarsprofiel. Voor dit laatste geldt dat op grond van de resultaten van de EcoShape pilot is gekozen voor een plaatsing van de slijtlaag boven het NAP-1 meter niveau.
- **De diepte waarop de golf geen rol meer in de ontwikkeling van het dynamisch evenwichtsprofiel speelt** (gekozen: NAP-1 m voor de HRD).

Voor de zandige versterking van de HRD wordt onderscheid gemaakt naar het zand onder NAP-1 meter en boven NAP-1 meter. Het zand boven NAP-1 meter interacteert met de golven. Het zand onder de NAP-1 meter doet dat niet tot zeer beperkt maar kan wel onderhevig zijn aan transport door wind gedreven circulatiestroming. Aan het zand boven NAP-1 meter worden eisen gesteld aan de D50 van het gebruikte zand. De D50 in dit deel van het profiel is bepalend voor het volume van het veiligheidsprofiel, de stormtoeslag en de onderhoudslaag.

De oriëntatie van de dijk ten opzichte van het golfveld en ook de kritische grens tussen een functionele toplaag en een ophooglaag zijn locatie specifiek. De oriëntatie, ten opzichte van het golfveld, van de dijk is een gegeven, maar wel van grote invloed op het nodige onderhoud maar ook op langstransport tijdens maatgevende condities.

De toepassing van een zandig profiel in het IJsselmeergebied gaat, nu nog, gepaard met een groot aantal onzekerheden, omdat in de huidige situatie stranden en zandige versterkingen ontbreken en er daarom niet kan worden beschikt over praktijkervaring. Er is dan ook grote onzekerheid over het evenwichtsprofiel dat zich in dit systeem zal instellen. Het is mogelijk dat daarom meer volume wordt aangebracht dan nodig is of dat er juist te weinig volume wordt ingezet. In het ontwerp van de zandige versterking van de HRD is daarom een bovengrensbepaling gehanteerd. Liever te veel zand dan te weinig, want het teveel aan zand kan worden gezien als extra volume voor de slijtlaag en daarmee tot uitstel van benodigd onderhoud.

2.2 Belangrijke kosten variabelen

De kosten van een zandig voorland in het IJsselmeergebied, of langs andere grotere meren, hangen af van het benodigde volume voor de aanleg en de kosten van het zand.

De belangrijkste variabelen die het volume bepalen zijn:

- **Waterdiepte.** Hoe dieper het water voor de dijk, hoe groter volume aan zand nodig is voor het opbouwen van een profiel. De waterdiepte langs de HRD varieert tussen de NAP-2 meter voor de hoogste delen van het Enkhuizerzand tot meer dan NAP-5 meter voor diepste delen tussen Trintelzand en Lelystad.
- **Hydraulische condities.** De ontwerpwaterstand bepaalt de aansluithoogte op de dijk en de golfhoogte/energie de verwachte evenwichtshelling van het profiel en daarmee het benodigde volume. Deze ontwerpwaterstand ligt ongeveer tussen de NAP+2 meter voor de meest geëxposeerde delen tot NAP+1 meter voor trajecten die beschut zijn gelegen oen/of met een expositie naar het noordoosten, zoals de IJsselmeerzijde van de HRD. Ook de hoogste van de maatgevende golven varieert tussen de 2 meter en iets meer dan 1 meter afhankelijk van de locatie. De oriëntatie op het golfveld is daarbij van invloed op het langstransport en het onderhoud.
- **Zetting van het voorland.** Afhankelijk van de ondergrond moet rekening worden gehouden met een zetting van enkele tientallen tot mogelijk meer dan 100 %, als sprake is van dikke veenpakketten in de ondergrond. Dikkere veenlagen komen onder de HRD niet voor, maar bijvoorbeeld wel voor de kust van Noord-Holland en mogelijk ook langs de Friese kust.

Kosten van zand bij aanleg

Het zand voor de versterking van de HRD komt uit putten op korte afstand voor de dijk. Door de korte afstand kan met een cutter of steekzuiger direct zand van winput in het profiel worden gezet. Een soortgelijke oplossing is ook gekozen voor de aanleg van de buitenranden van de Marker Wadden.

De kosten per m³ zijn daarmee aanzienlijk lager dan als gewerkt moet worden met transport met een beun(schip) vanuit een commerciële winput. Deze kosten kunnen nog toenemen ingeval zand moet worden aangebracht op

een ondiep voorland, zodat overslag naar een minder diep stekend schip boot, of de inzet van een niet volledig beladen beun nodig wordt.

De kosten voor aanvoer van grond van elders zijn vaak meer dan dubbel zo hoog dan in het geval van een directe winning en plaatsing vanuit een nabije put. Het op korte afstand zand kunnen winnen kan voor veel locaties worden gezien als een randvoorwaarde wil een zandige vooroever ook echt kosteneffectiever kunnen zijn dan een conventionele harde oplossing.

Anders dan aan de Noordzee is in het IJsselmeergebied sprake van Holocene grond die op Pleistoceen zand is gelegen. Deze Holocene grond moet eerst worden afgegraven voordat het zand kan worden gewonnen en dit leidt tot extra kosten voor de aanvoer van het zand. Voor de zandige versterking van de HRD is zandwinning aan de Markermeerzijde toegestaan maar niet aan de IJsselmeerzijde. Aan de Markermeerzijde geldt TBES (Toekomst Bestendig EcoSysteem) als kader om te toetsen of sprake is van multifunctioneel gebruik van de put, wat als voorwaarde voor de (ontgrondingsver)gunning geldt. Aan de IJsselmeerzijde ontbreekt dit kader en werd het kader en/of beleidsdoelstellingen, zoals geschetst in het beheerplan Natura 2000 en door de KRW onvoldoende bevonden als onderbouwing voor het multifunctioneel gebruik van een put. Voor het versterken van de HRD met zand is winning aan de IJsselmeerzijde daarom niet toegestaan. Dit betekent dat de kosteneffectiviteit van een zandige oplossing voor projecten in het IJsselmeer sterk afhangt van de vraag of een vergunning voor een winput kan worden verkregen.

Kosten zand bij onderhoud

Met het onderhoud van zandige versterkingen is er tot dusver geen ervaring in het IJsselmeergebied. Wat betreft het onderhoud kan onderscheid worden gemaakt naar:

- **Onderhoud aan het bovenwatertalud.** Dit hangt van het type begroeiing. Het gaat dan vooral om maaibeheer, verwijderen van afval e.d.
- **Onderhoud aan de oevervegetatie.** Dit is afhankelijk van het lokale golfklimaat kan ook oevervegetatie tot ontwikkeling komen en afhankelijk van de doelstellingen moet deze ook worden beheerd, bijvoorbeeld het verwijderen van opslag van houtige gewassen of het maaien van (overjarig) riet.
- **Onderhoud aan het (zandige) profiel onder water.** Deze kostenpost hangt vooral af van de erosie die optreedt, welke weer een functie is van de oriëntatie van het profiel en het golfklimaat.

Het onderhoud aan het (zandige) profiel is in potentie de grootste kostenpost, maar kent ook weer de grootste variatie van plaats tot plaats. De erosie kan plaatselijk zeer beperkt zijn, maar ook zeer omvangrijk bij een zeer ongunstige oriëntatie van het profiel in combinatie met een grote golfaanval. Knikken in de dijk en ook gekromde trajecten leiden tot grote gradiënten in langstransport en dus veel erosie.

Aan de kust wordt tijdens een storm zand van duin en strand afgeslagen en komt dat lager op de vooroever te liggen, waardoor het profiel flauwer wordt. Na storm wordt het profiel onder invloed van golven en getij weer opgebouwd en wordt een groot deel van het zand weer naar een positie hoger in het profiel gebracht. Bij stranden langs het IJsselmeer verdwijnt zand bij erosie naar dieper water en wordt door het ontbreken van getij en waarschijnlijk ook lange golven niet meer teruggebracht. De verliezen van zand door erosie naar dieper water zijn dus grotendeels irreversibel.

Erosie in de orde van meer dan 20 tot 50 m³/m per jaar is naar schatting ook op ongunstige plaatsen in het IJsselgebied in potentie mogelijk maar zal doorgaans door een optimalisatie van het ontwerp worden afgezwakt, bijvoorbeeld door de aanleg van vooroeverdammen. Als uitgangspunt voor het onderhoud zou kunnen worden uitgegaan van orde 1 tot 2 m³/m/jaar voor golfuwe locaties en 5 tot 10 m³/m/jaar voor plaatsen met veel erosie, die niet worden afgeschermd door vooroeverdammen. Dit is een globale schatting die als bandbreedte in de Business Case wordt gebruikt.

Belangrijk voor de kosten van het onderhoud zijn ook de kosten voor het zand. Bij de aanleg van een zachte versterking zijn grote hoeveelheden zand nodig die tegen geringe kosten in het profiel kunnen worden geplaatst. Bij incidenteel onderhoud zijn de 'voorrijkosten' groot en de volumes veel kleiner. De kosten per m³ kunnen dan ook een veelvoud zijn van die bij aanleg. Het loont daarom om de zandige versterking meteen bij aanleg voor langere tijd te voorzien in een slijtlaag. Probleem daarbij is wel dat men op dit moment bij de aanleg van een zachte

versterking maar moeilijk kan schatten hoeveel erosie zal optreden en ook waar het zand ter compensatie van toekomstige verliezen moet worden aangebracht. Bij het aanbrengen van een groot volume moet overigens ook weer rekening worden gehouden met extra m^3 die nodig zijn voor inpassing en zetting.

2.3 Kosten zandig voorland en asfaltoverlaging

Veel variabelen zijn van invloed op de kosten van een zandige versterking of asfaltoverlaging en dat een aantal daarvan zijn locatie- en/of projectspecifiek zijn.

Voor het opstellen van de Business Case, en het doen van eerste uitspraken welk alternatief waar de meest-kosteneffectieve wijze van versterking is, kan het aantal relevante variabelen worden beperkt tot de volgende twee:

- Dijktaalud, vooral vorm en afmetingen.
- Diepte van de vooroever voor de dijk.

Er wordt uitgegaan van een standaard ontwerp met een bepaalde taludhelling voor zowel de bestaande dijk als ook een zandig voorland. De diepte voor de dijk wordt daarbij gecombineerd met de verwachte zetting. De combinatie van beide bepaalt immers het totale volume aan zand dat moet worden aangebracht. De zetting varieert afhankelijk van de aanwezige ondergrond.

Vervolgens wordt gevarieerd op:

- Kosten c.q. beschikbaarheid van zand.
- Onderhoud in afhankelijkheid van de verwachte erosie.
- Wel of niet de teenbestorting vervangen.
- Mogelijkheden voor hergebruik van breuksteen
- Wijziging veiligheidsniveau.
- Overslag acceptabel of niet.

De kosten voor het aanbrengen van zand worden in het IJsselmeergebied door de volgende variabelen bepaald:

- **Locatie van de winput.** Zoals eerder is aangegeven maakt een put op kortere afstand, bij voorkeur minder dan 3 km, als het mogelijk is niet verder dan 6 km, het mogelijk om zand van de winning direct en zonder tussenstappen aan te brengen in het profiel.
- **Wijze van aanbrengen.** Het opspuiten van het zand kan met een landleiding of met een sproeiponton.
- **Volume dat moet worden aangebracht.** Hoe groter het volume dat moet worden verplaatst, hoe lager de kosten per m^3 , omdat de bijkomende kosten over meer m^3 worden verdeeld en er met groter materieel kan worden gewerkt.
- **Geologische opbouw input.** Vooral de dikte van de Holocene deklaag en de diepte en dikte van voor versterking geschikte zandlagen zijn van belang voor de kosten. De dikte van de Holocene laag verschilt binnen het gebied. Zo komen geologische profielen voor met een Holocene laag van 4 tot 6 meter, maar er zijn ook locaties waar de dikte van de Holocene laag meer dan 12 meter bedraagt.

De directe kosten voor zand voor de opbouw variëren daarmee tussen de minder dan 2 Euro/ m^3 (put nabij) tot meer dan 10 Euro/ m^3 (zand van elders). Zoals al eerder aangegeven is een put op korte afstand een voorwaarde voor het bouwen van een kosteneffectieve zandige versterking.

Onderhoud in afhankelijkheid de verwachte erosie

Een zandig profiel is onderhevig aan dwars- en langstransport. De dijken om het IJsselmeer en Markermeer kennen een zeer wisselende oriëntatie op de wind. Bij een vrijwel loodrechte inval is het (netto) langstransport beperkt en is het onderhoud vooral nodig tot dat een dynamisch evenwichtsprofiel is bereikt.

Bij de Houtribdijk wisselt de oriëntatie tussen vrijwel loodrecht op de dijk tot zeer scheef invallende golven, zoals bij Lelystad en ook aan de IJsselmeerszijde van de dijk. Bij Lelystad is in de verkennende fase ook gekeken naar de mogelijkheid van een zandige oplossing, maar al ras bleek dat de onderhoudsopgave hier heel erg groot zou zijn. Met heel erg groot wordt bedoeld, resulterend in een volume voor onderhoud dat groter is dan het volume dat initieel nodig is voor het maken van het veiligheidsprofiel. Daarbij komt ook nog dat er hier sprake is van een diepgelegen vooroever waardoor de aanleg van een zandig voorland veel materiaal vraagt.

Na aanleg van een zandig profiel treedt dwarstransport en zetting op totdat een evenwichtsprofiel is bereikt. In de EcoShape pilot is de vervorming van het profiel als gevolg van dwars- en langstransport gevolgd. Ten aanzien van het dwarsprofiel kan een evenwicht worden bereikt als:

- De breedte van de plateauvorm zo groot is dat de golf zo sterk wordt gereduceerd dat de golfaanval tot een minimum is beperkt.
- De breedte van de plateauvorm zo groot is dat er vrijwel geen zand verliezen meer optreden naar dieper water en op het plateau sprake is van een gesloten zandbalans.
- De toename van de zandfractie op de oeverlijn, als gevolg van het vooral verdwijnen van de fijnere fracties, zo groot is dat hiermee de erosie sterk wordt beperkt.
- De breedte van het plateau is aangepast op het circulair gedreven langstransport.
- Het profiel is aangepast op een zeer grote storm, waardoor daarop volgende kleinere stormen nauwelijks meer tot een vervorming van het profiel leiden.

Uit de analyses volgt dat er is sprake van een combinatie van voornoemde processen, maar ook dat de configuratie van de proefsectie (met de damwand) een belangrijke rol speelt. In de Business Case een standaard profiel gehanteerd met een helling van 1 op 32, waarmee zich (qua volume) in principe een plateau met een breedte van orde 50 a 60 meter kan ontwikkelen tussen NAP-1 meter en NAP+1 meter.

Het onderhoud kan in de praktijk worden verminderd door bijvoorbeeld de inzet van vooroeverdammen. Deze reduceren het langstransport en dus ook de hierin aanwezige gradiënten in langstransport, die tot erosie leiden. Voor de Houtribdijk zijn aan de Markermeerzijde op het Enkhuizerzand hockeysticks, robuuste vooroeverdammen die in geval van kruisend ijs de dijk ijsvrij moeten houden, gelegen die min of meer al deze functie vervullen. In het zandige ontwerp van de Houtribdijk zijn deze hockeysticks verplaatst om meer ruimte te maken voor 'luwgelegen' waterplantvelden, maar ook voor het mogelijk maken van oevervegetatie waarmee onderhoud aan het zandige talud kan worden beperkt. Aan de IJsselmeerzijde ontbreken deze vooroeverdammen ook in de huidige situatie. Wel of geen vooroeverdammen is daarom een erg project- en plaatsspecifiek gegeven.

Wijziging veiligheidsniveau

De zandige versterking moet worden aangepast als zwaardere hydraulische randvoorwaarden worden opgelegd. Een grotere golf en hogere ontwerpwaterstand vragen om een groter volume aan zand. De HRD wordt versterkt conform de oude normering. In de huidige (nieuwe) normering zijn de hydraulische voorwaarden iets minder zwaar. Het teveel aan zand kan dan als een extra slijtlaag worden aangemerkt. Met andere woorden er is sprake van een (beperkte) kostenbesparing in het onderhoud op middellange termijn.

Een zandig voorland dat is ontworpen op de huidige normering moet wel met extra zand worden versterkt als de hydraulische voorwaarden toenemen. De kosten van aanpassing zijn voor een zandige vooroever echter beperkt omdat alleen maar een beperkt volume aan extra zand hoeft te worden aangebracht. Wel is het aanbrengen verhoudingsgewijs lastig, omdat dit op het profiel zelf moet gebeuren, en er op dat moment sprake is van volgroeide vegetatie.

De asfaltoverlaging verandert in principe niet aangezien het standaard ontwerp, met 35-40 cm asfaltoverlaging, zeer robuust is en het ontwerp in wezen niet verandert bij een beperkte afname of toename in hydraulische condities. Zoals eerder is aangegeven is een asfaltoverlaging daarmee behoorlijk toekomstbestendig, mits de voorliggende teenbestorting natuurlijk ook voldoende robuust is.

Bij een versterking met gezette stenen leiden zwaardere hydraulische voorwaarden vaak tot omvangrijke extra kosten, omdat vaak de steenbekleding moet worden vervangen en vaak ook nog het profiel moet worden aangepast. Dit zijn zware en dure ingrepen. Of deze nodig zijn hangt mede af van de vraag of sprake is van enige reststerkte in het profiel, bijvoorbeeld omdat een steenklasse nodig was die ook nog zwaardere golfcondities aan kan. Minder zware hydraulische voorwaarden, bijvoorbeeld bij een overgang van de oude naar de huidige normering, geven voor een steenbekleding geen kostenbesparingen.

3 Harde versterking Houtribdijk

3.1 Kenmerken asfaltoverlaging

De asfaltoverlaging is een vorm van versterking die een oplossing biedt als sprake is van een kruinhoogtetekort (door ombouw naar een overslagdijk), een onvoldoende sterke of afgeschreven bekleding en beperkt ook als sprake is van macro-instabiliteit, als deze bijvoorbeeld samenhangt met het grondwaterverloop in het grondlichaam.

Een asfaltoverlaging vereist een minimale dikte. Deze is al gauw orde 30 tot 35 cm, wat samenhangt met de minimale dikte van de (afdekkende) steenlaag die met asfalt wordt gepenetreerd. In principe is deze dikte meer dan voldoende voor het golfklimaat op Markermeer en IJsselmeer en zelfs meer dan robuust te noemen. Dit betekent dat ingeval van zwaardere hydraulische randvoorwaarden er geen verdere aanpassingen nodig zijn. Een dijk met een asfaltoverlaging is in deze zin dus erg toekomstbestendig, dit onder voorwaarde dat ook de teenbestorting voldoende robuust is.

Asfalt kan niet onder de waterlijn worden aangebracht/gegoten. Een teenbestorting blijft daarom nodig en vormt ook een apart te ontwerpen onderdeel van een dijk met een asfaltoverlaging. In het geval van de Houtribdijk moet ook de teenbestorting ingrijpend worden aangepast. Er zijn zwaardere stenen en een profielaanpassing nodig en de teenbestorting moet bovendien dieper worden doorgezet. Dit heeft vooral aan de Markermeerzijde voor een deel zijn oorsprong in de ontstaansgeschiedenis van de Houtribdijk. De bekleding aan de Markermeerzijde werd in feite als een tijdelijke bescherming gezien, omdat de dam de opmaat was voor de inpoldering van de Markerwaard. De teenbestorting en ook de bekleding zijn daarom minder zwaar en minder bestendig aangebracht. Dit heeft er onder meer toe geleid dat de teenbestorting wegzakt, waardoor nu dus een omvangrijke en dure profielaanpassing nodig is. Op andere locaties langs het IJsselmeergebied kan ook sprake zijn van een teenbestorting die versterking behoeft, maar dat zal meestal minder omvangrijk zijn dan in het geval van de Houtribdijk.

De technische levensduur is bepalend voor de kosten op langere termijn. Ervaringen tot dusver laten zien dat een asfaltoverlaging ook onderhoudsarm is. Hierbij kan worden opgemerkt dat tot dusver ervaring met een asfaltoverlaging over een langere periode alleen bij een ligging aan zout water is opgedaan. De mogelijke invloed van vegetatiegroei in een zoet milieu en het risico op doorworteling van de asfaltlaag is hierin niet meegenomen. Gezien de forse minimale dikte van de laag is dat ook niet waarschijnlijk. De onderhoudskosten voor een asfaltoverlaging bestaan naar verwachting dus vooral uit de kosten die moeten worden gemaakt voor het onderhoud van de teenbestorting.

De kosten van een asfaltoverlaging worden in hoofdzaak bepaald door:

- **De omvang c.q. hoogte en talud van de dijk.** Omdat deze de omvang van het te overlagen oppervlak bepaalt.
- **De kosten van eventuele profielaanpassingen en verwijderen van bestaande bekleding.** In de meeste gevallen kan een asfaltlaag probleemloos over oude steenbekleding worden gezet. Hoewel een dikke asfaltlaag bijdraagt aan de macrostabiliteit, kan verflauwing van het talud soms nodig zijn, voordat de asfaltlaag wordt aangebracht.
- **De kosten van stenen en asfalt waarmee de overlaging zelf wordt opgebouwd.** Deze kosten variëren afhankelijk van transportafstand en –wijze. Goedkoop is aanvoer over water van de stenen, maar op sommige locaties is het water voor de dijk te ondiep voor diepliggende volbeladen schepen. Asfalt wordt over land aangevoerd vanuit een asfaltcentrale, zodat toegang tot het werk met een weg van belang is voor de kosten die moeten worden gemaakt. Bij groot werk kan een deel van de asfaltproductie ook mobiel op een ponton plaatsvinden.
- **De kosten van de teenbestorting, c.q. het onderwatertalud dat niet in asfalt kan worden gezet.** Zoals aangegeven zijn deze kosten hoog als naast een profielaanpassing ook zwaardere steensortering moet worden geplaatst, die dan moet worden aangekocht.
- **De eventuele kosten voor het afvangen van golfoverslag als dat vanwege achter de dijk gelegen functies niet toelaatbaar is.** Dit speelt niet bij de HRD, maar kan elders wel een belangrijke aanvullende kostenpost zijn, vooral als de dijk verhoudingsgewijs laag is en overslag ook bij frequenter optredende stormen kan optreden, of bij maatgevende stormen al tot een lokale inundatie van het achterland kan leiden.

Voor het bouwen van een asfaltlaag wordt een kleinere steensortering gebruikt, die met een minimale dikte moet worden aangebracht. Deze sortering is doorgaans niet beschikbaar vanuit het werk en moet worden aangekocht.

Wel of niet breuksteen vervangen

In het geval van de Houtribdijk moet ook de teenbestorting worden vervangen. Deze kosten worden uitgespaard ingeval met een zandige versterking wordt gewerkt, maar moeten wel worden gemaakt in het geval van een asfaltoverlaging. Het vervangen van de teenbestorting vormt voor de versterking van de Houtribdijk een aanzienlijke kostenpost. Dit komt doordat meer werkhandelingen nodig zijn, zoals verwijderen oude bekleding (stenen, textiel), aanpassen van het profiel, aanbrengen van textiel en nieuwe steenbestorting. Zoals hiervoor is aangegeven moet ook vooral aan de Markermeerzijde de teenbestorting flink verder worden doorgetrokken naar dieper water wat ook weer leidt tot hogere kosten. Het grootste deel van deze kosten bestaat uit de aankoop van de benodigde stenen.

Hierbij moet wel worden opgemerkt dat de kosten voor een teenbestorting natuurlijk groter zijn op dieper water. Ook voor de HRD geldt dat de instabiliteit van het talud doorgaans groter is op dieper water en dat geldt ook voor de mogelijke ondermijning door golven. Op het Enkhuizerzand, het deel dat met zand wordt versterkt, zijn de potentiële kosten voor de aanpassing van de teenbestorting naar verwachting kleiner.

Of de teenbestorting ook in het geval van een asfaltoverlaging tussen Trintelzand en Enkhuizen moet worden vervangen zal van plaats tot plaats verschillen. Slechts in enkele gevallen zal dat niet nodig zijn, omdat bij het vervangen van de bekleding of bij een profielaanpassing meestal ook de teenbestorting moet worden vervangen. Een uitzondering vormen situaties waar de versterking alleen de achter/landzijde van het talud betreft, bijvoorbeeld omdat alleen sprake is van een kruinhoogtetekort.

Golfverslag acceptabel of niet

De HRD dijk is een dam tussen twee wateren. Situaties met overslag zijn in dat geval van een asfaltoverlaging acceptabel. Bij grotere stormen is de dijk toch al afgesloten voor verkeer. De overslag is niet van invloed op de zeer robuuste asfaltoverlaging en ook niet op functies op en achter de dijk en ook vrijwel niet op waterpeilen en waterkwaliteit.

In geval van een dijk kan overslag een probleem vormen voor het achterland, vooral als hier bebouwing is gelegen. Een en ander is vooral afhankelijk van de frequentie van optreden en de kwetsbaarheid van de achterliggende functie. Er kunnen in dat geval omvangrijke werken nodig zijn om de overslag in goede banen te leiden. Hierbij kan ook worden gedacht aan functieverandering, bijvoorbeeld achterliggende gronden meer inzetten voor minder gevoelige functies. De kosten hiervan zullen van plaats tot plaats verschillen. Het is wel een belangrijke kosten variabele, die ertoe kan leiden dat minder vlug voor een asfaltoverlaging kan worden gekozen, ingeval er sprake is van een kruinhoogtetekort.

Mogelijkheden voor hergebruik breuksteen

Doordat het zandige profiel zowel aanwezige de teenbestorting en harde bekleding afdekt, wordt deze overbodig. Er is dan de keuze om deze te laten zitten of te verwijderen. Verwijderen kan zinvol zijn als hergebruik binnen het project of in de directe omgeving mogelijk is, waarmee kosten kunnen worden uitgespaard. Ook kan het soms om milieutechnische redenen nodig zijn om de bekleding te verwijderen voordat wordt versterkt met zand.

Of hergebruik mogelijk is en/of verwijderen nodig is, hangt af van plaats- en projectspecifieke variabelen. Voor de Houtribdijk is in principe hergebruik van de teenbestorting mogelijk binnen het werk of voor het bouwen van extra luwtedammen ten behoeve van natuurontwikkeling. Aandachtspunt hierbij is wel dat op het Enkhuizerzand de teenbestorting vanwege de beperkte vaardiepte, niet overal even goed bereikbaar is met een volgeladen schip. Er moet dan meer moeite worden gedaan om de aanwezige stenen op te pakken. Dit betekent dat hergebruik tot minder grote kostenbesparingen leidt dan in het geval de af te voeren stenen wel goed bereikbaar zijn.

3.2 Kenmerken versterking met stenen

Elders langs het IJsselmeergebied kan ook een versterking met zetsteen, in plaats van een asfaltoverlaging, aan de orde zijn. De kosten voor mogelijke aanpassingen aan de teenbestorting zijn vergelijkbaar, maar in een traditionele versterking worden ook veel kosten gemaakt voor het verwijderen van de bestaande en aanbrengen van de nieuwe bekleding. In het geval van de Houtribdijk gaat het daarbij vooral om zandasfaltbeton aan de Markermeerzijde dat zijn einde levensduur heeft bereikt. Dit betekent dat er geen hergebruik, binnen het werk, mogelijk is, waardoor vooral kosten worden gemaakt voor verwijderen, transport en storten. Bij de kosten van storten kan er dan ook nog sprake zijn van een risico op verontreinigingen, waarmee de kosten van het storten toenemen. Er zijn verontreinigde bekledingen die apart moet worden gestort. Aangezien een asfaltoverlaging direct over de bestaande bekleding kan worden gezet, worden bij een asfaltoverlaging deze kosten voor verwijderen en

afvoeren niet gemaakt. Of men de oude, mogelijk ook vervuilde, bekleding ook daadwerkelijk wil laten zitten is een kwestie van beleid.

De kosten van de nieuwe overlaging hangen vervolgens sterk af van de maatvoering van de nieuwe stenen die nodig zijn en of deels hergebruik van oude stenen mogelijk is. Bij grotere golfaanval zijn grotere stenen nodig die dan ook weer tot een dikkere laag bekleding leiden omdat de minimale laagdikte een functie is van de gemiddelde steenomvang. Al met al is daarmee een traditionele bekleding met stenen vaak op zich ook al weer duurder dan een asfaltoverlaging. De kosten nemen nog verder toe als er sprake is van een kruinhoogtetekort, of dat de dijk, vanwege macro-instabiliteit, nog moet worden voorzien van een flauwer profiel. De kosten voor het vervangen van de steenbekleding liggen daarom al gauw 1/3-deel hoger als die van een asfaltoverlaging, maar kunnen ook meer dan het dubbele bedragen.

Er zijn echter ook situaties waar wordt gekeken naar de mogelijkheid om gezette steenbekleding te verkitten, waardoor ze niet hoeft te worden vervangen. Dit is van geval tot geval anders maar kan soms wel leiden tot grote kostenbesparingen.

Er kunnen dijken zijn waar om landschappelijke of cultuurhistorische redenen gekozen wordt voor een bekleding van stenen. Als een groot deel van de stenen binnen het werk kan worden hergebruikt, is het opnieuw aanbrengen van een steenbekleding mogelijk goedkoper. Tegenwoordig worden stenen ook machinaal gezet, waardoor afvoeren van de oude stenen bekleding juist goedkoper kan zijn.

In de vergelijking is het uitgangspunt dat het vervangen van de steenbekleding orde 1/3 duurder uitvalt dan de inzet van een asfaltoverlaging.

4 Vergelijking duin tegen dijk en overlaging Houtribdijk

Een vergelijking is mogelijk op vele variabelen. Uitgangspunt zijn vooreerst condities zoals die aan de HRD worden aangetroffen. De waterdiepte varieert tussen de 2 en 5 meter voor de dijk. Er is uitgegaan van een ontwerp-waterstand en daarmee dus een aansluithoogte van het zandige talud op de dijk van gemiddeld 2 meter boven NAP (voor de Markermeerzijde).

De directe kosten voor het zand liggen theoretisch tussen de;

- 1,25 Euro/m³ (geen kosten voor verplaatsen van de deklaag en inzet van groot materieel),
- 2,50 Euro/m³ (met kosten voor verplaatsing van deklaag of andere functies dragen de kosten voor het verplaatsen van de deklaag) en
- 6,00 Euro/m³ (winning elders en transport per beun).

De directe kosten voor de asfaltoverlaging zijn globaal geschat (50 Euro/m², voor aankoop en plaatsing stenen en ingieten met asfalt) en dat geldt ook voor de teenbestorting (40 Euro/m² bij vervanging en 50 % lagere kosten teenbestorting ingeval van hergebruik en dus 20 Euro/m²).

Een vergelijking op directe kosten is ingeval van een zandige versterking en een asfaltoverlaging met een vervanging van de teenbestorting goed mogelijk omdat beide type projecten orde dezelfde opslagfactor voor indirecte kosten hebben. Er kunnen echter ook situaties zijn dat een harde versterking veel complexer is, bijvoorbeeld vanwege aanwezige bebouwing e.d., waardoor deze opslagfactor veel hoger is. In dat geval is het beter om een vergelijking te doen op de totale kosten. Dit maakt de vergelijking beter maar ook veel complexer. De bijkomende kosten van een zandige versterking kunnen toenemen als veel geologisch onderzoek nodig is voordat een goede locatie en een ontgrondingsvergunning is verkregen. De kosten kunnen ook toenemen als verhoudingsgewijs meer dekgrond moet worden verplaatst, of wanneer de daarmee samenhangende depotkosten oplopen vanwege de noodzaak van extra luwte structuren. Voornoemde kosten zijn allen zeer project- en plaatsspecifiek en niet verder in beschouwing genomen.

IN KOSTEN ASFALT OVERLAGING					
		Diepte [m]			
		5	4	3	2
Directe kosten Euro/m					
Alleen asfalt overlaging	A	963	963	963	963
Asfalt en teenbestorting	B	1643	1558	1488	1348
Idem met deel hergebruik	C	1411	1355	1309	1217
IN EQUIVALENT VOLUME ZAND UITGEDRUKT (bij verschillende zandprijzen)					
Directe kosten/m ³	1,25	A	770	770	770
		B	1314	1246	1078
		C	1129	1084	973
2,5		A	385	385	385
		B	657	623	539
		C	565	542	487
6		A	160	160	160
		B	274	248	225
		C	235	218	203
BENODIGD VOLUME ZANDIG VOORLAND ALS DUIN TEGEN DIJK					
Onderhoud	5	m ³ /m	100	100	100
Volume nodig		m ³ /m	1121	850	561
Uitgaande van een dijk met een kruinhoogte van 6,5 meter, een teen tot 3,5 meter beneden peil. Een zandig talud van 1 op 32, een ontwerpwaterstand van 2 meter boven peil en 15 tot 30% toeslag voor zetting e.d.					

Tabel 2 De directe kosten voor een asfaltoverlaging en een aanpassing van de teenbestorting bij verschillende waterdiepte en ook uitgedrukt in het volume aan zand dat bij verschillende zandprijzen, daarvoor gekocht kan worden. Daarnaast een schatting van het volume aan zand dat nodig is voor de aanleg van het zandige profiel uitgaande van beperkt onderhoud. De tabel is gebaseerd op een schematisch ontwerp zoals omschreven. Kleurencode: dondergroen zandig voorland goedkoper, licht groen zandig voorland in dezelfde orde van kosten.

Deze eerste vergelijking op basis van de kosten laat het volgende zien:

Alleen als het zand goedkoop is, kan een zandige versterking, type duin tegen dijk, kosteneffectiever zijn dan een asfaltoverlaging in geval ook de teenbestorting moet worden vervangen. Als vervanging van de teenbestorting niet nodig is of er kan veel breuksteen worden hergebruikt, dan is een asfaltoverlaging waarschijnlijk ook in dit geval bij grotere waterdiepte kosteneffectiever. Bij een zandprijs van 6 Euro/m³, dus ingeval zand van ver moet worden gehaald, is een zandig voorland, type duin tegen dijk, niet de meest kosteneffectieve oplossing.

Zoals aangegeven bevindt zich bijna overal in het IJsselmeergebied een Holocene deklaag. Een directe kostprijs van 1,25 Euro/m³ voor het aanbrengen van zand, rechtstreeks met een cutter of steekzuiger, is daarom niet reëel, omdat deze kostprijs exclusief de kosten voor het verplaatsen van de Holocene deklaag is. De minimale kostprijs ligt eerder op 2 tot 2,5 Euro/m³. Bij een kostprijs van 2,5 Euro/m³ is een zandige vooroever alleen nog goedkoper als de waterdiepte voor dijk niet groter is dan 3 meter en ook de verwachte zetting en inpassing van het volume beperkt zijn, c.q. niet veel extra volume en kosten vragen. Dit is in feite de situatie op het Enkhuizerzand waar de waterdiepte grotendeels tussen de 2 en 3 meter schommelt en ook de zetting op de meeste plaatsen beperkt is.

Als alle dekgrond effectief kan worden ingezet op korte afstand ten behoeve van natuurontwikkeling, dan zou men de daarmee samenhangende kosten kunnen zien als vermeden (maatschappelijke) kosten, en vormt de lagere zandprijs met 1,25 Euro/m aan directe kosten, de basis voor de vergelijking. In dat geval vormt een zandig voorland (duin tegen dijk) een goed alternatief ook bij een grotere waterdiepte. Dit is een valide redenering als er al natuur of KRW maatregelen zijn geïdentificeerd en begroot, die als onderdeel van de versterking kunnen worden gerealiseerd. Voor enkele van dit type maatregelen, zoals de aanleg van land water overgangen, geldt dat een aanleg in combinatie met versterking ook tot lagere realisatiekosten zal leiden.

Als zand niet nabij gewonnen kan worden, bijvoorbeeld omdat geen vergunning kan worden verkregen, zoals mogelijk op het IJsselmeer, dan is een asfaltoverlaging altijd goedkoper zelfs als de teenbestorting moet worden aangepast.

In voornoemd voorbeeld is uitgegaan van beperkt onderhoud, iets wat reëel is omdat het tracé op het Enkhuizerzand niet erg ongunstig is gelegen. Daarbij wordt in het ontwerp van de zandige versterking van de HRD dijk ook gebruik gemaakt van vooroeverdammen die het onderhoud ook aan de Markermeerzijde fors beperken. Bij een forse toename van het onderhoud verliest een zandige vooroever het ook op ondieper water van een asfaltoverlaging ook als een vervanging van de teenbestorting nodig is.

De diepte blijkt een doorslaggevende variabele naast de zandprijs. Dit komt mede doordat bij een toenemende diepte de teenbestorting niet evenredig meer toeneemt, omdat deze maar tot een bepaalde diepte wordt doorgezet.

Nu is een asfaltoverlaging een erg kosteneffectieve oplossing die niet altijd om landschappelijke of andere redenen gewenst is. Het vervangen van de bestaande bekleding door een gezette steenbekleding is veel duurder. In geval deze vergelijking wordt gemaakt dan is ook tot een waterdiepte van 4 meter een zandige versterking in potentie kosteneffectiever onder voorbehoud dat zand in de directe omgeving kan worden gewonnen en het onderhoud c.q. de erosie van het profiel niet te groot is.

5 Vergelijking met andere typen zandig voorland

5.1 Gekozen oplossing

De oplossing voor de Houtribdijk is een 'duin tegen dijk' oplossing. Zoals eerder aangegeven kan in principe uitgaande van een doorbraak/faalkans ook een afslagsom worden gemaakt waarbij ook het volume in de dijk meedoet in de omvang van het volume van de waterkering en dus in de sterkte. In het geval van de Houtribdijk was de situatie zo dat ook het gebruik van de provinciale weg geborgd moest worden, waardoor het niet acceptabel was om uit te gaan van een situatie waarbij afslag regelmatig voor problemen voor het talud zou zorgen.

Een verder punt van aandacht is de onderhoudsinspanning. Mocht bijvoorbeeld op basis van een afslagsom blijken dat de huidige bekleding niet hoeft te worden afgeschermd, dan zou regelmatig schade optreden aan het talud, waardoor, ook met oog op de weg, nog steeds frequent onderhoud nodig zou zijn. Het is dan ook nodig om ook vanuit het onderhoud een minimale reststerkte van de bekleding te eisen. Mocht er sprake zijn van enige reststerkte, dan kan natuurlijk ook nog worden uitgegaan van een hybride oplossing waarbij voldoende zand wordt aangelegd om de golf dusdanig te verminderen dat de huidige bekleding voldoende sterk is en de huidige kruin voldoende hoog.

Hybride oplossing

Deze situatie doet zich dus niet voor bij de Houtribdijk, maar kan zich wel voordoen op andere dijktrajecten in het IJsselmeergebied. In dat geval kan worden volstaan met een kleiner volume aan zand voor de initiële aanleg van het profiel. Hoeveel kleiner hangt af van de reststerkte van de bekleding en de vereiste reductie van de golfhoogte. Hierbij kan worden opgemerkt dat ook rekening moet worden gehouden met eventuele verschillen in reststerkte, die kunnen leiden tot lokale gradiënten in langstransport.

Een hybride of een duin in dijk oplossing zal er vooral toe leiden dat de aansluithoogte voor het zand lager komt te liggen. Bij een lagere aansluithoogte treft de aanstormende golf eerder de bekleding. Er ontstaat dan een ander beeld, waarbij het zandige voorland eerder tot een kosteneffectieve oplossing leidt.

In theorie kan men de hoogte van het voorland afstemmen op de maximale golf die nog toelaatbaar is gezien de (rest)sterkte van de bekleding of de hoogte van de kruin. Bij golven kleiner dan 0,5 meter houdt de meeste bekleding het wel en bij een nog kleinere golf houdt zelfs een grasbekleding op een niet te steil talud het. Uitgaande van een 0,5 meter en een golfhoogte/waterdiepte verhouding van 0,5, zou een hoogte van het voorland op 1 meter onder de ontwerpwaterstand voldoende moeten zijn. De ontwerpwaterstand varieert tussen meer dan 2 meter in de noordoostelijke hoek van Markermeer en IJsselmeer tot minder dan 1 meter voor de zuidwestelijke hoek. Dit betekent dat een voorland op NAP+1 meter vrijwel altijd voldoende golfreductie biedt langs het Markermeer en IJsselmeer, en dat plaatselijk ook een voorland op NAP voldoende is. Als de reststerkte van de bekleding groter is en ook de kruinhoogte dan volstaat mogelijk zelfs een voorlandniveau van NAP-1 meter.

Hierbij moet wel worden opgemerkt dat het onduidelijk is hoe een zandig profiel zich gedraagt als het maar beperkt doorloopt tot op de dijk. Bij een aansluiting tot op waterlijn, moet verwacht worden dat het voorland verder zal worden verlaagd, mede doordat de golfenergie op het stenen talud samenkomt. Gezien de ontwikkeling van het profiel in de EcoShape pilot zal de hoogte van het voorland zich stabiliseren om de NAP-1 meter. Bij deze hoogte is waarschijnlijk de erosie als gevolg van dwars en langstransport beperkt. De vraag is wel of er bij deze hoogte van het voorland nog sprake kan zijn van een significante golfreductie bij maatgevende condities.

Als wordt uitgegaan van een aansluithoogte op NAP+1 meter, in plaats van NAP+2 meter, dan ontstaat het volgende beeld:

IN KOSTEN ASFALT OVERLAGING					
		Diepte			
Directe kosten Euro/m		5	4	3	2
Alleen asfalt overlaging		963	963	963	963
Asfalt en teenbestorting		1643	1558	1488	1348
Idem met deel hergebruik		1411	1355	1309	1217
IN EQUIVALENT VOLUME ZAND UITGEDRUKT (bij verschillende zandprijzen)					
Directe kosten/m3	1,25	A	770	770	770
		B	1314	1246	1190
		C	1129	1084	1047
	2,5	A	385	385	385
		B	657	623	595
		C	565	542	524
	6	A	160	160	160
		B	274	260	248
		C	235	226	218
BENODIGD VOLUME ZANDIG VOORLAND ALS DIJN TEGEN DIJK					
Onderhoud	5	m3/m/j	100	100	100
Volume nodig		m3/m	850	621	396
Uitgaande van een dijk met een kruinhoogte van 6,5 meter, een teen tot 3,5 meter beneden peil.					
Een zandig talud van 1 op 32, een aansluithoogte van 1 meter boven peil en 15 tot 30% toeslag voor zetting e.d.					

Tabel 3 De directe kosten voor een asfaltoverlaging en een aanpassing van de teenbestorting bij verschillende waterdiepte uitgedrukt in het volume aan zand dat bij verschillende zandprijzen, daarvoor gekocht kan worden. Daarnaast een schatting van het volume aan zand dat nodig is voor de aanleg van het zandige profiel als een hybride type met een aansluithoogte van 1 meter. Kleurencode: donker groen zandig voorland goedkoper, licht groen zandig voorland in kosten in dezelfde orde als van een asfaltoverlaging.

Wel kan hierbij worden opgemerkt dat een hybride natuurlijk niet meer nodig is in het geval de reststerkte van de steenbekleding voldoende is om bijvoorbeeld het onderhoud te beperken of het talud van een eventuele weg te waarborgen bij vaker optredende stormen.

In een afweging met een duurdere versterking waar de steenbekleding volledig wordt vervangen, kan een zandig voorland de meest kosteneffectievere oplossing zijn tot een waterdiepte van 4 à 5 meter, ook bij een aansluithoogte op NAP+1 meter. Maar ook in dit geval geldt dat lokale beschikbaarheid van zand een voorwaarde is. Zodra het zand van verder weg moet komen, is een zandig voorland al gauw de duurdere oplossing.

IN KOSTEN ASFALT OVERLAGING					
		Diepte			
Directe kosten Euro/m		5	4	3	2
Steenbekleding		1348	1348	1348	1348
Steenbekleding en teen		2028	1943	1873	1733
Idem met deel hergebruik		1796	1740	1694	1602
IN EQUIVALENT VOLUME ZAND UITGEDRUKT (bij verschillende zandprijzen)					
Directe kosten/m3	1,25	A	1078	1078	1078
		B	1622	1554	1498
		C	1437	1392	1355
	2,5	A	539	539	539
		B	811	777	749
		C	719	696	678
	6	A	225	225	225
		B	338	324	312
		C	299	290	282
BENODIGD VOLUME ZANDIG VOORLAND ALS DUIN TEGEN DIJK					
Onderhoud	5	m3/m/j	100	100	100
Volume nodig		m3/m	850	621	396
Uitgaande van een dijk met een kruinhoogte van 6,5 meter, een teen tot 3,5 meter beneden peil. Een zandig talud van 1 op 32, een ontwerpwaterstand van 2 meter boven peil en 15 tot 30% toeslag voor zetting e.d.					

Tabel 4 De directe kosten voor een steenbekleding en een aanpassing van de teenbestorting bij verschillende waterdiepte uitgedrukt in het volume aan zand dat bij verschillende zandprijzen, daarvoor gekocht kan worden. Daarnaast een schatting van het volume aan zand dat nodig is voor de aanleg van het zandige profiel als een hybride type met een aansluithoogte van 1 meter. Kleurencode: donker groen zandig voorland goedkoper, licht groen zandig voorland in kosten in dezelfde orde als van een asfaltoverlaging.

Steiler profiel en minder onderhoud

De kosten van een zandig voorland kunnen nog verder omlaag als kan worden uitgegaan van een wat steilere algemene evenwichtshelling (bijvoorbeeld 1 op 26) en een beperkter onderhoud. Dit geeft meer mogelijkheden voor situaties waar de zandprijs iets hoger ligt of de waterdiepte voor de dijk wat groter is.

Ook kunnen er situaties zijn waarbij beschikt kan worden over fijner zand, maar dat daarvoor geen dekgrond hoeft te worden verplaatst, waardoor de kosten toch lager uitvallen, ondanks dat met een veel flauwer talud gewerkt moet worden en dus met een veel groter volume.

IN KOSTEN ASFALT OVERLAGING					
		Diepte			
Directe kosten Euro/m		5	4	3	2
Alleen asfalt overlaging		963	963	963	963
Asfalt en teenbestorting		1643	1558	1488	1348
Idem met deel hergebruik		1411	1355	1309	1217
IN EQUIVALENT VOLUME ZAND UITGEDRUKT (bij verschillende zandprijzen)					
Directe kosten/m3	1,25	A	770	770	770
		B	1314	1246	1190
		C	1129	1084	1047
	2,5	A	385	385	385
		B	657	623	595
		C	565	542	524
	6	A	160	160	160
		B	274	260	248
		C	235	226	218
BENODIGD VOLUME ZANDIG VOORLAND ALS DIJN TEGEN DIJK					
Onderhoud	2	m3/m/j	40	40	40
Volume nodig		m3/m	649	463	280
Uitgaande van een dijk met een kruinhoogte van 6,5 meter, een teen tot 3,5 meter beneden peil.					
Onderhoudsinspanning orde 2m3/meter per jaar.					
Een zandig talud van 1 op 26, een aansluithoogte van 1 meter boven peil en 15 tot 30% toeslag voor zetting e.d.					

Tabel 5 De directe kosten voor een asfaltoverlaging en een aanpassing van de teenbestorting bij verschillende waterdiepte uitgedrukt in het volume aan zand dat bij verschillende zandprijzen, daarvoor gekocht kan worden. Daarnaast een schatting van het volume aan zand dat nodig is voor de aanleg van het zandige profiel als een hybride type met een aansluithoogte van 1 meter, beperkt onderhoud en een taludhelling van 1 op 26. Kleurencode: dondergroen zandig voorland goedkoper, licht groen zandig voorland in dezelfde orde van kosten.

5.2 Kosten van onderhoud

In voornoemde rekenvoorbeelden is standaard 100 m³ per meter opgenomen voor onderhoud en stormtoeslag. Dit is een aanzienlijk volume, en daarom ook voldoende voor een langere periode. De onderhoudsinspanning varieert echter sterk van plaats tot plaats. Naast onderhoudssuppleties moet ook rekening worden gehouden met andere beheers- en onderhoudsaspecten, zoals inspectie, plaagbestrijding e.d. Vooral maaien van rietoevers, bijvoorbeeld om opslag van wilgen te voorkomen kan daarbij een aanzienlijke kostenpost zijn.

De onderhoudsinspanning hangt daarbij mede af van de aanwezigheid van vooroeverdammen en oeervervegetatie. In onderstaande tabel zijn vier varianten wat betreft onderhoudskosten voor een zandig voorland naast elkaar gezet, met daarbij ook een dijk met een teenbestorting. Uitgedrukt in gekapitaliseerde onderhouds- en beheerskosten gaat het om een aanzienlijk bedrag dat orde 25 tot 50 % van de aanlegkosten kan uitmaken.

Echter jaarlijkse beheer- en onderhoudskosten worden voor zachte en voor harde versterkingen gemaakt. Van belang is daarom vooral het verschil in beheers- en onderhoudskosten. Deze zijn voor 3 van de beschouwde varianten voor een zandig voorland heel vergelijkbaar met die voor een harde oplossing. In het geval van een open strand liggen de onderhoudskosten hoger, ondanks een beperkte erosie van orde 2 m³/m per jaar. Het verschil in (gekapitaliseerde) onderhoudskosten kan orde 250 Euro/meter bedragen, uitgedrukt in totale kosten.

Bij de investeringskosten voor onderhoud is gekeken naar een vergelijking op directe kosten. Bij grotere volumes is de omrekenfactor naar totale kosten orde factor 1,8 tot 2. Uitgedrukt in de bedragen van de tabellen 1 t/m 4 gaat het dus om orde 150 Euro/meter verschil. Dit is een beperkt verschil in vergelijking met de aanlegkosten. Wel moet

worden opgemerkt dat op trajecten met veel erosie het verschil groter en ook doorslaggevend voor een keuze zal zijn.

Profielvorm																	
hoogte kruin boven peil		7 [mtr NAP]															
taludhelling hard profiel		3 [1/n]															
taludhelling zandig profiel		30 [1/x]															
aansluithoogte zacht profiel		2 [mtr NAP]															
grens riet en talud		1 [mtr NAP]															
Beheer en onderhoud																	
		kosten Euro/m 2 jaar	1 maal per jaar	2 maal per jaar	1 maal per 3 jaar	Euro/m 3 mini maal	Euro/m 3 maxi maal	opper vlak m2/m	erosie m3/m.jaar minimaal	erosie m3/m.jaar maximaal	extensief maaien, rietkraag 30 meter	extensief maaien, rietkraag 10 meter	beperkte erosie, geen rietkraag	erosie, geen rietkraag	dijk met vooroever dam	asfalt zonder vooroever dam	
stenen	talud boven waterlijn	0,2						15			3	3	3	3	4,2	2,1	
stenen	teenbestorting	0,2									0	0	0	0	6	6	
stenen	vooroeverdam	0,6									1,8	1,8	0	0	1,8	0	
vegetatie	talud boven waterlijn		0,045	0,09	0,023			60			0,675	0,675	2,7	2,7	0	0	
vegetatie	oever riet		0,08		0,05			30			1,5	0,5	0	0	0	0	
vegetatie	oever waterriet		0,05		0,02			20			0,4	0,4	0	0	0	0	
vegetatie	watervegetatie										0	0	0	0	0	0	
zand	talud boven waterlijn					6	15		0,1	0,2	1,5	1,5	1,5	3	0	0	
zand	vooroever					3	10		0,2	2	2	2	10	20	0	0	
Totaal Euro/m											11	10	17	29	12	8	
Totaal Euro/1000 meter											10875	9875	17200	28700	12000	8100	
inspectie (Euro/km)											450	450	450	450	450	450	
handhaving (Euro/km)											450	450	450	450	450	450	
bestrijding plagsoorten (Euro/km)											950	950	950	950	950	475	
monitoring zandig profiel (Euro/km)											2500	2500	2500	2500			
Totaal jaarlijkse kosten (Euro/km)											15225	14225	21550	33050	13850	9475	
Gekapitaliseerd per meter											335	313	474	727	305	208	

Tabel 6 Schatting beheer-(en onderhoudskosten) als totale kosten van zandige vooroevers en een dijk met een asfaltverlaging

In voornoemd overzicht zijn vooral de mogelijke beheerskosten voor de teenbestorting een belangrijke variabele, die echter moeilijk is in te schatten. Goed aangelegde teenbestorting kan over meerdere jaren onderhoudsvrij zijn. Een incidentele zware ijsgang kan aanleiding zijn tot incidenteel onderhoud. Het is dus lastig deze post goed in te schatten, want er is moeilijk een langjarig gemiddelde kost aan te koppelen.

5.3 Effect van baten

Zandige oevers kunnen bijdragen aan andere doelstellingen zoals recreatie en natuur. Zoals hiervoor is aangegeven kan dan sprake zijn van vermeden kosten. Het meest eenvoudige voorbeeld is een situatie waarin de aanleg van een recreatiestrand gewenst is. Met een zandige vooroever wordt in feite een strand aangelegd, waardoor deze kosten in potentie vrijwel in zijn geheel worden vermeden/uitgespaard. Hiervoor kan een hybride al voldoende zijn, maar voor een strand moet de aansluithoogte wel boven NAP+1 meter zijn gelegen, zodat er sprake is van voldoende droog, hoog en breed strand.

Het kan ook zijn dat in de omgeving van een zandige versterking een zandstrand gewenst is, die geen deel uit maakt van de zandige versterking. In dat geval zijn er vaak kostenvoordelen omdat ook voor de aanleg van het recreatiestrand op korte afstand zand beschikbaar kan komen en ook baggerschepen beschikbaar zijn om de klus te klaren. Ook dit kostenvoordeel kan aanzienlijk zijn voor de aanleg van het strand, vooral als gebruik kan worden gemaakt van een lokale zandwinput. Het kostenvoordeel kan groot zijn voor het strand, maar in vergelijking met de totale kosten die voor de zandige versterking worden gemaakt, toch beperkt zijn. Met andere woorden deze spin-off draagt niet direct bij aan het goedkoper maken van een zandig voorland als wijze van versterking.

Een ander voorbeeld is dat met de versterking ook gewilde land-waterovergangen worden gemaakt. Dit is bijvoorbeeld aan de Markermeerzijde van de Houtribdijk het geval waar in de luwte van vooroeverdammen een zandig profiel wordt aangelegd. In geval hier niet met zand zou worden versterkt en men toch land-water overgangen wil maken, dan moeten hiervoor de volledige kosten worden gemaakt voor deze land-waterovergangen. Het totaal aan vermeden kosten hangt dan af van de omvang van de gewenst te realiseren land-waterovergangen en ook deels van hun ontwerp. Voor een land-water overgang is het niet nodig om een aansluiting van het zandige profiel tot op de ontwerpwaterstand bij maatgevende condities te maken. Een land-waterovergang zonder veiligheidsfunctie kan dus slanker worden uitgevoerd. De hoeveelheid zand die hiervoor nodig is dus kleiner, vooral ook omdat een grotere inzet van Holocene klei mogelijk is. Wel kan afhankelijk van de locatie nog steeds de bouw van een luwtedam nodig zijn, om de geschikte golfvrije condities voor de ontwikkeling van watervegetatie mogelijk te maken.

In welke mate extra doelen kunnen worden bediend is sterk afhankelijk van locatie en project. Met de versterking van de Houtribdijk kan ook een deel van de verdere aanleg van Marker Wadden worden gerealiseerd in de vorm van Trintelzand. Een deel daarvan kan budgetneutraal worden uitgevoerd, omdat deze oplossing niet duurder is dan een ander versterkingsontwerp waarbij minder ondiepten worden gemaakt. Doordat Trintelzand gemaakt kan worden met dekgrond die vrijkomt bij de zandwinning die een bestemming moet krijgen kan veel voor de natuur worden bereikt zonder dat daarbij sprake is van extra kosten. Het zelfstandig aanleggen van Trintelzand zou tot aanzienlijke kosten hebben geleid, vooral als deze aanleg geen gebruik kan maken van een winput, dekgrond en geschikt baggermateriaal. De vermeden kosten voor een vergelijkbaar gebied liggen in de orde van meerdere miljoenen, waarbij de kosten per m³ ingezet materiaal in dezelfde orde of zelfs iets hoger liggen dan bij een gelijktijdige realisatie met de versterking van de Houtribdijk. Een geheel zelfstandig project, nodig als de Houtribdijk in zijn geheel met asfalt zou zijn overlaagd, zou mogelijk op termijn altijd worden aangelegd, zij het in een andere vorm en tegen hogere kosten.

Als wordt verondersteld dat voor de zelfstandige aanleg van een dergelijk gebied ook kan worden beschikt over een eigen winput, dan zijn de vermeden kosten vergelijkbaar aan de kosten voor het verplaatsen van dekgrond voor de versterking van de Houtribdijk met zand. Als dit kan worden ingezet als cofinanciering bijgelegd dan zou de kostprijs van het zand voor de zachte versterking terugvallen naar de 1,25 Euro/m³, ofwel de laagste zandprijs waarmee in de tabel gerekend is.

In het IJsselmeergebied geldt voor de ontgrondingsvergunning een multifunctionaliteit beginsel, wat kan worden doorvertaald in een minimaal volume aan dekgrond dat lokaal moet worden ingezet voor de ontwikkeling van natuur. Omputten is goedkoper, en dit betekent dus dat in het versterkingsproject al extra kosten worden gemaakt voor het nuttig inzetten van dekgrond.

6 Conclusies situatie Houtribdijk

6.1 Inleiding

Bij de conclusies wordt gekeken naar:

- Een kosten-effectiviteitsvergelijking, die alleen wordt gedaan op basis van kosten.
- Een kosten-baten analyse, waarbij ook naar baten wordt gekeken.

6.2 Kosten-effectiviteitsvergelijking situatie Houtribdijk (duin tegen dijk)

De Business Case voor een zandige vooroever wordt bepaald door kosten en de meerwaarde die een zandige vooroever kan hebben voor andere functies, vooral recreatie en natuur.

Er zijn veel variabelen, die de kosten bepalen van een zandige vooroever en een asfaltoverlaging. Een grotere waterdiepte en golf en een hogere ontwerpwaterstand leiden tot hogere kosten voor een zandige vooroever, maar slechts beperkt bij een asfaltoverlaging. Alleen als ook de teenbestorting moet worden aangepast is de diepte en de golf ook van invloed op de kosten van asfaltoverlaging. Daar staat tegenover dat de kosten van een asfaltoverlaging niet dalen bij minder zware hydraulische condities of een kleinere waterdiepte. Dit komt omdat er een minimale dikte nodig is voor de uitvoering, namelijk 30- 35 cm asfaltoverlaging, over de gehele dijk.

Voor de asfaltoverlaging is het dan ook gemakkelijker een standaard kostprijs aan te geven en vervolgens te bezien onder welke voorwaarden een zandige vooroever goedkoper of ook duurder kan zijn in aanleg. Vervolgens kan gekeken worden naar de invloed van het onderhoud. Het onderhoud van een asfaltoverlaging is zeer beperkt en hangt in hoofdzaak samen met het onderhoud dat nodig is aan de teenbestorting die immers onderdeel vormt van deze vorm van versterking.

Bij een waterdiepte van minder dan 2 tot 3 meter wordt een zandige vooroever, type duin tegen dijk, waarschijnlijk goedkoper dan een asfaltoverlaging.

Dit leidt tot de volgende conclusies:

- Een asfaltoverlaging is, ingeval van de dijken in het IJsselmeergebied, waarschijnlijk altijd goedkoper dan een duin tegen dijk type zachte versterking als de teenbestorting van de dijk niet hoeft te worden aangepakt.

- Als de teenbestorting wel moet worden vervangen door nieuwe stenen, dan is een zandige vooroever type duin tegen dijk waarschijnlijk goedkoper bij een waterdiepte van minder dan 2,5 meter, inclusief zetting (eigenlijk moet gekeken worden naar de totale ophoging, dus waterdiepte, inclusief zetting) onder voorwaarde dat het zand lokaal dus op korte afstand kan worden gewonnen. Zoals al aangeduid is het laatste niet altijd mogelijk, omdat voor winningen in het IJsselmeergebied een multifunctionaliteitseis geldt, die op dit moment voor het IJsselmeer moeilijk kan worden onderbouwd. Toch is recent nog een vergunning verleend voor een zandwinning door Smals, waarbij de winning is gecombineerd met de ontwikkeling van een eiland dat plaats biedt aan een verwerkingsinstallatie en natuur en landschap.
- De versterking zoals gekozen voor de HRD, dus alleen zacht versterken op het ondiepere Enkhuizerzand, is gezien het kosten plaatje logisch. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat het volume aan zand nodig voor een zandig voorland ook sterk afhangt van de onderhoudsbehoefte. Deze onderhoudsbehoefte krijgt de vorm van een onderhoudslaag. Het volume hiervan is in verhouding tot het totale volume dat voor een zandig voorland moet worden aangebracht beperkt in het geval van een gunstige oriëntatie van de dijk ten opzichte van het golfveld en als de golfaanval beperkt is.
- Concave, bolvormige delen van de kust en dijken met veel golfaanval en een ongunstige oriëntatie hebben een grotere onderhoudsbehoefte. In sommige gevallen kan deze sterk worden teruggebracht door de aanleg van een vooroeverdam, maar dit leidt alleen tot besparingen als deze dam goedkoop op ondiep water kan worden gerealiseerd.

Voor de overige oevers van het IJsselmeergebied is het aantal locaties waar een zandige vooroever in potentie goedkoper is beperkt, maar is dit sterk afhankelijk van het alternatief, waarmee wordt vergeleken, en daarmee ook met het faalmechanisme dat een rol speelt. Zo is voor de Markermeerdijken een asfaltoverlaging sowieso geen optie vanwege de cultuurhistorische waarde van de dijk. Hier moet een zandige oplossing, in dit geval een 'duin voor een dijk', worden vergeleken met een omvangrijke versterking van een instabiele dijk, die ook veel duurder is dan een asfaltoverlaging. Echter ook de zandige versterking is hier relatief duur, omdat een volledige primaire kering nodig is, type duin voor dijk, er sprake is van veel zetting (tot wel 100 %) en het zand duur van elders moet worden gehaald.

Zoals eerder is aangegeven geldt het voorstaande voor een 'duin tegen dijk' oplossing, zoals deze het uitgangspunt vormt voor de versterking van de Houtribdijk. In gevallen waarbij nog sprake is van een sterkte in de bekleding kan ook van een hybride vorm worden uitgegaan, waarbij alleen een golfreducerend voorland wordt aangelegd. Er ontstaat dan een zandige versterking die minder hoog tegen de dijk wordt aangelegd. Het volume van de zachte versterking gaat daarbij al gauw 25 tot 30 % naar beneden. Dit maakt dat dit type zandige versterking eerder een kosten effectief alternatief kan vormen.

Het benodigde volume gaat nog verder terug als mag worden uitgegaan van een steilere evenwicht helling. In de globale vergelijking is nu uitgegaan van een 1 op 32 talud. Waarschijnlijk is ook een talud van 1 op 26 haalbaar voor meer golfvrije delen van het IJsselmeergebied. Het benodigde volume voor de zandige versterking neemt daarmee verder af, waardoor vooral ook in combinatie met een lagere aansluithoogte een situatie ontstaat dat een zandig voorland kosteneffectiever kan zijn dan een asfaltoverlaging.

Type	Voorbeeld	Vergelijken met:
Duin voor dijk	Oeverdijk voor de Markermeerdijken	<u>Situatie:</u> macro-instabiliteit/cultuurhistorische waarde: <u>Vergelijken met:</u> omvangrijke versterking met profielaanpassing vanwege macro-instabiliteit <u>Zandige vooroever:</u> het is onduidelijk of zandige versterking kosteneffectiever is, maar een oeverdijk geeft als enige de mogelijkheid om de cultuurhistorisch belangrijke dijk te handhaven; daarnaast wordt meerwaarde geboden en biedt de zandige vooroever ook mogelijkheden voor compensatie van effecten die samenhangen met dijkversterking binnen het project.
Duin tegen dijk	Houtribdijk	<u>Situatie:</u> Bekleding einde levensduur en weggezakte teenbestorting, toelaatbare overslag: <u>Vergelijken met:</u> Asfaltoverlaging en aanpassen teenbestorting. <u>Zandige vooroever:</u> kosteneffectiever bij diepten kleiner dan 2,5 tot 3 meter, bij winning zand nabij en beperkt onderhoud. De kosteneffectiviteit is groter als de ontwikkeling van land-water overgangen ook wordt gezien als vermeden kosten.

Hybride	Geen voorbeeld in het IJsselmeergebied	<u>Situatie:</u> Onvoldoende hoogte, bekleding met aanzienlijke reststerkte, maar onvoldoende om onacceptabel onderhoud te voorkomen, of om het operationele gebruik van een weg voldoende te waarborgen. <u>Vergelijken met:</u> aanpassing bekleding al dan niet in combinatie met verhogen van de kruin van de dijk. <u>Zandige vooroever:</u> in veel gevallen kosteneffectiever dan conventionele versterking, behalve op plaatsen met veel potentieel onderhoud. De bestendigheid van een zandige vooroever ingeval van een aansluiting om de waterlijn is een aandachtspunt.
Duin in dijk	Theoretische afslagsommen	<u>Situatie:</u> in geval functies en onderhoud geen bepalende eisen stellen, maar de dijk wel dreigt te falen bij maatgevende condities, dus van zichzelf onvoldoende volume heeft om doorbraak te voorkomen. <u>Vergelijken met:</u> aanpassen steenbekleding al dan niet in combinatie met de hoogte van de kruin. <u>Zandige vooroever:</u> in veel gevallen kosteneffectiever dan conventionele versterking, behalve op plaatsen met veel potentieel onderhoud. De bestendigheid van een zandige vooroever ingeval van een aansluiting om de waterlijn is een aandachtspunt.

Tabel 7 Overzicht mogelijke inzet zandige vooroevers in het IJsselmeergebied.

6.3 Bijkomende baten situatie Houtribdijk

Een asfaltverlaging levert geen extra baten en staat min of meer op zichzelf, en dat geldt ook voor de meeste andere conventionele vormen van dijkversterking. Een zandige vooroever levert direct en vaak ook indirect, bijvoorbeeld vanwege de inzet van de Holocene deklaag voor natuurontwikkeling, wel potentiële baten. De meeste potentiële baten zijn zeer plaats- en projectspecifiek. Een land-waterovergang in zand heeft beperkte waarde voor natuur in geval deze overgang sterk geëxposeerd is. De golfwerking is in dit geval zo groot dat oevervegetatie zich niet kan vestigen en dat geldt ook voor watervegetatie. Het onderste deel van het talud blijft kaal, zoals ook kan worden waargenomen in de EcoShape pilot. Een kaal strand biedt wel mogelijkheden voor recreatie, maar deze recreatie moet uit oogpunt van mogelijke verstoring van vogels wel toelaatbaar zijn. Bovendien moet dan ook het strand toegankelijk zijn, wat extra kosten met zich mee kan brengen voor ontsluiting en parkeervoorzieningen.

Het is moeilijk om deze bijkomende baten in geld uit te drukken en dat is niet altijd nodig. Zo kan alleen gewerkt worden op basis van vermeden kosten als concreet kan worden aangetoond dat met de bereikte natuurontwikkeling kan worden bespaard op de kosten van natuurontwikkeling (elders). Dat is niet altijd het geval, vooral ook omdat vaak sprake is van gescheiden budgetten voor veiligheid en natuur. Soms geven bijkomende baten mogelijkheden voor cofinanciering vanuit gelden die geoormerkt zijn voor doelen die ook met een zandig voorland gediend zijn, zoals de KRW en TBES. Dit kan ertoe leiden dat een deel van de aanvullende kosten die moeten worden gemaakt om de Holocene deklaag een plaats te geven, worden gedekt door andere financieringsbronnen, waardoor een zandig voorland per saldo 30 tot 40 % goedkoper kan zijn in aanleg. In de praktijk werkt het vaak evenwel anders. Vanwege het multifunctionaliteitsbeginsel moet vaak al een deel van de dekgrond als onderdeel van het project een andere bestemming krijgen, zoals een natuurgebied. Het zal niet gauw gebeuren dat in dit geval geld voor natuurontwikkeling zal worden ingezet om deze bijkomende kosten op zich te nemen. Op zich leidt deze beleidsregel ertoe dat in het geval van een zandige versterking ook natuur wordt gemaakt, maar het kan er ook toe leiden, dat eerder voor een conventionele oplossing zonder zand wordt gekozen omdat deze uiteindelijk toch goedkoper is.

Het op euro's zetten van bijkomende baten kan dan worden gedaan door te kijken naar vermeden kosten, ofwel welke kosten zouden worden gemaakt als de baten op een andere wijze gerealiseerd zouden (moeten) worden. Zoals hiervoor al is aangegeven zullen deze vermeden kosten in de orde van 30 tot 40 % van de aanlegkosten van een zandig voorland kunnen liggen. Het percentage hangt daarbij wel af van het aandeel Holocene deklaag in de totale winning en veronderstelt mede dat de natuurontwikkeling op korte afstand van de put kan plaatsvinden.

Daarbij speelt het volgende:

- De directe baten, bijvoorbeeld in de vorm van een recreatiestrand of een land-water overgang, die voortkomen uit de versterking, dus de waarde die aan de zandige vooroever kan worden toegekend, puur op basis van het ontwerp dat de veiligheid dient in vergelijking met referentie of een conventioneel alternatief.
- De aanvullende baten die samenhangen met een enigszins gewijzigd en daarom mogelijk duurder ontwerp voor de versterking. Het is vooral voor deze aanvullende baten dat gekeken kan worden naar vermeden kosten en gezocht kan worden naar aanvullende financiering.
- De besparing op kosten als natuurontwikkeling gelijktijdig kan plaatsvinden met de versterking zodat contractering, aanbesteding, mobilisatie en inzet van materiaal kunnen worden gedeeld, zonder dat sprake is van een directe functionele samenhang tussen deze projecten.

Afhankelijk van de situatie kan dus sprake zijn van baten die het zandige voorland als alternatief toch aantrekkelijker maken dan een asfaltoverlaging, ook als de asfaltoverlaging lagere kosten heeft.

6.4 De ontwikkeling van een Business Case

Een Business Case is meer dan een vergelijking van alternatieven op kosteneffectiviteit. Het is zaak de scope voldoende breed te houden, kansen vroeg te identificeren en daar ook het ontwerpproces mede op in te richten. Meestal doorloopt een project de volgende stappen:

- Op basis van een kosten-effectiviteitsvergelijking blijkt dat een zandige vooroever kosteneffectiever kan zijn dan een conventionele versterking op delen van de dijk.
- Met een ontwerpoptimalisatie blijkt voor eenzelfde budget toch meer mogelijk met ook veel impliciet vermeden kosten, zoals het opnemen van Trintelzand in het basis ontwerp.
- Vanwege de bouw wordt het goedkoper en aantrekkelijker om gelijktijdig ook andere doelen te realiseren, door de aannemer uit te dagen of ook door aanvullende financiering in te zetten. Zo wordt gelijk met de versterking ook voor Lelystad een surfstrand aangelegd voor een hard versterkt deel van de dijk, dat vanwege het aanwezige materieel daarom wat goedkoper in zijn realisatie is.

Al met al wordt bij de zandige versterking van de Houtribdijk aan de Markermeerzijde dus veel extra waarde gecreëerd, waarbij deels ook door extra financiering wordt ingezet. Dit gebeurt evenwel niet aan de IJsselmeerzijde, om een aantal redenen:

- Aan de IJsselmeerzijde ontbreken de vooroeverdammen en waterplantvelden. Er ligt hier daarom geen (natuur) compensatieopgave en er zijn ook minder kansen om meer luwte en waterplantvelden aan te leggen.
- Ook aan de IJsselmeerzijde kunnen in principe vooroeverdammen worden aangelegd, waardoor luwe zones ontstaan voor de ontwikkeling van waterplantvelden en oevervegetatie. Echter de kosten van deze vooroeverdammen zijn hoger dan de vermeden kosten van extra onderhoud. Daar is bij de keuze van een zandig voorland daarom ook niet voor gekozen. Met betrekkelijk weinig extra kosten, was dit misschien wel mogelijk geweest vooral als de vrijkomende teenbestorting zou worden hergebruikt.
- Doordat aan de IJsselmeerzijde geen dekgrond hoeft te worden geborgen, want er vindt hier geen zandwinning plaats, wordt hier met dekgrond ook geen natuur aangelegd.
- Het plan Marker Wadden heeft betrekking op de gehele Markermeerzijde van de dijk en vormde een kader en aanjager voor het definiëren van aanvullende activiteiten. Aan de IJsselmeerzijde ontbrak een dergelijk kader en ook initiatiefnemer.

Het verschil tussen Markermeer en IJsselmeerzijde laat meteen ook zien wat belangrijke voorwaarden zijn voor het realiseren van extra baten voor natuurontwikkeling. Zo biedt zandwinning grote potenties voor natuurontwikkeling omdat de dekgrond een bestemming moet krijgen. Als stenen vrijkomen uit het werk die geschikt zijn voor hergebruik ontstaat eerder de mogelijkheid om golfuwe zones aan te leggen. Van belang is echter ook dat er een (beleids)kader is voor natuurontwikkeling en/of regionale ontwikkeling, waardoor er vroeg zicht is op nut en noodzaak om andere beleidsdoelen te koppelen aan versterking.

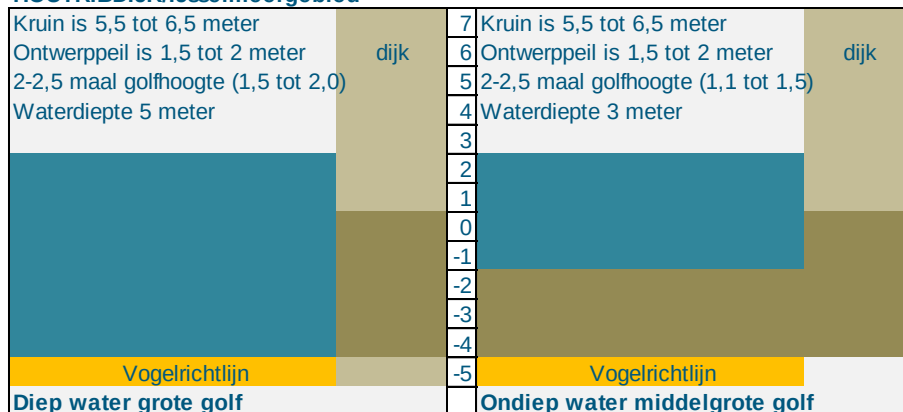
7 Extrapolatie naar andere trajecten IJsselmeergebied

7.1 Versterkingsopgave

Met de versterking van de HRD, de Afsluitdijk en de Markermeerdijken zijn de belangrijkste opgaven uit het tijdperk van de oude normering ter hand genomen. De HRD wordt voor de helft en de Markermeerdijken voor een deel met zand versterkt.

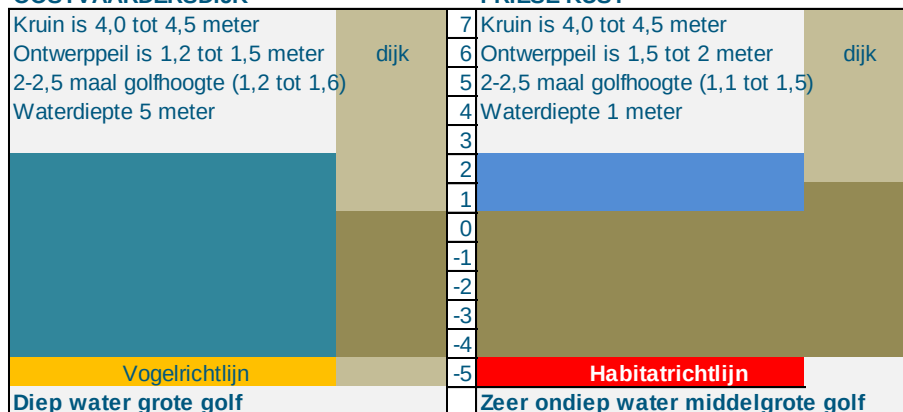
De huidige normering geeft in combinatie met het huidige instrumentarium nieuwe opgaven voor het IJsselmeergebied. Volgens de consequentie-analyse bestaan deze opgaven om het IJsselmeer vooral uit een hoogtetekort en mindere mate uit het risico op piping en macrostabiliteit. De hiervoor verantwoordelijke Hydraulisch Belasting Niveau (HBN) neemt toe onder meer langs de oevers van het Ketelmeer en Vossemeer. De grootste nog resterende opgave ligt bij de dijken van Flevoland.

HOUTRIBDIJK/IJsselmeergebied

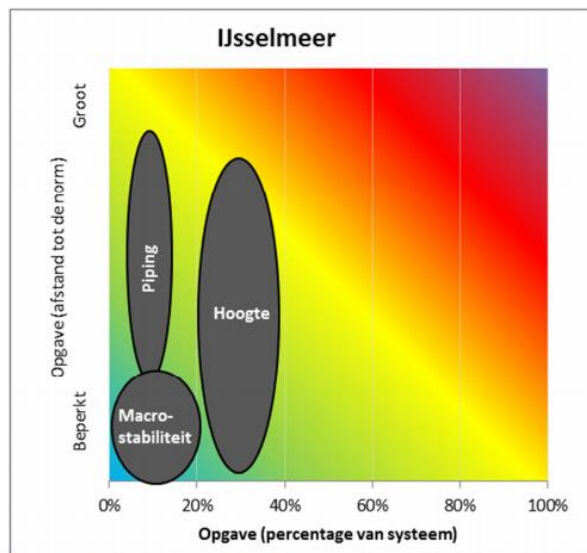


Figuur 1 Verschillende karakteristieke locaties aan de randen van het IJsselmeergebied.

OOSTVAARDERSDIJK



Figuur 2 Verschillende karakteristieke locaties aan de randen van het IJsselmeergebied.

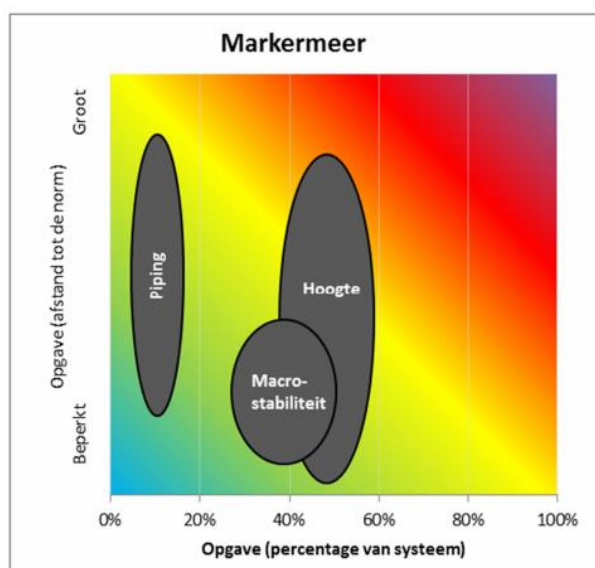


Figuur 3 De opgaven voor het IJsselmeer volgens de consequentie analyse. (Consequentieanalyse Nieuwe Normering & WBI2017; 2016).

In de aanloop naar de invoering van het nieuwe normeringsstelsel is gekeken naar de mogelijke gevolgen die dit kan hebben voor de versterkingsopgave. Hierbij is in eerste instantie gekeken naar de mogelijke toename van belangrijke hydraulische randvoorwaarden in de vorm van een consequentieanalyse. Deze consequentie analyse geeft ook voor het Markermeer kruinhoogtetekort als belangrijkste opgave aan (zie Figuur 4) Ook hier geldt dat deze opgave vooral samenhangt met de dijken van Flevoland.

Situaties met een kruinhoogtetekort vragen doorgaans om een flinke aanpassing van de dijk. Golfreductie met een zandig voorland is daarvoor een mogelijk alternatief. De dijken om Flevoland zijn grotendeels op dieper water gelegen. Dit maakt de aanleg van zandig voorland verhoudingsgewijs duur, omdat er veel volume nodig is.

De dijken van Flevoland zijn met uitzondering van de dijken om het Ketelmeer, ongunstig op de wind en golven gelegen. De onderhoudsbehoefte is dan in het geval van een open strandprofiel groot.

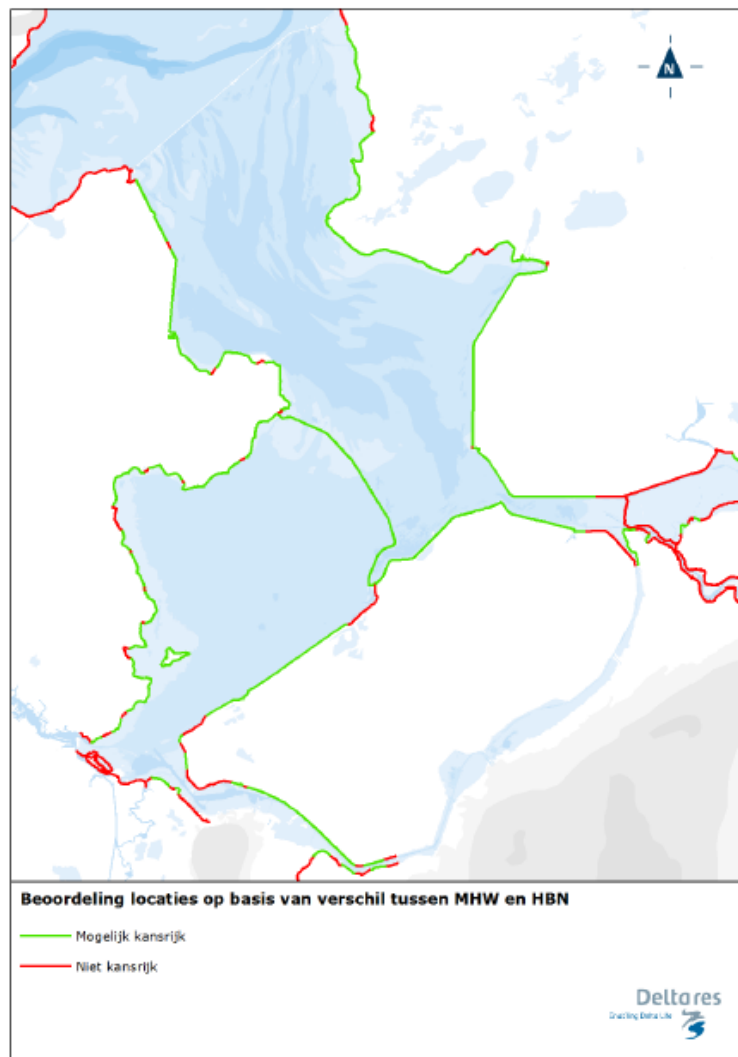


Figuur 4 De opgaven voor het Markermeer volgens de consequentie analyse. (Consequentieanalyse Nieuwe Normering & WBI2017; 2016).

7.2 Kansrijkheid op basis van potentiële golfreductie

De maatgevende wind(gedreven) golven zijn op het IJsselmeer en Markermeer groot. De strijklengte bedraagt veelal tientallen kilometers. De op de Houtribdijk gemeten windsnelheden doen vaak niet onder voor die aan de kust. De maatgevende golven zijn op vooral op zuidwest georiënteerde dijken dan ook 2 meter of hoger en worden mede door de verhoudingsgewijs geringe waterdiepte ook op veel plaatsen sterk door de diepte bepaald.

De golfhoogte is bepalend voor de vereiste hoogte van de dijk en sterkte van de bekleding. Met een voorland kan de golfhoogte sterk worden teruggebracht. In het IJsselmeergebied is de potentie voor de inzet van voorlanden daarom groot. Op onderstaande kaart is deze potentie aangegeven. De potentie voor golfreductie is een eerste voorwaarde voor de inzet van een voorland, maar ook de kosten en baten van de inzet van een voorland spelen een rol. Met uitzondering van de kust van Friesland komen aan de randen van Markermeer en IJsselmeer geen natuurlijke voorlanden voor. Dit betekent dat ze grotendeels vanaf de bodem moeten worden opgebouwd.



Figuur 5 Mogelijke kansrijke locaties voor de inzet van voorlanden in het groen op basis van het verschil tussen MHW en HBN (uit: Penning E. en O. Levelt, 2017).

7.3 Kansrijkheid op basis van waterdiepte en beschikbaarheid van zand

Voor situaties met vergelijkbare condities als die voor de Houtribdijk kan in principe worden geëxtrapoleerd op basis van de zandprijs en de waterdiepte voor de dijk als basis voor een eerste vergelijking op kosteneffectiviteit. Er komen maar beperkt trajecten voor met een ondiep voorland (met weinig zetting), vergelijkbaar aan het Enkhuizerzand en een naar verwachting beperkte onderhoudscomponent.

Dit geeft aan dat er maar beperkt trajecten zullen zijn, waar een zandige vooroever goedkoper zal zijn dan een asfaltoverlaging. De potentie voor de inzet van voorlanden wordt daarom vooral bepaald door:

- Een geschikte zandwinlocatie dichtbij het werk. Dit kan zijn een bestaande zandwinput op korte afstand van het werk, of een nieuw te creëren put in geval grote volumes zand nodig zijn.
- Medefinanciering vanuit KRW en Natura 2000 omdat met de aanleg van land-water overgangen beheersdoelen kunnen worden gehaald.
- Combinaties met commerciële zandwinning, waarbij ook voor dekgrond een bestemming wordt gezocht.

Het voorgaande is op basis van een vergelijking tussen een 'duin tegen dijk' oplossing die veel zand vraagt en een verhoudingsgewijs goedkope asfaltoverlaging. De mogelijkheden voor een inzet van een zandig voorland nemen toe als gewerkt kan worden met een golfreducerend voorland met minder volume en in vergelijking met een duurdere conventionele versterking van de dijk. Zoals uit de eerdere hoofdstukken blijkt, is de beschikbaarheid van een zandwinning op korte afstand van het werk daarbij nog steeds een voorwaarde. Dit kan zoals aangegeven een bestaande winning zijn, waarin nog voldoende zand aanwezig is, een vaargeul die nog verdere verdieping behoeft of een nieuwe put.

Het openen van een nieuwe zandwinlocatie brengt forse extra kosten met zich mee. Er is geologische onderzoek nodig en vaak ook archeologisch onderzoek. Er moet een ontgrondingvergunning worden aangebracht. Er moet een bestemming voor de dekgrond worden gevonden. Dit maakt dat een eigen put pas goedkoop zand kan leveren als tenminste orde 1 miljoen m³ of meer aan zand wordt geleverd. Deze 1 miljoen m³ zand is afhankelijk van de waterdiepte en het type zandig voorland voldoende voor de aanleg van 1 km tot 5 km aan zandig voorland. Ook de kosten voor een conventionele versterking zijn bij kleinere trajecten wat groter, maar de kosten voor het zand nemen verhoudingsgewijs veel sterker toe. Er is dus ook een minimale omvang, wil een zandig voorland kosteneffectiever kunnen zijn.

Uit de consequentie analyse volgt dat mogelijk delen van de dijken van Flevoland een kruinhoogtetekort hebben. Dit tekort is mogelijk beperkt en met een zandig voorland kan de golf mogelijk voldoende worden teruggebracht, zodat verdere aanpassing van de dijk niet nodig is. Vanwege golfoploop, kan met het terugbrengen van de maatgevende golf met 0,2 meter de benodigde kruinhoogte vaak al met 0,4 tot 0,5 meter worden teruggebracht.

Doorgaans kan worden gesteld dat op een ondiep voorland de golfhoogte dieptebeperkt is. Daarbij wordt meestal van de relatie golfhoogte is 0,5 de waterdiepte uitgegaan. Deze relatie is ook in veel modellen in gebouwd. Uitgaande van deze relatie kan in principe eenvoudig worden uitgerekend hoe hoog het voorland moet zijn of moet worden verhoogd om de gewenste golfreductie te bereiken. Een reductie met 0,2 meter, vraagt dan om een verhoging van een bestaand voorland met orde 0,4 meter.

Echter er kunnen op basis van de metingen in de EcoShape pilot ook vragen worden gezet bij de golfhoogte/waterdiepte verhouding. Bij metingen wordt ook een verhouding golfhoogte/waterdiepte van orde 0,9 gevonden op de rand van het plateau, mogelijk omdat het hogere deel van het S-vormige profiel zich gedraagt als een brandingszone. De grootste golf die gemeten is in de onderzoeksperiode van de pilot bedroeg 1,2 meter bij een opwaaiing van 0,5 meter op een waterdiepte van NAP– 2,5 meter. Dit resulteert in een golfhoogte/waterdiepte verhouding van 0,4.

7.4 In vergelijking met andere vormen van versterking

Echter in veel van deze situaties is een asfaltoverlaging mogelijk geen toelaatbare oplossing omdat overslag niet toelaatbaar is, iets wat zich vooral bij een (te) lage dijkhoogte kan voordoen. Een asfaltoverlaging is verhoudingsgewijs glad en de golfoploop is daarom groot. Er moeten dan al gauw extra kosten worden gemaakt om of de verwachte overslag binnen paal en perk te houden, door een verhoging van de dijk, een verflauwing van het talud of door maatregelen achter de dijk. Dit leidt tot aanzienlijke kostenstijgingen, waardoor een zandige vooroever toch weer als meest kosteneffectieve oplossing uit de bus kan komen. Ook op plaatsen waar kan worden volstaan met een kleiner volume, bijvoorbeeld vanwege een milder golfklimaat of een duin in dijk alternatief, kan een zandig voorland nog steeds de meest kosten effectieve oplossing zijn.

7.5 In geval van bijkomende baten

Voor het Markermeer gebied is mede op basis van de ANT-studies geconstateerd dat het ecosysteem niet goed functioneert mede als gevolg van een tekort aan land-water overgangen en te veel slib in het water. In het IJsselmeer vormt slib minder een probleem, maar ook hier is sprake van een tekort aan land-water overgangen. Een zandige vooroever kan een land-waterovergang bieden die meerwaarde heeft voor de natuur en het ecologische functioneren. Een voorwaarde is wel dat de golfaanval op het zandige talud beperkt blijft aangezien zich anders geen waterplantvelden kunnen vestigen. Dit leidt al gauw tot oplossingen waarbij een zandig talud wordt gecombineerd met een vooroeverdam. Deze laatste leidt tot aanzienlijke extra kosten, maar kan wel het onderhoud aan het zandige talud sterk beperken. Afhankelijk van de bouw, kan een vooroeverdam ook al de golfbelasting dusdanig terugbrengen dat ook de zandige vooroever een stuk slanker kan worden aangelegd, vooral in geval er beperkte eisen worden gesteld, bijvoorbeeld omdat de reststerkte van de bekleding net niet voldoende is.

Een andere mogelijke baat is (strand)recreatie. Zo liggen langs de randen van het IJsselmeergebied meerdere aangelegde recreatiestranden, zoals bij Almere, IJburg en Workum. De meeste van deze stranden liggen in of nabij de stad of een recreatiepark. Het strand heeft op deze plaatsen een hoge gebruikswaarde. De aanleg van een recreatiestrand is duur. Het zand moet daarvoor in kleinere hoeveelheden worden aangebracht, wat tot hoge kosten per m³ leidt. De meeste stranden hebben een beperkte omvang en zijn daarom ook tussen opsluitdammen gelegen die het zand op hun plaats moeten houden. Van studies aan populaire zeebadplaatsen is bekend dat de waarde van een strand, in termen van bijdragen aan de lokale economie en vastgoedwaarde, in de orde van 200 Euro/m² of meer kan zijn. Deze bedragen worden zeker niet gehaald in het IJsselmeergebied, maar geven wel aan dat een strand, vooral op plaatsen waar een strand ontbreekt, een aanzienlijke waarde vertegenwoordigt. Op plaatsen waar de dijk moet worden versterkt nabij stedelijk gebied ligt het dan ook voor de hand om de mogelijkheid van een (stads)strand te onderzoeken. Dit is onder andere gedaan voor de situatie bij Lelystad maar ook bij Hoorn, waar combinaties met versterking mogelijk zijn. Bij Lelystad bleek bij nadere analyse dat een zandige versterking veel duurder uitpakt dan een asfaltoverlaging, wat vooral samenhangt met de grote golfaanval en ongunstige ligging van het strand. Een los van de versterking voor de dijk aangelegd strand is hier goedkoper, omdat aan een dergelijk strand ook veel minder eisen worden gesteld wat betreft het functioneren bij maatgevende condities.

Bijlage B - Benedenrivierengebied

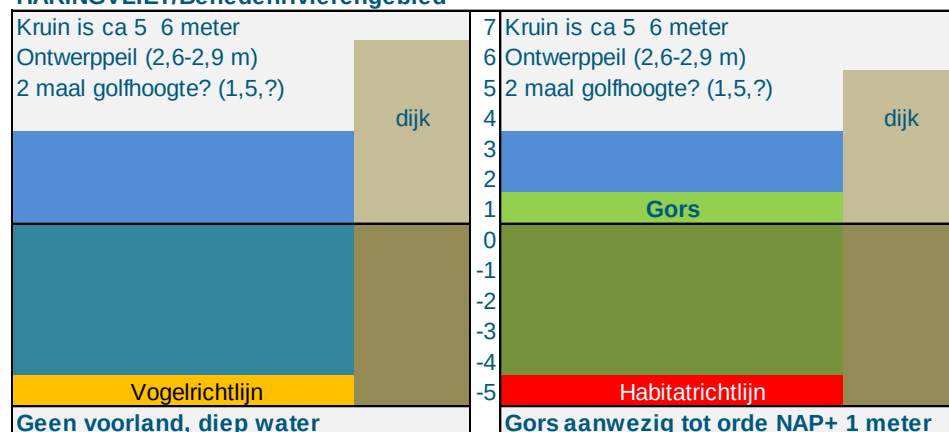
1 Inleiding

1.1 Algemene karakteristiek

Het benedenrivierengebied bestaat uit de benedenlopen van Rijn en Maas en Haringvliet en Hollands Diep, oude estuaria die veel breder zijn. Vooral op deze deltawateren is bij storm sprake van een forse golf en kan met een voorland een flinke golfreductie worden bereikt.

Dit deel van het benedenrivierengebied stond vroeger onder sterke invloed van de zee. Aan de randen zijn nog oude kwelders en slikplaatsen aanwezig die onder de permanente invloed van zoet water een ontwikkeling hebben doorgemaakt en nu als gorsen kunnen worden aangeduid. De meeste van deze voorlanden zijn beschermd met een vooroeververdediging.

HARINGVLIET/Benedenrivierengebied

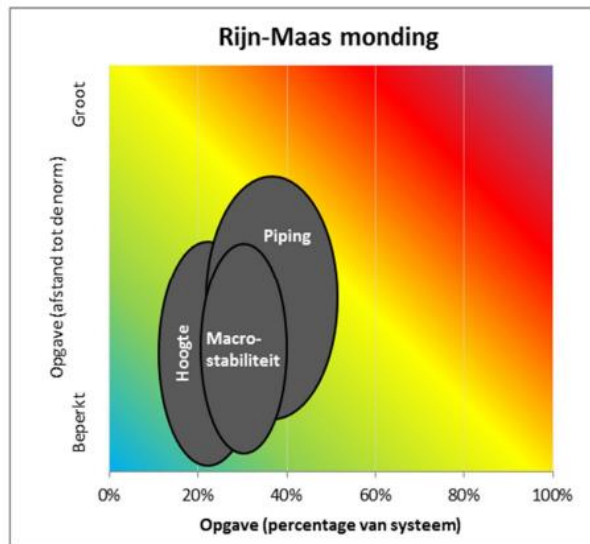


Figuur 1 Schematische voorstelling verschillende uitgangssituaties in het benedenrivierengebied.

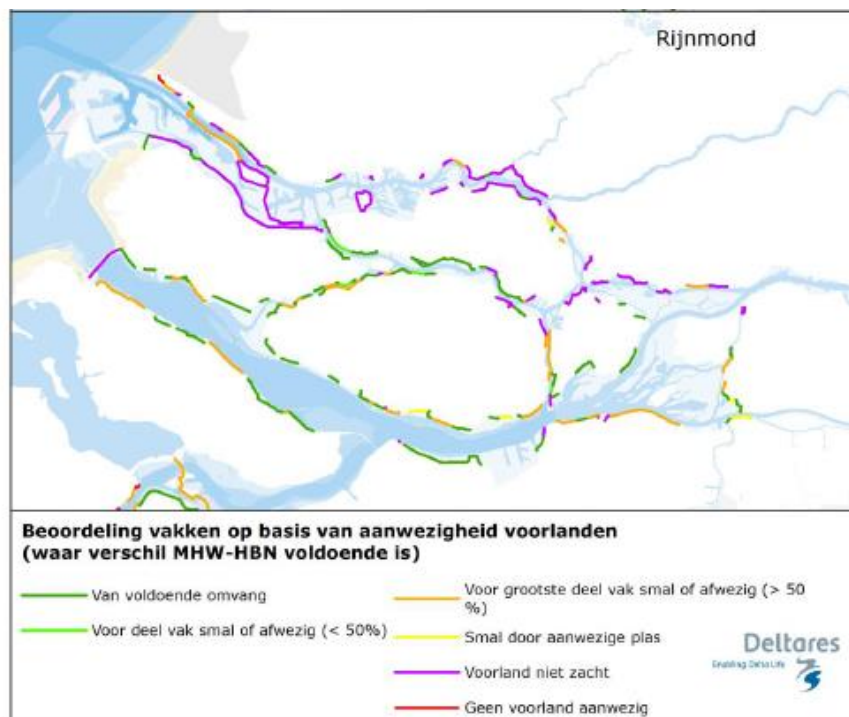
Het maatgevende hoogwaterpeil/toetspeil ligt voor grote delen van dit gebied tussen de NAP+2,6 en NAP+2,7 meter. De buitendijkse voorlanden liggen op een niveau van NAP+1 meter en daarmee lager dan de intergetijdgebieden die buiten de Haringvliet dam zijn gelegen. De kruinhoogte van de dijken om het Haringvliet ligt doorgaans om de NAP+5 tot NAP+6 meter.

1.2 Versterkingsopgave

De dijken in het beneden rivierengebied zijn recent versterkt als onderdeel van het Ruimte voor de Rivier programma en HWBP. De consequentie analyse laat een beperkte toename in de HBN zien. De opgaven hangen vooral samen met piping, vanwege de nieuwe rekenregels en macrostabiliteit vanwege de ondergrond van zeeklei. Er is niet tot vrijwel geen sprake van een kruinhoogtetekort of een onvoldoende sterke bekleding. Golfreductie zoals die met een (zandig en/of bebost) voorland kan worden bereikt kan geen bijdrage leveren aan het probleem van piping of macro-instabiliteit. De inzetbaarheid van een (zandige) vooroever blijft daarom in het Benedenrivierengebied naar verwachting beperkt. Wel kan de kwelweg worden verlengd met het aanbrengen van een kleilaag en verhogen van het bestaande voorland. Echter op veel plaatsen met een bestaand voorland is het probleem van piping niet aanwezig tot minder groot.



Figuur 2 De opgaven voor de Rijn-Maas monding volgens de consequentie analyse. (Consequentieanalyse Nieuwe Normering & WBI2017; 2016).



Figuur 3 De aanwezigheid van voorlanden in het benedenrivierengebied waar golfreductie een bijdrage kan leveren aan de veiligheidsopgave ((uit: Penning E. en O. Levelt, 2017).

1.3 Status als Natura 2000-gebied

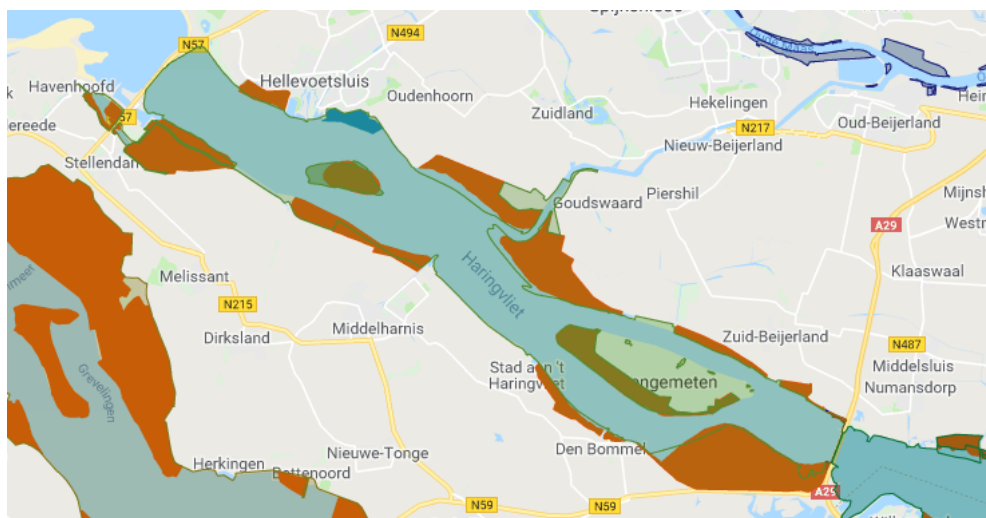
Het Haringvliet is als geheel aangewezen als Vogelrichtlijngebied. De voormalige schorren en slikken, nu gorsen zijn vrijwel geheel aangewezen onder de habitatrichtlijn. Deze gebieden kennen hoge natuurwaarden en de meeste habitats zijn in een slechte staat van instandhouding vooral vanwege het wegvallen van de getijdynamiek. Met de gedeeltelijke openstelling van de Haringvlietssluisen keert deze dynamiek gedeeltelijk terug.

Het gaat de volgende habitats:

- H3270 Rivieren met slikoevers met vegetaties behorend tot het *Chenopodium rubric pp* en *Bidention p.p.* Doel: uitbreiding oppervlakte en behoud kwaliteit.

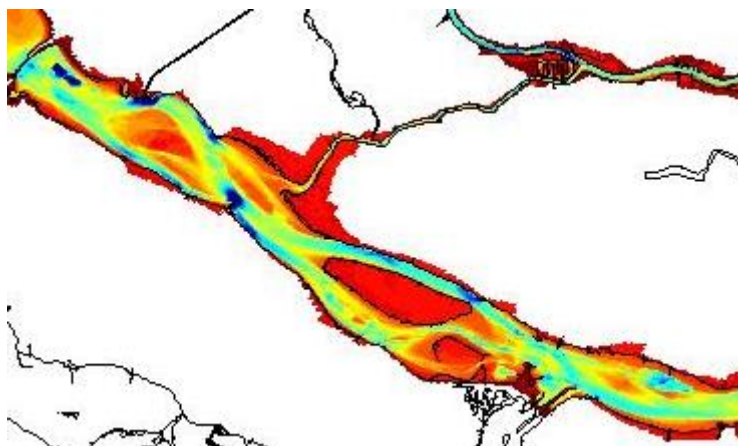
- H6430 Voedselrijke zoomvormende ruigten van het laagland. Doel: uitbreiding oppervlakte en verbetering kwaliteit van ruigten en zomen, harig wilgenroosje.
- H91E0 Bossen op alluviale grond met *Alnus Glutinosa* en *Fraxinus Excelsior*. Doel: uitbreiding oppervlakte en verbetering kwaliteit van vochtige alluviale bossen (vooral op Tiengemeenten).
- H1330 Atlantische schorren (*Glauco-Puccinellietalia maritimae*). Dit zijn zilte graslanden, die nog invloed van brak water staan.

Kenmerkend voor de meeste beschermde habitats is dat deze verhoudingsgewijs laag gelegen zijn (op ca NAP+1 meter) en nog beperkt onder de invloed van de rivier staan en een vochtige bodem hebben. Het ophogen van de aanwezige voorlanden, met bijvoorbeeld 0,5 tot 1 meter grond, zal tot vernietiging van deze habitats leiden en dus tot significante negatieve effecten. Door de ophoging wordt de standplaats ook veel droger zodat herstel na aanleg vrijwel niet mogelijk zal zijn. Mogelijk dat plaatselijk de ontwikkeling of inzet van rietland of griendbos een bijdrage aan de golfreductie kan leveren, maar over het algemeen zijn ook hiervoor de mogelijkheden op de bestaande voorlanden beperkt, omdat de uitbreiding van het ene habitat type altijd tot verlies leidt van een ander ook beschermd type.



Figuur 4 Habitatrictlijngebieden langs de oevers van het Haringvliet.

Vanuit Natura 2000 zijn er meer mogelijkheden ingeval nieuwe gorsen worden aangelegd eventueel in combinatie met een beperkt oppervlak aan nieuwe (beschermde habitats) of bijvoorbeeld hoger gelegen droog rietland. De mogelijkheden hiertoe zijn echter beperkt vanwege de waterdiepte. De ondiepe delen zijn al onder de habitatrictlijn gebracht. De buitendijkse uitbreiding van nieuw voorland is daarom moeilijk. Een alternatief is om toch op strategische plaatsen de bestaande voorlanden aan te passen zodat de golfreducerende werking wordt vergroot en daarbij dit verlies aan habitat vooral binnendijks te compenseren. Ook deze mogelijkheid is niet heel reëel, omdat vanwege het significante verlies aan beschermde habitats, een ADC-toets moet worden doorlopen die zal uitwijzen dat er alternatieven zijn met minder tot geen negatieve effecten op de bestaande beschermde habitats.



Figuur 5 Waterdiepte Haringvliet

Eventuele compensatie kan maar moeilijk worden gevonden.

1.4 Beschikbaarheid van grond

Over de beschikbaarheid van grond is weinig bekend. Mogelijk dat grond gewonnen kan worden binnen het Haringvliet of anders dat grond beschikbaar kan komen uit het vaargeulonderhoud in het benedenrivierengebied. Voor het ophogen van de bestaande gorsen kan klei en ten dele ook zand worden ingezet. Klei heeft echter de voorkeur omdat dit beter doorworteld kan worden door vegetatie, waardoor deze ook beter blijft staan in geval van storm. Het wilgenbos bij Fort Sint Andries is geplaatst op een plateau van klei.

Er is weinig bekend over de kosten voor het aanleveren van grond en de inzet daarvan voor het verhogen van een bestaand voorland.

2 De Business Case

Op de grote open wateren van het Haringvliet kunnen voorlanden een rol spelen in de beperking van de golfhoogte en op die wijze een (technisch) alternatief vormen voor conventionele vormen van dijkversterking.

Echter de bestaande voorlanden zijn grotendeels beschermd onder Natura 2000. Een ophoging van het voorland leidt al gauw tot significant negatieve effecten op beschermde habitats. Als het project door de ABC toets komt, dan moet nog rekening worden gehouden met fikse kosten voor natuurcompensatie. Als deze natuurcompensatie buitendijks moet worden gevonden, kan daarvoor gezocht worden naar dijktrajecten waar met de aanleg van een nieuw gors ook een dijkversterking kan worden voorkomen. De kosten van natuurcompensatie in de vorm van een nieuw gors, hangen daarbij vooral af van de diepte van het voorland en indirect ook van de vermeden kosten van dijkversterking.

Ophoging gors met klei	Bestaande gors			Geen gors		Natuurcomp.	
Ontwerppeil [NAP+ m]	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
Huidig niveau voor de dijk	1	1	1	-2	-2	-2	-2
Hoogte golf [m]	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Hoogte gors nabij dijk (nieuw)	1	1,2	1,5	0,2	0,5	1	1
Benodigde kruin bij hoogte voorland [NAP+m]	4,5	4,3	4	5,3	5	4,5	4,04
Kruin nu [NAP+m]	4,5	4,5	4,5	5,5	5,5	5,5	6
Verwachte golf bij niveau gors	0,8	0,7	0,55	1,2	1,05	0,8	
Kosten per m3 nabij	10	10	10	10	10	10	10
Kosten ophoging	0	110	275	1210	1375	1650	1650
Kosten per m3 veraf	20	20	20	20	20	20	20
Kosten ophoging (zonder nat.comp/oeverbes.)	0	220	550	2420	2750	3300	3300
Kosten natuurcompensatie	0	4980	4980	0	0	0	0
Kosten vooroeverbescherming	0	0	0	1500	1500	1500	1500
Totale directe kosten (klei 20 Eur.m3)	0	5200	5530	3920	4250	4800	4980
Totale directe kosten (klei 11 Euro/m3)	0	5090	5255	2710	2875	3150	3150
Totale direct kosten gecombineerd	0	2510	2675				
Totale directe kosten (klei 11 Euro/m3)	0	1630	1713				
Grens conventionele versterking orde 2000 Euro/m directe kosten							

Tabel 1 Indicatieve kosten berekening voor situaties met een voorland (gors) en zonder voorland bij NAP-2 meter waterbodem en verschillende hoogten voor het voorland. De vereiste natuurcompensatie is gezet op een hoog van NAP+1 meter. Bij bestaand voorland/gors zijn kosten voor natuurcompensatie meegenomen, bij situaties zonder voorland/gors zijn de kosten van een oeverbescherming meegenomen. In het gecombineerde voorstel zijn de kosten voor ophoging van situaties met een gors opgesteld bij de kosten voor het realiseren van een golfremmend voorland op NAP+1 meter dat tevens dient als natuurcompensatie.

De compensatie vraagt een nieuw gelijkwaardig voorland op een gemiddelde hoogte van circa NAP+1 meter, vergelijkbaar aan de hoogte van de huidige buitendijkse gebieden. Bij een waterdiepte van NAP-2 meter is er dan tenminste 3 meter klei nodig. Bij een minimale ophoging van het voorland van 50 meter, zal tenminste ook een vergelijkbare breedte aan compensatie gors moeten worden aangelegd. De kosten per meter bedragen dan in directe kosten, bij 10 tot 20 Euro/m³ klei, in de orde van 1.500 tot 3.000 Euro/meter. Hierbij komen dan nog de kosten voor een vooroeverbescherming voor het gors, bijvoorbeeld in de vorm van een breukstenendam. Gezien de waterdiepte moet al gauw rekening worden gehouden met kosten in de orde van 1.500 Euro/meter. De totale

(directe) kosten van natuurcompensatie bedragen dan al orde 3.000 Euro/meter tot 4.500 Euro/meter en zijn daarmee de grootste kostenpost. Alleen het ophogen van een bestaand voorland met 1 meter klei, kost orde 500 tot 1.000 Euro/meter. De kosten liggen mogelijk ook al hoger dan die van de vermeden dijkversterking.

Het loont daarom om de compensatie te zoeken op plaatsen waar met een nieuw gors ook een dijkversterking kan worden voorkomen. Als bijvoorbeeld de conventionele dijkversterking orde 2.500 Euro (directe kosten)/meter kost, dan is het ophogen van een gors met natuurcompensatie weliswaar duurder, en het aanleggen van een nieuw voorland ook, maar de combinatie kan goedkoper zijn. Als evenveel gors wordt opgehoogd als nieuw wordt aangelegd, dan zijn de kosten gemiddeld per meter in de orde van 1.750 tot 2.250 Euro/meter.

De conclusie zou daarom kunnen zijn dat het ophogen van een gors een mogelijke Business Case kan opleveren als:

Deze de ADC-toets kan doorstaan en geen natuurcompensatie vraagt, of deze natuurcompensatie kan worden gecombineerd met de aanleg van een gors waarmee op een naburig traject een dijkversterking kan worden voorkomen.

Dit naburige traject een niet te diep voorland heeft, omdat bij een grotere diepte de kosten van aanleg fors toenemen, en er ook anderszins voldoende ruimte is om orde 50 meter gors aan te kunnen leggen.

Bijlage C - Intergetijdegebieden

1 Inleiding

1.1 Algemene karakteristiek

In Nederland bevinden intergetijdegebieden zich in Noord-Nederland (de Waddenzee/Eems Dollard) en in Zeeland (Westerschelde en Oosterschelde).

Voorals langs de randen van de Waddenzee, in de provincies Groningen en Friesland zijn veel dijken afgekeurd. De eerste versterkingsprojecten zijn nu onderweg en er loopt een POV Waddenzeedijken waarin onder andere naar de inzet van kwelders en andere innovatieve oplossingen wordt gekeken, zoals brede groene dijken en dubbele dijken.

Kwelders zijn de natuurlijke voorlanden voor het intergetijdegebied. Ze ontstaan door opslibbing en bestaan in hoofdzaak uit klei. Er kan dus niet gesproken worden over een zandig voorland. Een zandig voorland vervormt tijdens een maatgevende storm maar een kwelder doet dat niet. Een kwelder blijkt ook in de praktijk een zeer bestendig oppervlak, dat ook bij zware storm nauwelijks vervorming vertoont.

WADDEN/Intergetijdegebieden

Kruin is 8 a 9 meter	dijk	8	Kruin is 7 a 8 meter	dijk
ontwerppeil (ca 5 meter)		7	ontwerppeil (ca 5 meter)	
2* golfhoogte (1,6-2,1m)		6	2* golfhoogte (1,6-2,1m)	
		5		
		4		
		3		
		2	Kwelder	
		1		
Habitatrichtlijn		0	Habitatrichtlijn	
Geen kwelder		-1	Hoge kwelder tot orde NAP+ 2 meter	

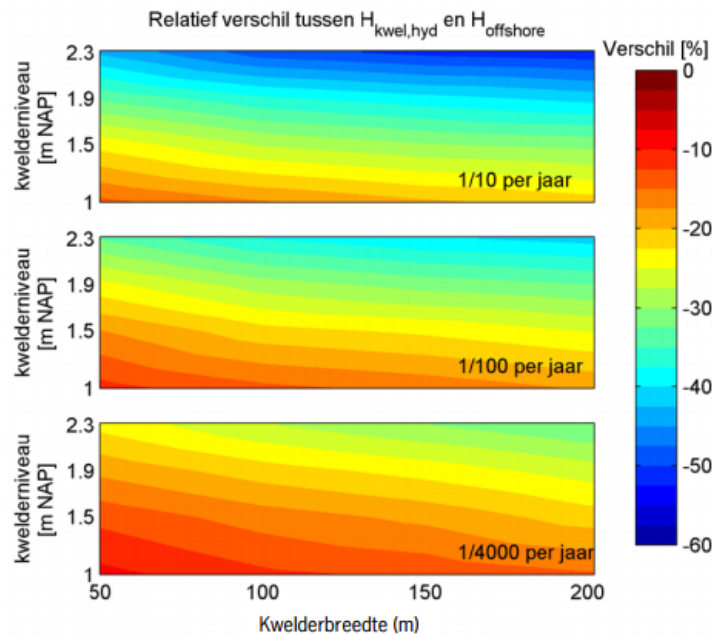
Figuur 1 Algemene kenmerken Waddengebied.

De golfreducerende werking van een kwelder is een functie van de relatieve hoogte van deze kwelder ten opzichte van het ontwerppeil en de aanwezige vegetatie. Natuurlijke kwelders kennen een zeer flauw profiel van 1 op 200 en meer. De golfhoogte voor de dijk kent daarom een vrijwel direct verband met de waterdiepte.

Kweldervegetatie is van invloed op de golfremmende werking van een kwelder, maar het is onduidelijk hoe groot die invloed is. Er zijn verschillende studies gedaan en in de meeste gevallen ligt de verhouding golfhoogte/waterdiepte een stuk lager dan de 0,5 die als vuistregel wordt aangehouden voor situaties met een (kale) zandige vooroever. Een extra golfremmende werking is echter ook waargenomen op slibplaten en deze ligt in de zelfde orde van grootte als van kwelders met vegetatie. Het is dus waarschijnlijk een combinatie van oppervlakteruwigheid en slib-opwerveling die daarbij een rol speelt. Bij metingen blijkt voor slibplaten en kwelders de verhouding golfhoogte/waterdiepte tussen de 0,25 en 0,5 te liggen. Andere studies wijzen op een extra 20 % reductie als gevolg van de aanwezige kweldervegetatie.

Kwelders kunnen aangroeien tot ongeveer springvloed niveau. Dit niveau wordt pas na enige tijd bereikt. De invloed van de zee is in op dit niveau beperkt, waardoor vergrassing van de kweldervegetatie optreedt. Maar ook de aanslibbingsnelheid neemt sterk af met de hoogte. Het hoogste deel van de kwelder, wat meestal voor de dijk is gelegen komt daarom vaak niet hoger dan net boven gemiddeld hoogwater.

De hoogte van een kwelder is overigens geen vast gegeven. Kwelders groeien mee met de zeespiegel en er zijn metingen die er op wijzen dat het kwelderniveau ook reageert op de 18 jarige cyclus in hoogwater. Op plaatsen met veel golfaanval of weinig aanbod van slib blijven kwelders van nature wat lager of komen in het geheel niet tot ontwikkeling.



Figuur 2 Effect voorland/kwelders op golfcondities aan de teen van de dijk bij extreme condities met een herhalingsjijd van eens per 10, 100 of 4000 jaar. In percentages de afname van de golfhoogte in %. (uit: Loon-Steensma, J.M. van, A.V. de Groot, W.E. van Duin, B.K. van Wesenbeeck, en A.J. Smale, 2012b. Zoekkaart Kwelders en Waterveiligheid Waddengebiet).

Doordat kwelders een natuurlijke maximale hoogte hebben, hangt hun bijdrage aan golfreductie vooral af van het verschil tussen ontwerppeil en springtij/gemiddeld hoogwater, omdat de laatste een indicatie geeft van de maximale maaiveldhoogte van een kwelder. De potentiële bijdrage is daarom ook groter ingeval van lagere ontwerppeilen en dus ook minder strenge veiligheidsnormen.

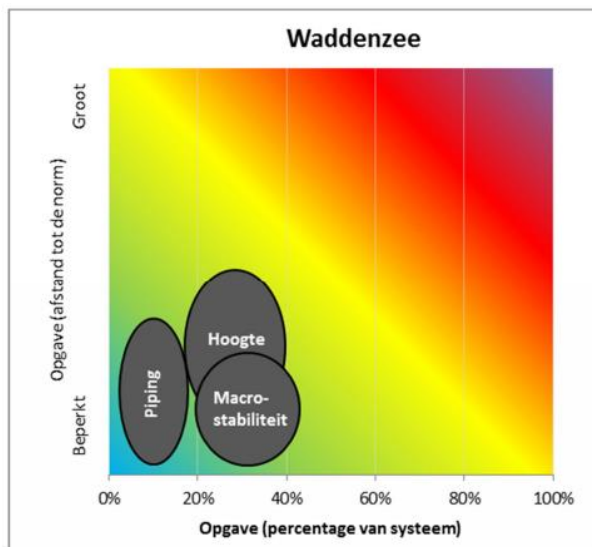
Figuur 2 geeft een indruk van de mate waarin een kwelder de golfhoogte kan verminderen. Uit de figuur komt duidelijk naar voren dat deze reductie van de golfhoogte minder is als de kwelder minder hoog en minder breed. De breedte speelt bij kwelders mede een rol omdat de golflengte bij maatgevende condities groter is dan bijvoorbeeld in het IJsselmeergebied. De reductie in golfhoogte is ook minder bij hogere ontwerppeilen passend bij een strengere veiligheidsnorm. Uitgaande van een maximale kwelderhoogte van 2,3 meter kan bij een 1 op 10 per jaar storm een golfreductie van orde 40 tot 50 % worden verwacht. Bij een 1 op 4.000 storm is dat nog maar 20 tot 30 % omdat het waterpeil door opstuwing dan een stuk hoger ligt.

Bij het ontwerp van de dijken in het Waddenzeegebied is rekening gehouden met de hoogte van voor de dijk liggende kwelders, maar niet met de mogelijk aanvullende golfremmende werking van de kweldervegetatie. Op dit moment loopt er onderzoek om te zien of en op welke wijze de golfreductie door kweldervegetatie kan worden meegenomen. Dit kan er toe leiden tot op veel plaatsen de nu ontworpen kruinhoogte meer dan voldoende is of dat er niet langer sprake is van een onvoldoende sterke bekleding.

Mocht de natuurlijke hoogte van een kwelder onvoldoende zijn, dan kan men ervoor kiezen om het achterste deel van de kwelder kunstmatig verder op te hogen, bijvoorbeeld met een kwelderwal. Vrijwel alle intergetijdegebieden en daarmee ook alle kwelders zijn aangewezen als een Natura 2000-habitatrichtlijn gebied. Een verhoging van een bestaande kwelder kan daarom niet toelaatbaar zijn, of alleen als er sprake is van voldoende natuurcompensatie.

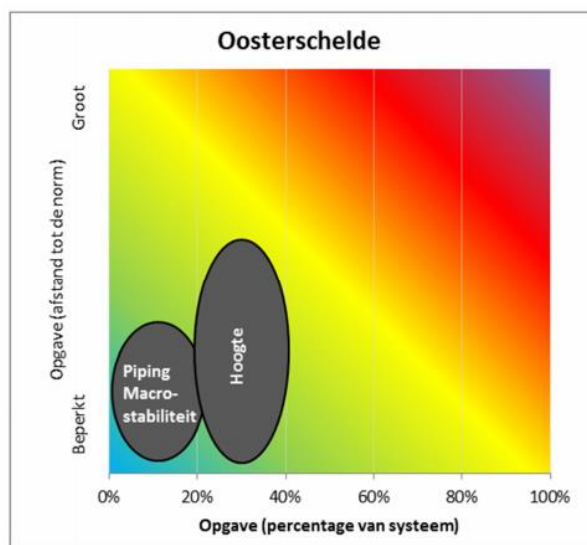
1.2 Versterkingsopgave intergetijdegebied

Langs de Waddenzee worden binnenkort veel dijken versterkt. De consequentie analyse geeft aan dat een toename in HBN voor meerdere plaatsen resulteert in een hoogtetekort dat mogelijk met de inzet van een voorland, in de vorm van een kwelder, kan worden opgelost. Het hoogtetekort speelt alleen bij de dijken in de provincie Groningen.



Figuur 3 De opgaven voor het Waddenzee volgens de consequentie analyse. (Consequentieanalyse Nieuwe Normering & WBI2017; 2016).

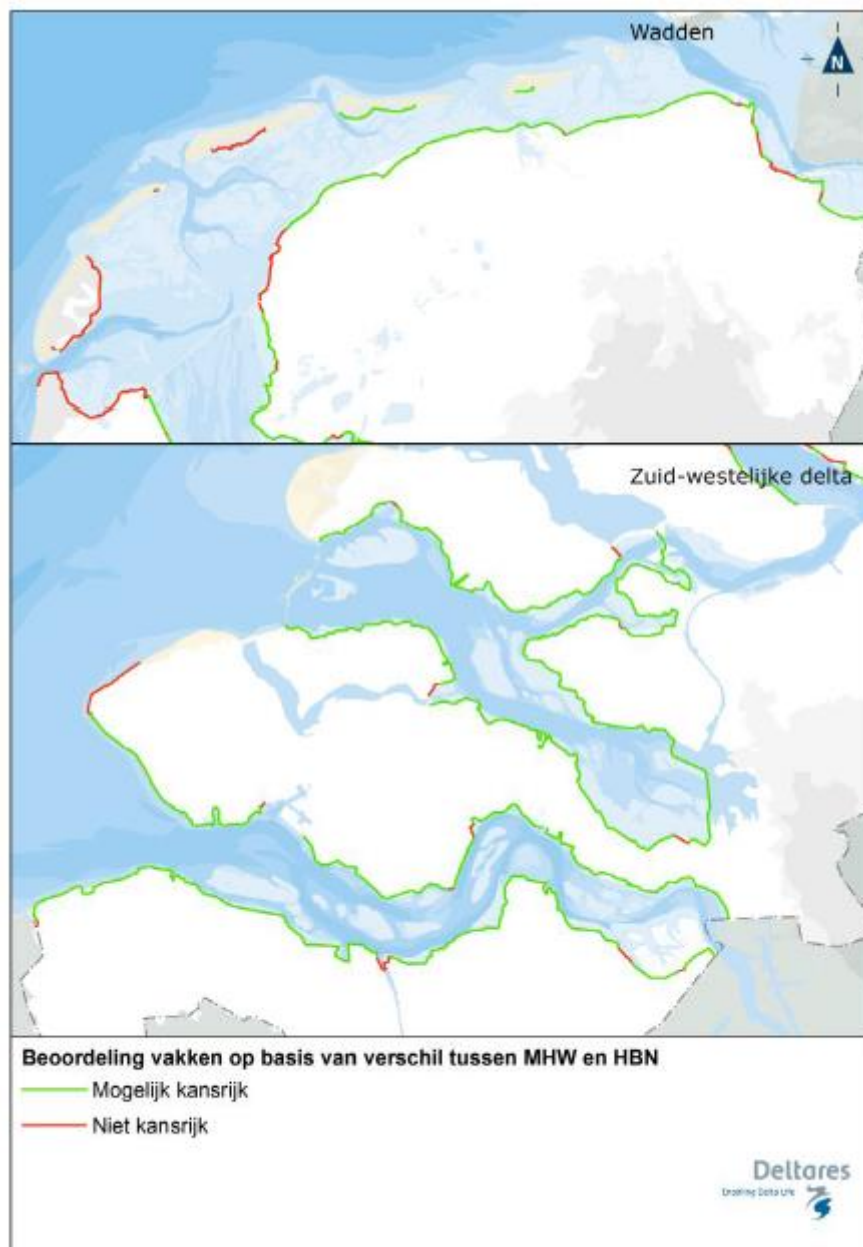
Ook voor de Oosterschelde geeft de consequentie analyse een hoogtetekort aan met name aan de noordzijde. Voor de Oosterschelde is al eens gekeken naar de bijdrage van zandplaten aan golven en golfreductie en deze is voor enkele plaatsen van groot belang. Recent is de steenbekleding van de dijken om de Oosterschelde versterkt. Een tekort aan hoogte is daarom ook het belangrijkste potentiële faalmechanisme.



Figuur 4 De opgaven voor het Oosterschelde volgens de consequentie analyse. (Consequentieanalyse Nieuwe Normering & WBI2017; 2016).

1.3 Mogelijke potentiële trajecten

Op veel plaatsen in het intergetijdegebied zijn er mogelijkheden om de golfhoogte sterk terug te brengen met een voorland.



Figuur 5 Mogelijke kansrijke locaties voor de inzet van voorlanden in het groen op basis van het verschil tussen MHW en HBN (uit: Penning E. en O. Levelt, 2017).

1.4 Status als habitatrichtlijn gebied

Een belangrijk aandachtspunt voor versterking aan de Waddenzee is de status als habitatrichtlijn gebied. Het project Marconi vernietigt bestaande habitats, vooral permanent ondergedoken platen, maar binnen het project kan dit verlies worden gecompenseerd door het weggraven van een (onnatuurlijke) griesberg waarmee een vergelijkbaar habitat sterk in kwaliteit kan toenemen. Ook voor de Prins Hendrikzanddijk is sprake van een kwalitatieve compensatie om het project binnen strikte eisen mogelijk te maken. Hiervoor wordt voor het duin een intergetijdegebied aangelegd.



Figuur 6 Kaart van de Waddenkust met de relatie tussen abiotische omstandigheden en kwelders en mogelijkheden voor kwelderontwikkeling. (uit: Loon-Steensma, J.M. van, A.V. de Groot, W.E. van Duin, B.K. van Wesenbeeck, en A.J. Smale, 2012b. Zoekkaart Kwelders en Waterveiligheid Waddengebied).

Bovenstaande figuur toont waar kwelders aanwezig zijn of met een kleine of grotere inspanning tot ontwikkeling kunnen worden gebracht. Aangezien voor bijna de gehele Waddenzeekust er een versterkingsopgave geldt, laat de figuur meteen ook zien hoe groot de potentie is voor de inzet van een kwelder.

Dijkversterkingen aan de Waddenkust kunnen mogelijk goedkoop worden uitgevoerd door voor de dijk een bestaande kwelder te verhogen, maar dat is vanwege de aanwijzing als habitatrictlijn gebied tot dusverre niet gedaan. In principe zou men een dergelijke verhoging van een kwelder kunnen compenseren, door bijvoorbeeld binnen het concept van een dubbele dijk ook compensatie voor verlies aan kwelder binnendijks mogelijk te maken. Een aantal kwelders is zo hoog geworden dat ze vergrassen. Het afgraven van deze kwelders zal ook leiden tot een kwalitatieve verbetering. Echter het verlagen van de kwelder direct voor de dijk zal juist de golfreductie verminderen.

Voor de Business Case kan men formeel concluderen dat inzet van bestaande of nieuw te bouwen kwelders niet mogelijk is, waardoor voorland oplossingen niet aan de orde zijn. Echter Marconi en de Prins Hendrikzanddijk laten zien dat als afdoende natuur compensatie kan worden geboden, ook een buitendijkse versterking met een voorland tot de mogelijkheden behoort. Nu is allicht in beide projecten sprake van een unieke situatie en mag er standaard niet van worden uitgegaan dat buitendijkse compensatie ook mogelijk zal zijn. Het is veiliger te veronderstellen dat de compensatie binnendijk gezocht moet worden.

Bij de verkenning van een mogelijke Business Case worden daarom extra kosten gerekend voor binnendijkse compensatie in de vorm van tussen twee dijken gelegen compensatie gebied. In het project 'Dubbele Dijk' is voorzien in een kleirijperij en een gebied met brakwaterlandbouw, maar niet in formele natuurcompensatie. Deze functies kunnen ten dele wel worden gecombineerd, omdat ze allen aangewezen zijn op een getijdeduiker, waarvan de kosten een groot deel van de totale kosten uitmaken. In geval van een kleirijperij en brakwaterlandbouw zijn er toekomstige baten die een deel van de aanlegkosten terugverdienen. Bij een natuurcompensatiegebied zijn deze terugverdienkosten vrijwel niet aanwezig, en moet het gebied zich vooral terugverdienen doordat de dijkversterking waarvan de compensatie onderdeel uitmaakt, goedkoper kan worden uitgevoerd.

Er komen langs de Waddenzee ook situaties voor met inlagen, zoals op Texel. Dit zijn doorgaans natuurgebieden die vooral ingericht zijn als broedgebied voor wadvogels. Er is geen sprake van getij, maar wel van brakwatermilieus, die vooral door brakke dijkkwel worden gevoed. Ze worden vooral als broedgebied gewaardeerd, omdat hoog water en storm geen probleem vormen voor de legsels. In principe zouden nieuwe inlagen kunnen worden gemaakt met een dergelijke natuurfunctie, door klei af te graven en dat bijvoorbeeld ook weer binnen een dijkversterkingsproject in te zetten. Naar deze vorm van natuurcompensatie is niet verder gekeken, omdat er in dit

geval geen compensatie in de vorm van een vergelijkbaar kwelderhabitat, slikken of ondergelopen zandbanken mogelijk is.

In geval intergetijdegebieden niet als habitatgebied zijn aangewezen, maar als vogelrichtlijngebied is compensatie vooral aan de orde als het nieuwe hoger gelegen kwelder niveau minder foerageermogelijkheden biedt voor beschermde vogelsoorten. De vereiste natuurcompensatie kan dan kleiner zijn. De intergetijdegebieden in Nederland, de Wadden, de Oosterschelde en Westerschelde zijn echter allemaal aangewezen als habitatrichtlijngebied. Compensatie van verlies aan kwelder is bij een ophoging van de kwelder daarom altijd aan de orde. Ook bij de aanleg van een kwelder is sprake van een compensatie verplichting voor het verlies aan permanent ondergedoken zandplaten of slibplaten.

In formele zin moet eerst een ADC-toets worden uitgevoerd, als sprake is van potentiële negatieve effecten op habitatgebieden. In deze toets wordt bepaald of bijvoorbeeld een buitendijkse versterking onvermijdelijk is en ook nodig is vanwege groot maatschappelijk belang. Dit is mogelijk niet het geval, waardoor de ophoging of ook de aanleg van een kwelder als onderdeel van de veiligheidsoplossing nog steeds niet mogelijk is.

1.5 Beschikbaarheid van grond

Voor de klei kunnen vijf mogelijke bronnen worden aangewezen:

- **Natuurlijke opslibbing van de kwelder door inzet van kwelderwerken.** Dit kan alleen als aanwezige kwelders nog niet op hoogte zijn en de verwachte eindhoogte van de kwelder afdoende is voor de gewenste golfreductie.
- **Nabij, voor de dijk, gelegen kwelders.** In vroegere tijden werden de Waddenzeedijken ook in hoofdzaak versterkt met klei die uit de aanliggende kwelders werd gewonnen. Klei wordt met een kraan afgegraven, per vrachtwagen verplaatst en ook weer aangebracht met een kraan. De transportafstanden zijn klein en de kosten verhoudingsgewijs laag. De kweldervegetatie wordt vernietigd daar waar klei wordt gegraven, gereden en aangebracht. Bij te hoge kwelders, die sterk zijn vergrast, kan afgraven tot een kwaliteitsverbetering leiden op termijn. Dus dit is een potentiële bron voor klei, die ook gezien de Natura 2000-beheersdoelstellingen mogelijk zou kunnen zijn.
- **Uit achtergelegen polders.** Dit is een mogelijkheid die o.a. wordt uitgenut in het project dubbele dijk, waar de tweede dijk met lokale klei wordt aangelegd. Ook in dit geval wordt de klei lokaal afgegraven, per as vervoerd en vervolgens weer met een kraan aangebracht. Deze klei zou natuurlijk ook voor de zeedijk kunnen worden ingezet.
- **Uit de kleirijperij.** Op dit moment loopt een proefproject voor het maken van klei uit slib uit de Eems-Dollard. De idee is om nabij de dijksterking klei te laten rijpen en zo mede vanwege een besparing op transportkosten geschikte klei te kunnen leveren tegen een kostprijs die lager of tenminste concurrerend is. Voor de dijken langs de Wadden geldt dat geschikte klei mogelijk van ver uit het benedenrivierengebied zou moeten worden gehaald. Voor versterkingen op andere plaatsen kan dat anders liggen.
- **Van elders.** Deze mogelijkheid wordt doorgaans ingezet voor dijkversterking. Dit hangt mede samen met de eisen die aan de klei worden gesteld. De kosten kunnen in dit geval flink oplopen en hangen mede af van de transportafstand. Het transport leidt ook tot veel emissie van CO₂. Als gerekend wordt met een hoge prijs per ton CO₂, dan is transport een belangrijke kostenfactor.

2 Inzet van voorlanden/kwelders

2.1 Bestaande voorbeelden

In het Waddengebied is meerdere keren gekeken naar de mogelijke inzet van kwelders als alternatief voor dijkversterking. Als onderdeel van de prijsvraag Toekomst van de Afsluitdijk is door het consortium Waddenwerken gekeken naar een combinatie van kwelders met een duin als oplossing. Het duin bleek nodig omdat alleen met natuurlijke kwelders onvoldoende golfreductie bereikt kon worden bij maatgevende condities. Er is daarbij overigens niet gekeken naar een hybride constructie die uit ging van een reststerkte van de bestaande bekleding. Ook is door EcoShape een verkenning gedaan naar de inzet van natuurlijke keringen en is door WUR Imares gekeken naar de

inzet van innovatieve dijkconcepten in dit gebied. Uit deze studies blijkt dat vooral de combinatie van een kwelder en een dijk tot een kosteneffectieve oplossing kan leiden.

De Prins Hendrikdijk aan de zuidzijde van Texel wordt versterkt met een duin waarvoor een intergetijdegebied is gelegen. Ook hier is dus gekozen voor een combinatie met een voor dijk geplaatst duin. Aan het kweldergebied wordt in dit geval geen golfreducerende werking toegekend, ondanks dat dit intergetijdegebied door een speciale strandhaak wordt beschermd. De mogelijke reden is dat er feitelijk nog niet formeel getoetst kan worden op de aanwezigheid van een kwelder en mogelijk ook omdat men de kwelder en de strandhaak niet formeel onderdeel wil maken van de primaire kering.

In het project Marconi bij Delfzijl worden nieuwe kwelders aangelegd ter versterking van een havendam, waarbij versterking van de achterliggende zeedijk niet langer nodig is. De kwelders worden hier gerealiseerd door een initieel startniveau voor kwelderontwikkeling aan te leggen, waarna een periode van natuurlijke kwelderontwikkeling volgt. Hier vormen de kwelders onderdeel van de primaire kering.

In Duitsland wordt al langer vertrouwd op de golfreducerende werking van kwelders en zijn ze ook formeel onderdeel van de primaire kering.

2.2 Mogelijke vormen van een kweldervoorland

De Waddenzeedijken kunnen zijn afgekeurd op een tekort aan kruinhoogte, een te lichte bekleding, macrostabiliteit en ook piping vormt een mogelijk probleem als de dijk is geplaatst op een ondergrond met zandlagen. Al deze faalmechanismen vragen om een andere conventionele oplossing, zoals een verhoging van de kruin, een versterking van de bekleding, het verflauwen van het profiel en het aanbrengen van een langere berm voor een langer kwelweg. Met een kwelder kunnen veel van deze faalmechanismen samen worden aangepakt, behalve problemen met achterwaartse stabiliteit.

Dijk met kwelder

Er is een groot aantal variabelen, dat ontwerp en daarmee ook de kosten bepalen. Een eenvoudige vergelijking kan gemaakt worden in het geval van een kruinhoogtetekort. Zo kan een kruinhoogtetekort van bijvoorbeeld 1 meter, worden doorvertaald naar een vereiste reductie van de golf en daarmee naar een vereiste toename van de bodemhoogte voor de dijk. Ervan uitgaande dat de toelaatbare golfoploop orde 2,5 meter maal de golfhoogte is, vraagt een kruinhoogtetekort van 1 meter om een toename van de bodemhoogte voor de dijk van orde 80 cm. Dit is voor een situatie met een bestaande, maar te lage kwelder.

Voor de breedte van deze verhoging kan worden uitgegaan van orde 2 maal de golflengte, ofwel orde 60 meter. Een conventionele kruinverhoging vraagt om een aanpassing van het gehele profiel, waarbij of de bekleding aan de achter of voorzijde wordt opgepakt en mogelijk ook moet worden vervangen. Dit is een omvangrijke en dure ingreep.

Bij onvoldoende sterkte van de bekleding kan worden uitgegaan van een reductie van de maatgevende golf totdat een acceptabele hoogte tot bijvoorbeeld 0,5 meter. Een maximale golf van 0,5 meter vraagt om een bodemhoogte voor de dijk die orde 1 meter onder de maatgevende waterstand is gelegen. Bij een maatgevende waterstand van bijvoorbeeld 4 meter, is 3 meter bodemhoogte voor de dijk nodig. Als de golfremmende werking van de kweldervegetatie wordt meegerekend kan de bodemhoogte lager zijn.

De maximale hoogte van de kwelder kan gelijk het hoogste getij gelimiteerd zijn tot 2 meter, zodat er in dit voorbeeld 1 meter moet worden opgehoogd.

Bij het verhoging van de kwelder moet wel rekening worden gehouden met een geleidelijke oploop van het maaiveld. Als daarvoor orde 1 op 40 wordt aangehouden dan vraagt een verhoging van het maaiveld voor de dijk met 1 meter nog steeds om een ingreep over 100 meter met een totale inhoud van orde 80 m³. Mogelijk kan van een wat steilere helling worden uitgegaan. Zo wordt de brede groene dijk naar Duits voorbeeld voorzien van een 1 op 20 taludhelling. De praktijk, in Duitsland, laat zien dat bij deze helling nauwelijks erosie optreedt.

De reductie van de golf kan ook worden bereikt met een kwelderdam. Dit is een kleinere constructie met een kleinere voetafdruk en volume. Voor het ontwerp kan in dit geval worden uitgegaan van een 1 op 20 taludhelling, met een wat steiler achtertalud.

Dijk zonder kwelder

Op plaatsen waar geen kwelder is gelegen moet naar verhouding veel meer worden opgehoogd. Als een kwelder ontbreekt, is dat meestal een teken dat een kwelder zich daar ook moeilijk van nature kan ontwikkelen. Men kan in dat geval de groei van een kwelder stimuleren door te voorzien in een voldoende hoog startniveau, bijvoorbeeld omstreeks gemiddeld waterpeil.

Een kwelder kan alleen functioneren met een flauw oplopend profiel, en vraagt daarom om een minimale breedte. Bij een onvoldoende hoge kwelder voldoet het ophogen van de achterste 60 tot 100 meter en is maar een klein volume nodig. De aanleg van een nieuwe kwelder vraagt om een veel groter volume omdat vanaf de bodem met een zeer flauwe taludhelling de kwelder moet worden opgebouwd. De breedte bedraagt dan al gauw 300 meter of meer. Het benodigde volume ligt dan al gauw in de orde van 1.000 m³/meter of meer. Dit is dus meer dan 10 keer zoveel als op plaatsen waar alleen het achterste deel van de kwelder hoeft te worden opgehoogd. De kosten zijn navenant. Het loont dan ook om te bezien of natuurlijke kwelderontwikkeling mogelijk is en ook leidt tot voldoende maaiveld verhoging. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat kwelderwerken doorgaans pas geplaatst kunnen worden als er al sprake is van een jonge kwelder of slibplaat.

Op plaatsen waar geen kwelder aanwezig is, zal de aanwezige dijk al steviger en hoger zijn. Het is in dat geval mogelijk dat de aanleg van een kwelder, tot hoogtijniveau, leidt tot een veel grotere golfreductie dan nodig.

Voor het beschouwen van de mogelijkheden voor inzet van voorland in het Waddengebied kan daarom gedacht worden aan de volgende combinaties:

- 1) Bestaande kwelder meenemen in het toets protocol en op grond daarvan concluderen dat dijkversterking niet nodig is. Het kan zijn dat er dan nog maatregelen nodig zijn om de aanwezigheid van de kwelder tijdens maatgevende omstandigheden ook te garanderen. Er is in dit geval altijd sprake zal zijn van een sluitende Business Case . Op deze Business Case wordt niet verder ingegaan.
- 2) Als 1) maar concluderen dat de bestaande kwelder niet voldoende is voor de vereiste golfreductie. In dit geval kan men denken aan een van de volgende varianten:
 - Ophogen van het achterste deel van de kwelder, ook wel kwelderwal genoemd, dusdanig dat sprake is van voldoende golfreductie waardoor kruinverhoging of aanpassing van de bekleding niet nodig is.
 - Het neerleggen van een duin tegen dijk, die in combinatie met de aanwezige kwelder voldoende golfreductie tot gevolg heeft.
 - De constructie van een kwelderdam van voldoende hoogte, robuustheid en breedte. Het is dan een soort dubbele dijk maar dan aan de zeezijde gelegen. De bestaande kwelder tussen beide kan eventueel beperkt worden afgegraven teneinde een verjonging mogelijk te maken, waarbij het materiaal weer kan worden ingezet om de kwelderdam of het ophogen van het achterste deel van de kwelder mogelijk te maken.
- 3) Bij afwezigheid van een kwelder *een kweldervoorland maken* dat voldoende hoog en robuust is om de vereiste golfreductie te bewerkstelligen en ook kan door ontwikkelen als kwelder.

Daarnaast zijn er nog drie wijzen van uitvoering mogelijk:

- Een directe aanleg tot aan de vereiste hoogte. Meestal is dat een hoogte passend bij een ontwerpwaterstand en golfcondities zoals die bijvoorbeeld over 50 jaar worden verwacht.
- Een geleidelijke aanleg tot aan de vereiste hoogte. In dit geval laat men de kwelder geleidelijk aan meegroeien met de zee, al dan niet door bijvoorbeeld met rijshoutschermen de extra aangroei te stimuleren. Dit is veelal de goedkopere aanlegwijze met oog de minste natuureffecten. Dit zou in principe mogelijk zijn als:
 - De vereiste eindhoogte voor het waarborgen van voldoende golfreductie niet hoger dan de natuurlijke aanwashoogte ligt die een kwelder kan bereiken.
 - Gedurende de gehele aangroeiperiode de veiligheid gewaarborgd is volgens de op elk moment geldende hydraulische randvoorwaarden.

- Dat men accepteert dat men toetst op trendmatige verlopende aanpassingen van de hydraulische randvoorwaarden.
- Een combinatie waarbij men direct de hoogte maakt om te voldoen aan de huidige hydraulische condities en vervolgens inzet op het laten meegroeien met de zee.

Het stimuleren van het meegroeien met de zeespiegel en geldende hydraulische randvoorwaarden is een belangrijk punt. Bij de zachte versterking van de Hondsbossche en Pettemer Zeewering blijkt dat men natuurlijke voorlanden qua uitgangspunten als een dijkconstructie ontwerpt. De consequentie is dat men nu al het volume aan zand eist wat in principe pas over 50 jaar nodig is bij de dan geldende hydraulische condities. Voor een dijk met een technische levensduur van 50 jaar is dat logisch bij een oplossing die geleidelijk aan kan meegroeien minder.

3 Kosten en baten van kweldervoorland

3.1 De kosten

De kosten van de aanleg van een kwelder of het ophogen van een kwelder worden vooral bepaald door de kosten voor de aankoop en het aanbrengen van de klei. Het verschil in kosten is erg groot, met een bandbreedte voor orde 5-6 Euro/m³ (directe kosten) voor het aanbrengen van lokale klei, tot 20 Euro/m³ (directe kosten) voor het aanbrengen van Cat. 1 klei van elders. Er is daarbij ook sprake van een groot prijsverschil tussen de inzet van Cat. 1 klei en Cat. 2 klei, de laatste is tot 2 maal zo duur. Voor de bouw van een kwelder met een zeer flauw verloop is lokale klei waarschijnlijk geschikt. Voor een kwelderwal kan ook gedacht worden aan een opbouw met een klei kern van lokale klei of Cat. 2 van elders en een afdeklaag met Cat. 1 klei. In dat geval moet wel worden gewerkt met een maximale taludhelling en mag de golfbelasting niet te groot zijn. De kosten van een dergelijk type kwelderdam wijken daarom niet veel af van een dam die gebouwd is met breuksteen. Wel past een in klei gebouwde dam beter in het kwelderlandschap.

Bij de aanlegkosten komen dan nog de kosten voor natuurcompensatie. In de meeste gevallen kan compensatie alleen maar binnendijs worden gevonden. Deze kosten bestaan uit grondaankoop, getijdeduiker, extra waterscheiding, maar er zijn ook (potentiele) terugverdiencosten door lokaal geschikte klei te ontgraven bij de inrichting van het gebied. De aankoopkosten hangen daarbij af van de kwaliteit van de gronden maar ook de aanwezigheid van bebouwing die mogelijk niet gehandhaafd kan blijven. Bij de inrichting moet nog rekening worden gehouden met infrastructuur, zoals wegen en nutsvoorzieningen, die mogelijk moeten worden omgelegd.

De getijdeduiker vormt een groot deel van de kosten en deze zijn uitgedrukt per ha vooral afhankelijk van de getijslag van het buitenwater en het totale gebied dat wordt voorzien. De kosten per ha zijn daarom variabel. Er wordt gerekend met bijkomende directe kosten voor natuurcompensatie in de orde van 15 tot 20 Euro/m² aan onder voorwaarde dat een voldoende groot gebied wordt aangelegd. Omgerekend naar 1 meter dijk gaat het om bijkomende kosten in de orde van 900 tot 1500 Euro/meter bij een ophoging en te compenseren verlies over 60 tot 100 meter/meter dijk. De potentiële compensatiekosten bedragen daarmee al gauw de helft van de totale kosten.

De kosten voor natuurcompensatie worden fors lager als bij de inrichting van het gebied geschikte klei voor versterking vrij komt. De waarde hiervan, als categorie 2 klei, kan in de orde van 10 Euro/m² bedragen. Als voor de inrichting ode 1 m³/m² vrijkomt die lokaal weer kan worden ingezet dan vertegenwoordigd dit een waarde in de orde van 10 Euro/m². De kosten van natuurcompensatie nemen dan af tot orde 5 a 10 Euro/m² ofwel 300 tot 750 Euro/meter dijk.

Dit bedrag wordt lager als er combinaties mogelijk zijn met andere vormen van landgebruik, zoals brakwaterlandbouw, waarmee bijvoorbeeld de kosten voor de getijduiker kunnen worden gedeeld. Voor compensatie van slikken en kwelders is vaak maar een beperkte afgraving van de aanwezige grond nodig. Voor mosselteelt kan men veel meer klei afgraven, waarmee een veel grotere bijdrage aan de kosten kan worden geleverd. De aanvullende kosten voor natuurcompensatie nemen dan verder af.

Ophoging kwelder met klei	Kwelder tot max peil			Kweldernok boven HW		
Ontwerppeil [NAP+ m]	5	5	5	5,5	5,5	5,5
Hoog tij, max. niveau kwelder [NAP+xm]	2	2	2	2	2	2
Hoogte golf [m]	2	2	2	2	2	2
Hoogte kwelder nabij dijk [NAP+m]	-1	0,9	1,5	-1	0,9	1,5
H/h	2	2	2	2	2	2
Benodigde kruin bij huidige kwelder hoogte [NAP+m]	9,0	9,0	8,5	9,5	9,5	9,5
Kruin nu [NAP+m]	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Kruinhoogte tekort [m]	1,0	1,0	0,5	1,5	1,5	1,5
Maximale toelaatbare golf huidige kruin [m]	1,5	1,5	1,5	1,3	1,3	1,3
Benodigde kwelder hoogte [m]	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0
Inclusief kosten natuurcompensatie ad 20 Euro/m2						
Totale directe kosten (klei 20 Eur.m3)	26000	6620	3500	28400	9020	5900
Totale directe kosten (klei 11 Euro/m3)	15200	4541	2825	16520	5861	4145
Totale directe kosten (klei 6 Euro/m3)	9200	3386	2450	9920	4106	3170
Inclusief kosten natuurcompensatie ad 5 Euro/m2						
Totale directe kosten (klei 20 Eur.m3)	24500	5120	2000	26900	7520	4400
Totale directe kosten (klei 11 Euro/m3)	13700	3041	1325	15020	4361	2645
Totale directe kosten (klei 6 Euro/m3)	7700	1886	950	8420	2606	1670
Grens conventionele versterking orde 2000 Euro/m directe kosten						

Tabel 1 Een vergelijking op directe kosten uitgaande van verschillende hoogten voor het voorland en verschillende kosten voor klei en verschillende kosten voor natuurcompensatie. Uitgangspunt is een natuurlijke gradiënt tot hoogwater van 1 op 200 en 1 op 40 voor een kweldernok, c.q. een ophoging van het achterste deel van de kwelder en een minimale breedte van 100 meter voor het achterste hoogste deel van de kwelder. Daarbij is uitgegaan van een verhouding tussen diepte en golfhoogte van 0,5.

Eerste vergelijking op basis van directe kosten laten het volgende zien:

- Als er geen kwelder aanwezig is, zijn de kosten erg hoog vanwege het grote volume dat nodig is voor de aanleg van een kwelder. Zelfs als er goedkoop grond aanwezig is, blijft dit een dure oplossing. Het benodigde volume hangt wel sterk af van de hellingshoek die wordt aangenomen voor de aanleg van de kwelder. In de berekeningen is uitgegaan van 1 op 200, dit is zelfs steiler dan wat van nature voorkomt.
- Maar ook in het geval een kwelder aanwezig is kunnen de kosten nog vrij omvangrijk zijn vooral als moet worden voorzien in dure natuurcompensatie.
- Zodra ook de kosten voor natuurcompensatie sterk terug vallen wordt het ophoging van een kwelder een kosteneffectievere oplossing, die vooral bij de inzet van lokale klei veel goedkoper kan zijn dan een conventionele dijkversterking.

Als ook rekening mag worden gehouden met de golfremmende reductie door kweldervegetatie dan neemt de benodigde kwelderhoogte fors af en daarmee ook de kosten.

Ophoging kwelder met klei	Kwelder tot max peil			Kweldernok boven HW		
Ontwerppeil [NAP+ m]	5	5	5	6	6	6
Hoog tij, max. niveau kwelder [NAP+xm]	2	2	2	2	2	2
Hoogte golf [m]	2	2	2	2	2	2
Hoogte kwelder nabij dijk [NAP+m]	-1	0,9	1,5	-1	0,9	1,5
H/h	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
Benodigde kruin bij huidige kwelder hoogte [NAP+m]	9,0	7,9	7,5	10,0	9,6	9,2
Kruin nu [NAP+m]	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Kruinhoogte tekort [m]	1,0	0,0	0,0	2,0	1,6	1,2
Maximale toelaatbare golf huidige kruin [m]	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0
Benodigde kwelder hoogte [m]	0,8	0,8	0,8	3,2	3,2	3,2
Inclusief kosten natuurcompensatie ad 20 Euro/m2						
Totale directe kosten (klei 20 Eur.m3)	23600	2420	500	28976	9596	6476
Totale directe kosten (klei 11 Euro/m3)	13880	1331	275	16837	6178	4462
Totale directe kosten (klei 6 Euro/m3)	8480	726	150	10093	4279	3343
Inclusief kosten natuurcompensatie ad 5 Euro/m2						
Totale directe kosten (klei 20 Eur.m3)	22100	2920	1000	27476	8096	4976
Totale directe kosten (klei 11 Euro/m3)	12380	1831	775	15337	4678	2962
Totale directe kosten (klei 6 Euro/m3)	6980	1226	650	8593	2779	1843
Grens conventionele versterking orde 2000 Euro/m directe kosten						

Tabel 2 Als de voorgaande tabel maar dan met een verhouding tussen diepte en golfhoogte van 0,35.

De totale kosten voor de aanleg van een nieuwe kwelder liggen veel hoger dan voor conventionele vormen van Dijkversterking.

3.2 De baten

Anders dan in het IJsselmeergebied kan minder snel gesproken worden van baten voor natuur en recreatie. Dit hangt vooral samen met de status van de meeste intergetijdegebieden als Natura 2000-habitatrichtlijn gebied. Zelfs als in het geval van natuurcompensatie binnendijs nieuwe natuur wordt toegevoegd dan is er in formele zin sprake van compensatie van negatieve effecten en dus geen netto winst.

In de praktijk is de balans natuurlijk anders aangezien de kwantitatieve compensatie wordt gerealiseerd op bestaande landbouwgronden. Het oppervlak aan natuurareaal neemt daarmee toe. Bovendien kan waarschijnlijk nog steeds een natuurwaarde worden toegekend aan het opgehoogde deel van een kwelder. Bij de 'nieuwbouw' van een kwelder neemt het areaal aan kwelders toe en neemt, in geval van compensatie, het areaal aan slikken en platen, niet af.

Ook de baten voor recreatie zijn aan de Waddenkust beperkt. Er kunnen door het slibbige karakter geen stranden worden ontwikkeld. Het Marconi-project laat zien dat het wel mogelijk is iets voor recreatie te doen op nieuw ontwikkelde kwelders, als deze een nadruk hebben op botanische waarden, en als stedelijk uitloopegebied kunnen worden ontwikkeld.

Ten slotte is er nog de mogelijkheid om als onderdeel van de binnendijs compensatie ook brakwaterlandbouw een plaats te geven. Deze vorm van landbouw heeft mogelijk aanvullende baten, maar het is de vraag of deze voldoende zijn om tot een positieve Business Case te kunnen komen. Dit hangt vooral samen met de grote kosten voor de inrichting en de bouw van een getijdeduiker door de primaire kering.

Geen van de voornoemde baten leidt tot een vorm van vermeden kosten die zou kunnen leiden tot cofinanciering van de veiligheidsopgave, behalve de eventuele opbrengst van geschikte klei bij de inrichting van het gebied voor natuurcompensatie en brakwaterlandbouw. Of deze opbrengst ten goede komt aan het project hangt af van de eigendomssituatie van de grond, en naar wie deze baat toevalt in geval van een wijziging van de bestemming en daarop vallende inrichting van het gebied.

De natuurcompensatie leidt vooral tot aanvullende kosten en zijn in het meest gunstige geval neutraal.

3.3 De Business Case

De Business Case is dus sterk afhankelijk van de Ausgangssituatie, waar grond voor de aanleg vandaar kan komen en hoe om kan worden gegaan met de beschermde status en eventuele compensatieverplichting. Ook de kosten van de 'concurrerende' conventionele dijk versterking variëren. Ook van belang is de golfremmende werking van een kwelder inclusief kwelder vegetatie en de breedte c.q. de veronderstelde taludhelling waaronder een kwelder kan worden aangelegd.

Volgende situaties worden onderscheiden:

- **Bestaande kwelder is afdoende als het golfremmende effect van de kweldervegetatie kan worden meegenomen.** Dit kan uit het lopende onderzoek binnen de POV blijken. De aanvullende reductie van de maatgevende golf kan voldoende zijn in geval van een onvoldoende hoge kruin en/of een wat te zwakke bekleding.
- **Bestaande kwelder op hoogwaterniveau maar met onvoldoende golfreductie om versterking van de bestaande dijk te voorkomen.** Hier zou kunnen worden gewerkt met de ophoging van het achterste deel van de kwelder of met de inzet van een kwelderwal. Zoals aangegeven moet hierbij rekening worden gehouden met extra kosten voor natuurcompensatie, terwijl de kans bestaat dat dit alternatief niet door de ADC-toets komt. Het verhogen van een bestaande kwelder leidt niet tot een kwaliteitsverbetering van een bestaande kwelder en kan daarom ook nooit als kwalitatieve compensatie worden aangemerkt. Binnendijs compenseren is nodig wat gepaard kan gaan met forse extra kosten. In geval van een integrale aanpak, een handige combinatie van grondstromen en geschikte klei in het aangewezen compensatiegebied kunnen de kosten van

natuurcompensatie terugvallen naar nul. In dat geval is er zeker sprake van een positieve Business Case . Het ophogen met klei van elders leidt meestal niet tot een positieve Business Case .

- ***Kwelder in ontwikkeling en waarvoor de gevraagde hoogte voor golfreductie beneden hoogwater-niveau is gelegen.*** In deze situaties is het in principe mogelijk om de kwelder aangroei te stimuleren zodat op afzienbare termijn voldoende hoogte in het voorland aanwezig is. Het doen ontwikkelen van een kwelder kost tijd. Deze moet dan wel beschikbaar zijn gezien de eisen die aan het garanderen en bereiken van een bepaald veiligheidsniveau worden gesteld. Het stimuleren van kwelderaangroei kan mogelijk zonder dat dit tot significant negatieve effecten leidt op bestaande habitats c.q. kwelder.
- ***Geen kwelder maar met de aanleg van een kwelder wordt voldoende golfreductie bereikt.*** Dit vraagt wel veel grond en mogelijk ook extra maatregelen voor het op gang brengen van de kwelderontwikkeling. Ook in dit geval is sprake van het verlies aan beschermde habitats, in dit geval permanent ondergelopen zandplaten of slikken. Het gaat daarbij om een fors oppervlak. De aanleg van kwelder zou onder voorwaarden kunnen worden toegestaan als daarmee een beter functionerend ensemble van habitats zou kunnen ontstaan. De aanleg van een kwelder op plaatsen met waar deze van nature niet aanwezig is op plaatsen met dieper water, vraagt veel grond en is duur. Ook de daarmee samenhangende natuurcompensatieopgave kan grote aanvullende kosten met zich mee brengen. De vraag is of dit een kosteneffectievere oplossing kan zijn dan de versterking van de bestaande dijk.

Contact

Spuiboulevard 210,
3311 GR Dordrecht
+31 78 6111 099
info@ecoshape.nl
www.ecoshape.nl