

Disclaimer:

Dit rapport is het resultaat van onderzoek dat is verricht in het kader van de MIRT Verkenning Grevelingen. De Bestuurscommissie MIRT Grevelingen heeft kennis genomen van de inhoud van dit rapport. Het rapport heeft bijgedragen aan gedachtevorming binnen de Bestuurscommissie Grevelingen over denkbare, mogelijke en wenselijke, ontwikkelingen voor de toekomst van de Grevelingen.

Het betreffende onderzoeksrapport kan niet noodzakelijkerwijs rekenen op instemming van de Bestuurscommissie MIRT Grevelingen of de organisaties die in de Bestuurscommissie vertegenwoordigd zijn. De verantwoordelijkheid voor de inhoud van dit rapport ligt bij de opsteller. Het rapport heeft geen verdere status dan onderzoeksrapport. Aan het rapport kunnen geen rechten worden ontleend.

Om betrokkenen en geïnteresseerden in staat te stellen actief mee te denken over de toekomst van de Grevelingen, hecht de Bestuurscommissie Grevelingen aan maximale openbaarheid van de onderzoeken die binnen de MIRT Verkenning Grevelingen worden uitgevoerd. Opgeleverde onderzoeksrapporten zijn daarom via de website www.toekomstgrevelingen.nl voor een ieder in te zien en te downloaden.

Eind 2011 zal de Bestuurscommissie Grevelingen een voorkeursbeslissing voorleggen aan het BO MIRT. Op dat moment wordt ook een verkenningenrapport opgeleverd waarin de Bestuurscommissie een toelichting geeft op de gemaakte keuzes.

Invloed getij op oevers Grevelingen Meer

Huidige ontwikkeling en prognoses voor scenario's T50, T70
en T100

Datum	18 augustus 2010
Status	Eindconcept

Invloed getij op oevers Grevelingen Meer

Huidige ontwikkeling en prognoses voor scenario's T50, T70
en T100

Datum	26 juli 2010
Status	Eindconcept

Colofon

Uitgegeven door Informatie	Rijkswaterstaat Dienst Zeeland Jan Willem Slager
Auteurs	Dick de Jong & Dirk van Maldegem
Datum	26 juli 2010
Status	Eindconcept
Review	John de Ronde Deltares

Inhoud

1	Samenvatting 6
2	Aanleiding 8
3	Globale ontwikkeling van het meer 10
4	Ontwikkelingen van de oevers 13
4.1	Enkele begrippen 13
4.2	Basisproces in het watersysteem bij wegvallen getij: zandhonger 13
4.3	Morfologische processen in de oeverzone van een meer 15
5	Oeverontwikkeling tot nu toe 23
5.1	Monitoring 23
5.2	Proceskant oeverontwikkeling 23
5.3	Eindresultaten monitoring tot 2002 26
5.4	Globale ontwikkeling per oevertype tot heden 28
6	Prognose voor ontwikkeling oevers op basis van beschikbare informatie 31
6.1	Leeswijzer 31
6.2	Prognose voor verschillende type oevers vanaf instellen getij 31
6.3	Kwantificering van de veranderingen bij een vaste middenstand 33
6.4	Effecten van verhoging van de middenstand 35
7	Aanbevelingen voor nader onderzoek 37
	Literatuur 39
	Bijlagen 41
	Bijlage 1 Ligging oeververdedigingen en meetraaien Grevelingenmeer 41
	Bijlage 2 Globaal overzicht beschikbare informatie 42
	Bijlage 3 Oeverprofielen omgeving Slikken van Flakkee, Hompelvoet en Veermansplaat 43
	Bijlage 4 Prognose intergetijdgebied voor andere middenpeilsscenario's met een getij 47
	A Arealen 47
	B Figuren 48
	C Kaarten 49

1 Samenvatting

Ter verbetering van de waterkwaliteit van het Grevelingenmeer worden drie alternatieven met een beperkt getij van 50, 70 en 100cm onderzocht op hun consequenties voor het watersysteem. Dit rapport beschrijft de consequenties voor de ontwikkelingen in de oevers.

In het meer zijn vier typen oevers te onderscheiden; onverdedigd, met een directe of een indirecte verdediging, of met een combinatie van beide.

In oevers waar de huidige oeverlijn direct verdedigd is zal de getijdenzone geheel of voor een fors deel op de stenen verdediging vallen. Er zal geen laag intergetijdengebied met een zandige bodem ontstaan; hooguit kan er bij het grootste getijverschil tijdelijk iets ontstaan, maar dat zal snel eroderen tot onder de laagwaterlijn. Wel zal er achter de directe verdediging hoog intergetijdengebied met een zandige bodem kunnen ontstaan; dit hoge intergetijdengebied kan begroeid zijn met een zoutvegetatie. De erosie van het droogvallende gebied zal vergelijkbaar blijven met de huidige situatie, ongeveer nul.

In oevers zonder directe verdediging zal de huidige erosie ter hoogte van de oeverlijn ongeveer in het zelfde tempo doorgaan als nu. Hier ontstaat wel over de hele getijslag intergetijdengebied met een zandige bodem. Op de begroeiingsgrens kan er door de erosieafremmende werking van de vegetatie een erosieklifje ontstaan. Daardoor kan de begroeiingsgrens geleidelijk een stuk opschuiven naar boven.

In alle gevallen zal de vooroever verdiepen. De buiten vooroever, buiten de buitenste verdediging, zal verdiepen met ongeveer het verschil tussen de huidige waterstand en de nieuwe laagwaterstand. De binnen vooroever, achter de indirecte verdediging, zal mogelijk iets minder verdiepen, met name bij meer beschutte delen, omdat daar de indirecte verdediging kan werken als een golfbreker.

Door het ontbreken van goede recente data over de hoogteligging zijn geen harde uitspraken te doen over het potentieel te verwachten areaal intergetijdengebied. Met behulp van oude diepte data is wel een globale inschatting gemaakt: direct na instellen van de getijsituatie T50cm: 650ha, T70cm: 800ha en T100cm: 1050ha. Bij het instellen van een beperkt getij zal het areaal droogvallend gebied, gerekend vanaf de huidige waterlijn (NAP -0,2m) in 2050 met ongeveer 240ha zijn afgenomen. Dat is gebaseerd op de afname bij het huidige peilregime. Daarnaast zijn globale schattingen gemaakt van de veranderingen in areaal als gevolg van verhoging van de middenstand op het meer door zeespiegelstijging; zie bijlage 4.

2 Aanleiding

Aanleiding voor deze memo is de vraag van de werkgroep Water en Natuur van de MIRT studie Grevelingen om een beschrijving te geven van de ontwikkelingen van de oevers langs het Grevelingenmeer bij een gedempt getij met mogelijk een verlengde LW periode voor een getijcentrale. Uitgegaan is van de volgende scenario's:

- T_5 : Huidige situatie met een gemiddeld getijverschil van 5 cm bij een gemiddeld streefpeil van NAP-20cm; hierbij komt nog op- en afwaaiing door de wind.
- T_{50} : een getijslag van 50cm rond een gemiddelde waterstand van NAP-10cm; Gem Laagwater NAP-35cm en Gem Hoogwater NAP+15cm, exclusief windvariatie.
- T_{70} : een getijslag van 70cm rond een gemiddelde waterstand van NAP-20cm; GLW NAP-55cm en GHW NAP+15cm, exclusief windvariatie.
- T_{100} : een getijslag van 100cm rond een gemiddelde waterstand van NAP-20cm; GLW NAP-70cm en GHW NAP+30cm, exclusief windvariatie.

Bij een combinatie van een doorlaatmiddel met een getijcentrale zal de waterstand tijdens HW en LW naar verwachting minimaal 1u op deze niveaus worden vastgehouden om zo tijdens eb resp. vloed een groter niveauverschil te creëren wat een gunstig effect heeft op de elektriciteitsopbrengst. Dit betekent dat op deze niveaus een concentratie van processen plaatsvindt. In de scenario's primair gekeken naar de situatie direct na instellen van het nieuwe getij. Maar er wordt daarnaast kort aangestipt wat mogelijke effecten zijn van verhoging van het middenpeil als gevolg van een versnelde zeespiegelrijzing.

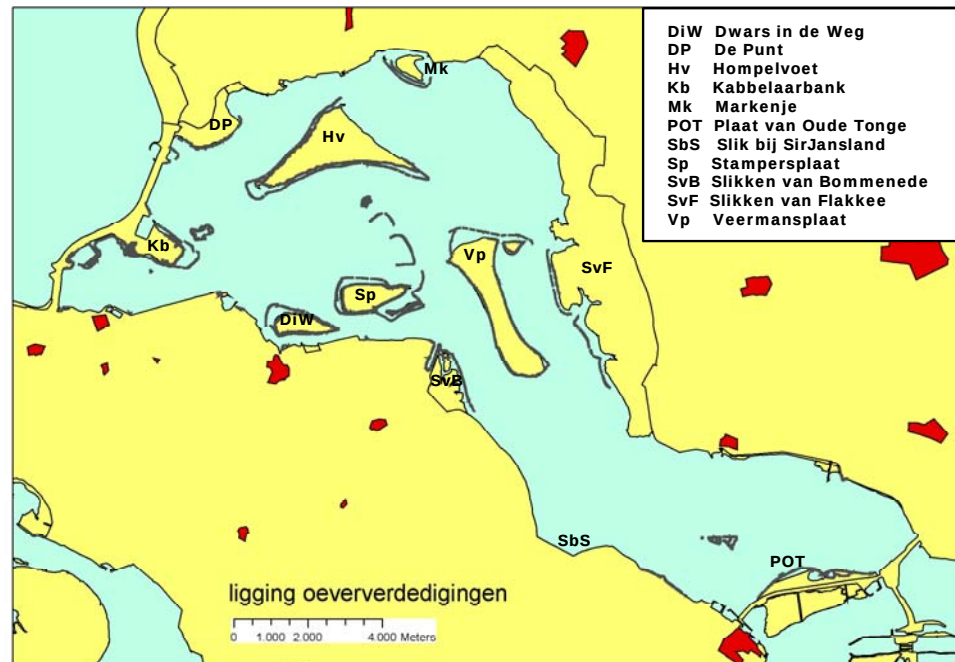
De algemene consequentie van de nieuwe scenario's is dat er een intergetijdenzone ontstaat en dat de morfologie in de oevers zich zal aanpassen aan dit nieuwe getij. In dit rapport worden deze consequenties beschreven en zo goed mogelijk gekwantificeerd. Hierbij is gebruik gemaakt van bestaande gegevens en literatuur en van actuele informatie, voor zover toegankelijk.

3 Globale ontwikkeling van het meer

Het Grevelingenmeer is in de periode 1965 -1970 ontstaan door de aanleg van de Grevelingendam (1965) en de Brouwersdam (1970).

Er is hiermee een gebied afgesloten dat in de loop van vele eeuwen onder invloed van menselijke ingrepen was ontstaan en dat zich samen met het Krammer-Volkerak had ontwikkeld tot een onderdeel van het estuarium van Rijn en Maas (en vroeger ook Schelde) in de zuidwestelijke Delta. In 1965 werd door de aanleg van de Grevelingendam het getijvolume al sterk beperkt. In 1970 verdween door het sluiten van de Brouwersdam het getij volledig en ontstond een meer met de bathymetrie van een estuarium. Hiermee verdween de getijstroom geheel in dit gebied en daarmee viel de opbouwende werking van de getijstrooming weg waardoor alleen nog de afbrekende werking van golven overbleef. Het resultaat was dat de randen van de permanent drooggevalen gebieden gingen eroderen. In hoofdstuk 4 wordt dit proces nader beschreven en waar mogelijk gekwantificeerd.

Na de afsluiting was ca 3100ha permanent drooggevalen gebied en ca 10800 ha water (peil NAP-0,20m) aanwezig. In de perioden 1980–1990 en 1990-2001 is respectievelijk 44 en 55ha drooggevalen gebied geërodeerd, waardoor er momenteel nog 2900-3000ha permanent drooggevalen gebied over is.



Figuur 1. Situatie Grevelingenmeer met ligging oeververdedigingen en gebiedsbenamingen

De oevers in het Grevelingenmeer zijn globaal in twee typen te onderscheiden: flauwe oevers zonder steilrand en steile oevers met een steil erosieklif(je). De oevers met een erosieklif(je) zijn altijd op de een of andere manier verdedigd, de

flauwe oevers soms wel en soms niet. Die verdediging kan zijn direct tegen de oever (een directe verdediging), of op enige afstand van de oever (een indirecte verdediging of vooroeververdediging) of een combinatie van beide (een gecombineerde verdediging).

In totaal gaat het om ca 60km oever, waarvan ca 14,2km niet is verdedigd. De rest is allemaal op de een of andere manier verdedigd. Tabel 1 geeft de verdeling over de diverse typen oeververdediging voor de gebieden die geen recreatiefunctie hebben. In bijlage 1 is te zien waar de typen verdediging zijn gesitueerd.

type verdediging	direct	combinatie	indirect	niet	opmerking
Hompelvoet	500	7250	0	2200	waarvan 1800 K Stpl
Veermansplaat	9500	750	1150	0	
Stampersplaat	0	6200	0	0	
Dwars in de Weg	0	3800	0	0	
Slikken van Flakkee-N	0	0	0	6200	
Slikken van Flakkee-Z	0	900	2800	2000	recreatiedeel niet hoge schelpenrand
Slik van Bommenede	0	0	1600	0	
Slik van Sirjansland	0	0	0	1000	
Markenje	0	0	950	1200	
Punt-O (Springersgors)	0	0	0	1600	
totaal per type	10000	18900	6500	14200	
totaal direct en combinatie	28900				
totaal indirect en niet verdedigd			20700		
totaal alle typen	49600				

Tabel 1. Overzicht oeververdedigingen (m) in 2010 voor de gebieden zonder hoofdfunctie recreatie, ca 80% van de totale oeverlengte. De recreatiegebieden zijn als regel direct verdedigd of gecombineerd verdedigd.

De directe verdediging bestaat meestal uit een pakket stortsteen (alleen directe verdediging) tot grof grind (bij een gecombineerde verdediging) dat tot een afstand van ca. 5m uit de oeverlijn is aangelegd. De vooroeververdediging bestaat uit grove stortsteen en is aangelegd op een afstand van 50 tot 100m van de oeverlijn op een diepte van ca. NAP-1m met een basisbreedte van 10m en lengten van ca 180m. Hiertussen bevinden zich openingen van ca 20m voor de verversing van het water. Beide constructies zijn veelal aangelegd tot ca twee decimeter boven het gemiddelde meerpeil van NAP-20cm.

Directe verdedigingen zijn toegepast bij korte steile vooroevers. Vooroeververdedigingen zijn toegepast bij iets flauwere oevers. Op meer geëxponeerde plaatsen bleek echter in de loop van de tijd dat er achter de vooroeververdediging nog steeds sprake was van een ongewenste erosie van de oeverlijn zodat daar alsnog een directe verdediging is aangelegd. Alleen bij zeer flauwe oevers is helemaal geen oeververdediging toegepast, omdat de oevererosie langzaam was in verhouding tot de oeverbreedte.

De afgelopen decennia zijn de oeververdedigingen waar nodig aangepast.

4 Ontwikkelingen van de oevers

4.1 Enkele begrippen

Teneinde verwarring te voorkomen worden hier eerst enkele begrippen nader beschreven die in de verdere tekst nog veelvuldig gebruikt zullen worden.

In figuur 2 boven is aangegeven wat wordt verstaan onder:

= de waterlijn: de plaats van het (gemiddelde) waterniveau in de oeverzone bij een min of meer stagnerend peil;

= de oeverzone: de hele zone waar de bodem wordt beïnvloed door het water (boven de gemiddelde waterlijn), en de windgolven (onder de waterlijn);

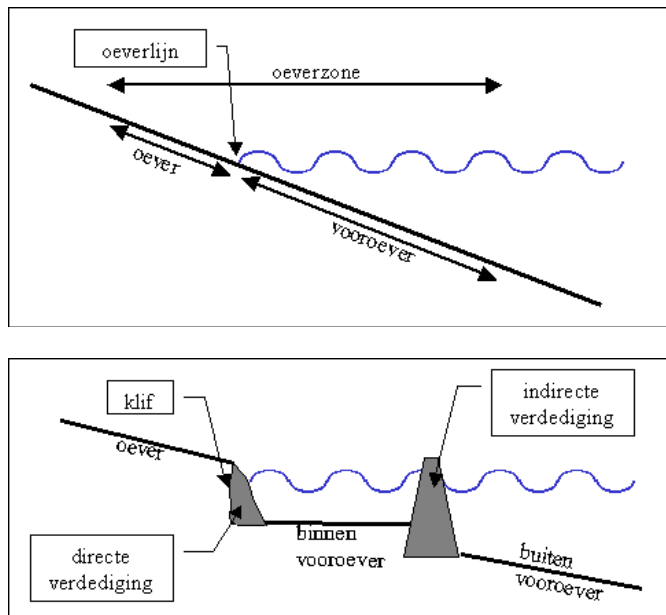
= oever: de zone boven de waterlijn, die wordt beïnvloed vanuit het meerwater, door bv opwaaiing;

= vooroever: de zone onder de waterlijn, die wordt beïnvloed door golven.

In figuur 2 onder is aangegeven waar de directe oeververdediging en de indirecte oeververdediging zijn gesitueerd in de oeverzone. Tevens is te zien dat er sprake is van twee typen vooroevers:

= de buiten vooroever, buiten de directe of indirecte verdediging, die direct bloot staat aan golven vanuit het meer;

= de binnen vooroever, achter de indirecte verdediging, waar sprake is van een zekere reductie van de golfhoogte door de indirecte verdediging.



Figuur 2. Toelichting enkele termen in de oever van het Grevelingenmeer.

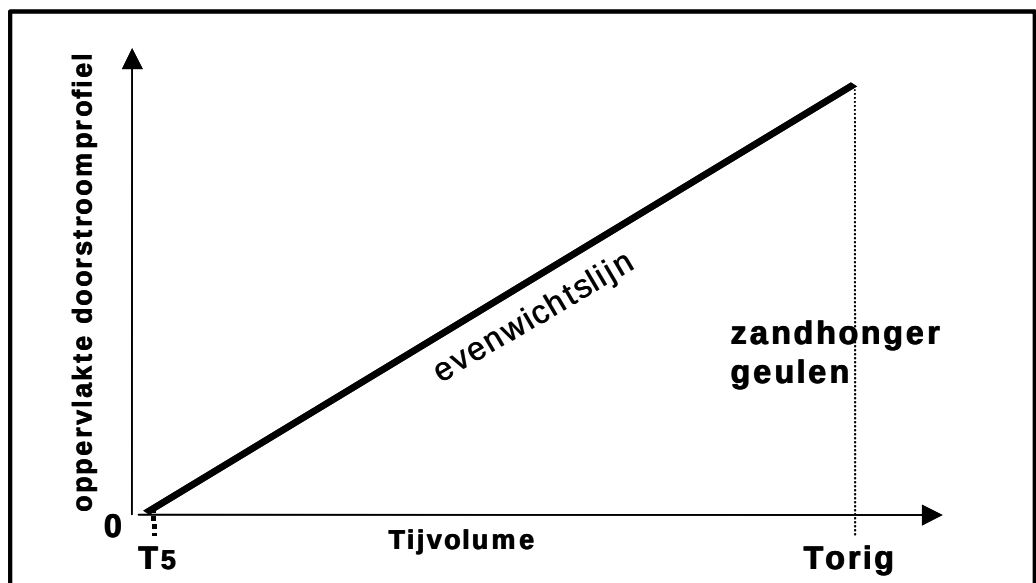
4.2 Basisproces in het watersysteem bij wegvallen getij: zandhonger

Door het wegvallen van getij in het Grevelingenmeer is ook de getijstrooming verdwenen. Deze getijstrooming is de voornaamste drijvende kracht achter het op hoogte houden van de slikken en platen in een normale getijdensituatie. Met het verdwijnen van de strooming is dus ook de opbouw van deze gebieden vervallen. Aan

de eroderende werking van golven onder invloed van wind is echter weinig veranderd. Het gevolg is dat het intergetijdengebied alleen nog erodeert. Hierbij verdwijnt het sediment vanuit de ondiepe vooroever naar de diepere delen van de vooroever en uiteindelijk in de geulen. Sinds de aanleg van de Oosterscheldekering wordt dit proces ook wel aangeduid als “zandhonger”. De geulen “honger” naar zand om zich te kunnen ontwikkelen naar een doorstroomprofiel dat past bij de huidige situatie (figuur 3).

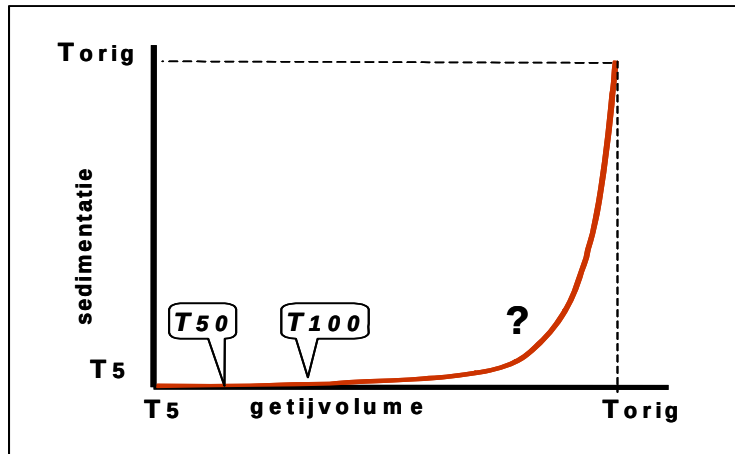
Dit eroderende proces stopt zodra de invloed van de golven op de bodem verdwenen is. Bijvoorbeeld in het Veerse meer zijn hierdoor nagenoeg alle kleinere eilanden, die direct na de afsluiting overbleven, in korte tijd geërodeerd tot deze evenwichtsdiepte. De grotere zijn overgebleven, omdat ze zijn verdedigd tegen deze oevererosie.

In het Grevelingenmeer ligt deze evenwichtsdiepte globaal op ca 2m onder het waterniveau. Uiteindelijk zullen ook hier alle droogvallende gebieden uiteindelijk in principe verdwijnen, tenzij ze zijn verdedigd.



Figuur 3. Principe van morfologisch evenwicht in getijdengeulen.
(T_{orig} = oorspronkelijk getijverschil)

Het getijvolume in de monding van het Grevelingen bedroeg ca $800 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (bij een open verbinding met het Krammer Volkerak, tot 1965). In de huidige situatie is het getijvolume via de sluis in de Brouwersdam verwaarloosbaar klein. Voor de MIRT-scenario's $T_{50/70/100}$ bedragen de getijvolumes 86 tot $215 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, grofweg 10 tot 30% van het oorspronkelijke getijvolume. Hoewel een toename van het getijvolume tot 30% van het oorspronkelijk volume substantieel lijkt is het effect op de opbouwende werking van de getijstrooming nihil. De getijstrooming neemt namelijk slechts beperkt toe en het zandtransporterend vermogen van deze strooming loopt via een hogere machtsfunctie; met andere woorden, een beperkte toename van de strooming heeft slechts een heel beperkt effect op het sedimenttransport. In figuur 4 is dit globaal weergegeven.



Figuur 4. Principe van afname sedimentatie bij vermindering getijvolume. T50 en T100 zijn globaal ingetekend. (? : De exacte vorm van de curve is niet bekend) (Torig = oorspronkelijk getijverschil)

4.3 Morfologische processen in de oeverzone van een meer

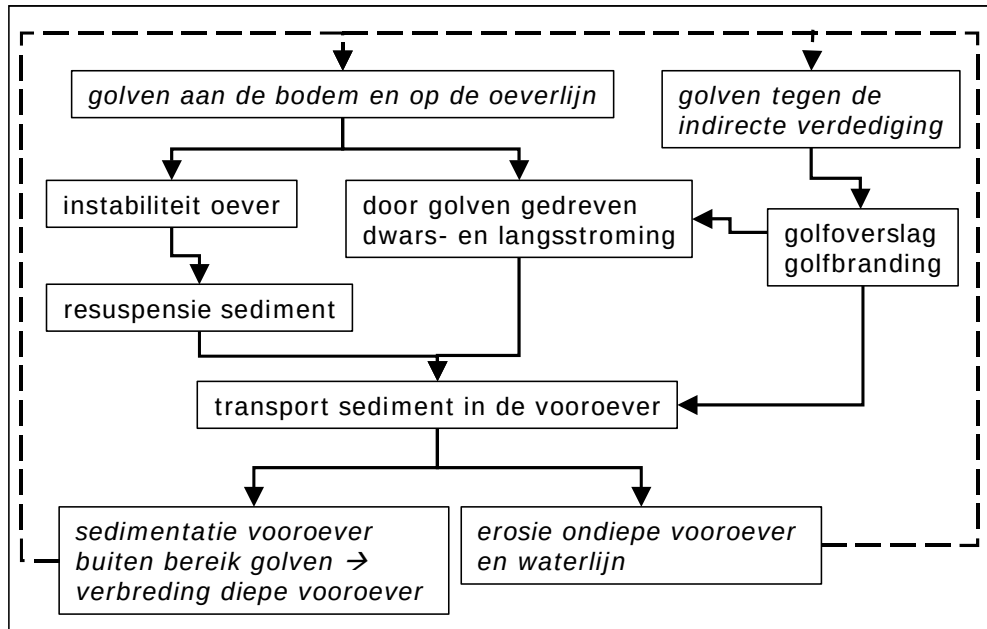
4.3.1 Algemeen

De processen die een rol spelen bij de erosie en transport van het sediment over de vooroever in de huidige situatie zijn schematisch weergegeven in figuur 5. In dit schema is de getijstroming weggelaten, omdat deze na de afsluiting van de Grevelingen is weggefallen. Verder is geen aandacht geschonken aan mogelijke opbouwende processen, omdat deze dus (nagenoeg) niet meer voorkomen in het Grevelingenmeer.

De bodemsamenstelling is overal fijn zand en speelt in principe geen aparte rol bij de processen.

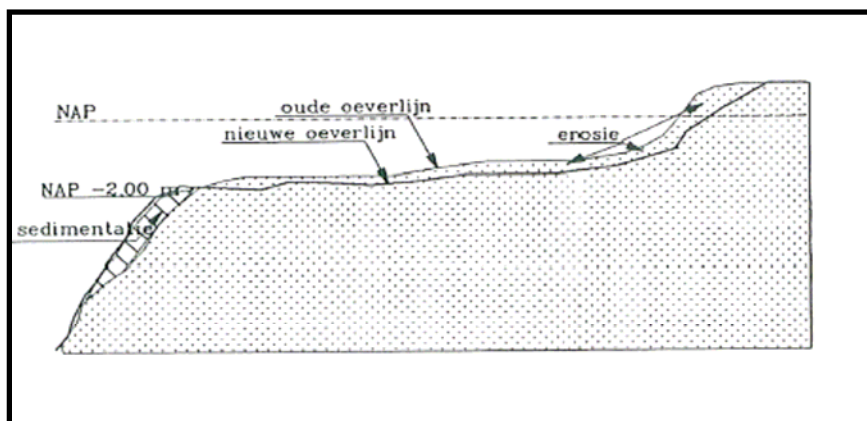
In het algemeen kan worden gesteld dat golven belangrijk zijn voor het losmaken van sediment vanaf de oever en vanuit de bodem, waardoor transport van sediment mogelijk wordt. Vervolgens zijn stromingen nodig om het sediment daadwerkelijk te transporteren. Daarbij spelen golfop- en afloop, golfgedreven stroming en windgedreven stroming een belangrijke rol. In figuur 5 wordt onderscheid gemaakt in dwars- en langsstroming, leidend tot transport van de oeverlijn naar beneden resp. parallel aan de oeverlijn. Golven tegen de indirecte verdediging geeft aan dat golven die tegen deze verdediging aankomen hierover heen zullen slaan en zo voor extra waterafvoer (langsstroming) zorgen achter de indirecte verdediging.

Bij het transport speelt de oeverhelling een belangrijke rol. De terugkoppeling van "erosie vooroever" en "sedimentatie buiten bereik golven" naar "golven" wil zeggen dat er na verloop van tijd er min of meer een evenwicht ontstaat. Als de golven de bodem nauwelijks meer in beweging kunnen brengen omdat de bodem te diep is komen te liggen zal de erosie nagenoeg nul zijn; alleen bij zware stromen zal er nog enige erosie optreden.



Figuur 5. Schematische weergave van de morfologische processen in de oeverzone (bewerkt naar Leeuwestein & Schoot, 1988)

Het schema geeft netto aan welke processen op grote schaal plaatsvinden. In figuur 6 is dit nog uitgewerkt in een schematische tekening, waarin is aangegeven waar erosie plaatsvindt bij met name een onverdedigde oever en waar het geërodeerde materiaal terechtkomt.



Figuur 6. Principe van het erosie en sedimentatieproces in een meer (Consemulder & Liek 2000)

In tabel 2 zijn deze globale processen nog wat nader uitgewerkt voor de verschillende type verdediging van de oever; in de derde kolom is aangegeven hoe het voor de toekomstscenario's met een gedempt getij zal zijn.

Type	Huidige situatie	Toekomst scenario
Onverdedigde oevers	Golfshoaling, -breking, -oploop en -afloop op <i>relatief vast</i> niveau. Golf- en windgedreven stroming langs oever op <i>relatief vast</i> niveau.	Golfshoaling, -breking, -oploop en -afloop op <i>variabel</i> niveau. Golf- en windgedreven stroming langs oever op <i>variabel</i> niveau. <i>Stroming langs oevers dicht bij doorlaatmiddel.</i>
Direct verdedigde oevers	Golfshoaling, -breking, -overslag op <i>relatief vast</i> niveau. Golf- en windgedreven stroming langs oever op <i>relatief vast</i> niveau.	Golfshoaling, -breking, -oploop en -afloop op <i>variabel</i> niveau, <i>deels op onverdedigde zone</i>. Golf- en windgedreven stroming langs oever op <i>variabel</i> niveau. <i>Golfoverslag over verdediging waardoor extra watertransport achter verdediging.</i> <i>Stroming langs oevers dicht bij doorlaatmiddel.</i>
Indirect verdedigde oevers	Golfshoaling, -breking, -overslag op <i>relatief vast</i> niveau <i>vóór</i> verdediging. Golfdoordringing via openingen Golf- en windgedreven stroming in zones <i>vóór</i> en achter verdediging	Golfshoaling, -breking, -overslag op <i>variabel</i> niveau <i>vóór</i> verdediging. Golfdoordringing via openingen <i>en tijdens HW over verdediging heen</i>. Golf- en windgedreven stroming in zones <i>vóór</i> en achter verdediging. <i>Golfoverslag over verdediging waardoor extra watertransport achter verdediging.</i> <i>Stroming t.g.v. vulling en lediging van kom achter verdediging.</i> <i>Stroming langs oevers dicht bij doorlaatmiddel.</i>

Tabel 2 Overzicht van de verschillende optredende golf- en stroomeffecten bij de oevers langs het Grevelingenmeer in de huidige situatie en bij de toekomstscenario's.

4.3.2 Effecten golfwerking

Het energieverlies van de windgolven door shoaling¹, maar vooral door breking en oploop, veroorzaakt opwerveling van sediment vanaf de bodem en bij een klif vanuit de oever naar de waterzone. Dit losgemaakte sediment kan vervolgens door stroming worden meegenomen. Het proces van opwoeling gaat door tot de windgolven geen invloed meer kunnen uitoefenen op de bodem. Dit komt overeen met ca. 2 keer de waarde van de maatgevende golfhoogte ter plaatse. De golfhoogte is hierbij afhankelijk van de strijklengte en de waterdiepte. Wanneer er een verdediging is zal de bodemopwoeling plaatsvinden voor die verdediging (en bij een gecombineerde verdediging dus bij beide oeververdedigingen).

4.3.3 Effecten golfgedreven stroming "zgn brandingsstroom"

Brekende golven op de oever veroorzaken tijdens storm een lichte verhoging van de waterstand (zgn wave set-up). Bij loodrecht invallende golven leidt dit tot erosie aan de bodem als gevolg van langs de bodem terugstromend water (undertow).

Daarnaast veroorzaken schuin invallende golven een versnelling van de waterdeeltjes langs de oever. Deze schuin invallende golven leiden ook tot transport van sediment parallel aan de oeverlijn (langstransport). Verschillen in de mate van dit transport leidt vervolgens tot erosie of lokaal ook sedimentatie.

Een derde fenomeen hierbij is golfoverslag over de oeververdediging. Bij de vooroeververdediging leidt dit tot ontgrondingskuilen direct voor en achter de verdediging en extra waterafvoer uit de binnenvooroever wat weer kan leiden tot extra erosie in de openingen in de vooroeververdediging. Bij een directe verdediging kan het leiden tot erosie van de bodem direct achter de verdediging. In alle gevallen kan dit aanleiding zijn tot grotere instabiliteit van de verdedigingen.

Golfgedreven stroming treedt met name op tijdens stormsituatie in de gebieden, die geëxponeerd liggen op de windrichting. Door het evenwicht in watermassa ontstaat er een bovenstroom naar de kust toe en een onderstroom van de kust af. Indien de stroomsnelheid langs de bodem groter wordt dan 20 cm/s kan hierdoor transport optreden van fijn sediment dat door de golven wordt opgewoeld vanaf de bodem. Wat netto gebeurt is sterk afhankelijk van de situatie. Over het algemeen zal tijdens storm door de sterkere onderstroom met name afvoer van sediment plaatsvinden en tijdens rustig weer eventueel enige opbouw; maar dit laatste fenomeen zal in het Grevelingenmeer nauwelijks nog optreden, omdat er niet echt sprake is van branding². Dit betekent dat, indien golfgedreven stroming optreedt langs de oevers, dit met name erosie zal veroorzaken.

Vermoedelijk is de golfgedreven stroming vooral verantwoordelijk voor de dwarstransporten van sediment, dus richting diepere delen.

4.3.4 Effecten windgedreven stroming

Ook door windgedreven stroming kan sediment worden verplaatst vanaf een stroomsnelheid van ca. 20cm/s en kan transport gaan plaatsvinden van opgewerveld sediment. Feitelijke erosie (opwerveling vanaf de bodem) door uitsluitend windgedreven stroming zal pas optreden bij stroomsnelheden >50cm/s,

¹ Shoaling: vormverandering van de windgolf onder invloed van wrijving met de bodem in ondiep water.

² Branding is het verschijnsel wat op de kust optreedt na het luwen van een storm en effect van de voortplanting van windgolven van een storm ver weg.

omdat door pakking van het sediment, wortels, algen enz. de erosiebestendigheid veel groter is. Dit zal in het Grevelingenmeer niet voorkomen.

Tabel 3 geeft voor verschillende condities qua windsnelheid en waterdiepte een indicatie welke strijklengtes nodig zijn om door windgedreven stroming zand te laten transporteren.

Windsnelheid [m/s] ³ diepte(m)	Benodigde strijklengte [m] bij 4 waterdieptes (waarden afgerond op 100m)				Beaufort-waarde
	1	2	3	4	
5	3300	6600	10000	13300	ondergrens 4
10	800	1700	2500	3300	ondergrens 6
15	400	800	1100	1500	halverwege 7
20	200	400	600	800	bovengrens 8
25	150	300	400	500	ondergrens 10
30	100	200	300	400	halverwege 11

Tabel 3 Condities waarbij zand in beweging komt (= 20 cm/s)

Uit de tabel volgt dat windgedreven stroming met zand transporterend vermogen met name in de ondiepe zones (<2m) is te verwachten en bij een windsnelheid ≥ 10 m/s (6 Beaufort). Stormen (windsnelheid >15 m/s) veroorzaken de grootste effecten. Windgedreven stroming zal vooral voorkomen in gebieden met flauwe ondiepe oevers en zijn vermoedelijk vooral verantwoordelijk voor langstransport van sediment, dus langs de oever. Er zal hierdoor op de oeverzones zowel erosie als sedimentatie kunnen optreden.

Hierbij moet bedacht worden dat hier primair gekeken wordt naar gemiddelde snelheden over de breedte van de (binnen)vooroevers of in de openingen in de verdedigingen. In werkelijkheid zal er sprake zijn van versnellingen in de stromingen, met name aan de randen van verdedigingen, waardoor ontgrondingskuilen kunnen ontstaan en verdedigingen instabiel kunnen worden.

4.3.5 Effecten getijstroming

Omgeving doorlaatmiddel

Er is een kleine kans dat bij de grootste getijvariant T_{100} in de omgeving van het doorlaatmiddel in voormalig Springersdiep, bij de Hompelvoet en de Kabbelaarsbank, langs de oevers stroomsnelheden kunnen optreden, die groter zijn dan 0,5 m/s. Het getijvolume loopt via de geulen Springersdiep, Springergeul, Hompelgeul en Geul van Ossenhoek. In totaal is dit minder dan 10000 m² doorstroomprofiel. Bij een doorstroomcapaciteit van tijgemiddeld 2500 m³/s zal de werkelijke capaciteit ca. 5000 m³/s moeten bedragen. In die situatie zijn langs de oever gemiddelde stroomsnelheden van 0,5 m/s mogelijk in deze omgeving. Wellicht dat dit langs de oevers hier tot geringe uitschuring leidt.

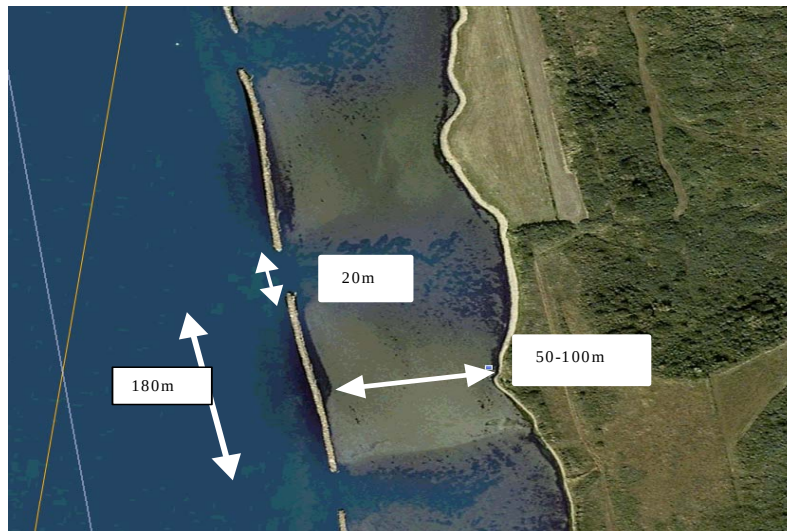
Elders

Vullen en ledigen van gebied achter indirecte oeververdedigingen

Bij de getij-scenario's zullen de vooroevers achter de oeververdedigingen vullen en ledigen als gevolg van het getij. De in- en uitstroming vindt plaats via de openingen tussen de verdedigingen (zie ook figuur 7). Daarin kunnen door contractie stroomsnelheden gaan optreden die sediment kunnen meevoeren mits dit door

³ Beaufort-waarden zijn als extra kolom in tabel 3 opgenomen.

golven eerst is losgemaakt van de bodem. In de huidige situatie lijkt zandtransport slechts heel beperkt op te treden door aanlandige en aflandige wind, die het water opstuwt resp. maar gecombineerd met een beperkt getij kan dat toenemen. Onderstaand rekenvoorbeeld illustreert dit.



Figuur 7 Situatieschets van een indirecte en directe oeververdediging

Rekenvoorbeeld:

De gemiddelde stroomsnelheid zal orde $(O \cdot T) / (t \cdot A)$ bedragen, waarin
 $O =$ komoppervlak $\sim L \cdot B \sim 180\text{m} \cdot 50\text{m}$ (maximaal mogelijk $180\text{m} \cdot 100\text{m}$)
 $T =$ getijhoogte 1 of 0,7 of 0,5m afhankelijk van getijvariant
 $t =$ tijdsduur vulling/lediging $\sim 6\text{u}$ of 21800s

Bij de aanleg van een getij-centrale wordt de LW en HW periode met minimaal 1 uur verlengd. Hierdoor reduceert de tijdsduur van vulling/lediging naar maximaal ca 5 uur ~ 18.000 sec.

$A =$ doorstroomoppervlak opening; de breedte ligt vast; de diepte zal afhankelijk zijn van het golfklimaat in deze omgeving. Indien de vooroever op NAP-1m ligt zal de gemiddelde hoogte van de doorstroming ca 1m bedragen. Het doorstroomoppervlak wordt geschat op ca. $20 \cdot 0,81\text{m}^2$.

De gemiddelde stroomsnelheid in de openingen door getijstroming alleen zal ca. 0,03 tot 0,06m/s bedragen, te weinig voor transport. Maar bij omstandigheden met grotere windsnelheden, zal het effect van de wind- en golfgedreven stromingen versterkt worden, waardoor er sneller sedimenttransporten kunnen optreden.

4.3.6 Te verwachten netto effect bij een gedempt getij

Uit het voorgaand blijkt dat bij een gedempt getij er niet sprake zal zijn van sedimentatie van betekenis in de vooroever, omdat het vermogen van het water om sediment omhoog te brengen nihil is.

In delen waar nog erosie plaatsvindt zal deze doorgaan. Of en in welke mate deze erosie verandert is lastig aan te geven. Het lijkt echter goed mogelijk dat de erosie zal toenemen, omdat de eroderende krachten toenemen. Omdat hierover echter onvoldoende harde informatie beschikbaar is wordt hier voornamelijk aangenomen dat de erosiesnelheid van dezelfde ordegrrootte zal zijn.

In delen waar de erosie min of meer gestopt is zal de erosie echter weer opnieuw beginnen. De vooroever waar momenteel geen invloed meer is van golven op de bodem zal namelijk weer onder invloed van golven komen, waardoor de opwoeling van sediment weer kan beginnen en daarmee er weer mogelijkheid is voor afvoer van sediment naar lagere delen. Deze nieuwe erosie zal doorgaan tot de vooroever opnieuw buiten bereik van de golven is gekomen, wat betekent dat er globaal een verdieping zal optreden van maximaal het verschil tussen huidig gemiddeld peil en toekomstig laagwater. Daar waar een vooroeververdediging aanwezig is kan dit in de binnen vooroever wat minder zijn omdat deze vooroeververdediging een zeker golfreducerend effect zal hebben. Of dit gebeurt is onder meer afhankelijk van de ligging ten opzichte van de voornaamste windrichtingen.

De wat toenemende getijstroming achter de indirecte verdediging en over de verdediging slaande golven zullen er voor zorgen dat er bij grotere windsnelheden sneller sedimenttransport kan plaatsvinden dan voorheen.

5 Oeverontwikkeling tot nu toe

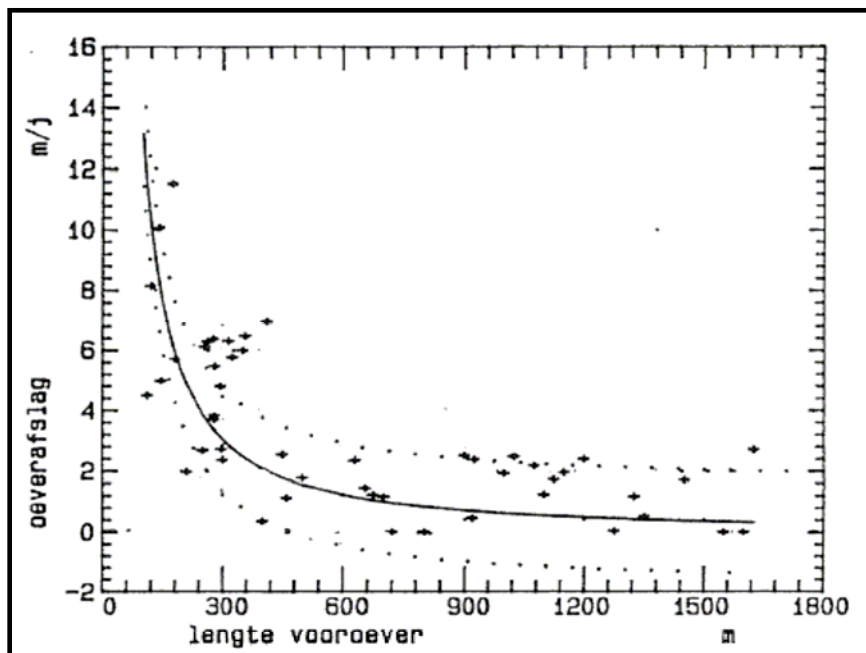
5.1 Monitoring

Na de totstandkoming van het Grevelingenmeer is een stelsel van meetraaien uitgezet om de ontwikkelingen in de oevers te volgen. Met wisselende frequenties zijn hier hoogtemetingen uitgevoerd. Eind jaren tachtig heeft een eerste evaluatie van deze metingen plaatsgevonden, waarbij tevens veel aandacht is besteed aan de optredende processen (mn Leeuwestein & Schoot, 1988). Een tweede evaluatie heeft plaatsgevonden rond 2000, waarbij met name is gekeken naar veranderingen in de ligging van de oeverlijn en van de NAP-2m lijn. Die laatste lijn is globaal de lijn tot waar erosie plaatsvindt in de vooroevers. Hier worden de resultaten van beide evaluaties nader toegelicht.

5.2 Proceskant oeverontwikkeling

5.2.1 Metingen

Onverdedigde oevers vertonen een doorgaande erosie, waarbij door erosie in de ondiepe delen de oeverlijn zich landwaarts verplaatst en door afzetting van geërodeerd sediment verbreding van de diepere vooroever optreedt.



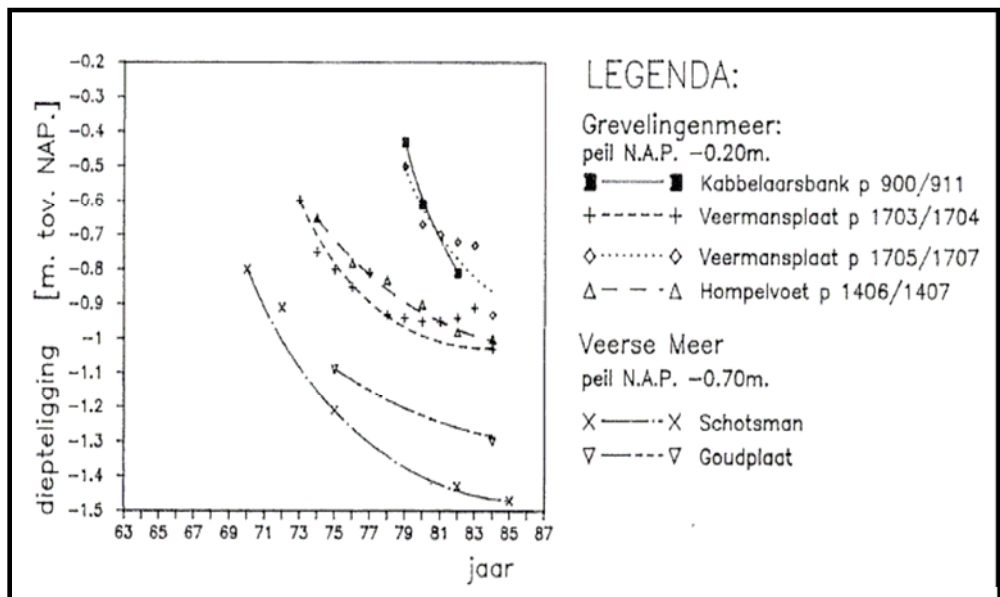
Figuur 8 Oeverlijnverplaatsing (hier oeverafslag genoemd) als functie van de lengte van onverdedigde vooroever van de Veermansplaat. (Vooroever is de zone tot ca NAP-2m.) [Ref. Leeuwestein&Schoot, 1988]

Bij de mate van oeverachteruitgang bestaat er een relatie met de windoriëntatie, de strijklengte in verband met de groei van windgolven en de lengte van de vooroever. Dit laatste wordt in figuur 8 geïllustreerd. Bij langer worden van de vooroever is er

een snelle afname van de mate van achteruitgang, maar er blijft ook bij heel lange vooroevers (>1km) sprake van erosie, met een oeverlijnverplaatsing van 1-2 m/jaar.

Uit de metingen blijkt dat door verlenging van de diepere vooroever als gevolg van de sedimentatie van geërodeerd materiaal uit de ondiepe vooroever de erosiesnelheid heel geleidelijk afneemt.

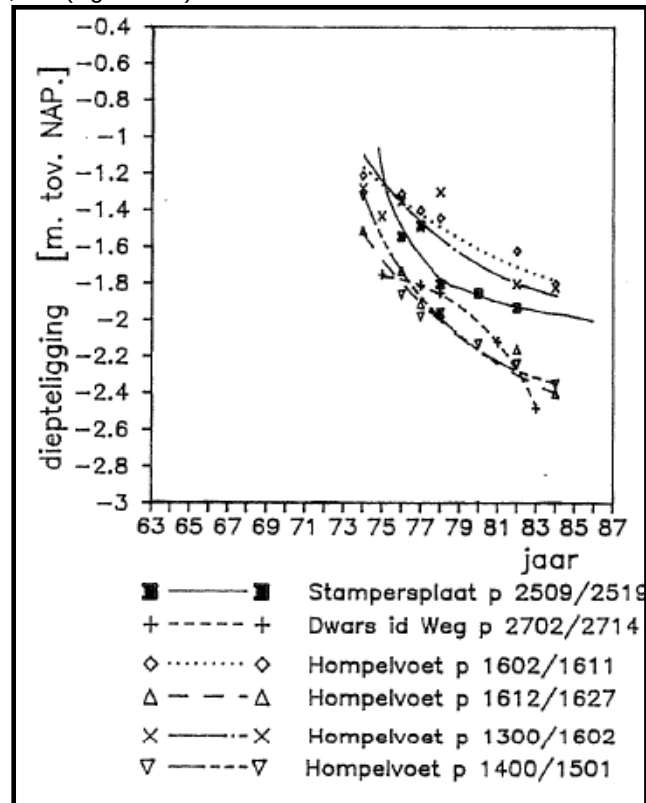
Directe verdedigingen leggen de oeverlijn vast, maar kunnen wel op naastgelegen onverdedigde oevers extra erosie geven. Na aanleg van de verdediging treedt er in het Grevelingenmeer in 10 jaar een versterkte verdieping van de vooroever op tot een bodemligging van NAP-0,8 tot -1,0m (figuur 9). In het Veerse meer was sprake van een verdieping tot NAP-1,5m. Dit komt door de langere periode dat het meer bestond maar ook het lagere winterpeil (op NAP -0,7m) speelt hier een rol. De figuur laat tevens zien dat er in deze periode een ontwikkeling is naar een nieuw evenwicht in de bodemligging, maar wat in het Grevelingenmeer nog niet is bereikt na 10 jaar. Kijkend naar de lijnen mag een evenwichtsdiepte worden verwacht op ca NAP-1 tot NAP -1,2m. Verder voor de verdediging zal de diepte nog toenemen; zie hieronder en figuur 10.



Figuur 9 Ontwikkeling van de waterdiepte voor de teen van de directe oeververdediging [Ref. Leeuwestein & Schoot, 1988].

De indirecte vooroeververdedigingen hebben geleid tot duidelijke afname in de verplaatsing van de oeverlijn. Desondanks bleef de oeverlijn veelal niet geheel stabiel. Op veel plaatsen is daarom na aanleg van de vooroeververdediging alsnog een directe verdediging aangelegd om de oever beter te stabiliseren. De opgetreden verdieping na 10 jaar bedraagt ca. 0,2m, zowel achter de verdediging als achter de opening. Er treden randeffecten op: bij de openingen tussen de verdediging blijft erosie overheersen en direct achter de verdediging is er ook verdere verdieping als gevolg van overslaande golven tijdens stormen. De nieuwe evenwichtsdiepteligging van de binnenvooroever bedraagt naar schatting ca. NAP -0,4 tot NAP -0,5m. Actuele meetinformatie is nodig voor betere specificaties. De bodemligging van de

buitenvooroever ligt voor het Grevelingenmeer globaal tussen de NAP-1,5m en – 2,5m (figuur 10).



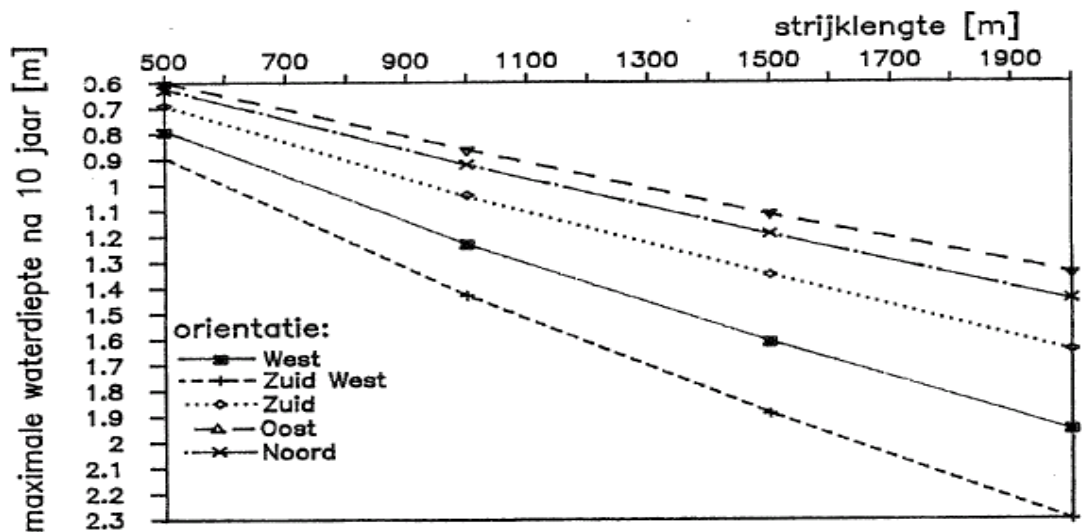
Figuur 10 Diepteontwikkeling buitenvooroever bij een indirecte verdediging [Ref. Leeuwestein & Schoot, 1988].

5.2.2 Model

Op basis van de metingen tot circa 1987 zijn modellen gemaakt om de processen te modelleren en om te zien welke parameters met name belangrijk zijn (Leeuwestein & Schoot 1988).

Deze modelberekeningen laten zien dat de nieuwe diepteligging afhankelijk is van de strijklengte en de oriëntatie ten opzichte van de overheersende windrichting; logisch omdat met name deze twee factoren de mate van golfontwikkeling bepalen (zie figuur 11; zie ook figuur 5).

Hierbij past de aantekening dat aanpassing in principe ook afhankelijk is van korreldiameter en cohesie van het sediment. Maar omdat in het Grevelingenmeer in de oeverzone eigenlijk alleen sprake is van zand, met slechts incidenteel kleine kleilensjes kan dit aspect buiten beschouwing blijven.



Figuur 11 Berekende waterdiepte op de vooroever als functie van strijklengte en oriëntatie van de vooroever in het algemeen (dus zonder verdediging, na 10 jaar) [Ref. Leeuwestein & Schoot, 1988].

In het kader van deze evaluatie heeft Rijkswaterstaat ook een biologische evaluatie uitgevoerd (zie bijv. Fortuin 1989). De resultaten hiervan laten zien dat ook biologische processen een rol spelen bij de morfologische processen (denk aan erosiebestendigheid), maar deze zijn sterk tijds- en seizoensafhankelijk en ondergeschikt aan de fysische processen.

5.3 Eindresultaten monitoring tot 2002

Bij de tweede evaluatiestudie uit 2002 is er voor gekozen om de ontwikkelingen in de gemeten profielen met name te volgen op de ligging van de oeverlijn (NAP – 0,2m) en op de overgang ondiep/diep water (NAP-2m). Bij alle oevertypen verplaatst de oeverlijn landwaarts (Tabel 4). Het ondiep water gebied neemt in de meeste gevallen toe doordat de ondiepwaterlijn veelal meerwaarts verplaatst. Recentere meetdata van de raaien zijn niet beschikbaar en informatie om de ruimtelijke effecten van de erosie te laten zien is summier voorhanden, maar deze zullen het beeld niet veranderen.

De geconstateerde ontwikkelingen komen overeen met het principe van het erosie- en sedimentatieproces in een meer met vast peil zolang nog een verdieping van de vooroever plaatsvindt. In de ondiepe delen vindt onder invloed van de golven erosie plaats, en het geërodeerde materiaal wordt naar de diepere delen getransporteerd tot een diepte waar de golven geen invloed meer hebben op de bodem (zie ook figuur 6).

De geringe verplaatsing van de oeverlijn bij een indirecte verdediging heeft er waarschijnlijk mee te maken dat in de meetperiode zijn, die in de loop van de meetperiode alsnog zijn voorzien van een directe verdediging. Als regel is bij veel directe verdediging de verplaatsing van de oeverlijn gestopt.

oevertype	Verplaatsing oeverlijn NAP-0,2m (m/j)		Verplaatsing ondiepwaterlijn NAP-2m (m/j)		Afname areaal droogvallend gebied (ha/j)
	1980- 1990	1990- 2001	1980- 1990	1990- 2001	
onverdedigd	-0,8	-3,8	0	-0,7	3,3
Direct verdedigd	-0,3	-0,4	0,5	-0,2	0,4
Indirect verdedigd	-1,9	-0,5	0,1	0,2	0,8
Combinatie verdedigd	-0,1	-0,2	0,2	0,2	0,4

Tabel 4 Verplaatsing van diepwaterlijn en ondiepwaterlijn (NAP-2) in de periode 1980 – 2001 en afname areaal droogvallend gebied. Gebaseerd op Nijssen [2002]; in m/jaar; positief is meerwaartse verplaatsing; negatief is landwaartse verplaatsing. Zie ook bijlage 5 voor de schematische profielontwikkeling van de verschillende oevertypen.

Op basis van lodingkaarten van kort voor de sluiting van de Brouwersdam (1969 en 1970) en een recent gemaakte dieptekaart (in 2009 met behulp van “groene laser”) is voor het NW deel van het Grevelingen Meer wel enige ruimtelijke informatie beschikbaar over de ontwikkelingen sinds de afsluiting. In het betreffende gebied zijn hieruit enkele oeverprofielen geselecteerd in de omgeving van de Slikken van Flakkee, Hompelvoet en Veermansplaat. De profielen lopen vanaf de geul tot en met de oever (figuur 12). De profielen zijn opgenomen in bijlage 3.

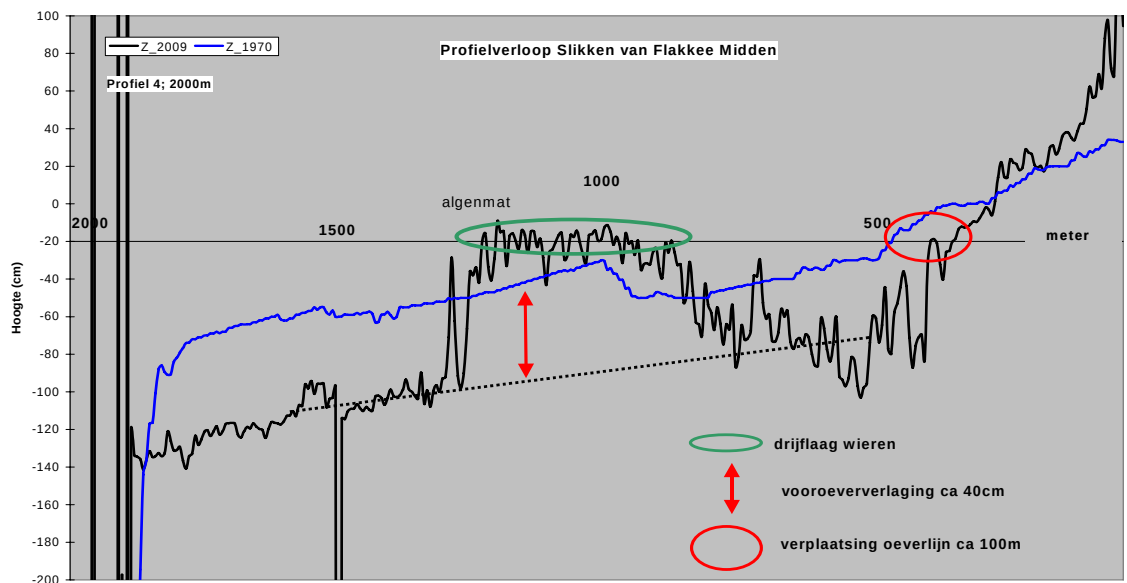


Figuur 12 Situatie oeverprofielen 1970 – 2009⁴.

In figuur 13 is profiel 4 als voorbeeld weergegeven.

⁴ De situatieschets markeert niet alle profielen, die in bijlage 3 zijn opgenomen

In de profielen van 2009 zijn hier en daar “bulten” tot aan de waterlijn zichtbaar, die na controle in het veld overeenkomen met drijvende algenmatten. Als hiervoor gecorrigeerd wordt (de doorgetrokken stippellijn in figuur 14) dan is te zien dat er een forse verlaging is opgetreden van orde grootte 40cm. Er lijkt nog niet sprake te zijn van een stabilisatiezone; die ligt blijkbaar nog dieper dan NAP -1,3 - -1,4m. Dit is een gemiddelde erosie van 1 tot 2cm/jaar. Ook is goed te zien dat de oeverlijn hier ruim 100 m in 40 jaar achteruit is gegaan, 2,5m/jaar.



Figuur 13 Diepteprofiel 4, Slikken van Flakkee-noord 1970 en 2009.
(de verhoging van het maaiveld boven de waterlijn is een meetfout, omdat hier de dichte vegetatie verhindert dat de bodem zelf wordt opgemeten)

5.4 Globale ontwikkeling per oevertypen tot heden

Per oevertypen zijn de morfologische ontwikkelingen anders geweest (zie ook hiervoor de principevoorbeelden in bijlage 5).

Bij de onverdedigde oevers is sprake van een nog steeds doorgaande erosie. De oeverlijn treedt terug met snelheden die variëren afhankelijk van de ligging op de overheersende windrichting. Op de Slikken van Flakkee is dat ca 2 tot 3m/j en op de Hompelvoet een stuk minder. Het voorland verdiept zich nog steeds met 1 tot 2cm/jaar. De stabilisatiediepte ligt dieper dan NAP-1,4m. Kijkend naar de direct verdedigde oevers lijkt stabilisatie op te treden rond een diepte van NAP-1,5 tot NAP -2m. Dat is 1,3 tot 1,8m onder het waterpeil.

Bij direct verdedigde oevers is de verplaatsing van de oeverlijn nihil. De buiten vooroever verdiept tot een evenwichtsdiepte rond de NAP-1,5 tot NAP-2m, afhankelijk van de oriëntatie op de wind. Dat is 1,3 tot 1,8 m onder het waterpeil. Bij indirect verdedigde oevers kan de oeverlijn zich nog wel iets verplaatsen maar is dat erg gering. De binnen vooroever verdiept enigszins tot een diepte van 50cm (en soms meer) onder het waterpeil. Hier is een evenwichtssituatie bereikt. In de buiten

vooroever treedt een vergelijkbare verdieping op als bij een directe verdedigde oever

Bij een gecombineerde verdediging zijn de ontwikkelingen vergelijkbaar met die bij een directe verdediging en een indirecte verdediging: geen verplaatsing van de oeverlijn van betekenis, matige verdieping van de binnen vooroever en sterke verdieping van de buiten vooroever.

6 Prognose voor ontwikkeling oevers op basis van beschikbare informatie

6.1 Leeswijzer

Op basis van de ontwikkelingen die tot nu toe hebben plaatsgevonden en de beschreven processen kan een prognose worden gemaakt voor de ontwikkeling van de verschillende type oevers bij het instellen van een beperkt getij. Dit wordt per oevertype hier uitgewerkt voor de situatie direct na instellen van een getij (paragraaf 6.2). In bijlage 5 wordt dit geïllustreerd. In paragraaf 6.3 worden voor de situatie direct na instellen van het nieuwe getij de belangrijkste zones gekwantificeerd en wordt globaal aangegeven wat er verandert in de eerste decennia hierna.

Door de zeespiegelstijging in de komende eeuw zal de middenstand op het meer in principe meestijgen. De gevolgen hiervan worden kort in paragraaf 6.4 beschreven. Dit wordt geïllustreerd in bijlage 4.

6.2 Prognose voor verschillende type oevers vanaf instellen getij (zie ook bijlage 5)

Onverdedigde oever

De huidige morfologische processen, de achteruitgang van de waterlijn en de verlaging van de vooroever, gaan gewoon door met vergelijkbare snelheid als voorheen. De evenwichtsdiepte van de vooroever zal daarbij zakken met de toename van het laagwater ten opzichte van het huidige peil, minimaal ca 15cm bij T_{50} tot maximaal ca 50cm bij T_{100} , naar ca 1,5 tot 2,5m onder de laagste waterstand, afhankelijk van de expositie. Het hoogste aangrijpingspunt van de erosie op de oever zal naar boven verschuiven met de toename van het hoogwater t.o.v. het huidige peil.

In het onderste deel van het intergetijdengebied zal een zone kaal slik ontstaan die geschikt is voor bodemdieren en foeragerende vogels. Aan de bovenzijde zal deze zone overgaan in een met zoutvegetatie begroeid deel. In welke mate de vegetatie de erosie in het hogere deel van intergetijdenezone kan afremmen is niet geheel duidelijk, omdat de aard van de vegetatie moet worden afgewacht. Maar de vegetatie zal de erosie niet stoppen, maar hooguit afremmen. De vegetatie in het hogere deel van de getijdenezone zal er waarschijnlijk toe leiden dat er een afslagklifje zal gaan ontstaan, waardoor de uitbreiding van de vegetatie naar beneden kan worden gehinderd; daardoor zal de onderste begroeiingsgrens naar boven opschuiven.

Direct verdedigde oever

Voor de directe verdediging zal de buiten vooroever verder verdiepen indien er nog geen stabiele situatie is ontstaan of opnieuw verdiepen als er al wel een stabiele situatie is ontstaan. De extra verdieping zal ongeveer gelijk zijn aan de toename van het laagwater t.o.v. huidig peil, minimaal ca 15cm bij T_{50} tot maximaal ca 50cm bij T_{100} ; daardoor zal de nieuwe evenwichtsdiepte komen op ca 1,5 tot 2,5m onder de laagste waterstand, afhankelijk van de expositie. Door de verdediging zal de oeverlijn in principe niet verder opschuiven. Maar als het hoogwater boven de

verdediging uitkomt zal er achter de verdediging mogelijk wel (nieuwe) erosie optreden, tenzij de zoutvegetatie voldoende erosiebestendig is. Dat is nog onduidelijk en zal de toekomst moeten leren. Indien de oever achter de verdediging laag is, lager dan het nieuwe gemiddeld hoogwater, is er kans op stagnantie van zout meerwater waardoor er kale delen achter de verdediging kunnen ontstaan die erosiegevoelig zijn.

Door de verlaging van de buiten vooroever zal de oeververdediging in principe instabiel worden, zeker bij de grotere getijverschillen.

De nieuwe intergetijdenzone zal geheel of voor het grootste deel op de harde verdediging vallen, waardoor er geen ruimte is voor kaal slik. Mocht er bij T_{100} direct na instellen van het nieuwe getij een smalle strook slik ontstaan dan zal deze snel door erosie onder water verdwijnen. De nieuwe evenwichtsdiepte zal na 10 tot 15 jaar bereikt kunnen zijn. Aan de bovenzijde kan er eventueel een strook zoutvegetatie ontstaan, afhankelijk van de hoogte van de verdediging en van het achtergelegen gebied; indien er lage delen achter de verdediging liggen kunnen daar kale delen ontstaan die erosiegevoelig zijn.

Indirecte verdedigde oever

De binnen vooroever zal opnieuw verdiepen tot een nieuwe evenwichtsdiepte. De nieuwe verdieping zal in principe ongeveer gelijk zijn aan de toename van het laagwater t.o.v. huidig peil, minimaal ca 15cm bij T_{50} tot maximaal ca 50cm bij T_{100} .

In oevers waar de indirecte verdediging voor alle windrichtingen een serieus golfbrekend effect heeft bij de lagere waterstanden kan deze nieuwe verdieping enigszins minder zijn. De nieuwe evenwichtsdiepte komt daarmee op ca 0,5 tot 1m onder de laagste waterstand, afhankelijk van de expositie en strijklengte tussen de indirecte verdediging en de waterlijn. De buiten vooroever zal zich verdiepen naar 1,5 tot 2,5m onder de laagste waterstand. Door beide processen zal de oeververdediging instabiel worden.

De eventueel aanwezige erosie ter plaatse van de waterlijn zal op vergelijkbare wijze doorgaan als in de afgelopen jaren, dan wel opnieuw kunnen beginnen. Het aangrijppingspunt zal echter hoger komen te liggen met de toename van het hoogwater t.o.v. huidig peil.

In het onderste deel van het intergetijdengebied zal een zone kaal slik ontstaan die geschikt is voor bodemdieren en vogels; de breedte ervan is afhankelijk is van het getijverschil. Door de bodemverlaging van de binnen vooroever en de erosiewerende werking van de vegetatie zal deze zone kaal slik in de eerste decennia echter versmallen. In het bovenste deel van het nieuwe getijdengebied zal begroeiing ontstaan. De invloed van de vegetatie als erosieremmer is niet geheel duidelijk omdat eerst de aard van de vegetatie moet worden afgewacht. De vegetatie zal de erosie echter niet stoppen, maar hooguit afremmen. De vegetatie in het hogere deel van de getijdenzone zal waarschijnlijk aan de onderzijde begrensd worden door een afslagklifje, waardoor de uitbreiding van de vegetatie naar beneden wordt gehinderd, en de onderste begroeiingsgrens naar boven zal gaan.

Combinatie direct en indirect verdedigde oever

De ontwikkelingen, die beschreven zijn bij de direct en indirect verdedigde oever qua aanpassing en erosie zijn hier beide van toepassing: geen kale zone in het intergetijdengebied, hooguit kort bij T_{100} . Verdieping van de binnen en buiten vooroever en instabiele oeververdedigingen. Achter de directe verdediging zal er zoutvegetatie ontstaan.

Samengevat betekent dit dat alleen bij oevers waar er geen verdediging op de huidige oeverlijn ligt er sprake is van het ontstaan van intergetijdengebied met een zacht substraat. Alleen daar zal een smallere of bredere strook kaal intergetijden gebied ontstaan waar eventueel vogels kunnen foerageren.

In de oevers waar een verdediging op de huidige oeverlijn ligt zal hooguit bij T_{100} kortstondig sprake zijn van een smalle strook kaal intergetijdengebied, die echter al na 10 tot 15 jaar weer geheel onder water is verdwenen.

Bij alle oevertypen zal er in de hoogste zone sprake zijn van een zoutvegetatie. Als er een vorm van directe verdediging is wordt de ondergrens ervan bepaald door de hoogte van deze verdediging. Er is echter, zeker bij het grootste getijverschil van 100cm, grote kans op substantiële erosie achter de directe verdediging door golfoverslag. Als er geen vorm van directe verdediging is, zal de ondergrens primair bepaald worden door de begroeiingsmogelijkheden van de zoutplanten. Door de erosieremmende werking van de vegetatie zullen er afslagklifjes ontstaan waardoor na verloop van tijd de ondergrens van de begroeiing geleidelijk een stuk naar boven zal verschuiven.

In alle gevallen waar er sprake is van een oeververdediging zal deze door de verlaging van de vooroever instabiel worden. Hoe groter het getijverschil hoe groter de instabiliteit van de oeververdediging zal worden. Bij de indirecte verdedigingen moet daarbij ook gedacht worden aan instabiliteit door achterloopsheid en uitschuring van de openingen. Hoe groot de risico's precies zijn is moeilijk te zeggen. Bij de directe verdedigingen kan de eventueel optredende erosie direct achter de verdediging ook leiden tot instabiliteit van de verdediging.

Een verlengde hoog- en laagwaterperiode, zoals gewenst bij een getijcentrale, kan er toe leiden dat de kans op klifvorming bij onverdedigde oevers vergroot wordt, zeker als zo'n "stagnante" periode samenvalt met een stormsituatie. Bij een directe verdediging is er vergrote kans op stagnantie van zout water achter de verdediging met daarbij een vergrote kans op kale, erosiegevoelige delen achter de verdediging.

6.3 Kwantificering van de veranderingen bij een vaste middenstand

In tabel 5 zijn de arealen intergetijdegebied van de belangrijkste zones direct na instellen van de nieuwe getijsituatie weergegeven. De getallen zijn gebaseerd op de arealen uit de kaarten in bijlage 4c. Deze kaarten zijn gebaseerd op een dieptekaart uit 1969 (!), omdat deze kaart een nagenoeg volledig en aaneengesloten beeld geeft van het hoogte-/diepteverloop. De erosie die in de vooroevers heeft plaatsgevonden en de lokaal opgetreden sedimentatie in de droge delen door verwaaiing is hierin niet opgenomen. De getallen zijn dan ook vrij globale indicaties. Andere hoogte-/diepte informatie zou hieraan toegevoegd kunnen worden, maar dit verandert wel de getallen maar verbeterd de nauwkeurigheid maar heel beperkt. Voor een goede vergelijking naar de toekomst (zie H 6.4) is er voor gekozen om deze cijfers hier toch te hanteren.

De verdeling over de twee voornaamste zones kaal slik en zout vegetatie is gebaseerd op een impressie van de verdeling in de kaartjes in bijlage 4C. Bij oevers met een vorm van directe verdediging is niet gerekend met het ontstaan van een zone kaal slik, omdat de getijzone zich (vrijwel) geheel op de harde verdediging bevindt of daar boven. Hooguit is er kortstondig bij een getij van 100cm een smalle zone kaal slik die snel zal verdwijnen. Ook zones buiten een indirecte verdediging zijn niet meegerekend voor kaal slik.

Zodra het nieuwe getij is ingesteld zullen de processen, zoals beschreven in paragraaf 4.3, in de oeverzone gaan optreden. Dat leidt tot veranderingen in de oevers. De bodem van de binnen en/of buitenvooroever gaat verdiepen en bij oevers zonder directe verdediging zal de oeverlijn zich blijven (niet verdedigd) of opnieuw (indirect verdedigd) landwaarts verplaatsen.

Bij de oevers met een vorm directe verdediging zullen de initieel ontstane zones niet veranderen. Bij de oevers zonder directe verdediging zou dat eventueel wel kunnen, met name als de bodemhelling van de vooroever of het droge gebied verandert. Hierover is echter te weinig bekend om mogelijke veranderingen voldoende hard te maken. Daarom wordt hier aangenomen bij deze niet direct verdedigde oevers er weinig zal veranderen in de arealen per zone, hooguit in de ligging van die zones. Wat wel verandert is de areaal droogvallend gebied omdat dit af zal nemen door de doorgaande verplaatsing van de oeverlijn.

Een globale kwantificering hiervan is gedaan op basis van de totale lengte onverdedigde oever en de mate van achteruitgang in de afgelopen periode. Uit tabel 1 blijkt dat er ca 14.200m niet verdedigde oever is en 6.500m indirect verdedigde oever. Tabel 4 laat zien dat bij onverdedigde oevers de achteruitgang van de waterlijn ca 3,8m/j bedraagt en bij indirect verdedigde oevers ca 0,5m/j. Aangenomen wordt dat bij niet verdedigde oevers de achteruitgang met dezelfde snelheid zal blijven doorgaan omdat de helling van de vooroever niet veel zal veranderen. Bij indirect verdedigde oevers zal de binnen vooroever echter gaan verdiepen waardoor de ter plaatse van de waterlijn de erosie zal toenemen. Na verloop van tijd houdt de verdieping van de binnen vooroever op en zal parallel aan de verplaatsing van de waterlijn de helling van de getijdzone geleidelijk weer afnemen. Dit zal enige decennia duren. Hier wordt aangenomen dat een verdubbeling van de achteruitgang naar 1m/j gedurende minimaal 20 jaar goed mogelijk is, waarna de achteruitgang terug gaat naar de huidige waarde van 0,5m/j.

In cijfers ontstaat dan het volgende beeld voor de achteruitgang van het droogvallende gebied:

= niet verdedigde oever: 14.200m met een achteruitgang van 3,8m/j geeft 5,4ha/j. Over een periode van 40 jaar is dat 216ha droogvallende oever minder.
 = indirect verdedigde oever: 6.500m met een achteruitgang van 1m/j geeft 0,65ha/j voor de eerste 20 jaar en met een achteruitgang van 0,5m/j over de tweede twintig jaar van 0,33ha/j. Over 40 jaar wordt dat ca 20ha.
 = totaal over 40 jaar is dat een achteruitgang van ca 240ha in areaal droogvallend gebied.

getijscenario	G5		G50		G70		G100	
areaal	2010	2050	2010	2050	2010	2050	2010	2050
Droogvallend		-240ha		-240ha		-240ha		-240ha
intergetijgebied	5 km ²		13km ²		15km ²		25km ²	
% zoutvegetatie	90		70		60		50	
% kaal slik	10		30		40		50	

Tabel 5 Achteruitgang droogvallend gebied over 40 jaar (2050) en areaal intergetijdegebied na instellen van een getij. De verhouding percentage zout vegetatie / kaal slik is gebaseerd op de kaartjes in bijlage 4 .

6.4 Effecten van verhoging van de middenstand

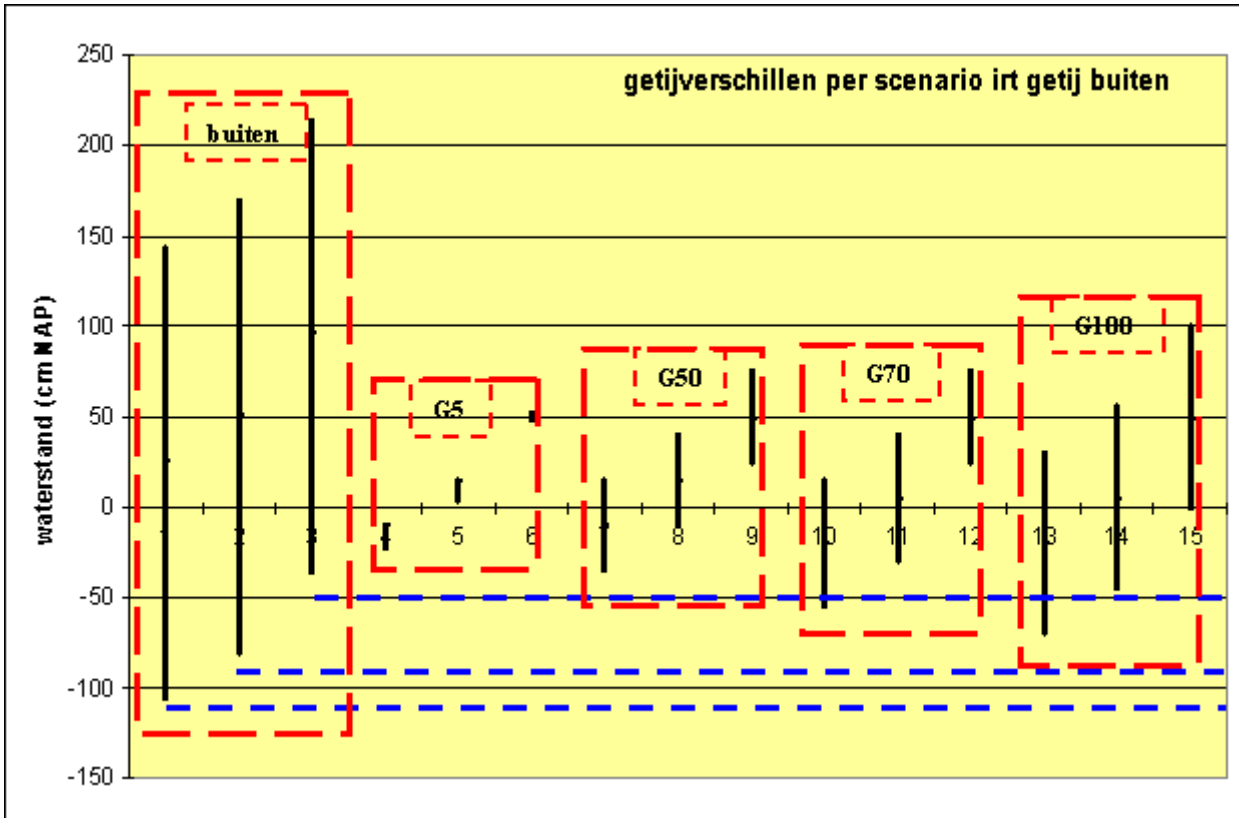
(zie ook bijlage 4)

Door stijging van de zeespiegel in de komende decennia zullen GHW (Gemiddeld Hoog Water en GLW (Gemiddeld Laag Water) aan de buitenzijde van de Brouwersdam stijgen. Dat zal consequenties kunnen hebben voor de mogelijkheid om een vaste middenstand op het Grevelingenmeer te handhaven. In figuur 14 is per getijscenario (G5, G50, G70 en G100) is te zien hoe gemiddeld laagwater op het meer zich verhoudt tot de te verwachten buiten waterstanden. Te zien is dat bij G5 (waarde 4 op absis grafiek) op zich geen problemen zijn om het getij te handhaven. Bij G50 (waarde 7) is te zien dat een stijging van 70cm betekent dat GLW niet of nauwelijks haalbaar meer is. In feite beginnen er al problemen vanaf een verhoging van de buitenwaterstand met ca 30 tot 40cm. Bij G70 en G100 (waarde 10 resp 13) zijn GLW niet meer op natuurlijke wijze te handhaven. Dat betekent dat de middenstand op het meer bij alle getijscenario's groter dan G5 zal moeten meestijgen. Om een indruk te krijgen wat dit betekent voor de ontwikkelingen van de belangrijkste zones in het meer is gekeken wat er gebeurt als de middenstand mee stijgt met de buitenwaterstand. Dat is weergegeven in de figuur 14 en bijlage 4 als M (middenstand)-scenario's.

In bijlage 4 zijn kaartjes opgenomen waarin voor alle vier getijscenario's is weergegeven wat er bij verhoging van de middenstand met ca 25 cm (2150) en 70cm (2100) globaal verandert in de ligging en het areaal van de belangrijkste zones. Deze kaartjes zijn gebaseerd op een dieptekaart uit 1969 omdat i) geen gebiedsdekkende recente informatie beschikbaar was en ii) in de hogere delen met dichte vegetatie de informatie uit het AHN (Actueel Hoogtebestand Nederland) niet voldoende betrouwbaar is.

De arealen zijn in bijlage 4 globaal gekwantificeerd, zodat ook de ordegrootte van de veranderingen duidelijk wordt. Omdat niet is gewerkt met een perfecte diepte-/hoogtekaart moet een en ander als indicatief worden beschouwd voor de mogelijke ontwikkelingen in de komende decennia/eeuw. Zeker voor de huidige situatie (kaarten met middenstand NAP-10cm of -20cm) is het areaal "kaal slik" sterk overschat omdat grote delen door erosie in de afgelopen decennia ook bij een nieuw getij permanent onder water liggen. Eigenlijk is alleen bij gebieden zonder een directe verdediging sprake van daadwerkelijk "kaal slik".

Het beeld wat deze exercitie oplevert is dat G100 ongunstig is voor het intergetijdegebied bij toename van M.



Figuur 14 getijverschil binnen en buiten het Grevelingenmeer bij verschillende zeespiegelrijzingen.

De rode blokken geven getijscenario's aan. Per getijscenario zijn er drie middenstandscenario's weergegeven: uitgangsscenario – 25cm verhoging – 70cm verhoging. Blauwe lijn is niveau gem laagwater voor drie gem zeeniveaus buitengaats. Zie ook bijlage 4 voor de gebruikte hoogtes.

7 Aanbevelingen voor nader onderzoek

De actuele oeverontwikkelingen zijn beschreven tot ca 2000. Het verdient aanbeveling om ook voor de recentere periode na te gaan hoe de oeverontwikkelingen geweest zijn. Hiervoor moet de informatie van de raaien en bodems beschikbaar komen en zullen relevante raaien opnieuw gemeten moeten worden. Hieruit zal dan blijken in hoeverre de bodemhoogte van de vóóroever zich nog verder heeft aanpast aan het golfklimaat en wat de uiteindelijke evenwichtsdieptes zijn van de vooroevers. Het verdient aanbeveling om dan ook metingen te doen naar de maximale golfhoogten die langs diverse oevers optreden.

Het beeld van de gehele bodem is van belang omdat de oeverontwikkeling nu is gebaseerd op een grove benadering. Voor het doen van meer concrete prognoses op lange termijn zou ook meer bekend moeten zijn omtrent de ondergrond qua mogelijke aanwezigheid van slecht erodeerbare lagen. De zeer brede vooroever bij de Slikken van Flakkee-noord zou er bijvoorbeeld op kunnen duiden dat hier op enkele meters diepte een harde (veen)laag aanwezig is die de erosieprocessen sterk kan beïnvloeden. Ook elders in de Delta komen dergelijke uitgestrekte veenlagen in de ondiepe ondergrond voor, met ook daar grote invloeden op de morfologie; bijvoorbeeld het Verdrongen Land van Saeftinge in de Westerschelde en het Verdrongen Land van Zuid Beveland en de Slikken van de Dortsman in de Oosterschelde.

Bij alle oevers waarbij sprake is van een vorm van harde oeerverdediging zal de oeerverdediging instabiel worden. Hoe dat varieert per getijscenario is niet goed te kwantificeren. Hiernaar zou nader gekeken moeten worden.

Literatuur

J C Consemulder & G J Liek, 2000.

Analyse oeverontwikkelingen Grevelingenmeer : periode 1990-1998.
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee; Werkdocument RIKZ/AB/2000/839x

A M Fortuin, 1989.

De ontwikkeling en bescherming van oevers in afgesloten zeearmen : samenvatting van de morfologische en biologische evaluatiestudies in Veerse meer en Grevelingenmeer.
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren

H J Hoeksema, 2002.

Grevelingenmeer : van kwetsbaar naar weerbaar? : Een beschrijving van de ontwikkelingen van 1996 tot 2001 en een toesing aan het beleid.
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RWS, RIKZ); Rapport RIKZ/2002.033

W Leeuwenstein & P Schoot, 1988.

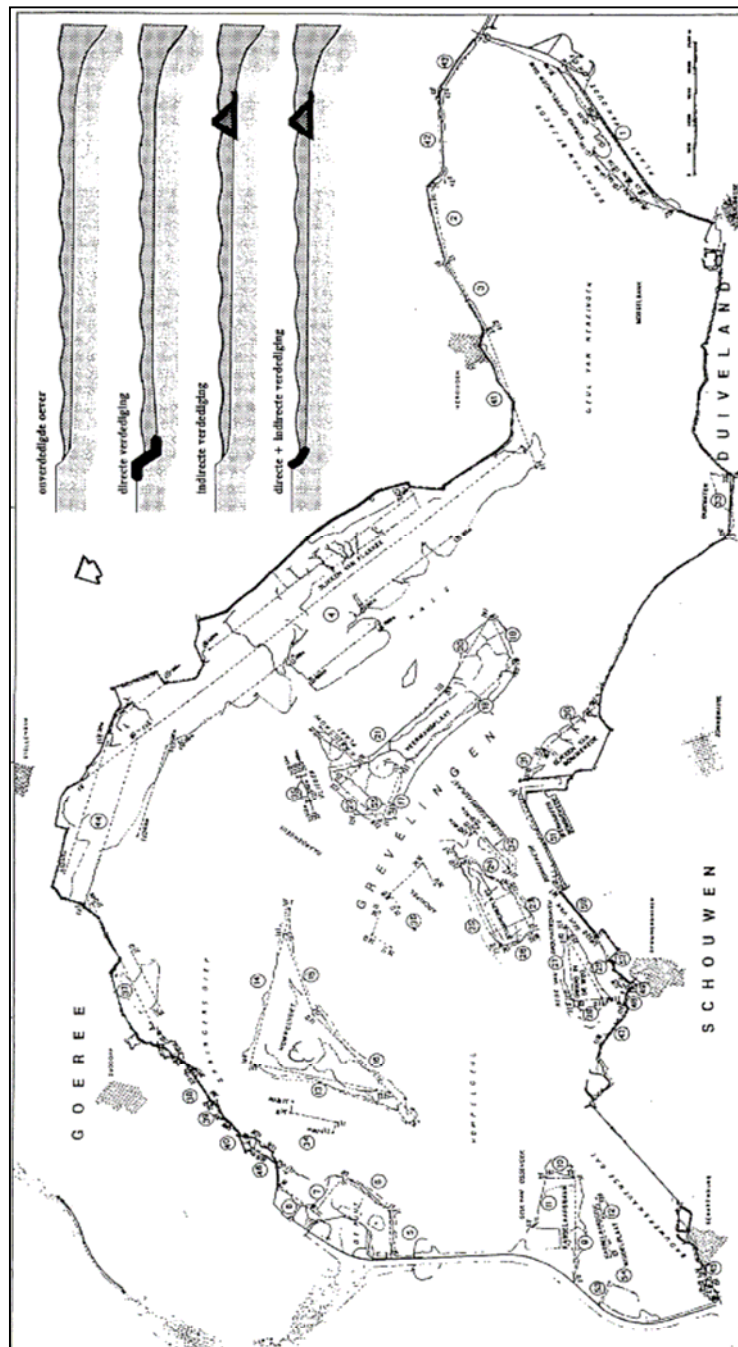
Evaluatie oevers: eindrapportage van het project Oevererosie.
Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek , Vakgroep Waterbouwkunde, Sectie Kustwaterbouwkunde; TU Delft, 01-1988

A Nijssen, 2002.

Oeverontwikkelingen in het Grevelingenmeer over de periode 1990-2001.
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee; RIKZ/AB/2002.816x

Bijlagen

Bijlage 1 Ligging oeververdedigingen en meetraaien Grevelingenmeer



Bijlage 2 Globaal overzicht beschikbare informatie

Hoogte - en dieptegegevens

Informatie omtrent de ontwikkelingen in de oevers is te ontleen aan de raai-metingen en lodingen. Deze zijn opgeslagen in ZEEKOE. In 2000 is ZEEKOE gemigreerd met uitzondering van o.a. het Grevelingenmeer, waardoor deze data niet direct bruikbaar zijn. Contactpersoon voor deze gegevens bij het Waterschap Zeeuwse Stromen is Sandra Stoel. Tijd en geld is nodig om deze database te kunnen gebruiken. De raaimetingen zijn tot 1998 verwerkt voor een klein deel van de oevers.

In het kader van het algemene hoogtebestand is een laseraltimetrieopname van de omgeving van het Grevelingenmeer uitgevoerd in 2008.

De gegevens van lodingen (lodingvakken 33, 34 en 35) en bijbehorende verschilkaarten geven informatie over de ruimtelijke ontwikkelingen van het gebied beneden NAP-1m. De laatste loding dateert van 2003. De 1^e opname rond de afsluiting van de Grevelingen is 1971 waarbij gepeild is tot ca. NAP+0,5m.

Daarnaast zijn opnamen gedaan 1975, 1986, 1991 en 2003 (vanaf 1986 beschikbaar in DIA format). De volgende opname is gepland in 2014. Er is een pilot gedaan met een groene laser in 2009 voor het NW deel. Met deze informatie kan de ruimtelijke uitgangssituatie van het begin van het Grevelingenmeer worden gemaakt.

Waterstanden

Op het Grevelingenmeer wordt bij de Brouwerssluis binnen, Bommenede en de hevel de waterstand continu gemonitord.

Windsnelheid

Windsnelheid wordt gemeten aan de buitenzijde van de Brouwerssluis en bij Stavenisse (Oosterschelde). Voor de Grevelingen is deze informatie goed bruikbaar.

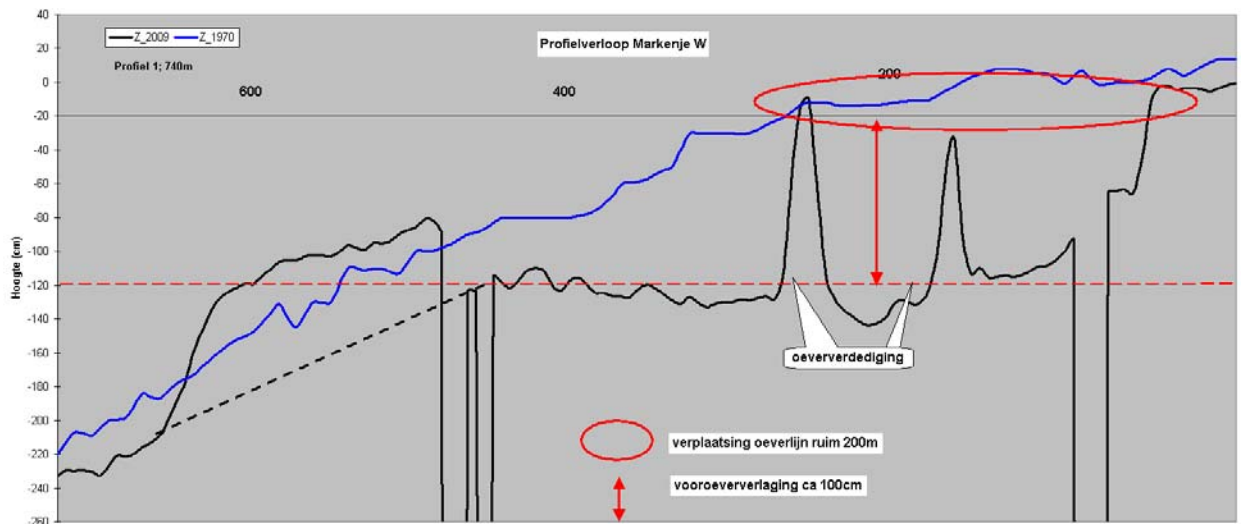
Golfhoogten

Golfhoogten zijn in het verleden bepaald met stappenbaak op 4 locaties (tabel 4).

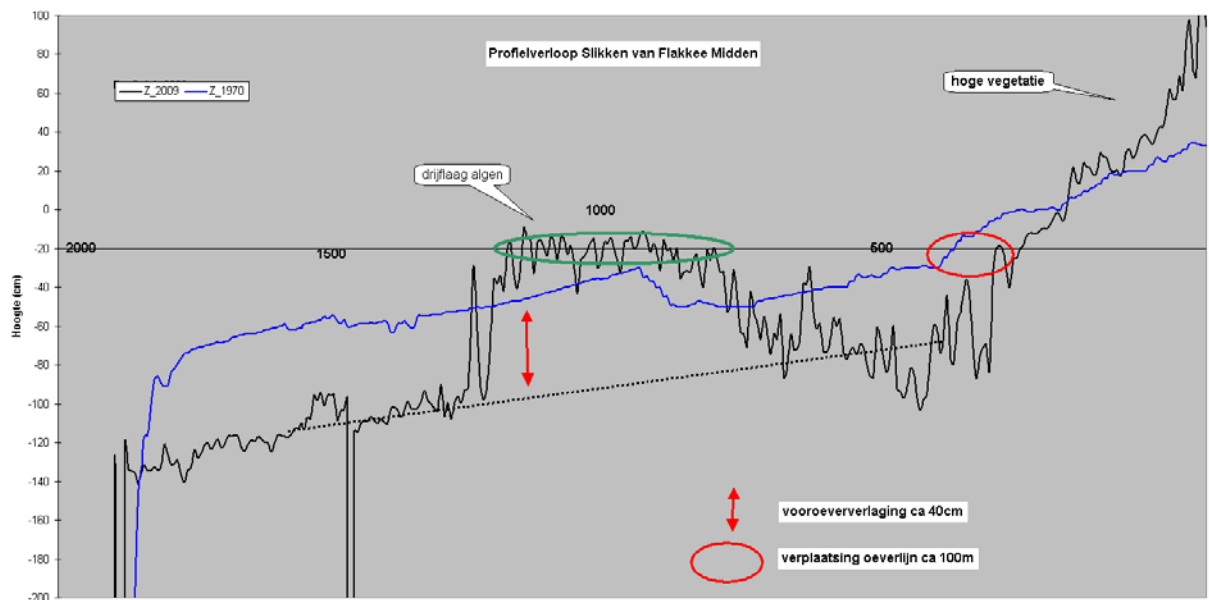
Tabel 4 Locaties golfmetingen met stappenbaak

locatie	x	y	periode	sensortype	omschrijving
GM1	57555	419740	19841122-19850621	stappenbaak	omgeving Veermansplaat
GM2	57579	419630	19841122-19850621	stappenbaak	omgeving Veermansplaat
GM3	58178	418440	19841122-19850621	stappenbaak	omgeving Veermansplaat
GM4	54069	418690	19860410-19880602	stappenbaak	omgeving Stampersplaat
GM4	54561	418220	19860410-19880602	stappenbaak	omgeving Stampersplaat

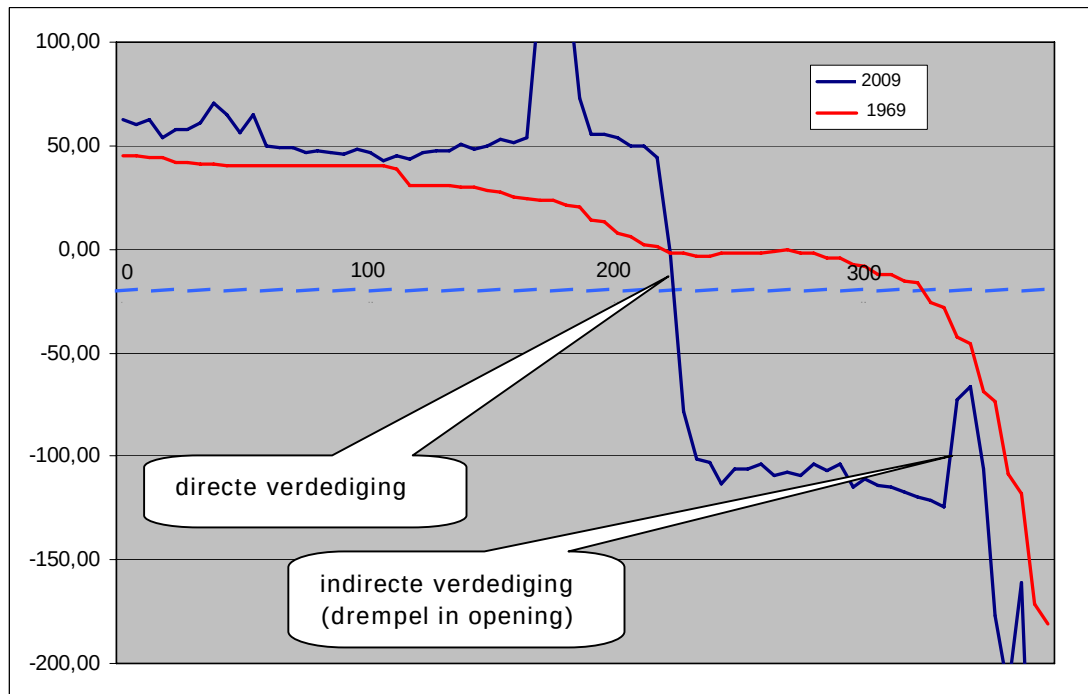
Bijlage 3 Oeverprofielen omgeving Slikken van Flakkee, Hompelvoet en Veermansplaat



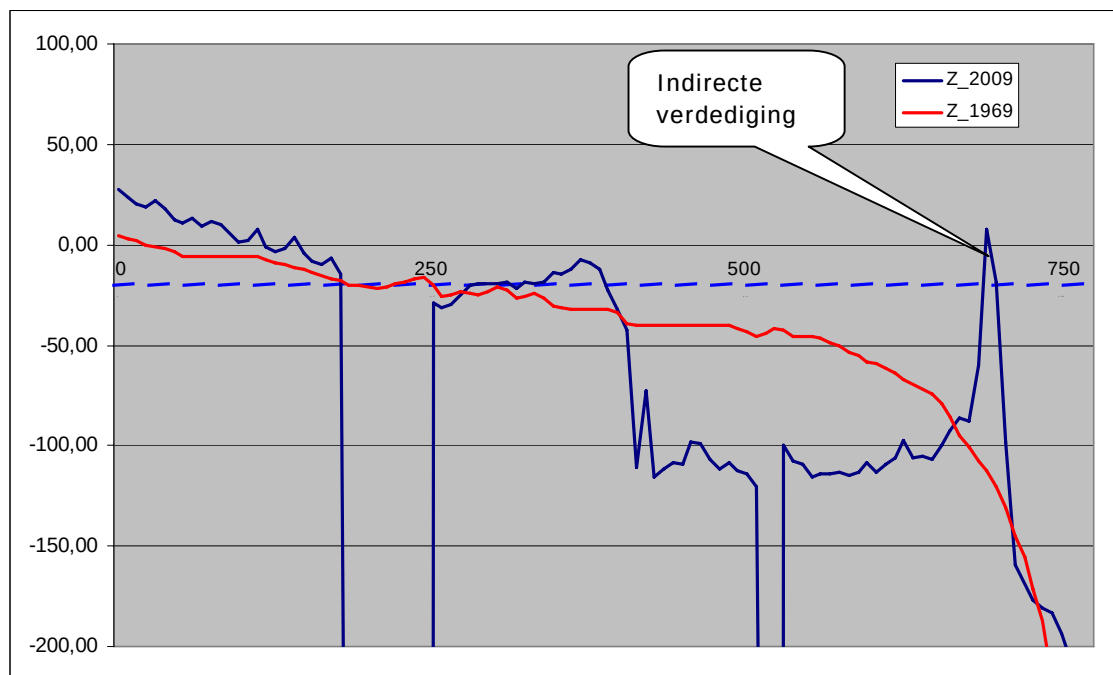
Raai Markenje-west



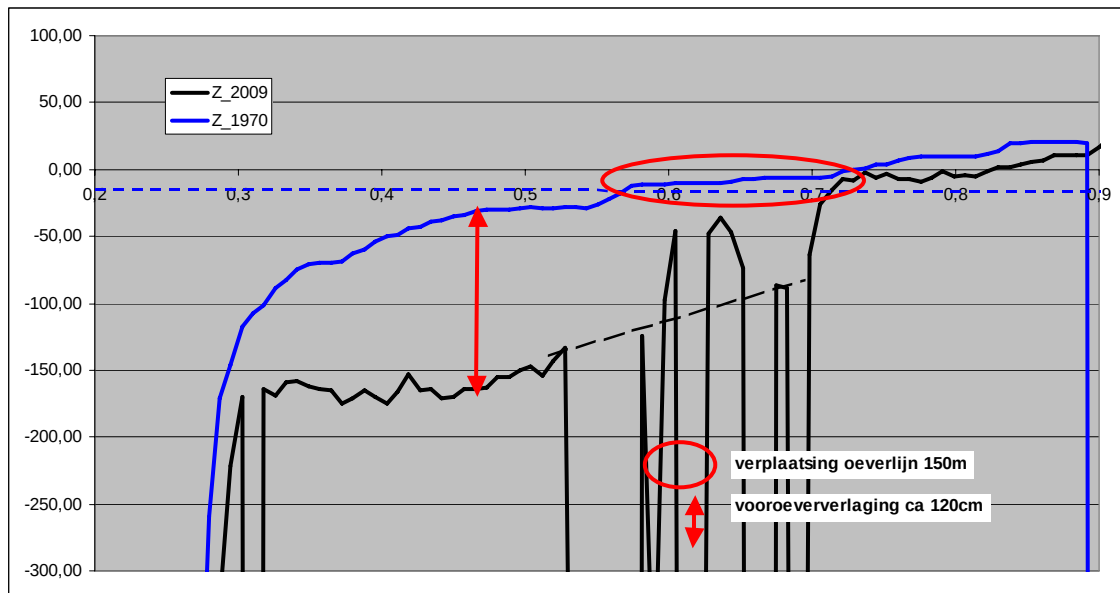
Raai Slikken van Flakkee-noord, midden



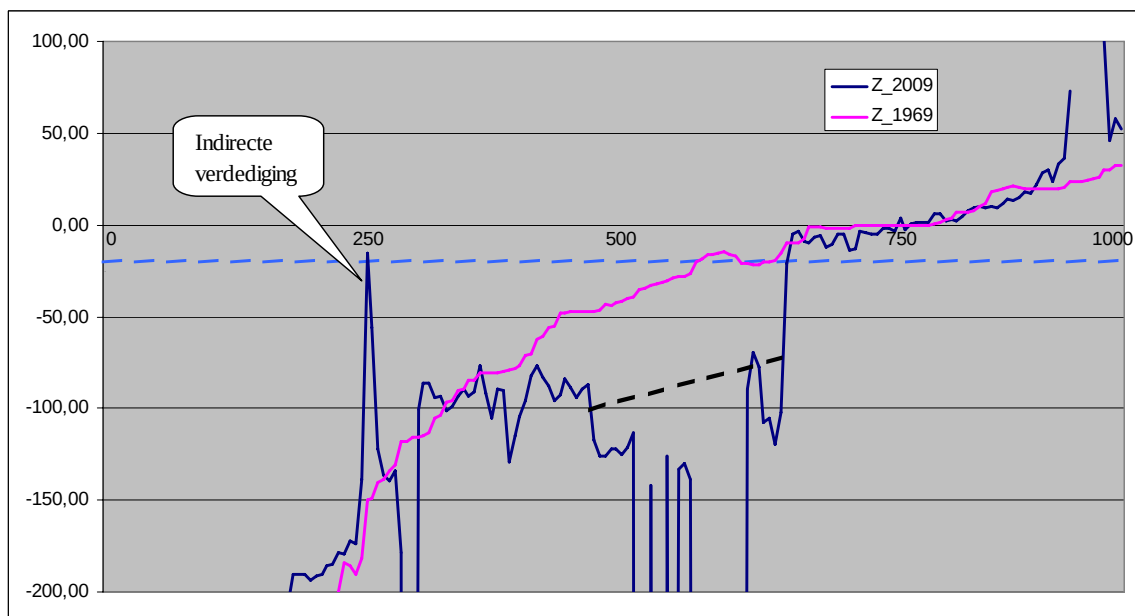
Raai Slikken van Flakkee-midden ("recreatiestrandje")



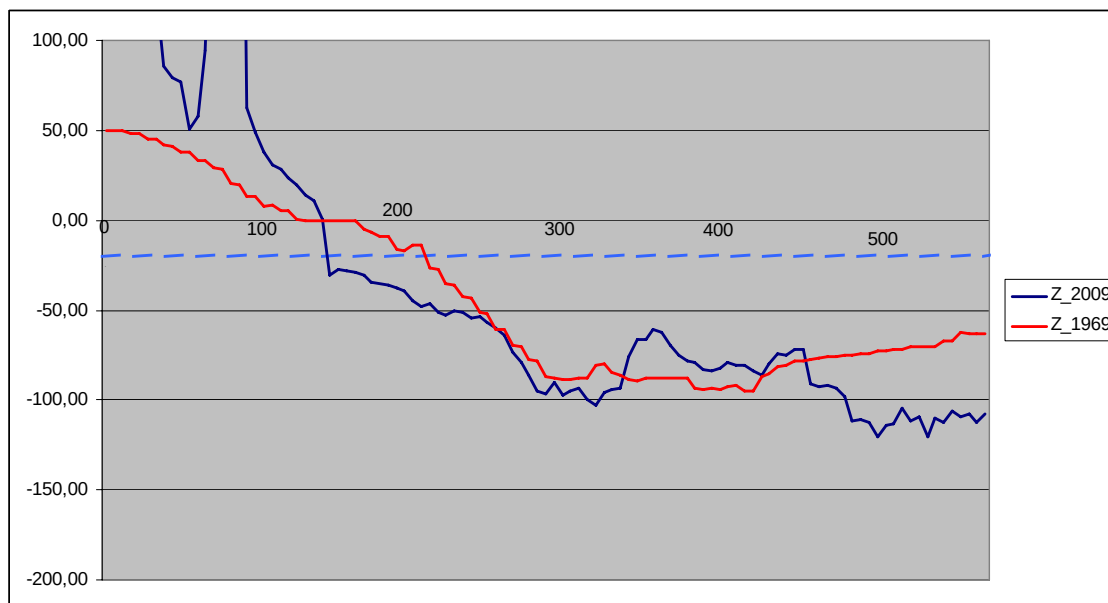
Raai Slikken van Flakkee zuid (ter hoogte van indirecte verdediging)



Raai Hompelvoet-noordoost



Raai Veermansplaat-noord



Raai Veermansplaat-oost

Bijlage 4 Prognose intergetijdegebied voor andere middenpeilsscenario's met een getij

A Arealen

In bijgaande tabel zijn in het bovenste deel de gebruikte hoogtes per scenario weergegeven en in het onderste deel de arealen voor drie belangrijke zones. De arealen zijn gebaseerd op de kaarten uit bijlage 4c; zie ook daar voor de toelichting.

jaar	2010	2050	2100	2010	2050	2100	2010	2050	2100	2010	2050	2100
getij	G5			G50			G70			G100		
middenstand	M-20	M+15	M+50	M-10	M+15	M+50	M-20	M+15	M+50	M-20	M+15	M+50
veg grens +	2	27	72	35	60	95	35	60	95	50	75	120
ghw	-18	18	52	15	40	75	15	50	85	30	65	100
veg grens -	-18	7	52	-5	20	55	-5	20	55	10	35	80
glw	-22	13	48	-35	-10	25	-55	-20	15	-70	-35	0
arealen (km ²)												
overig	17,5	10,2	2,8	12,3	8,8	4,0	12,9	6,8	5,1	8,0	5,6	2,4
zoutvegetatie	4,6	4,3	2,5	9,4	8,2	3,7	8,4	7,5	4,5	11,3	6,7	2,8
kaal slik	0,4	0,3	0,4	3,8	5,5	2,3	6,4	7,7	2,4	13,4	12,7	6,2

Bij G5 is vegetatieondergrens gelijk aan GHW

Bij G50, G70 en G100 is vegetatiegrens GHW + en - 20cm

Stijging middenstand: 2050: +25cm / 2100: +70cm

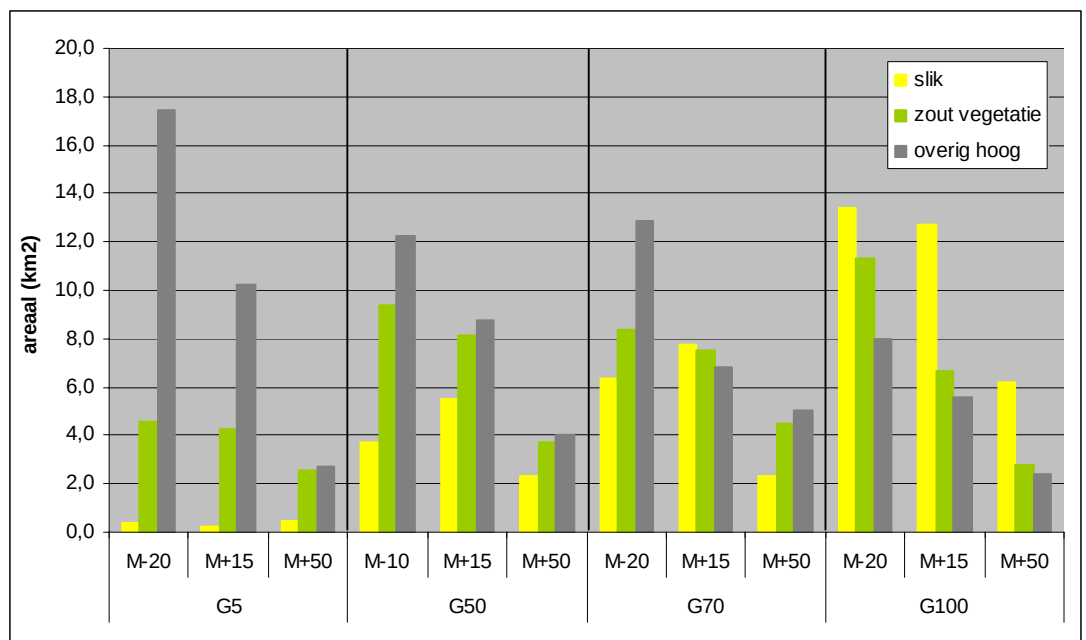
B Figuren

De volgende figuur geeft een indicatie van de arealen kaal slik, vegetatie en hoog gebied bij de verschillende getijvarianten en verschillende middenstanden van het getij.

Het oppervlak kaal slik neemt aanzienlijk toe bij een groter getijverschil, maar bij verhoging van de middenstand neemt dit oppervlak binnen een getijvariant weer af.

De oppervlak zoute vegetatie neemt eveneens toe bij het instellen van een groter getijverschil. Bij verhoging van de middenstand neemt het oppervlak echter sterk af. Deze sterke vermindering van het oppervlak zout vegetatie komt omdat het gebied waarin het kan voorkomen, 'opraakt'. Op de platen en de lagere slikken is er gewoon geen ruimte meer voor. Zie ook de kaarten in bijlage 4c.

Het oppervlak overig hoog (droog) gebied neemt af bij een groter getijverschil. Bij een verhoging van de middenstand neemt dit oppervlak nog sterker af. Deze sterke vermindering van het oppervlak overig hoog gebied komt omdat het gebied waarin het kan voorkomen, 'opraakt'. Op de platen en de lagere slikken is er gewoon geen ruimte meer voor. Zie ook de kaarten in bijlage 4c.

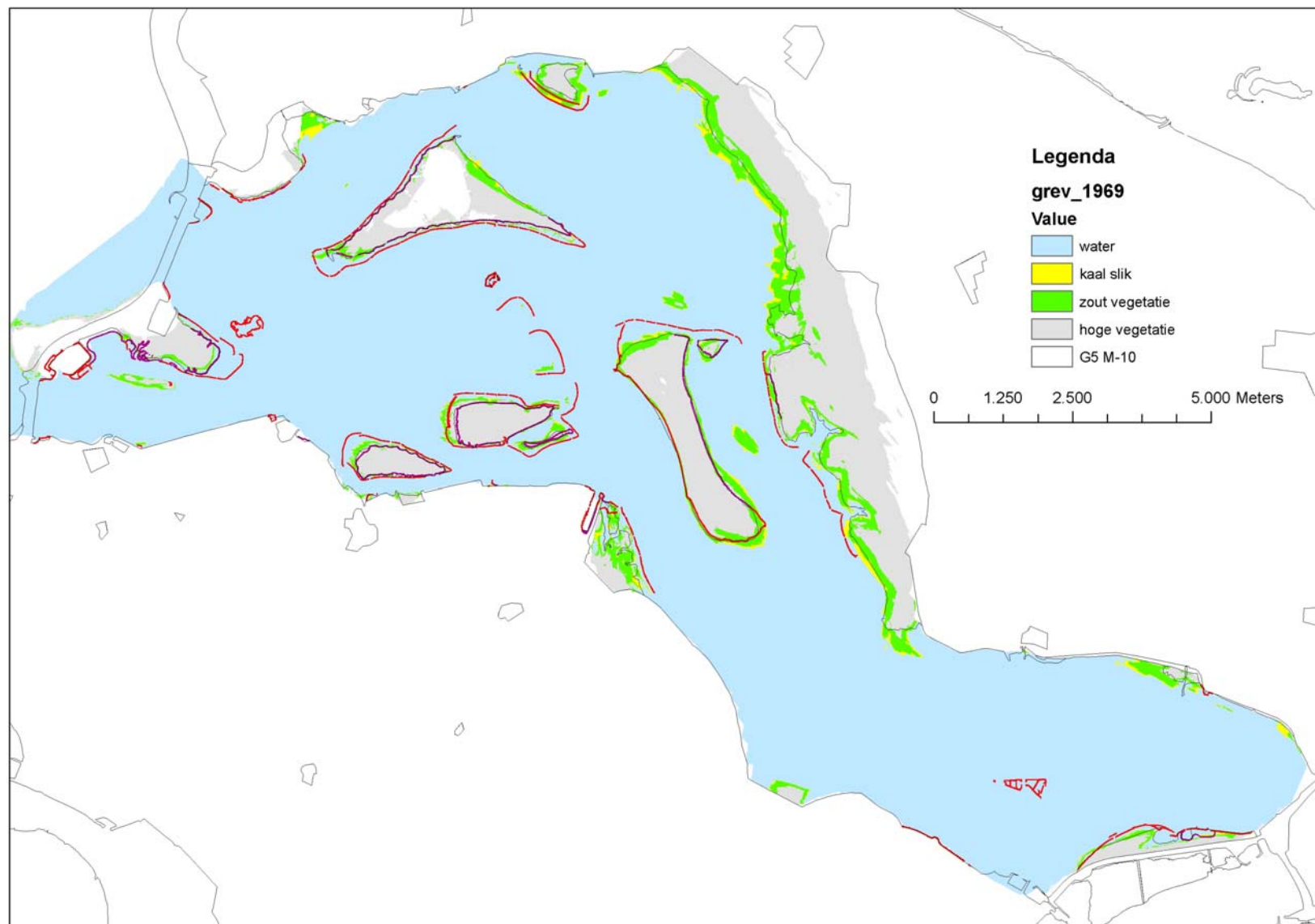


C Kaarten

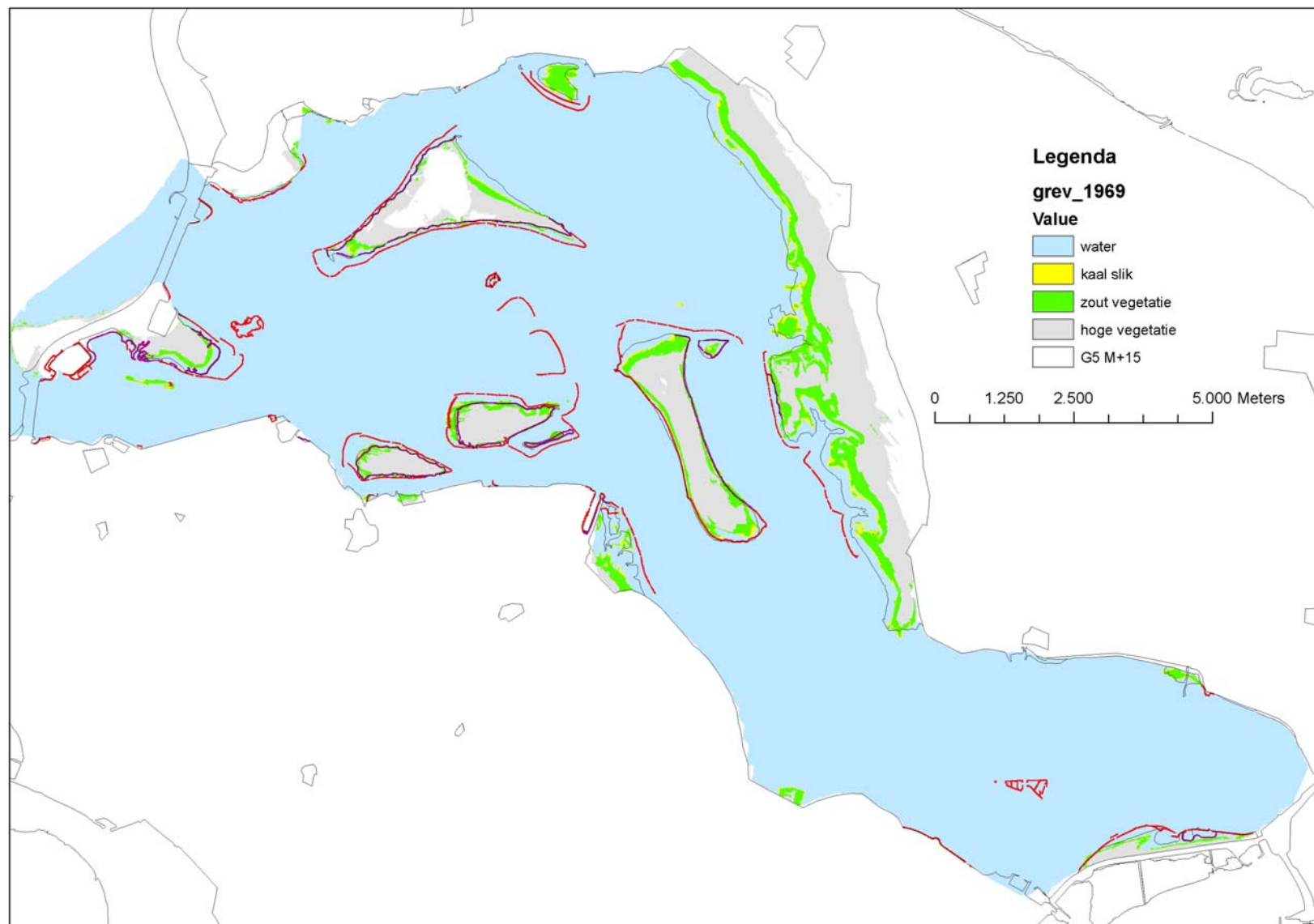
Op de volgende pagina's is voor de verschillende getijscenario's en middenpeilsenario's aangegeven waar de belangrijkste zones ongeveer liggen. Hierbij is gebruik gemaakt van een dieptekaart uit 1969 omdat deze voor het hele vereiste hoogtebereik een gebiedsdekkend beeld geeft. In de periode 1970 – 2010 heeft zich overal erosie van de ondiepe vooroever voorgedaan en is er sprake van terugtrekking van de oeverlijn. Deze zijn niet in deze kaarten verwerkt. Het beeld geeft dus een globale indruk en niet het echte beeld. De oppervlakte zijn daarom gegeven in km² (1 km² = 100ha).

De kale zones op oevers met een directe verdediging zijn niet reëel. Bij de areaalberekeringen (zie tabel hierboven) zijn deze dan ook niet meegenomen. Ook zijn de arealen bij gebieden met hoofdfunctie recreatie (bijvoorbeeld Plaat van Oude Tonge, De Punt en Kabbelaarsbank) niet meegenomen omdat hier de eventuele natuurwaarden ondergeschikt zijn aan het recreatieve gebruik.

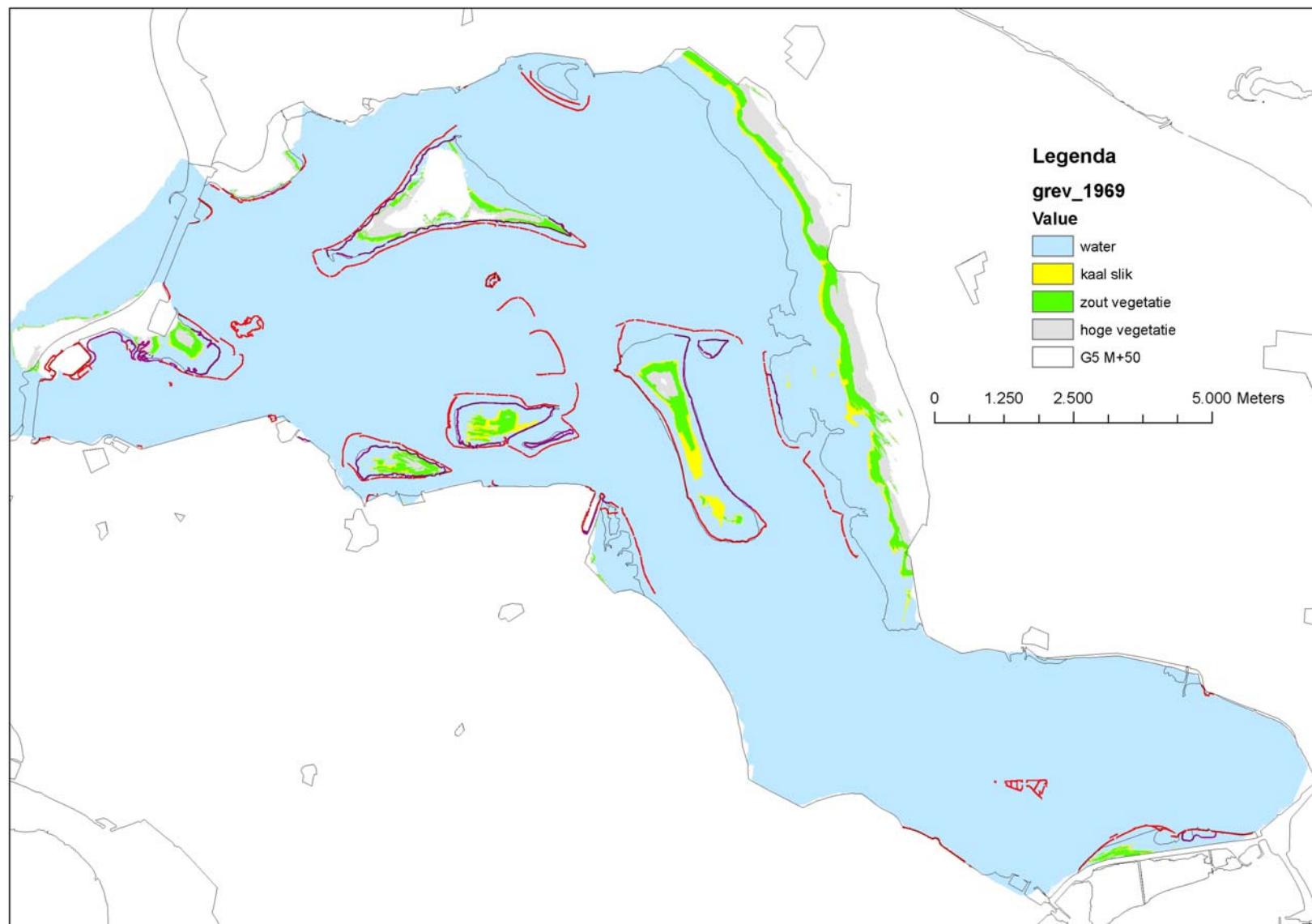
Ligging belangrijke hoogtezones: getijscenario T₅ in 2010, met huidige middenstand op NAP-0,10m



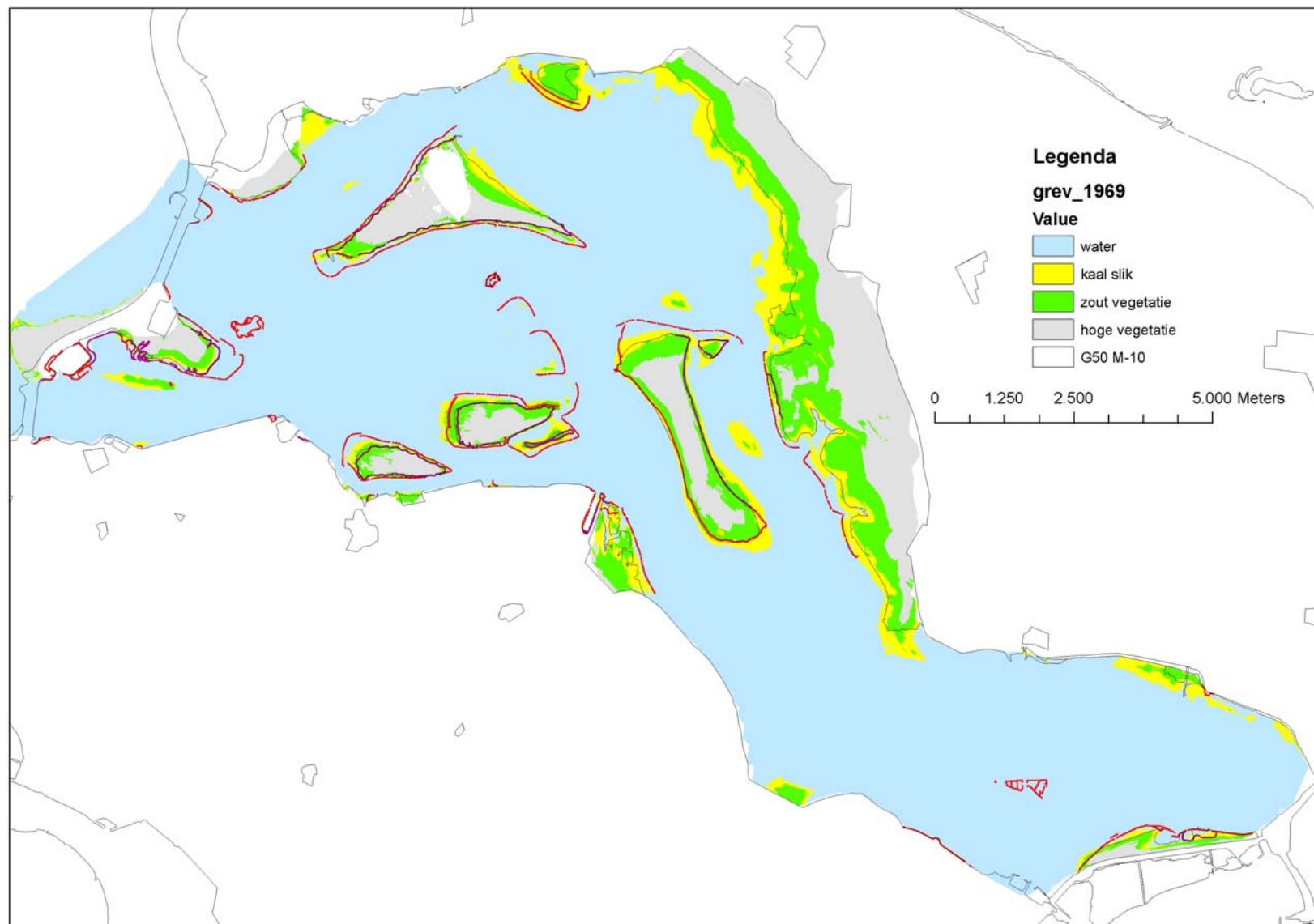
Ligging belangrijke hoogtezones: getijscenario T₅ in 2050, met verhoogde middenstand op NAP+0,15m



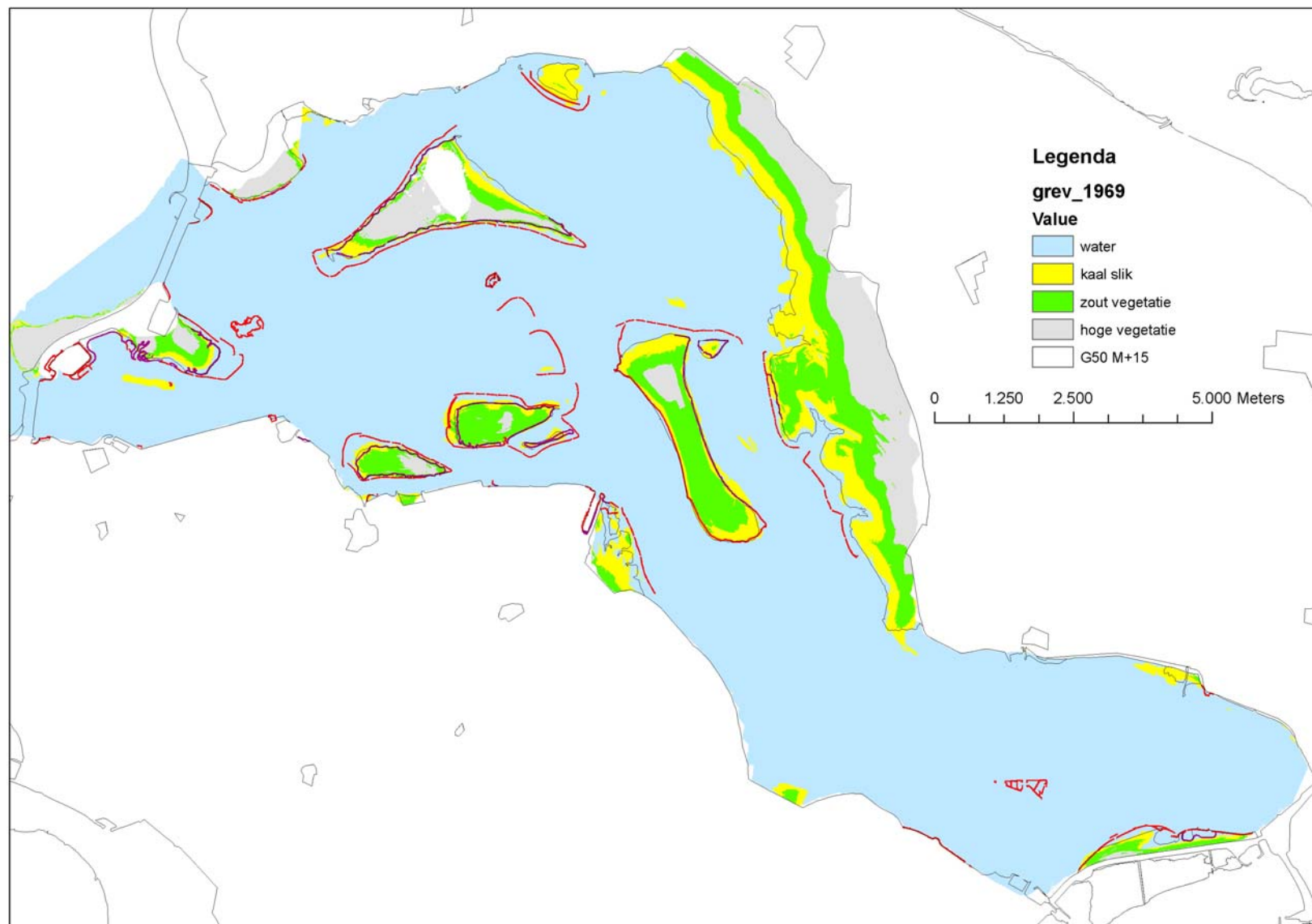
Ligging belangrijke hoogtezones: getijscenario T₅ in 2100, met verhoogde middenstand op NAP+0,5m



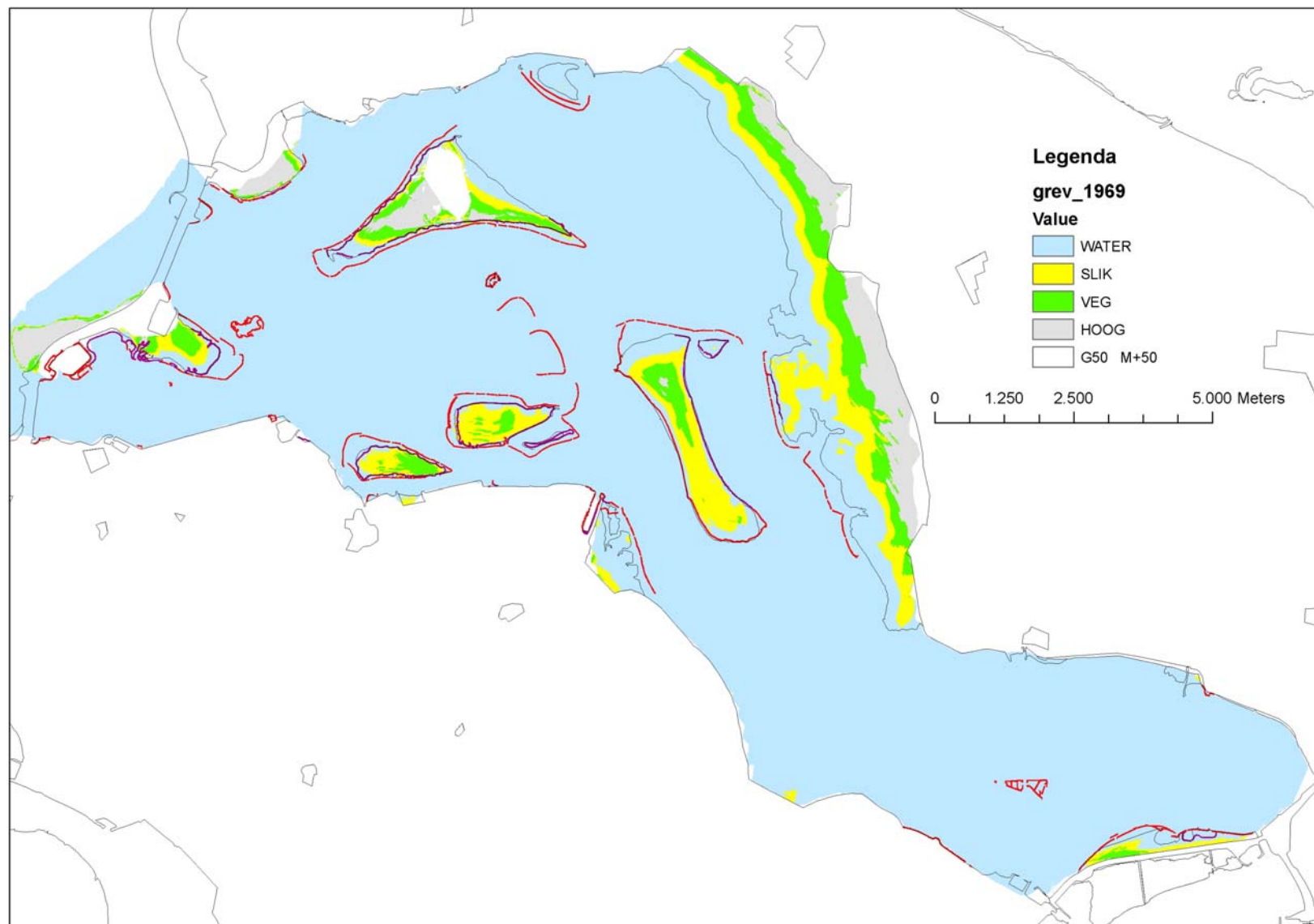
Ligging belangrijke hoogtezones: getijscenario T₅₀ in 2010, met huidige middenstand op NAP-0,10m



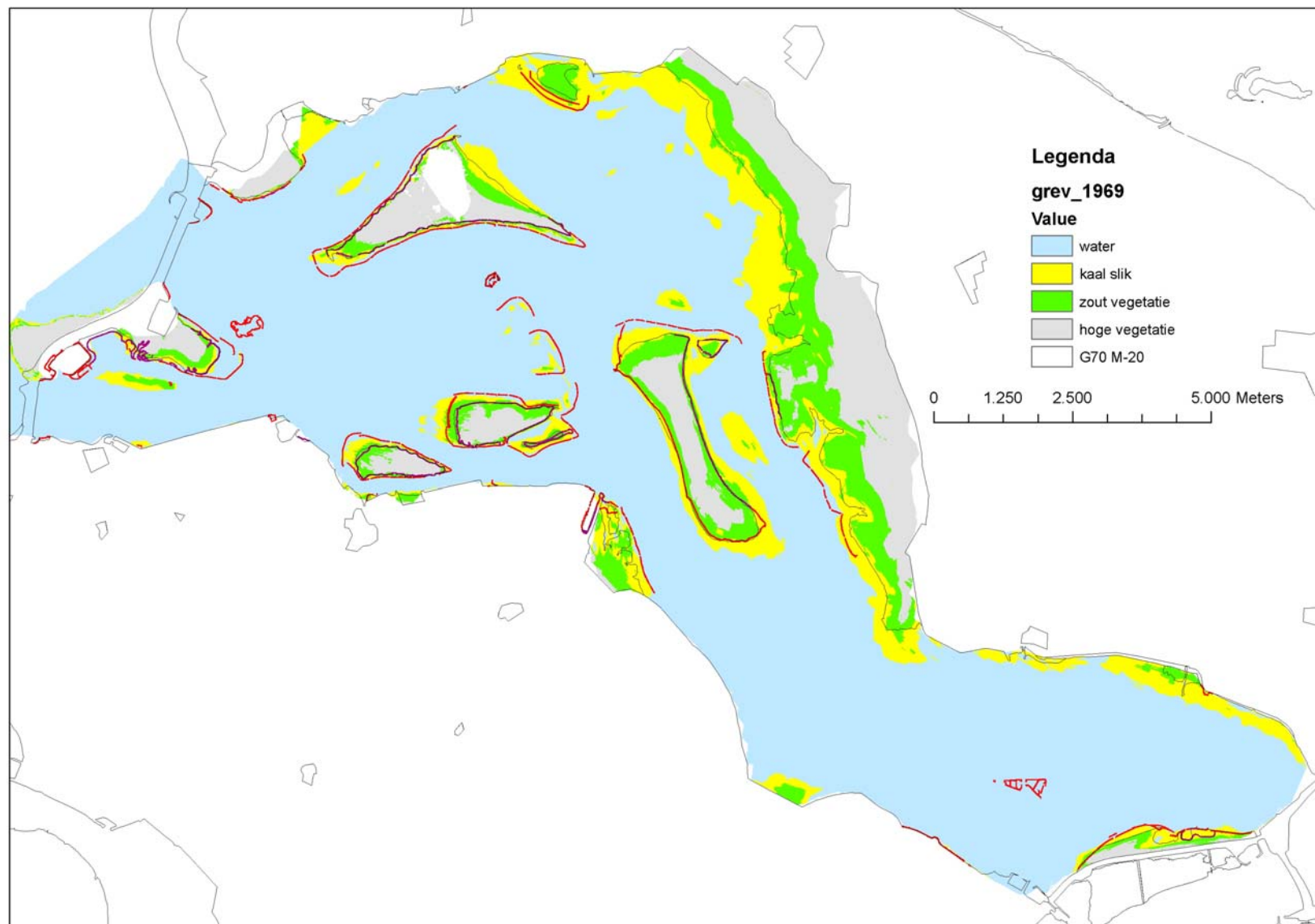
Ligging belangrijke hoogtezones: getijscenario T₅₀ in 2050, met verhoogde middenstand op NAP+0,15m



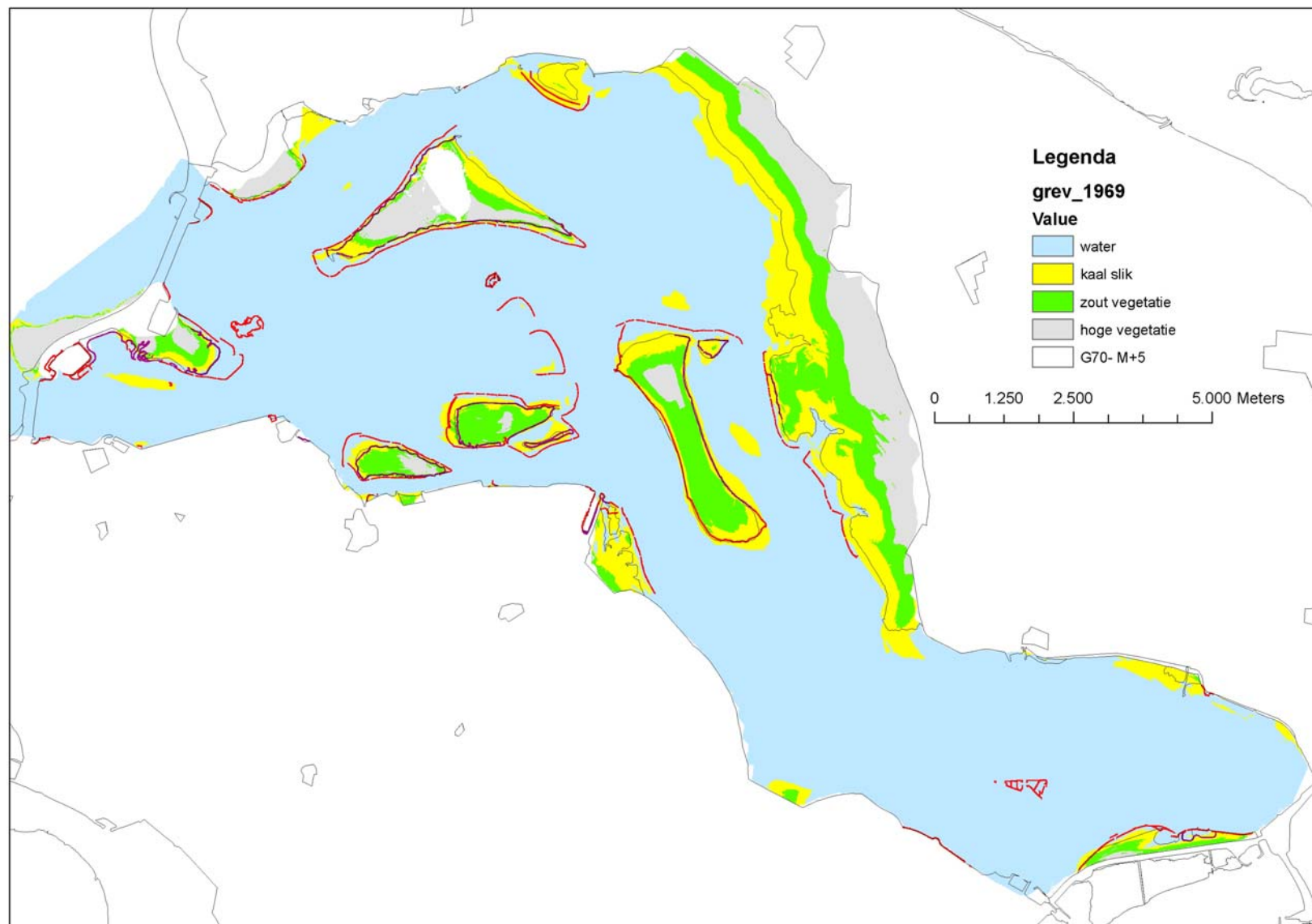
Ligging belangrijke hoogtezones: getijscenario T₅₀ in 2100, met huidige middenstand op NAP-0,20m



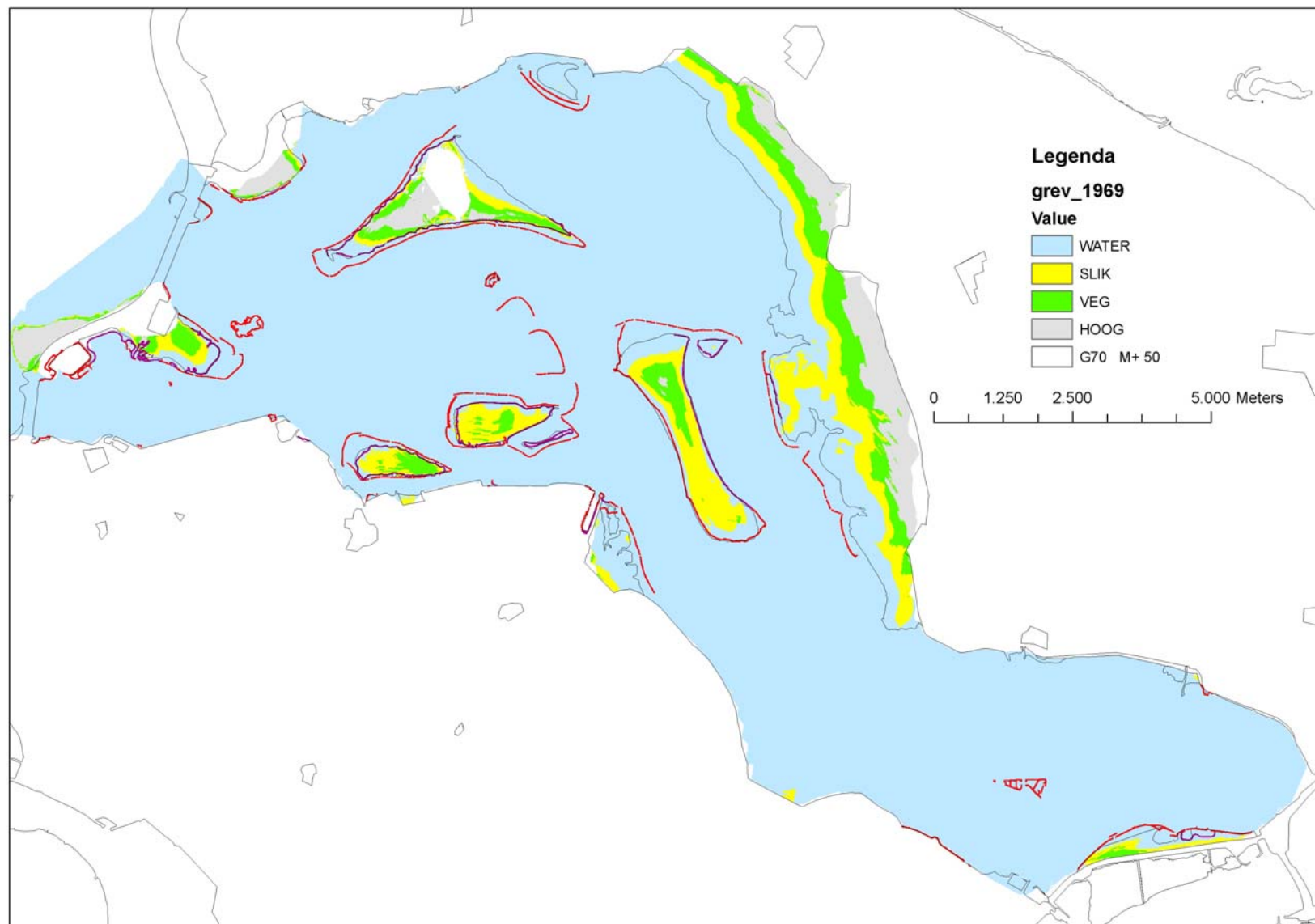
Ligging belangrijke hoogtezones: getijscenario T₇₀ in 2010, met middenstand op NAP-0,20m



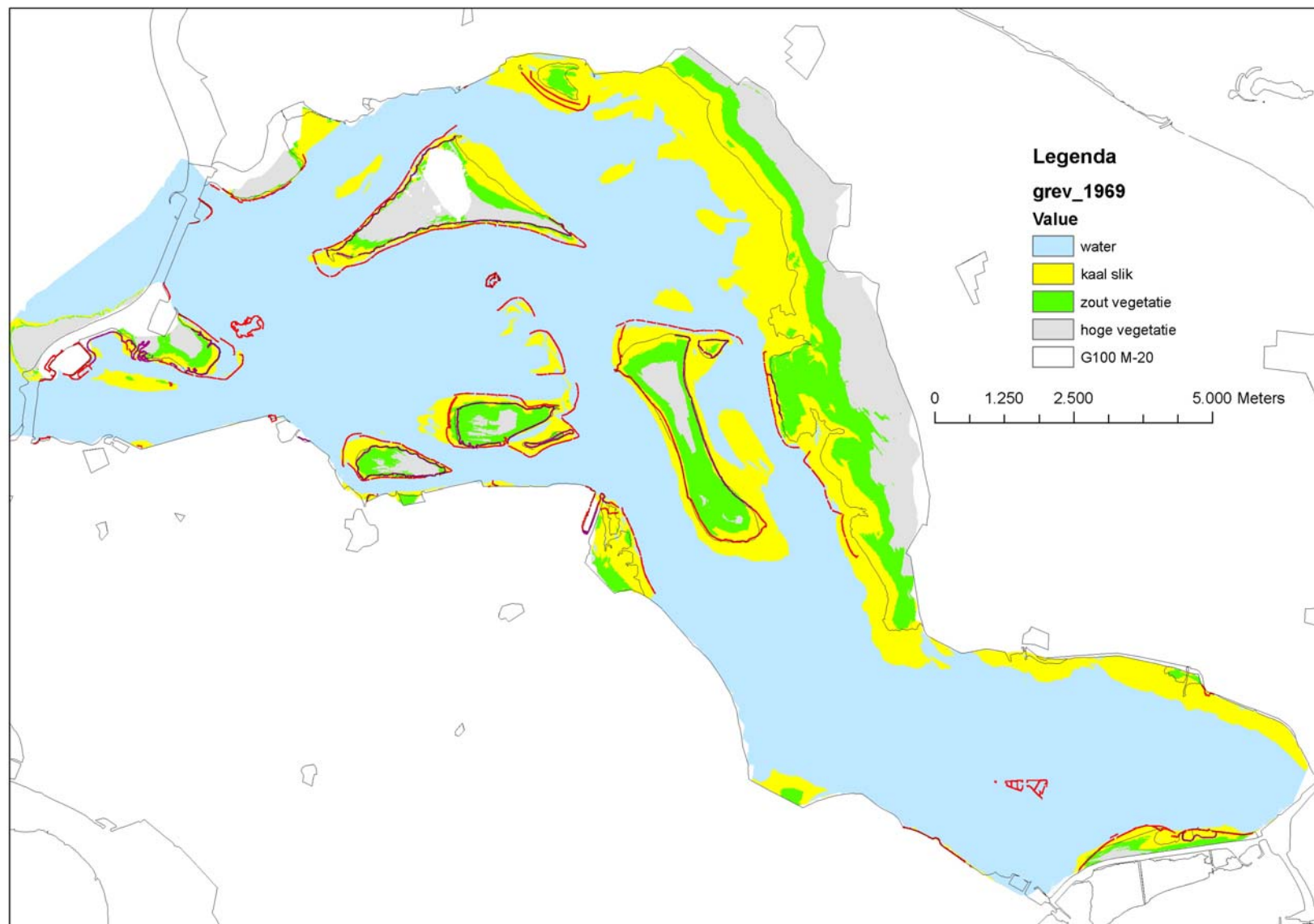
Ligging belangrijke hoogtezones: getijscenario T₇₀ in 2050, met verhoogde middenstand op NAP+0,05m



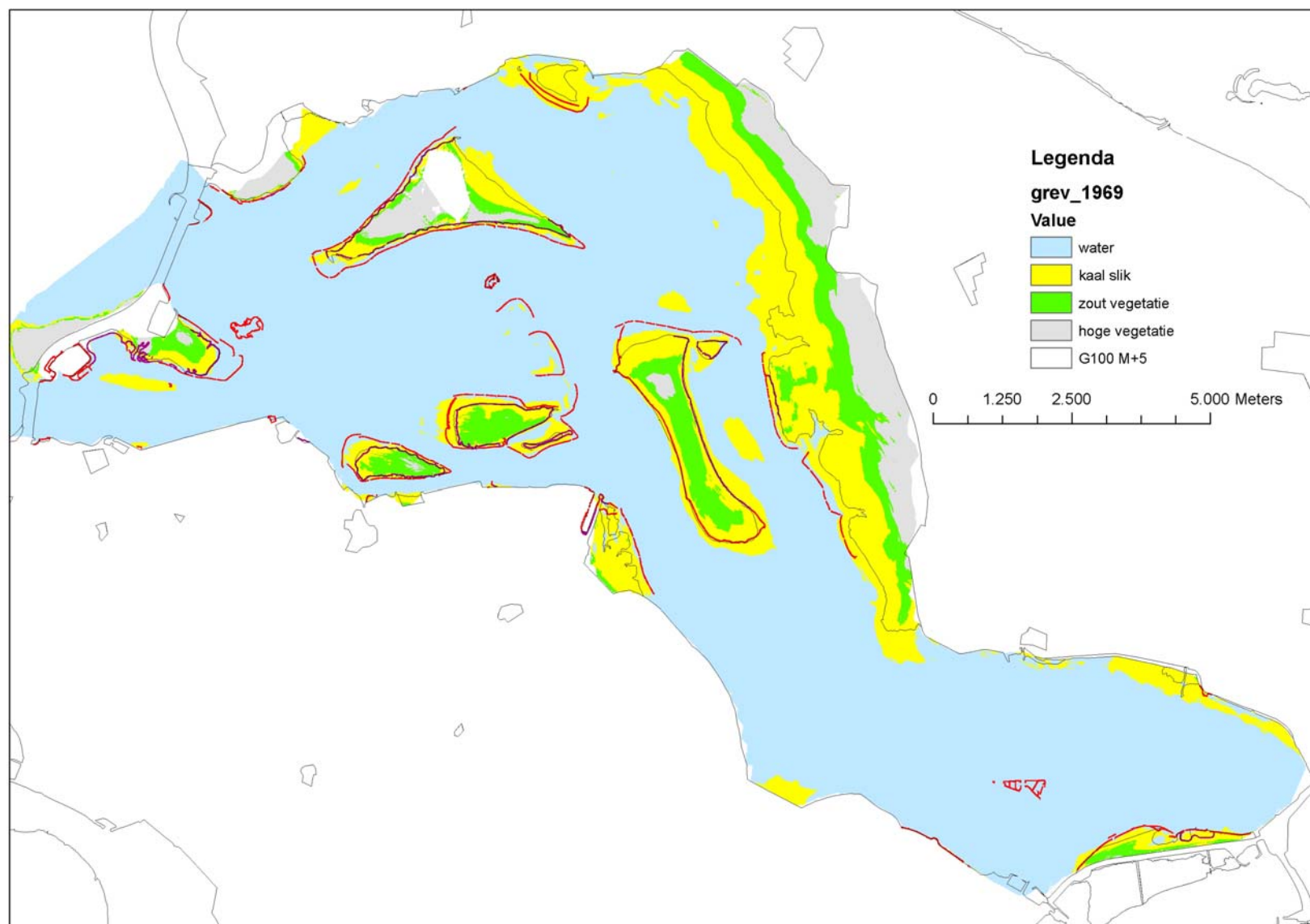
Ligging belangrijke hoogtezones: getijscenario T₇₀ in 2100, met verhoogde middenstand op NAP+0,50m



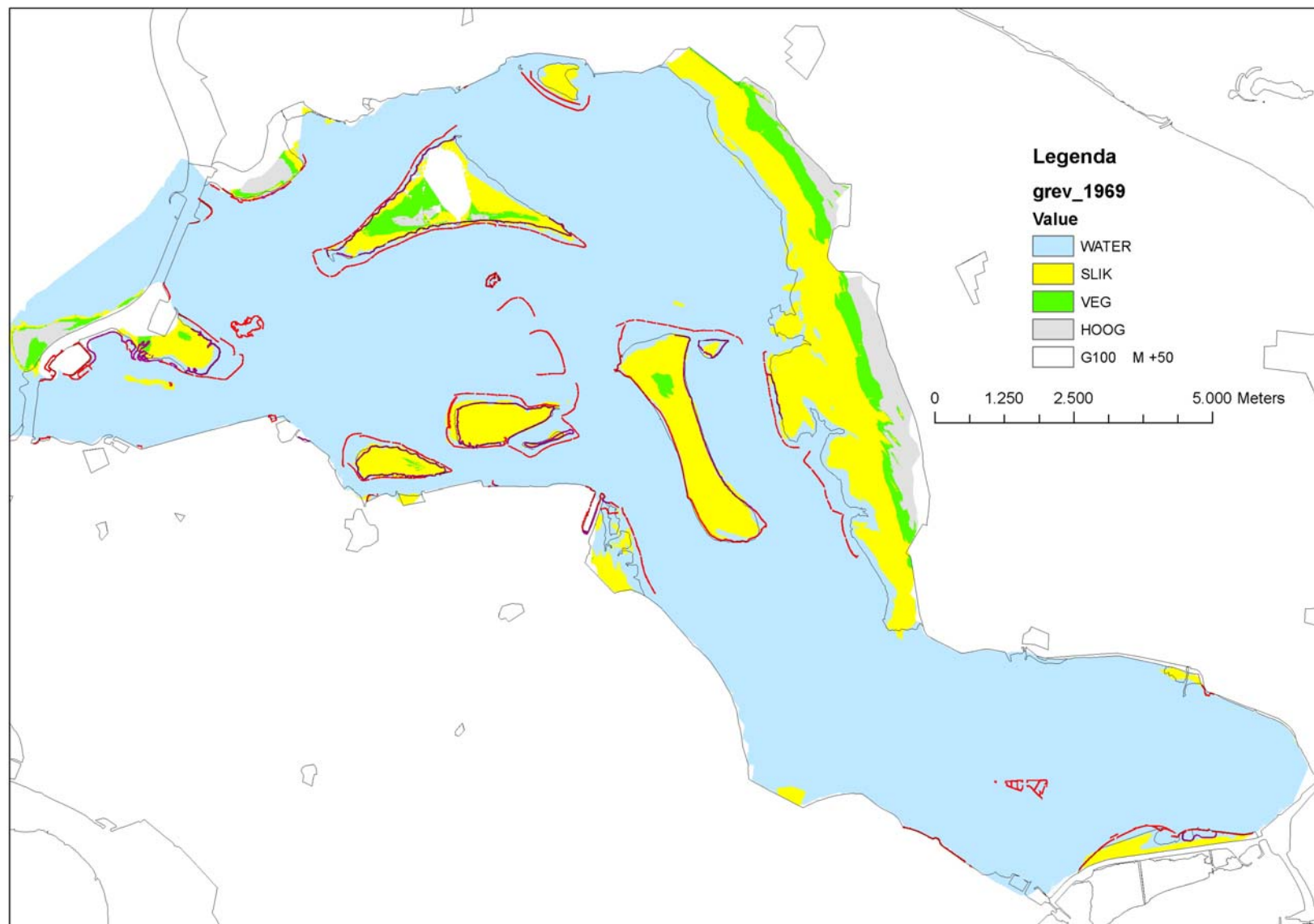
Ligging belangrijke hoogtezones: getijscenario T₁₀₀ in 2010, met middenstand op NAP-0,20m



Ligging belangrijke hoogtezones: getijscenario T_{100} in 2050, met verhoogde middenstand op NAP+0,05m



Ligging belangrijke hoogtezones: getijscenario T₁₀₀ in 2100, met verhoogde middenstand op NAP+0,50m

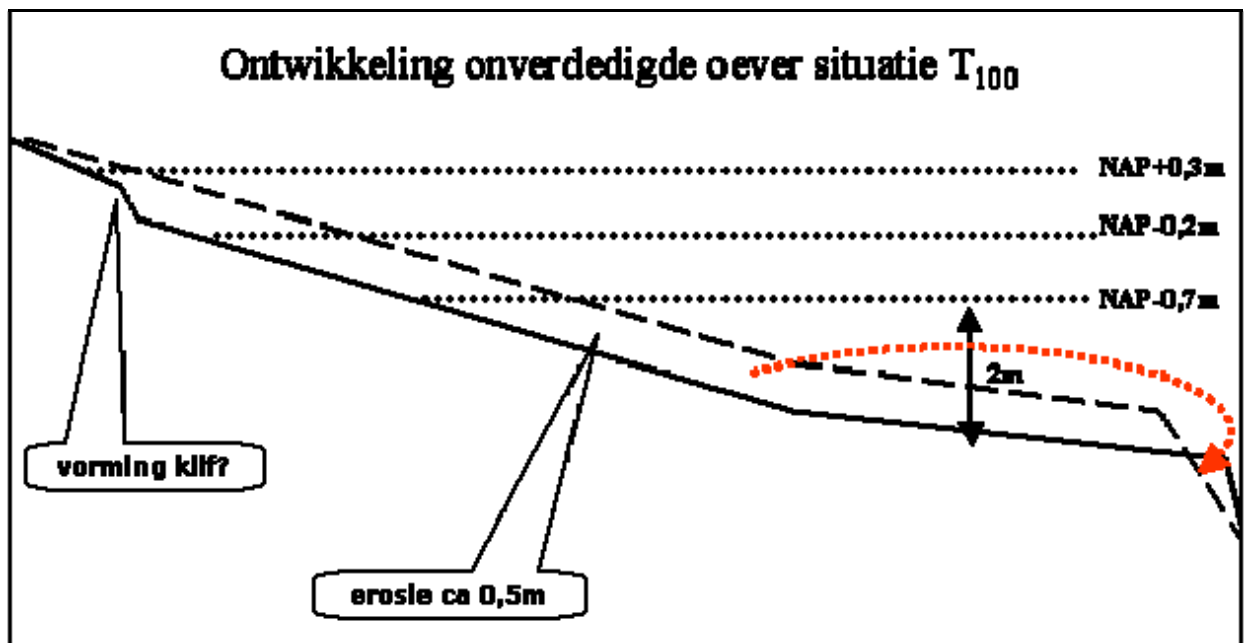
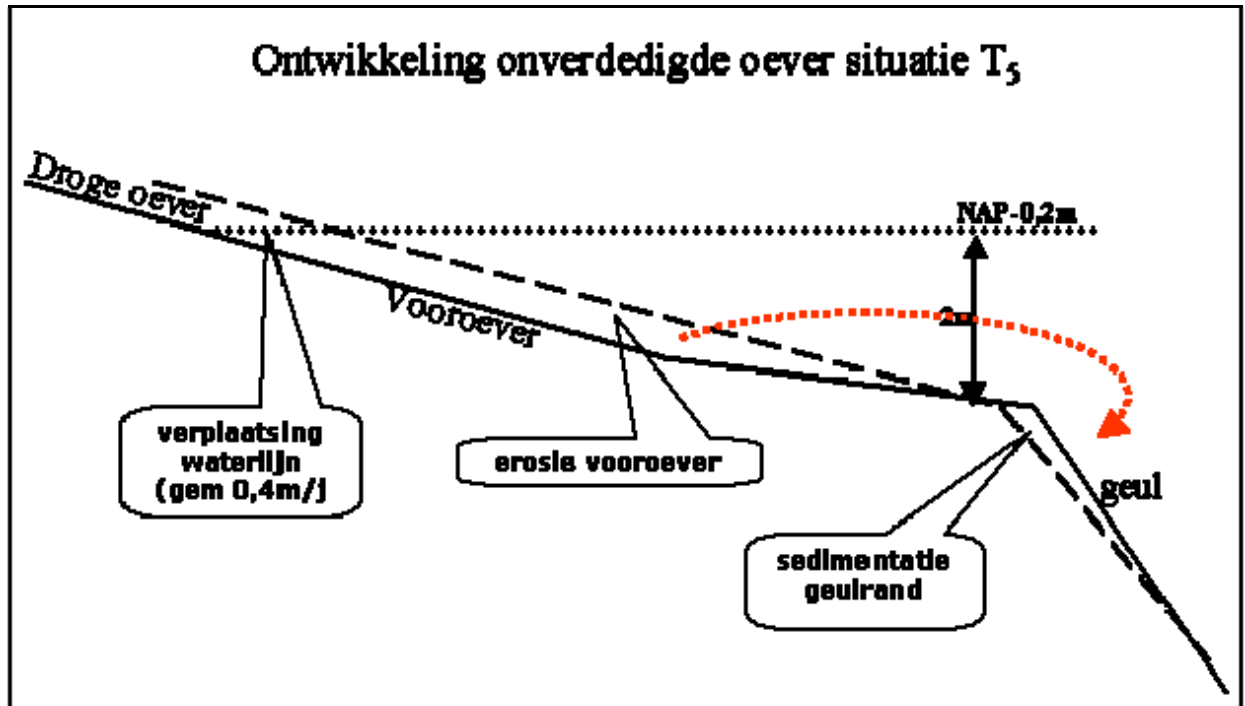


Bijlage 5 Globale morfologische ontwikkeling van de verschillende type oevers

Onverdedigde oever

boven: tot en met heden

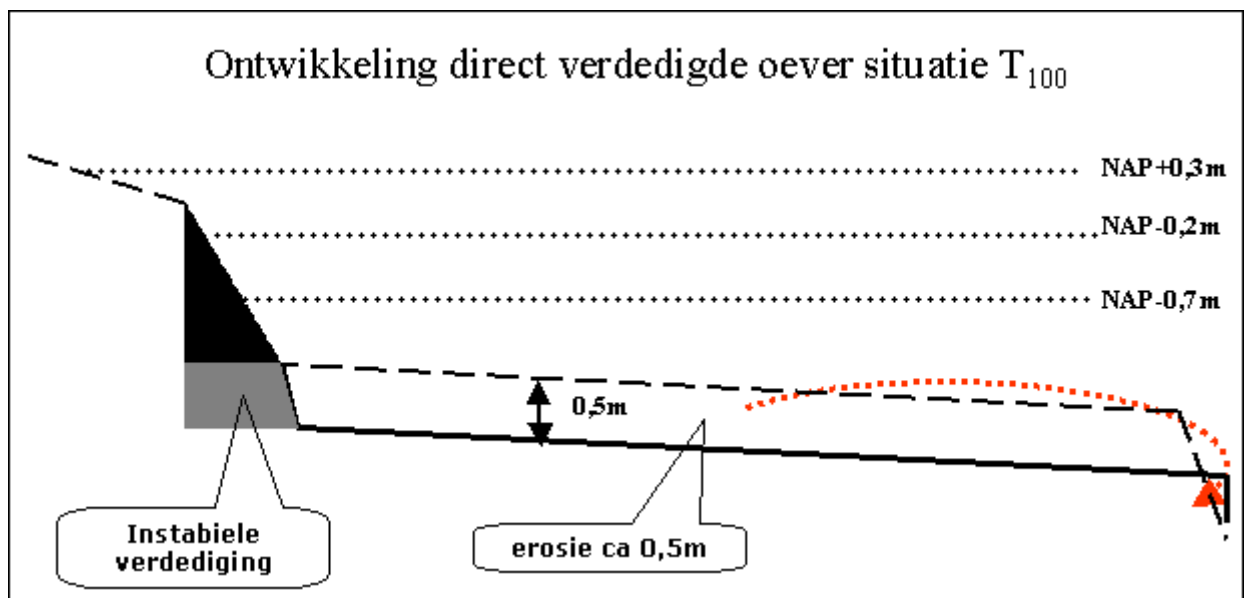
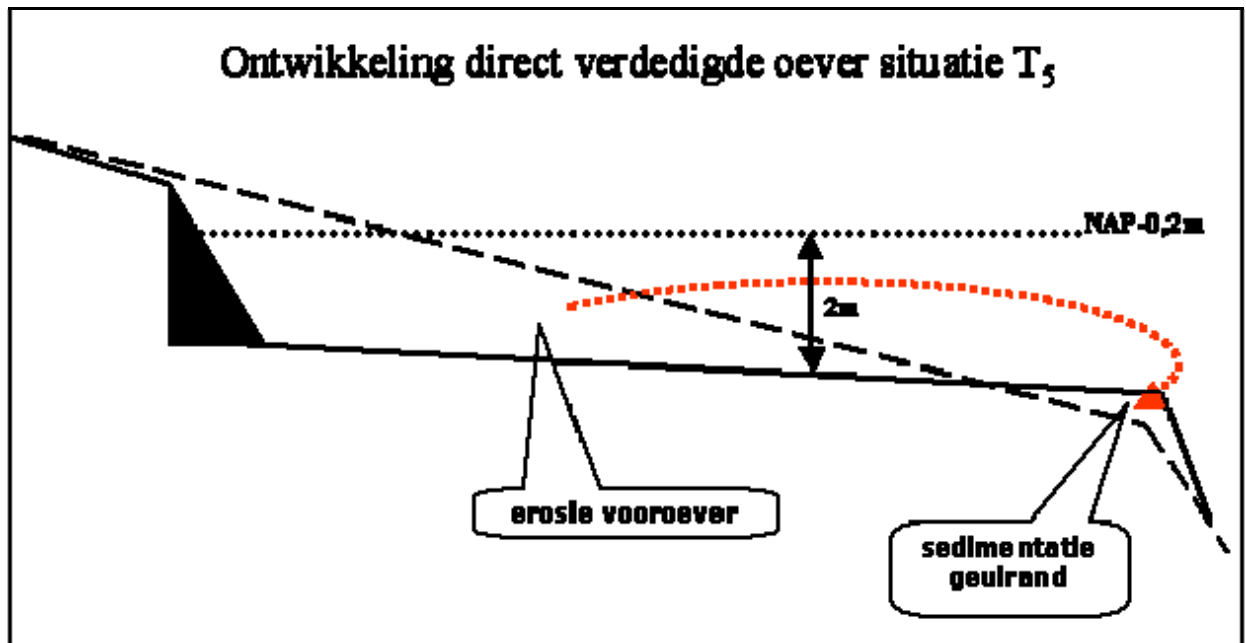
onder: vanaf instellen nieuw getij 100cm



Direct verdedigde oever

boven: tot en met heden

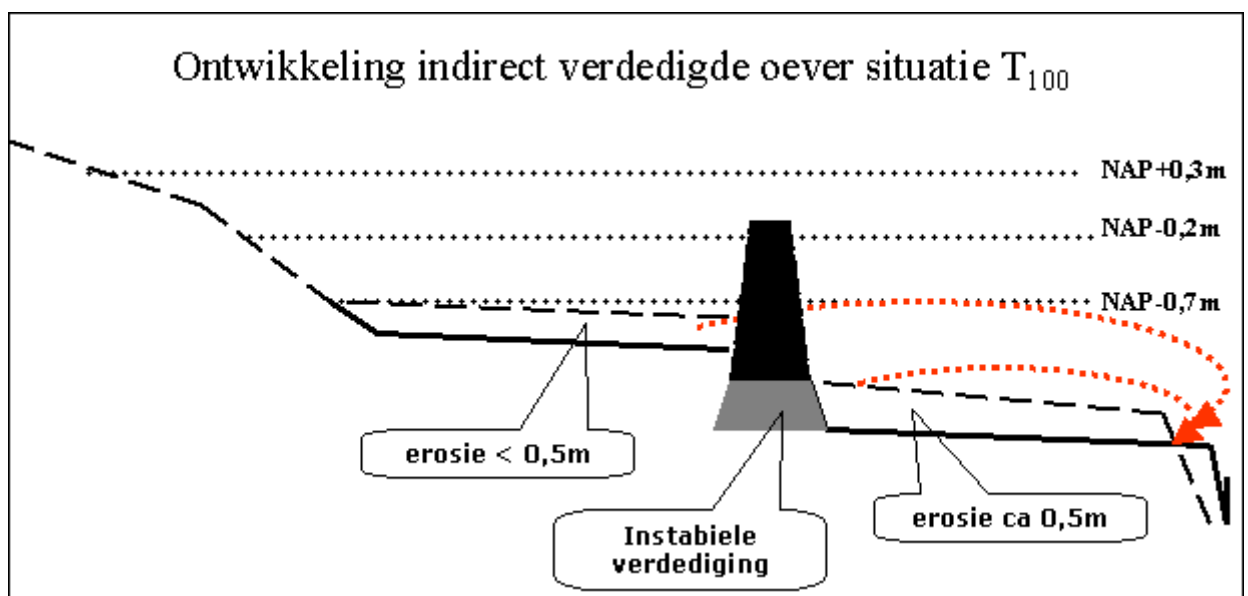
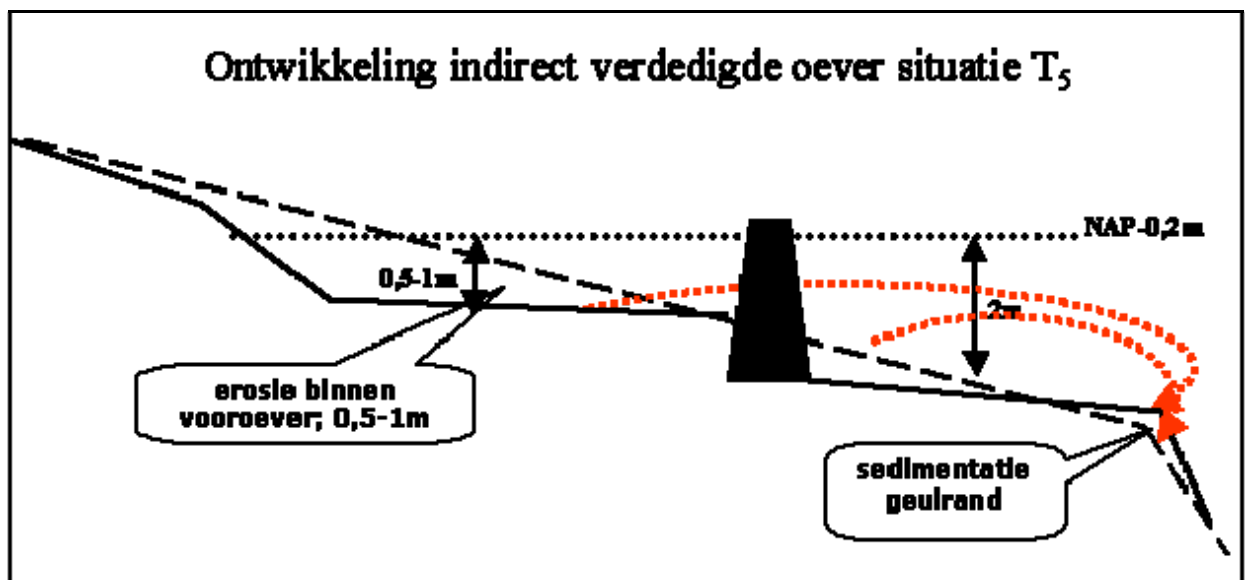
onder: vanaf instellen nieuw getij 100cm



Indirect verdedigde oever

boven: tot en met heden

onder: vanaf instellen nieuw getij 100cm



Gecombineerd verdedigde oever

boven: tot en met heden

onder: vanaf instellen nieuw getij 100cm

