

Meegroeien met zeespiegelstijging

Kennisprogramma Zeespiegelstijging

Deelrapport Werken met natuurlijke
oplossingen bij zeespiegelstijging

Systeembeschrijvingen deelgebieden



Werken met natuurlijke oplossingen bij zeespiegelstijging

Systeembeschrijvingen deelgebieden

Deelrapport

Auteurs:	Bob Smits (Deltares), Alphons van Winden (Bureau Strooming), Jim van Belzen (WMR), Carolien Wegman (HKV), Ton Hoitink (WUR), Bas van Maren (Deltares), Bregje van Weesenbeeck (Deltares)
Controle:	Alex Hekman (Sweco, NL2120)
Datum:	05-02-2025
Versie:	Definitief
In opdracht van	Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat en Staf Deltacommissaris, TKI Deltatechnologie en WNF
Financiering	Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat en Staf Deltacommissaris, TKI Deltatechnologie, WWF-NL, NL2120, Stichting EcoShape, Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur en in kind bijdragen van de partijen in het kernteam.
Kernteam	Sweco, Deltares, HKV, H+N+S, WWF-NL, EcoShape en Jong EcoShape, Wageningen Marine Research/NIOZ, Wageningen University, Bureau Strooming, Witteveen + Bos, Royal HaskoningDHV, Boskalis, Van Oord, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Staf Deltacommissaris en Rijkswaterstaat.

Colofon:

Dit rapport is gebaseerd op onderliggende rapportages. We verwijzen hier naar deze onderliggende rapportages voor nadere onderbouwing van getallen en referenties.



Verantwoording

Dit deelrapport beschrijft het resultaat van een onderdeel van de uitwerking van de denkrichting Meegroeien van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. De verkenning is een gezamenlijk initiatief van de Staf Deltacommissaris, het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, de Topsector Water & Maritiem en NL2120. De denkrichting is een aanvulling op de denkrichtingen Beschermen (open/gesloten), Meebewegen en Zeewaarts die staan beschreven in het rapport 'Ruimte voor zeespiegelstijging, Een verkenning van denkrichtingen om Nederland ook op lange termijn veilig en leefbaar te houden bij zeespiegelstijging'.

De resultaten van deze verkenning zijn tot stand gekomen in vijf georganiseerde hackathons en door studies, berekeningen en uitwerkingen op basis van bestaande kennis en expert judgement door het kernteam. In totaal is een (ontwerp)proces van ca. negen maanden doorlopen. Er is in dit proces dankbaar gebruik gemaakt van bestaande uitwerkingen en plannen die de afgelopen jaren zijn ontwikkeld. Gedurende de hackathons hebben experts met verschillende thematische achtergronden meegedacht over oplossingsrichtingen. De resultaten van de hackathons zijn door het kernteam verder uitgewerkt en op verschillende aspecten gebundeld in deelrapporten.

Het hoofdrapport is vervolgens op basis van de deelrapporten geschreven. Resultaten in dit deelrapport kunnen afwijken van conclusies in het hoofdrapport als gevolg van gemaakte keuzes en relaties met andere onderwerpen. Het resultaat van het project kan als startpunt dienen voor vervolgonderzoek binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging.

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	3
1 Systeembeschrijvingen deelgebieden	4
1.1 Introductie	4
2 De ontstaansgeschiedenis van de Nederlandse Kustzone	5
2.1 Fase van de opbouw (5.000 v. Chr. tot begin jaartelling)	5
2.2 Fase van de afbraak (begin jaartelling tot begin 19 ^e eeuw)	6
2.3 De mens als sturende factor (de laatste 200 jaar)	6
3 Systeembeschrijvingen	7
3.1 Kustzone	7
3.2 Zuidwestelijke Delta	15
3.3 Rijn-Maasmonding	21
3.4 Bovenrivieren	27
3.5 Waddengebied	32
3.6 IJsselmeer	38
4 Referenties	44

1 Systeembeschrijvingen deelgebieden

1.1 Introductie

Om een goed beeld te krijgen van de knelpunten voor gezond functioneren van de ecosystemen in de kustzone en van de belangrijkste processen die daarbij een rol spelen is van elk deelgebied een systeembeschrijving gemaakt. Een dergelijke analyse van het systeem helpt bij het identificeren van de onderliggende processen en interacties die de dynamiek en gezondheid van deze ecosystemen bepalen (Van Wesenbeeck et al. 2021). Een systeemanalyse biedt een gedetailleerd beeld van de complexe interacties tussen biotische en abiotische factoren. Dit inzicht is essentieel voor het voorspellen van de reacties van het systeem op natuurlijke en menselijke invloeden. Daarnaast kunnen door de belangrijkste drijvende krachten en kwetsbaarheden van een ecosysteem te identificeren, gerichte maatregelen worden geïdentificeerd die de veerkracht en duurzaamheid van het systeem bevorderen. Tot slot vormt een systeemanalyse de basis voor het ontwerpen van interventies die in harmonie zijn met natuurlijke processen, wat de kans op succes vergroot.

Het gezond functioneren van een kustsysteem wordt beïnvloed door verschillende sleutelfactoren. Getijdynamiek speelt een cruciale rol door het reguleren van de waterbeweging en sedimenttransport, wat essentieel is voor de vorming en instandhouding van kustlandschappen. Wind- en golfdynamiek dragen bij aan de erosie en afzetting van sedimenten, wat de kustlijn voortdurend verandert en helpt bij het vormen van natuurlijke barrières zoals duinen. Rivierdynamiek zorgt voor de aanvoer van zoet water en sediment naar de kust, wat bijdraagt aan de vorming van kustecosystemen en delta's. Zoet-zoutinvloeden zijn belangrijk voor de biodiversiteit, omdat ze een overgangszone creëren waar zowel zoet- als zoutwaterorganismen kunnen gedijen. Ten slotte speelt morfodynamiek een rol in de vorming en evolutie van kustlandschappen door de interactie tussen fysische processen en de morfologie van de kust. Deze componenten worden daarom per deelgebied uitvoeriger belicht.

2 De ontstaansgeschiedenis van de Nederlandse Kustzone

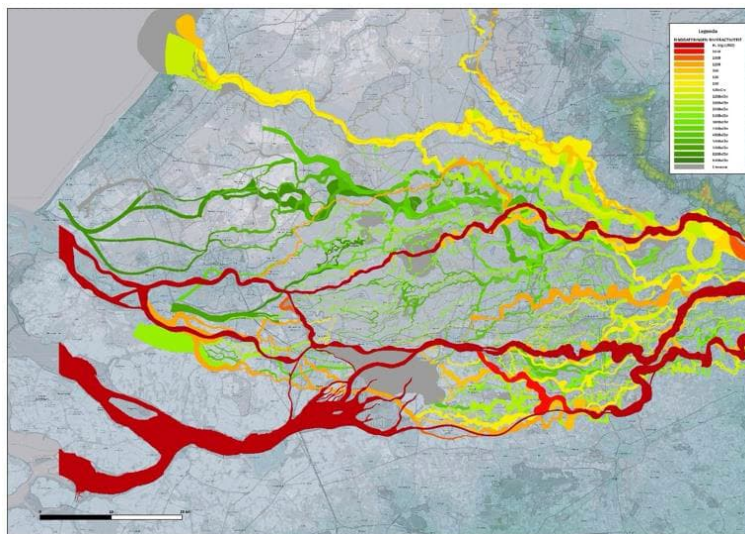
2.1 Fase van de opbouw (5.000 v. Chr. tot begin jaartelling)

De ontstaansgeschiedenis van de Nederlandse kustzone wordt gedomineerd door relatieve zeespiegelstijging (ZSS) tijdens het Holoceen. Vanaf 9.700 v. Chr. steeg de zeespiegel door temperatuurstijging en bodemdaling, waardoor het Noordzeebekken rond 5.000 v. Chr. de huidige kustlijn bereikte. De ZSS vertraagde daarna, en sedimentaanvoer uit zee hield gelijke tred. Rond 3.500 v. Chr. vormde zich een brede strandwal ter hoogte van de huidige kustlijn, opgebouwd uit zand dat door golftransport vanuit de Noordzee werd aangevoerd. Langs de Vlaamse, Zeeuwse en Hollandse kust ontstond een concave strandwal, verbonden met de stenige kust van Noord-Frankrijk en de morene-afzettingen van Texel. De kustlijn bleef in dynamisch evenwicht door zeespiegelstijging en zandaanvoer. Bij versnelling van de stijging of zandtekort trok de kustlijn terug; bij trage stijging of veel zand breidde de kustlijn zich zeewaarts uit.

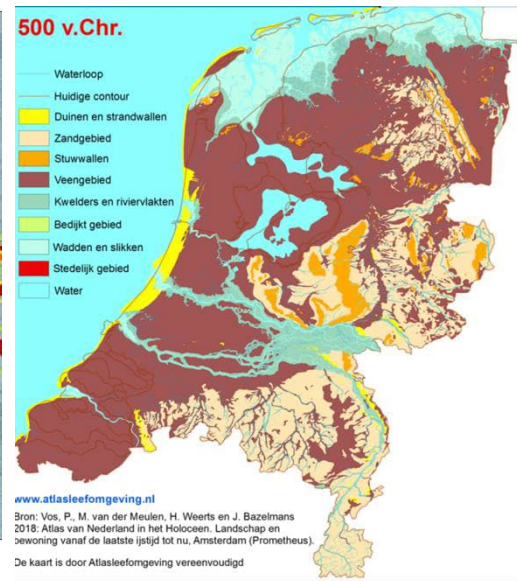
Aanvankelijk waren er openingen in de kustlijn waarlangs sedimentrijk zeewater de binnensee (haf) binnenkwam, wat slik- en zandplaten vormde. Rond 3.000 v. Chr. begon laagveenvorming, die 3.000-4.000 jaar aanhield en overging in hoogveen. De West-Nederlandse strandwal sloot zich op vier openingen na, waar rivieren in zee uitmondde. De strandwal stabiliseerde en raakte begroeid, waardoor hoge duinsystemen ontstonden. In het noorden bleef de kustlijn open door grotere bodemdaling en minder sedimentaanvoer. Dit leidde tot een doorbraak naar de lagune achter de westelijke strandwal, waardoor het Flevomeer met de Waddenzee werd verbonden en de afwatering van Centraal Nederland naar het noorden veranderde.

De zee was de belangrijkste factor in deze ontwikkelingen, terwijl rivieren een secundaire rol speelden. Het aanbod van sediment vanuit de rivieren was veel geringer dan dat vanuit de zee (verhouding 1:10) en in de fase dat er een binnensee achter de strandwal was ontstaan bezonk het riviersediment daar in een relatief klein gebied. Voor zover het klei betrof, mengde het zich in de omgeving van de riviermonden met het mariene sediment, terwijl het zandige riviersediment langgerekte stroomgordels vormde die zich gaandeweg van oost naar west over de lagune uitbreidden (zie Figuur 2.1). Pas in de fase dat de lagune geheel opgevuld was, vanaf ca. 1.500 v. Chr., liepen de riviergordels door tot aan de kustlijn en bereikte het riviersediment ook de Noordzeekust. Een bijzonder moment in de ontwikkeling van de rivieren was de doorbraak van de IJssel vanuit de Rijn rond het jaar 1.000 n. Chr. ter hoogte van Doesburg, waarbij zich een nieuwe loop vormde door een voormalig gletsjerdal en een deel van het rivierwater voortaan via het Flevomeer naar de Waddenzee kon stromen.

Het ontstane patroon van een strandwal met duinen, met daarachter een brede lagune waarin mariene sedimenten zijn afgezet, deels opgevuld met veen en deels open water gebleven, met daardoorheen een stelsel van stroomgordels waarlangs het rivierwater zich naar zee verplaatst (Figuur 2.2), karakteriseert tot op de dag van vandaag het grondplan van de Nederlandse kustzone.



Figuur 2.1 Ouderdom van de Holocene Stroomgordels in de Rijn-Maas delta (Bron: Digitaal Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas Delta. Cohen et al., 2012).



Figuur 2.2 In de Periode vanaf 2.000 v. Chr. sloot de West-Nederlandse kustlijn zich geheel op de 4 riviermonden na waar Schelde, Maas, Rijn en IJ in uitmondten. Deze heelheid zou rond 100 n. Chr. worden opgebroken door nieuwe inbraken vanuit de zee.

2.2 Fase van de afbraak (begin jaartelling tot begin 19^e eeuw)

Vanaf het begin van de jaartelling breidde de zee zich in ZW-Nederland weer uit achter de zandige kustboog. Dit werd mogelijk geholpen door veenontginning voor landbouw en brandstof, waardoor het land inklinkte en binnen het bereik van het getij kwam. Getijstromen braken de veenlaag af, waardoor een binnenzee ontstond waar marien sediment platen en gorzen vormde. De zee drong steeds verder naar het oosten door, tot tegen de Brabantse Wal, en rond 1400 was al het veen in de ZW-delta verdwenen.

De Elizabethvloed in 1421 zorgde voor een doorbraak naar de lagune achter de westelijke strandwal, waardoor het Flevomeer met de Waddenzee werd verbonden. Dit veranderde de afwatering van Centraal Nederland naar het noorden. De veranderde waterbeweging leidde tot verzanding van de Maasmond en vorming van een grote binnenzee. Het sediment uit rivieren en getijdengeulen versnelde de opbouw van platen en gorzen, vooral langs het Hollands Diep en Haringvliet, wat leidde tot snelle opwassen van de Hoekse Waard en Overflakkee.

2.3 De mens als sturende factor (de laatste 200 jaar)

Na de Elizabethvloed kreeg de mens een steeds dominantere invloed op het kuststelsel. Door economische voorspoed ontstond behoefte aan landbouwgrond, wat leidde tot inpoldering van land achter de strandwal, vooral in de ZW-delta waar veel sediment in beweging was. Langs de noordelijke kustlijn verliep landaanwinning langzamer door minder sedimentaanbod.

Technische innovaties maakten het mogelijk om ondergelopen land droog te malen en veengebieden, veranderd in waterplassen door turfwinning, om te zetten in landbouwgrond. Dit leidde tot verzanding van kreken en verlies van verbinding met buitenwater. Het watersysteem werd aangepast aan de tijd, met baggerwerk om rivieren op diepte te houden.

Industrialisatie en mechanisatie versnelden deze ontwikkelingen, met nieuwe rivierlopen en kanalen in het lage land van de voormalige lagune. Na WO II werden grotere zeearmen afgesloten en grote havencomplexen aangelegd, verbonden door vaargeulen met de Noordzee en het achterland.

3 Systeembeschrijvingen

In dit hoofdstuk worden de verschillende deelgebieden in Nederland, te weten de Kustzone, de Zuidwestelijke Delta, de Rijn-Maas Monding, de Bovenrivieren, het Waddengebied en het IJsselmeer, kort beschreven aan de hand van een aantal karakteristieken. Voor ieder deelgebied komen aan bod:

- Een korte systeembeschrijving volgens abiotische sleutelfactoren (getijdynamiek, wind- en golfdynamiek, rivierdynamiek en zoet-zoutinvloeden, en morfodynamiek).
- De invloed van menselijke ingrepen op de werking van het huidige systeem
- De sedimentbalans
- De huidige toestand van fysiotopen
- Stuurknoppen om invloed uit te oefenen op de systeemwerking
- De meerwaarde van herstel dynamiek, uitbreiding areaal en andere systeemingrepen voor de drie hoofddoelen (waterveiligheid, zoetwaterbeschikbaarheid en natuur)

3.1 Kustzone

Vrijwel de gehele Nederlandse kustlijn is zandig. Slechts op enkele plaatsen zijn er harde overgangen. Het is een onderdeel van een groot zandig systeem dat uitwisselt met Noordzee, Waddenzee en de estuaria van de Schelde en de Eems. Mede hierdoor is het voor de Nederlandse overheid een beleid te ontwikkelen en uitvoeren dat is gebaseerd op 'voldoende zand', om zo de kustlijn te handhaven en duurzaam functies en waarden van de kustzone te bewerkstelligen, waaronder uiteraard sterke duinen voor de waterveiligheid. Dit uitgangspunt (dynamisch handhaven, zacht waar het kan, hard waar het moet, sinds 1990) is waarschijnlijk de grootste en langstlopende 'nature based solution' in Nederland. Het sediment in de kustzone (hoofdzakelijk zand) wordt zowel onder als boven water in beweging gebracht door de krachten van wind en water (stroming die worden aangedreven door het samenspel van getij en golven). Dit zorgt voor een gebied met een grote variatie in fysiotopen en ecotopen. Voor de planning van kustbeleid en -beheer zijn verschillende zones te onderscheiden. Dieper dan 20 meter is de diepzee. De aanname is dat deze alleen verwaarloosbaar zand uitwisselt met het deel dat minder diep ligt. Ondieper dan ca. 8 meter is de ondiepe vooroever. Hier worden eventuele suppleties aangebracht. Die kunnen van daar goed verspreiden, omdat daar de reguliere golven nog krachtig genoeg zijn om op de bodem zand in beweging te brengen. Tussen de -20 meter lijn en de ondiepe vooroever ligt de diepe vooroever. Dat is een zone waar ook 'behoud van sediment' geldt: zandwinning is in ieder geval uitgesloten, maar actief zand toevoegen is tot nu toe niet zinvol c.q. nodig geweest voor duurzaam gebruik van de kust. Landwaarts van de ondiepe vooroever liggen het natte en droge strand (de overgang daarheen wordt wel met brandingszone aangeduid) en vervolgens de duinen. De buitenste duinenrij (zeereep) is een cruciaal element in de waterveiligheid. Landwaarts van de zeereep liggen de duinen met veel gradiënten en hoge natuurwaarden. Ze zijn allemaal aangewezen onder N2000. De kustzone eindigt bij de binnenduinrand.

Korte systeembeschrijving volgens abiotische sleutelfactoren

A. Getijdynamiek:

Langs de Nederlandse kust speelt het getij vooral een rol in de ligging van de kustlijn bij estuaria, de afgesloten bekkens in de Zuidwestelijke delta en bij de zeegaten naar de Waddenzee. Hier bepalen getijgeulen, die ook soms een migrerend gedrag vertonen, voor een belangrijk deel de ligging van de zandige kustlijn. Langs de golfgedomineerde Hollandse kust en de centrale delen van de Waddeneilanden spelen getijstromingen veel minder een rol in de ligging van de kustlijn (en de verspreiding van eventuele suppleties). Het getij langs de kust wordt zelf aangedreven door een golf die ons via het Kanaal bereikt en een andere die rondom Schotland de Noordzee in beweegt. Door een verschil in looptijd zijn er delen langs de kust waar de golven elkaar versterken of juist opheffen. De gemiddelde getijslag varieert daardoor van ca 4,5 m bij de Belgische kust, loopt af tot ca 1,5 m bij Den Helder om daarna langs de Wadden weer toe te nemen tot 2,5 m nabij Rottum. In de bekkens en estuaria wordt het getij verder vervormd door de ligging van de bodem. Door vernauwing van geulen, denk aan de trechtersvorm van de estuaria, kan getij opgestuwd worden. Door zijwaartse stroming over intergetijdengebieden en door bodemweerstand neemt het verschil in hoog- en laagwater juist af.

De getijgolf loopt in ca 7 uur van zuid naar noord langs de kust en verandert daarbij behalve in hoogte ook van vorm. Langs de Zeeuwse kust duurt de stijgende en dalende beweging ongeveer even lang, langs de Hollandse kust is er eerst sprake van een snelle stijging, dan een langzame en tenslotte een geleidelijke daling

en in de Waddenregio wordt de golf weer gelijkmatiger. De getijgolf zorgt voor stromingen langs de kust die netto noordwaarts zijn gericht en de beweging van het sediment dat mee wordt gevoerd is daarom ook netto noordwaarts.

B. Wind- en golfdynamiek:

De wind is de belangrijkste motor achter de verplaatsing van sediment in de kustzone. De wind zorgt voor golven die zand in beweging brengen en voor transport van strand naar duinen. Omdat de overheersende windrichting bij Nederland Zuidwest is, is er ook netto transport van zand langs de kust in die richting.

C. Rivierinvloed en variaties in zoutgehalte:

De invloed van de rivieren op de ligging van de Nederlandse kust is tegenwoordig klein, behalve uiteraard het feit 'dat ze er zijn' en voor onderbrekingen in de kustlijn zorgen en estuaria hebben gevormd waar het getij in hoge mate de bodemligging bepaalt. De rivieren brengen tegenwoordig weinig sediment naar de kustzone. Voor het zandtransport is de aanwezigheid van zoetwateruitstroom vrijwel niet van belang. Voor het transport van slib overigens wel. Het rivierwater is in vergelijking met de zee ook relatief voedselrijk en draagt bij aan het ecologisch functioneren van in het bijzonder het deel dat dichterbij de kustlijn ligt.

D. Morfodynamiek:

De positie van de kustlijn wordt in Nederland vooral bepaald door het aanbod van zand. Op plekken met erosie is er meer transport van de locatie af dan naar de locatie. Suppleties worden gepland om dit te compenseren. Bij overmatig aanbod van zand kan de kustlijn zeewaarts gaan. Hiervan zijn in Nederland veel voorbeelden te vinden. Ze variëren van plaatsen waar als gevolg van harde constructies de transporten zijn veranderd (ten zuiden en noorden van havendammen bijvoorbeeld) tot plaatsen waar extra zand naar toe is gebracht door de mens (Zandmotor, versterkingen Zwakke Schakels) of de stromingen (zoals aan de Noordzijde van Voorne, onder invloed van de afsluiting van het Haringvliet en aanleg Brielse Gatdam)

Samenvattend zijn de sturende onderdelen voor de morfodynamiek:

- De grootschalige situatie: zijn het (voormalige) zeegaten met getijgeulen of is het een doorlopende golfgedomineerde kustlijn. Hieruit volgen de netto transporten van zand;
- De hoeveelheden zand die beschikbaar zijn, door suppleties of door de aanwezigheid van (al dan niet voormalige) buitendelta's. Deze zijn in het Waddengebied een belangrijk tussenstation voor de verdeling van zand op de tijdschaal van 10 tot 50 jaar of meer. Daarom kan ook via suppleren op deze gebieden de ontwikkeling van de kustzone beïnvloed worden.
- Onderhoud van vaargeulen. Hiervoor niet genoemd, maar zowel in de Waddenzee, de estuaria als in de toegangsggeulen liggen vaargeulen. Een overdiepte werkt als sedimentvang en dit zand (vaak ook met een hoger gehalte slib dan elders langs de kust door de luwte) en dit is afkomstig uit de 'directe' omgeving. Als dit niet op een verstandige plaats wordt teruggestort is dit verloren voor de handhaving van de kustlijn. Tegenwoordig is winning van zand op plaatsen die ondieper zijn dan 20 meter niet toegestaan en moeten stortplaatsen / loswallen ook binnen die grenzen liggen.
- Suppleties: momenteel is de lijn dat er jaarlijks orde 11 Mm³ wordt aangebracht. Deze hoeveelheid wordt verdeeld op basis van een landelijk programma dat is gebaseerd op het opmeten van de kustlijn, toetsen aan de referentie (de Basiskustlijn) en het plannen van ingrepen op basis van de kennis van het morfologisch functioneren. De voorkeur heeft het aanbrengen van suppleties onder water (goedkoper, de natuur verspreidt het en het geeft minder overlast), maar er zijn delen van de kust waar suppleties op het strand niet te vermijden zijn.
- De aansluitende, zanddelende, systemen (Waddenzee en estuaria). Er is met name veel netto transport naar de Waddenzee. Door bodemdaling en zeespiegelstijging is er momenteel een zeker dynamisch evenwicht tussen het geïmporteerde sediment en de gemiddelde diepte. Ingrenen in de begrenzingen van de bekkens hebben in het verleden de getijstromingen in de Waddenzee sterk beïnvloed. Veelal leidde dit tot een extra 'vraag' naar sediment vanuit het bekken, wat geleverd werd door de kustzone van het Waddengebied, in het bijzonder de buitendelta's.

Tot nu toe is er vooral op de hoeveelheden zand en het zandtransport ingegaan. Het gedrag en de beschikbaarheid van fijn sediment (wat zich per dag over veel grotere afstanden kan bewegen en veelal niet gelimiteerd is door de transportcapaciteit van de stromingen) bepaalt mede hoe de kust eruit ziet. Het gaat

daarbij uiteraard om die delen die luwtes kennen en waarin de asymmetrieën in het getij het netto transport kunnen bepalen.

Het transport van fijn sediment langs de kust gebeurt in een tientallen km brede zone, netto richting het noorden. Het volume wordt geschat op 9 Mton per jaar. Dit sediment is grotendeels afkomstig vanuit het Kanaal en de zuidelijke Noordzee. Onderweg langs de kust belandt een deel in de zeegaten en kan daar achterblijven op platen en kwelders. Een veel groter volume komt in havens en vaargeulen, maar wordt opgebaggerd en moet naar een stortplaats worden gebracht. Veelal liggen die binnen het kuststelsel. Er is een beperkt aanbod van fijn sediment uit Rijn en Maas dat de zee bereikt.

Menselijke invloed & ingrepen

De mens heeft aan de basis gestaan van veel ontwikkelingen die de ligging van de kustlijn bepaalden. Door ontginning van veengrond achter de kustlijn, daalde het land en kwam het bij de riviermonden binnen het bereik van het getij. Dit zorgde voor het inbreken van de zee en een snel verval van de veengrond tot ver in het achterland, waardoor de ZW-delta is ontstaan. Het dichten van zulke bressen in de kustlijn lukte pas voor het eerst rond 1800 toen het Zijpe werd afgesloten met de Hondsbossche Zeewering. Voor die tijd legde men al wel kribben en windschermen aan om zand vast te houden. De watersnood van 1953 betekende een radicale ingreep met het afsluiten van 4 van de 5 zeegaten in de ZW-delta. Het versterken van de duinen ging ondertussen door, al lang werd helm geplant om zand in te vangen en de duinen op te hogen. Op de Waddeneilanden zijn lage stuifdijken aangelegd, die voldoende zand invingen om uit te groeien tot een duin. Sinds in 1990 geldt het dynamisch kustbeheer gebaseerd op toevoegen van zand om zowel erosie te bestrijden als mee te groeien met de stijgende zeespiegel. Omdat vanaf de suppletie locaties het zand verder wordt verspreid, ook naar delen van de kust die niet erodeerden groeit de Noordzeekust op dit moment op de meeste plaatsen netto aan.

Sedimentbalans

Tabel 3-1 Netto volumes sediment in beweging binnen de Nederlandse kustzone

Import	Zand (Mm ³ /jaar)	Slib (Mton/jaar)
Vanuit Belgisch deel kustzone	p.m.	9
Vanuit de rivieren	0	0,5
Via suppleties	11	0
Export		
Naar het Duitse deel kustzone	p.m.	p.m.
Naar Westerschelde	2	0,9
Naar diepere vaargeulen		2
Naar bekkens Waddenzee	4,5	1
Naar Eems en monding ervan	3,5	1,5
Over zeewaartse grens	Zie onder	Zie onder

In het overzicht is het netto dwarstransport in de kustzone niet opgenomen. Deze getallen verschillen namelijk met de diepte waarover netto transport bekeken wordt. Voor het handhaven van de kustlijn is in het bijzonder de overgang rond -8 meter belangrijk, van de ondiepe naar de diepe kustzone. In de Zuidwestelijke delta is er gemiddeld zeewaarts transport vanuit de relatief smalle suppletiezone, vooral naar voorliggende geulen. Dit is, gezien de lengte van de kustlijn, beperkt. De buitendelta's zelf eroderen en dragen bij aan het netto noordwaarts transport dat uiteindelijk in de Euro-Maasgeul komt. De Tweede Maasvlakte is een unieke situatie. Daar verdwijnt na verloop van tijd bijna al het gesuppleerde zand (ca. 0,6 miljoen m³ per jaar), want de kust is hier enorm uit evenwicht. Langs de Hollandse Kust verdwijnt weer weinig zand uit de suppletiezone en in het Waddengebied zijn de transporten uit de ondiepere delen van de Noordzeekustzone weer gedomineerd door de import naar de bekkens / Waddenzee. Om de vraag te beantwoorden hoeveel zand er nodig is om de kustlijn te handhaven bij versnelde zeespiegelstijging moet onderscheid gemaakt worden tussen erosie die veroorzaakt wordt door de netto transporten en de behoefte aan zand om echt 'omhoog te groeien'. In 2023

is dit berekend voor verschillende waarden van zeespiegelstijging in 2100 en 2200 (Taal et al., 2023), zie Tabel 3-2.

Tabel 3-2 Gemiddelde sedimentbehoefte per jaar voor de Nederlandse kust per zichtwaarde in 2100 / 2200 (mln. m³ per jaar) uit Taal et al. (2023). De benaming 'actieve zone' verwijst naar deel van de kustzone waar suppleties zich verspreiden.

Indruk sedimentbehoefte Nederlandse kust per jaar gemiddeld over periode (mln. m ³ /jaar)							
zichtwaarde	0,5 m	1 m	2 m	1 m	2 m	3 m	5 m
scenario zeespiegelstijging	laag	hoog	extreem	laag	mid	hoog	extreem
eindjaar	2100	2100	2100	2200	2200	2200	2200
1. Meegroeien actieve zones met kustlijnzorg, inclusief export							
Wadden	12	16	26	12	17	21	30
Hollandse kust	3.3	4.1	5.7	3.2	3.9	4.6	6.2
Delta	2,0	2,9	4,9	1,9	2,7	3,6	5,6
TOTAAL	17	23	37	17	23	29	42
2. Meegroeien actieve zones waar nu geen kustlijnzorg is, inclusief export							
Groninger Wad	0.7	2.4	6.0	0.6	2.5	4.2	8.1
3. Delen kustzone die nu niet, maar in toekomst mogelijk wel actieve zone zijn							
buitendelta's Deltakust	2.3	4.7	9.3	2.1	4.1	6.2	11.0
Vlakte van de Raan	2.1	3.1	5.2	1.9	2.9	3.8	5.9
4. Onzekerheden in sedimentbehoefte							
extra breedte actieve zone	0.4	0.8	1.6	0.4	0.7	1.0	1.8
transport naar Westerschelde	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Totaal meegroeien zones en onzekerheden	22	34	59	22	34	44	69

In deze berekening is uitgegaan van natuurlijke voeding van de bekkens en estuaria. Er is dus geen getal berekend voor een beleidsscenario waarbij er actief zand naar bekkens wordt gebracht om de bodem daar beter met de zeespiegel omhoog te laten komen. Hiervoor zijn zeer lastig waarden te bepalen en eerdere pogingen die simpelweg de oppervlakte van een bekken maal de snelheid van zeespiegel berekenden zijn meer dan waarschijnlijk te hoog. Deze aanpak gaat voorbij aan de bijdrage van slib in de sedimentatie, aan de morfologische veranderingen die al hebben plaatsgevonden (de Waddenzee 'verlandt' nu nog, wat als extra veerkracht tegen zeespiegelstijging gezien kan worden) en aan de vraag wat voor mix van fysiotopten wenselijk is bij een langzame omslag naar verdrinking.

Het is niet verstandig, mede gezien het adaptieve karakter van de kustlijnzorg en het feit dat het belangrijkste vraagstuk voor de houdbaarheid de beschikbaarheid van zand voor suppleties is, de nadruk te leggen op verschillende snelheden van zeespiegelstijging. In algemene zin geldt voor het kustonderhoud dat 1 mm/jaar extra snelheid aan zeespiegelstijging leidt tot ca. 1 miljoen m³ aan suppleties. Voorlopig domineren dus de netto transporten uit de te onderhouden zones. Voor gebieden die via natuurlijke sedimentatie 'mee moeten groeien' met de zeespiegelstijging is de snelheid wel bepalend. Bij sedimentatie door slib is de

beschikbaarheid van slib in de waterkolom bepalend (denk aan kwelders etc.) en bij sedimentatie door zand (grote delen van de Waddenzee b.v., zie hierboven) de transportcapaciteiten, zowel door een zeegat als binnen een bekken of estuarium via het geulensysteem.

Tabel 3-3 Sedimentatiesnelheid per fysiotoop zonder interventies voor de kustzone.

Fysiotoop	Snelheid (mm/jaar)	Motivatie / bron
-----------	--------------------	------------------

Zuidwestelijke Delta

Duinen	N.v.t.	
Strandwallen	N.v.t.	
Ondiep water	ZSS (19 mm/jaar)	Het is onwaarschijnlijk dat afgeweken wordt van het huidige beleid waarbij het bodemprofiel de ZSS volgt middels suppleties.
Diep water	ZSS (19 mm/jaar)	Het is onwaarschijnlijk dat afgeweken wordt van het huidige beleid waarbij het bodemprofiel de ZSS volgt middels suppleties.

Hollandse kust

Duinen	N.v.t.	
Strandwallen	N.v.t.	
Ondiep water	ZSS (19 mm/jaar)	Het is onwaarschijnlijk dat afgeweken wordt van het huidige beleid waarbij het bodemprofiel de ZSS volgt middels suppleties.
Diep water	ZSS (19 mm/jaar)	Het is onwaarschijnlijk dat afgeweken wordt van het huidige beleid waarbij het bodemprofiel de ZSS volgt middels suppleties.

Waddenkust

Duinen	N.v.t.	
Strandwallen	N.v.t.	
Ondiep water	ZSS (19 mm/jaar)	Het is onwaarschijnlijk dat afgeweken wordt van het huidige beleid waarbij het bodemprofiel de ZSS volgt middels suppleties.
Diep water	ZSS (19 mm/jaar)	Het is onwaarschijnlijk dat afgeweken wordt van het huidige beleid waarbij het bodemprofiel de ZSS volgt middels suppleties.

Huidige toestand fysiotoopen

We ordenen de fysiotoopen als volgt:

1). **Duinen:** Het duinareaal valt vrijwel geheel onder N2000. Op hoofdlijnen is, zeker nadat de NB-wet in gang is getreden het areaal behouden gebleven. Omdat de kustlijn vrijwel nergens meer landwaarts gaat dankzij het kustonderhoud is het areaal nu meer dan stabiel. Het areaal groeit aan de zeewaartse zijde zelfs aan, voornamelijk door netto transport met de wind vanaf het strand. Binnen de fysiotoop zijn er relatief veel hoge en oude duinen. Het vastleggen voor de veiligheid (variërend van helmaanplant tot suppleren) heeft wel tot een afname van dynamiek en variatie in aangroei- en afslagkusten geleid. De laatste decennia wordt de dynamiek lokaal hersteld door verwijderen begroeiing en kerven en stuifkuilen te creëren, zodat wind en water weer de ruimte krijgen. Onder het huidige suppletiebeleid zal er geen extra netto duinafslag zijn. Waar dynamisch duinbeheer het uitgangspunt en de kustlijn niet gehandhaafd hoeft te worden (denk bijvoorbeeld aan de staarten van de Waddeneilanden zoals de Boschplaat van Terschelling) wordt extra duinafslag positief gezien voor het natuurlijk functioneren. Een hogere zeespiegel betekent ook een hoger grondwaterniveau, met meer natte duinen, duinmeren en kwel aan de binnenduinstrand. Ook als duinen breder worden kan de zoetwaterbel groeien.

2). **Strandvlakten:** Langs delen waar er een overschot aan sediment is ontstaan strandvlakten. Dit is een karakteristiek element van een uitbouwende kust. Als de uitbouw permanent is ontstaan tegen de huidige zeereep aan nieuwe duinen. De vorming en begroeiing van strandvlakten is goed te zien op Waddeneilanden, in het bijzonder op plaatsen waar grote zandplaten vanuit de buitendelta zijn aangeland. Langs de gestrekte, golfgedomineerde kust komen ze nauwelijks voor. Alleen bij de Zandmotor bij Delfland zijn plaatsen te vinden

die je hieronder kan indelen. De afsluiting van zeegaten heeft dit fysiotoop doen uitbreiden omdat de transporten daar ingrijpend veranderden. De huidige strandvlakten profiteren ook van suppleties. Verwachting: Bij een snellere stijging van de zeespiegel is de situatie voor dit fysiotoop afhankelijk van het suppletiebeleid, ze blijven immers afhankelijk van de lokale zandbalans. Het is niet zeker of suppleties zodanig gepland worden dat die gericht zijn op handhaving van strandvlakten.

3). Vooroever (diep en ondiep) en eb- en vloeddelta's: Dit zijn delen die permanent onder water staan, maar een grote variëteit omvatten. De diepe vooroever (het gedeelte van ca. -8 meter tot -20 m) is relatief dieper geworden en vertoont niet de dynamiek van banken en troggen c.q. platen en geulen die de leefgebieden in de ondiepere kustzone bepalen. De buitendelta's bij de actieve zeegaten (Wester- en Oosterschelde en alle gaten tussen de Waddeneilanden) vertonen een natuurlijke grootschalige dynamiek. Bij de Grevelingen en Haringvliet is deze dynamiek verdwenen en wordt veel zand kustwaarts verplaatst, waar het de komende decennia zandplaten en strandvlaktes vormt. De vooroever nabij de riviermonden is een belangrijk habitat voor mariene organismen; deze zijn gebaat bij een meer regelmatige uitstroom van zoetwater, die er nu vaak niet is. De verwachting is dat met het stijgen van de ZSS en het vasthouden aan de huidige kustlijn de ondiepe vooroever in stand blijft, maar dat de diepe vooroever dieper komt te liggen.

4). Diepe zee: Het gaat hierbij om het gedeelte van de zee dieper dan -20 m, dus buiten het kustfundament. Net als de diepe vooroever ligt het buiten de invloed van de kustzone waarin suppleties zich verspreiden. Wel bewegen in deze zone veel fijn sediment en voedingsstoffen in noordelijke richting. Voor veel mariene organismen is het wel een belangrijk leefgebied, zeker in combinatie met de nabije ondiepe zones en estuaria. Het gaat om een enorm areaal met veel variatie (zand, klei, veen, eindmorene) dat niet of nauwelijks aan verandering onderhevig is. De verwachting is dat met het stijgen van de zeespiegel de diepe zee niet of nauwelijks zal veranderen; het areaal wordt wellicht wat groter ten koste van het deel dat nu aan de andere kant van de -20 meter lijn ligt, maar dit is feitelijk meer een rekenkundige verandering.

Tabel 3-4 Huidige toestand fysiotoopen in de kustzone mbt areaal (boven), de mate waarin estuariene dynamiek nog functioneert (midden) en de mate waarin connectiviteit op orde is (onder).

Kustzone					
Arealen	Duinen	strandwallen/vlakten (-1 m tot +2,5 m)	Ondiep water (-5 m tot -1 m)	Diep water (-5 m tot -17m)	
Oppervlakte	38.750 ha (11%)	15.900 ha (4%)	44.500 ha (12%)	265.500 ha (73%)	Arealen
ZW-Delta kust					areaal grotendeels afwezig
Hollandsche Kust					areaal beperkt aanwezig
Waddenkust					areaal in redelijke mate aanwezig
					areaal nog in takt
Dynamiek	Getijden-dynamiek	Morfodynamiek			Dynamiek
ZW-Delta kust					dynamiek grotendeels verdwenen
Hollandsche Kust					dynamiek gedeeltelijk aanwezig, functioneert onvoldoende
Waddenkust					dynamiek nog gedeeltelijk aanwezig
					dynamiek nog in natuurlijke staat
Connectiviteit	Zout-zoet verdeling	Tussen de gebieden	Tussen land-water		Connectiviteit
ZW-Delta kust					verbindingen grotendeels verdwenen
Hollandsche Kust					verbindingen deels aanwezig, functioneren onvoldoende
Waddenkust					verbindingen nog gedeeltelijk aanwezig
					verbindingen nog in takt

Stuurknoppen

De belangrijkste stuurknop in de kustzone is het sedimentbeheer en dan voornamelijk de suppleties en de keuzes voor het storten van gebaggerde specie. De (natuurlijke) transporten kunnen ook beïnvloed worden door de aanleg van harde structuren. Het gaat erom de (lokale) sedimentvoorraad d.m.v. natuurlijke processen aan te vullen en/of te verspreiden:

- a. Zand suppleren: voor het op zijn plaats houden van de kustlijn is zand nodig, naar gelang de stijging van de zeespiegel wordt er zoveel aangevoerd dat de zandvoorraad op peil blijft.
- b. Meer zand suppleren dan strikt nodig voor handhaving van de kustlijn: als a, maar nu wordt zoveel aangevuld dat de kustlijn zich (al dan niet tijdelijk) uit kan bouwen. Dit is gedaan bij de Zandmotor bij Delfland
- c. Niet suppleren c.q. de kustlijn niet handhaven: Dit is mogelijk waar brede duingebieden zijn c.q. ruimte voor dynamisch handhaven. De duinen leveren daarbij mogelijk ook zand dat elders aan handhaving van de kustlijn bij kan dragen.
- d. Grote suppleties op buitendelta's. Als dit gericht gebeurt kan de cyclische aanlanding van banken op de Waddeneilanden beïnvloed worden.
- e. Baggermateriaal benutten. Het gebaggerde materiaal uit vaargeulen en havens wordt nu wel binnen het kustfundament gestort, maar draagt niet direct bij aan de ligging van de kustlijn. De loswallen liggen ver van de gebieden af waar (suppletie)zand zich verspreidt o.i.v. golven.
- f. Binnen een estuarium of bekken kan met baggeren en storten sediment worden herverdeeld, in dienst van alle gebruiksfuncties. In de Westerschelde is het morfologisch beheer hier grotendeels op ontworpen.
- g. Aanvullen sedimenttekorten in de zeegaten: De afgesloten bekkens in de ZW-delta hebben in de loop der tijd een groot tekort opgelopen. In de Oosterschelde wordt momenteel gericht zand naar eroderende platen gebracht om foerageergebieden voor vogels op peil te houden. Dit is interne herverdeling. Het is echter ook mogelijk sediment van buiten een (deels) afgesloten bekken naar binnen te brengen. Bij de Oosterschelde is dit goed denkbaar, want daar is nog getijdynamiek. Voor andere bekkens is het terugbrengen van natuurlijkere morfodynamiek lastiger.
- h. Wash-overs toestaan/creëren: op delen van de Waddeneilanden kan dit voor sneller transport zorgen tussen kust en duingebied op de eilanden
- i. Veranderingen aanbrengen in de komberging: Dit type ingreep valt onder de Zuidwestelijke delta en de Waddenzee. Door inpoldering en bedijking terug te draaien verandert ook de morfologische dynamiek omdat de geulen verdiepen en dat maakt sediment beschikbaar voor de plaatgebieden. De vergrote komberging zorgt voor extra sedimentvraag omdat daar sediment zal neerslaan. Dit op natuurlijke wijze meegroeien zorgt voor extra veerkracht
- j. Dynamische duinbeheer: Door ruimte te geven aan verstuiwingen (binnen het duingebied) of door duinvalleien weer in verbinding gebracht te brengen met de zee (kerven, sluffers) is er een grotere uitwisseling van sediment dan via de zeereep mogelijk is. Dat leidt tot (de terugkeer van) gradiënten die leefgebieden van hogere ecologische kwaliteit (en meer veerkracht) geven.

Zoet-zoutverdeling: De impact van zoetwater op de kustzone is gering, maar er zijn verbetermogelijkheden

- k. Continue uitstroom van rivierwater: door het rivierwater nabij de mondingen in zee beter in ruimte en tijd te verdelen ontstaan er overgangszones tussen zoet en zout. Nu wordt het rivierwater een groot deel van het jaar geforceerd naar een beperkt aantal uitstroompunten gestuurd. Er zijn kansen bij Haringvliet, maar ook bij het IJsselmeer/Waddenzee, het Lauwersmeer en de Westerwoldse Aa. Deze laatste vallen onder andere gebieden / factsheets .

Meerwaarde voor drie hoofdoelen:

Tabel 3-5 Meerwaarde herstel dynamiek in de kustzone voor drie hoofdoelen

stuurknop	ingreep	Hoogwateropgave	Zoetwateropgave	Natuuropgave
Herstel morfodynamiek	zand aanvoeren en suppleren in de kustzone	basiskustlijn blijft op zijn plek		1). Meer zand beschikbaar voor alle fysiotopten
	extra zand aanvoeren en suppleren in de kustzone	1). basiskustlijn bouwt zeewaarts uit 2). meer zand beschikbaar voor andere delen van de kustzone		1). Uitbreiding van bepaalde fysiotopten (strandvlakten en duinen)
	kustlijn loslaten	1). meer zand beschikbaar voor andere delen van de kustzone		1). Meer zand beschikbaar voor alle fysiotopten
	aanvullen buitendelta's met zand	1). meer zand beschikbaar voor andere delen van de kustzone		1). Buitendelta's vervullen hun rol als verdeelstation voor sediment waar fysiotopten van profiteren
	baggermateriaal benutten	1). meer zand beschikbaar voor kustzone		1). Kan fungeren als slibmotor in de zeearmen waar nu tekort is aan fijn sediment voor kweldervorming
	aanvullen sedimenttekorten zeearmen	1). Meer materiaal beschikbaar voor kweldervorming 2). Stoppen zandhonger		1). Meer materiaal beschikbaar voor kweldervorming 2). Stoppen zandhonger
	washovers toestaan waddeneilanden	1). Sedimenttekort Waddenzee vermindert		1). Grotere variatie aan bijzondere ecotopten
	herstel komberging zeearmen	1). Meer materiaal beschikbaar voor kweldervorming 2). Meer materiaal beschikbaar voor kustzone		1). Meer materiaal beschikbaar voor kweldervorming 2). Meer materiaal beschikbaar voor plaat- en slikvorming 3). Stoppen zandhonger
	dynamisch duinbeheer			1). Grotere variatie aan bijzondere ecotopten
Herstel rivierdynamiek	continue uitstroom zeewater		1). Zouttong verder naar binnen (neg),	1). Herstel van zoet-zoutovergangen

3.2 Zuidwestelijke Delta

De Zuidwestelijke Delta omvat Zeeland en delen van Zuid-Holland en Noord-Brabant. Het gebied bevat waardevolle intergetijdennatuur, zoals slikken, platen en schorren en is door de eeuwen heen gevormd door een samenspel van natuurlijke processen en menselijke ingrepen. Het gebied is van belang voor natuur, landbouw, scheepvaart en recreatie (Coen, 2008; Dillingh, Graveland, & Pieters, 2005). Deze benedenloop van de Schelde, Maas en Rijn, allen uitmondend in de Noordzee, is een uniek estuarien systeem met diverse ecosystemen en grote soortenrijkdom. Deze rijkdom hangt voor een groot deel samen met de vele gradiënten, waaronder de overgangen tussen zoet en zout water. Historische waterbeheeractiviteiten en landaanwinning hebben het landschap ingrijpend veranderd, maar ook kwetsbaar gemaakt wanneer een overstroming plaatsvindt. Na de watersnoodramp van 1953 werden de Deltawerken aangelegd om het gebied te beschermen, wat de natuurlijke dynamiek van de delta sterk heeft beïnvloed.

Hier bespreken we de waterlichamen van de Zuidwestelijke delta met uitzondering van de Haringvliet, Hollands Diep en Biesbosch omdat deze met de huidige inrichting als onderdeel van de Rijn-Maas monding functioneren en dus in die factsheet aan de orde komen.

Menselijke invloed & ingrepen

Menselijke ingrepen hebben het natuurlijke systeem van de Zuidwestelijke Delta ingrijpend veranderd, vanaf de vroege Romeinse nederzettingen tot de moderne infrastructuur. De eerste veranderingen begonnen met de ontwatering van het kustveen door de Romeinen, wat uiteindelijk leidde tot een toename van de zeewaterinflux in het gebied. Ongeveer duizend jaar geleden begonnen de eerste inpolderingen nadat een laag zeeklei was afgezet op de geërodeerde veengebied, wat een belangrijke stap was in de creëren van nieuwe landerijen en de daarbij noodzakelijke beheersing van de waterpeilen in de polders. Als gevolg van de inpoldering, waterbeheer en landbewerking daalt de bodem met gemiddeld 2 a 3 mm/jaar. De inpolderingen legden de basis voor latere ingrepen, zoals de aanleg van dijken en dammen.

In de 20e eeuw veroorzaakte de aanleg van de Deltawerken een ingrijpende verandering in de Zuidwestelijke Delta. Deze grootschalige waterbouwkundige projecten waren ontworpen om de regio te beschermen tegen de dreiging van overstromingen, vooral na de verwoestende Watersnoodramp van 1953. De Deltawerken omvatten de bouw van dijken, dammen, stormvloedkeringen en sluizen, die effectief de invloeden en dynamiek van de getijden en stormvloeden konden beheersen. Hoewel deze infrastructuur aanzienlijke bescherming biedt tegen overstromingen en een belangrijke rol speelt in de waterveiligheid, heeft ze ook diepgaande gevolgen voor de ecologie en de veerkracht van de delta op langere tijdschalen door o.a. bodemdaling, morfologische homogenisatie (b.v. als gevolg van zandhonger), en accumulatie van organisch materiaal en nutriënten.

Korte systeembeschrijving volgens abiotische sleutelfactoren:

Sinds de aanleg van de Deltawerken zijn de deltawateren, die voor die tijd grotendeels verbonden waren, als apparte waterlichamen met zeer beperkte functionele verbondenheid te beschouwen. De dynamiek van abiotische sleutelfactoren als getij, rivierinvloed, morfo- en zoutdynamiek is sterk veranderd.

Tabel 3-6 Veranderde dynamiek als gevolg van aanleg Deltawerken. Kwantitatieve inschatting van de mate van dynamiek. 0 = geen, 1 = weinig, 2 = gemiddeld, 3 = veel.

Waterlichaam	dynamiek							
	Getij		Rivier		Morfo		Zout	
	1950	2024	1950	2024	1950	2024	1950	2024
Westerschelde	3	3	2	2	3	2	3	3
Oosterschelde	3	3	2	0	3	0	2	1
Veerse meer	3	0	0	0	3	0	1	1
Grevelingen	3	0	2	0	3	0	2	1
Volkerakmeer	3	0	3	1	3	0	3	0
Zoommeer	3	0	0	1	3	0	1	0

A. Getijdynamiek:

De Zuidwestelijke Delta kent van oudsher een sterke getijdynamiek vanuit de Noordzee, die zorgt voor aanzienlijke variaties in waterstanden en stroomsnelheden. Die getijdynamiek stuurt de verdeling en verplaatsing van sedimenten, die worden afgezet op platen, slikken en schorren, en creëert zo een dynamisch en ecologisch waardevol landschap. Dit dynamische systeem biedt leefgebieden voor diverse estuariene soorten, waaronder schorren, zeegrasvelden en schelpdieren. Tegelijkertijd brengt het uitdagingen met zich mee, zoals verzanding, erosie, en risico's op overstromingen en stormvloed. De getijwerking en extreme gebeurtenissen spelen een cruciale rol in het behoud van de kwaliteit en kwantiteit van deze ecosystemen. Echter, door de aanleg van de Deltawerken is veel van de natuurlijke getijdynamiek sterk ingeperkt of verdwenen, wat de ecologische balans en de natuurlijke dynamiek van de Delta aanzienlijk heeft veranderd. Sinds de aanleg van de Deltawerken is ongeveer 2/3 van de getijdennatuur verdwenen van ca. 60.000 ha naar ca. 20.000 ha.

B. Rivierdynamiek

Van oudsher wordt de rivierafvoer in de Zuidwestelijke Delta bepaald door de waterstromen van de grote rivieren de Rijn, Maas en Schelde. Tegenwoordig is, vanwege de compartimentalisatiedammen, de afvoer van de Rijn en Maas op deze regio niet meer van invloed. Deze rivieren leverde zoet water en sediment aan, al is de aanvoer van sediment vanuit de rivieren tegenwoordig beperkt en is de belangrijkste bron van sediment de kust. De aanvoer van zoet water is van groot belang voor de instandhouding van de estuariene dynamiek en is daardoor grotendeels verdwenen (Smaal & Van Stralen, 1992). De Schelde is het enige nog overgebleven functionerend estuarium met een natuurlijk variatie van de door regenwater gevoede rivier. Daardoor is er een duidelijke seizoenale variatie in afvoer. Fluctuaties in rivierafvoer beïnvloedde normaliter de waterhuishouding en sedimentatiepatronen in een groot deel van de delta. Bij extremere rivierafvoeren komt verhoogde sedimenttransport als gevolg van de sterkere waterbeweging voor en kunnen bijdragen aan de natuurlijke dynamiek en ontwikkeling van ecosystemen door nieuwe sedimentafzettingen als ook temporele en seizoenale variaties in zoutgehalte. De aanwezigheid van deze dynamiek is dus nu beperkt tot de Westerschelde.

C. Morfodynamiek:

De oorspronkelijke morfodynamiek van de Zuidwestelijke Delta volgde uit de (ruimte voor) afwisselingen in sedimentatie en erosie, wat leidde tot voortdurende veranderingen in bodem- en oeverliggingen. Menselijke ingrepen, zoals de aanleg van dammen, stormvloedkeringen en zandwinning, hebben deze natuurlijke morfodynamiek aanzienlijk beïnvloed en vaak beperkt. Het Veerse gat en Grevelingen zijn zoutwater meren geworden zonder relevante getijwerking en vanwege het stagnante waterniveau is golfslag de dominante factor voor de morfodynamiek geworden (Bijlsma & Iedema, 1991; Hoeksema, 2002). Om oevererosie te voorkomen is (oever)bestorting aangebracht. In de Oosterschelde heeft de beperking van het getij als gevolg van de aanleg van de compartimenteringsdammen en de stormvloedkering de morfodynamiek afgezwakt, resulterend in 'zandhonger': Het beperken van sedimentimport als gevolg van het gereduceerd getij verhindert de opbouw van getijdenplaten en schorren, terwijl golfslag nog altijd zorgt voor erosie waardoor het bekken langzaam verdrinkt. Dit leidt tot een verlies aan ca. 100 ha getijdennatuur per jaar (Mulder, 1992; Van Maldegem, 2004; Waterstaat, 2003). In de Westerschelde is de invloed van het getij juist toegenomen, eerst voornamelijk als gevolg van inpolderingen en later (sinds jaren zeventig) door vaargeulverruiming. Met name de recente (afgelopen decennia) vaargeulaanpassingen en onderhoudswerken om de voorgeul op diepte te houden zorgt voor een verstijling van het systeem en heeft een negatieve invloed op het intergetijdegebied. Natuurlijke morfodynamiek, zoals de vorming en verplaatsing van zandbanken, heeft een belangrijke bijdragen aan een gevarieerd en dynamisch landschap wat essentieel is voor de biodiversiteit en ecologische waarde van de Deltawateren. Ondanks de uiteenlopende uitdagingen per waterlichaam is de gemeenschappelijke trend in alle systemen dat de veranderingen in dynamiek de morfologische variatie verminderen waarmee biodiversiteit niet gediend is.

D. Zoetzoutdynamiek

In een groot deel van de Deltawateren speelde de interactie tussen zoet en zout water een belangrijke rol in de ecologische dynamiek en waterkwaliteit. Zoutindringing vanuit de zee, vooral tijdens periodes van lage rivierafvoer, heeft een aanzienlijke invloed op de ecologie. De fluctuaties in de grenszones tussen zoet en zout water creëren variabele habitatcondities die essentieel zijn voor een divers scala aan flora en fauna, van zoutminnende vegetatie tot brakwaterecosystemen. Deze dynamiek ondersteunt de vervolmaking van levenscycli van veel marine soorten en voorkomen van specifieke brakwatersoorten en draagt bij aan de

biodiversiteit van het gebied (Ysebaert, et al., 2016). Juist waterfilterende functies, zoals het afbreken van schadelijke stikstofverbindingen, werken het meest optimaal in brakke milieus die regelmatige droogvallen (getijdenplaten). Tegelijkertijd kan de fluctuatie in zoutindringing echter ook negatieve gevolgen hebben voor de zoetwaterbeschikbaarheid, zoals door verzilting van landbouwgronden, wat een uitdaging vormt voor het landgebruik in het gebied. Sinds de aanleg van de Deltawerken is de zoetzoutdynamiek sterk beïnvloed en is alleen de Westerschelde nog een functionerend estuarium (de Jong, de Jong, & Mulder, 1992).

Sedimentbalans

De sedimentbalans in de Zuidwestelijke Delta is sterk verstoord, in het bijzonder in de afgesloten bekkens. Over het algemeen is door de bouw van dammen en stormvloedkeringen de natuurlijke sedimentaanvoer beperkt, wat resulteert in erosie van slikken en schorren en sedimenttekorten op sommige plaatsen. Dit heeft negatieve gevolgen voor de morfologie en ecologie, waaronder het verlies van habitat voor vogels en vissen.

Momenteel is de Westerschelde het enige deltawater dat nog grotendeels natuurlijk functioneert en een natuurlijk uitwisseling van sediment met de Noordzee heeft. Het beheer in de Westerschelde is erop gericht om sediment in het estuarium te houden en daarvoor worden steeds naar de beste stortplaatsen gezocht. De verwachting is dat met zeespiegelstijging de sedimentvraag verder toe gaat nemen in de Westerschelde. Het gevolg is dat de Westerschelde meer sediment vanuit het Noordzee kustgebied gaat importeren om aan de sedimentbehoefte te voldoen, wat een grotere suppletiebehoefte aan de kust zal veroorzaken. Tabel 3-7 vat de sedimentbalans van de Westerschelde samen, als enige estuarium in de Zuidwestelijke Delta dat direct in verbinding met de zee staat.

Tabel 3-7 Sedimentbalans van de Westerschelde.

Transport	Zand (Mm ³ /jaar)	Slib (Mton/jaar)
Vanuit Noordzee naar Westerschelde	2	0,9
Depositie in Westerschelde		0,4

De platen in de Oosterschelde worden momenteel periodiek gesuppleerd om verloren getijdennatuur gedeeltelijk te herstellen en ook waterveiligheid te dienen. De verwachting is dat de inspanningen (terugkeertijd) ook hier moeten toenemen om met deze sedimentstrategie intergetijdengebied in stand te houden.

Tabel 3-8 Sedimentatiesnelheid per fysootoop zonder interventies voor de Zuidwestelijke Delta.

Fysootoop	Snelheid (mm/jaar)	Motivatie / bron
<i>Westerschelde</i>		
Slikken	10	De gemiddelde sedimentatiesnelheid op de platen van de Westerschelde is 57 cm tussen 1955 en 2014 (de Vet et al., 2017) ofwel 9,7 (~10) mm/jaar. Deze verhoging vlakkt niet af, wat waarschijnlijk maakt dat deze doorzet. Een afvlakking wordt ook deels voorkomen doordat de zeespiegel stijgt, en daardoor ook de getij amplitude zal toenemen (van der Wegen et al., 2022). De hoge sedimentatiesnelheid hangt deels samen met menselijke ingrepen (zoals storten nabij platen – de Vet et al., 2020) dus is wel (deels) afhankelijk van continuering van huidig bagger en stortbeleid.
Kwelders	13	Jaarlijks bezinkt 0,4 miljoen ton (grotendeels slib) in het Land van Saefinghe, het grootste (30 km ²) kweldergebied van de Westerschelde. Dit komt overeen met 13 mm/jaar. Deze sedimentatiesnelheid is veel hoger dan de huidige ZSS snelheid, en daarmee lijkt de aanslibbingsnelheid losgekoppeld van de snelheid van ZSS.
Ondiep water	0	Geen onderscheid met diep water
Diep water	0	De Westerschelde verdiept als sinds 1800, gemiddeld 420 miljoen m ³ in 215 jaar (Dam et al., 2022) – met een oppervlakte van 275 km ² komt dit neer op een jaarlijkse verdieping van 7,1 mm/jaar. Wanneer echter gecompenseerd wordt voor zandwinning wordt een opvulling van 40 miljoen m ³ in 50 jaar verwacht, ofwel +2.9 mm/jaar. Aangezien zandwinning is diverse studies samengevat in Van der Wegen et al. (2022) suggereren dat zeespiegelstijging leidt tot een verhoging van de getijamplitude en daardoor een uitruiming van geulen. Dit zal de sedimentatie welke verwacht wordt door stoppen met zandwinning

		waarschijnlijk deels teniet doen. Ook zijn er geen aanwijzingen dat het Schelde estuarium meef gaat importeren door zandwinning. Netto wordt er geen wijziging verwacht.
--	--	--

Oosterschelde

Slikken	-3	Het intergetijdengebied in de Oosterschelde verlaagt 7 mm/j tussen 1983 en 2013 (de Vet et al., 2017). Deze trend zal afnemen in de tijd (want gestuurd door constructie OS dam). Door ZSS zal het getijdebiet toenemen waardoor de zandhonger afneemt op de platen, waardoor erosie van de platen zal afnemen (de Vet et al., 2024). Beste inschatting van sedimentatiesnelheid lijkt een halvering (orde 3 mm/j).
Kwelders	6	Huidige aanslibbing is 3 tot 10 mm/j (van Maldegem en de Jong, 2004), er is geen aanwijzing dat dit sterk verandert door ZSS. Areaal wordt wel kleiner door de verdrinking van slikken (kliferosie).
Ondiep water	3	Het meeste sediment wat wordt geërodeerd van de slikken wordt afgezet in ondiep water net beneden de LW lijn (de Vet et al., 2024). Vanwege de verwachting dat de erosie zal afnemen zal ook deze afzetting afnemen.
Diep water	2	Hoewel bekend is dat de slikken eroderen vanwege de sedimenthonger in de geulen, lijken er weinig getallen te zijn over aanzanding van de geulen. De overgebleven zandhonger is 65% van ~500 miljoen m ³ , ofwel 325 miljoen m ³ . Dit zou neerkomen op ruim een meter in de Oosterschelde geulen (250 km ²). Zoveel sediment is niet beschikbaar op de slikken (<100 miljoen m ³ – de Vet et al., 2024). Import uit zee is beperkt. Onder aanname dat de helft van het sediment beschikbaar op de platen in de komende 100 jaar erodeert en in de geulen bezinkt, geeft een verwachte meegroeiensnelheid van 20 cm in 100 jaar ofwel 2 mm/jaar. Dit getal is erg onzeker.

Huidige toestand fysiotopten

In de Zuidwestelijke Delta is de huidige toestand van de fysiotopten afhankelijk van de bekken en de verandering van de dynamiek. De ecologische kwaliteit van deze fysiotopten varieert daardoor aanzienlijk per bekken van de deltawateren maar staan in alle gevallen onder druk door menselijke activiteiten en klimaatverandering.

1. Afname van intergetijdengebieden: De aanleg van dijken en dammen in het kader van de Deltawerken heeft geleid tot een verlies van ongeveer twee derde van de intergetijdengebieden, zoals platen, slikken en schorren. Deze habitats zijn van nature van groot belang voor een goede ecologische toestand van de delta. Ze dienen o.a. als broed- en foerageergebieden voor vogels, schuilplaatsen voor jonge vissen, en belangrijke migratieroutes voor trekvis. Het verdwijnen van deze gebieden heeft dan ook grote gevolgen gehad voor de biodiversiteit en de natuurlijke dynamiek van de delta..
2. Verlies van natuurlijke dynamiek: De afsluitingen en beheersmaatregelen hebben de natuurlijke dynamiek van de delta drastisch verminderd. Vroeger zorgden de getijden en riveriafvoer voor variaties in sedimenttransporten en wisselende zoutgradiënten, wat de basis vormde voor een breed scala aan habitats en soorten. Nu is de dynamiek sterk beperkt, met verminderde sedimenttoevoer en erosie als gevolg. Dit heeft geresulteerd in een verstoring van de ecologische balans en een afname van de diversiteit in zowel habitats als soorten.
3. Hydrologische veranderingen en waterkwaliteitsproblemen: Door veranderingen in de hydrologie en het waterbeheer, zoals het afsluiten van zeearmen en het reguleren van de waterstanden, is de waterkwaliteit in veel delen van de delta verslechterd. De stagnatie van water en verminderde doorstroming hebben geleid tot problemen zoals stratificatie, zuurstofgebrek, en een verhoogde gevoeligheid voor nutriëntenbelasting en eutrofiëring. Deze waterkwaliteitsproblemen hebben negatieve effecten op de waterige ecosystemen en kunnen o.a. leiden tot vissterfte en afname van onderwaterleven.
4. Verstoorte migratieroutes en verminderde biodiversiteit: De afsluitingen van de zeearmen en de veranderingen in zoutgehalten hebben de natuurlijke migratieroutes van vissen, zoals zalm, steur en paling, verstoord. Ook voor trekvogels zijn de veranderingen in het landschap nadelig geweest, omdat de verdwenen slikken en schorren belangrijke rust- en foerageerplekken waren. Dit heeft grensoverschrijdende consequenties voor vogelpopulaties. De verstoring van deze routes en habitats heeft geleid tot een afname van de biodiversiteit en heeft sommige soorten ernstig onder druk gezet.

Galgeplaat en Oesterdam herstellen slechts een deel van het verloren areaal. In de Westerschelde is juist een afname van de getijdynamiek wenselijk wat bereikt kan worden door de breedte diepte verhouding weer meer in balans te brengen. Ontpolderingen kunnen hier helpen evt samen met het beperken van verdere vaargeulverruiming en baggerwerkzaamheden. In de Westerschelde is met de ontpoldering van de Hedwigepolder en buitendijkse maatregelen bij Bath en Zimmerman in 2022/2023 het eerste pakket van 600 hectare natuurherstel afgerond. Er zijn afspraken om vóór 2030 minimaal 3.000 hectare natuurherstel te realiseren, maar het is onwaarschijnlijk dat dit gehaald gaat worden.

- c. Morfodynamiek en het beter benutten van sediment: Sediment is een essentiële bouwsteen voor de aanpassing van de bodem van bv. Oosterschelde en het Westerschelde-estuarium aan veranderende omstandigheden als gevolg van veranderingen in hydrodynamiek door menselijke ingrepen en zeespiegelstijging. De Westerschelde importeert gemiddeld zand en slib. De Oosterschelde importeert geen sediment meer, waardoor hier andere maatregelen nodig zijn om erosie en habitatverlies tegen te gaan. Door middel van verschillende sediment strategieën kan hier bijgestuurd worden (baggeren, storten, extractie en suppleren). Ook is het mogelijk om met harde en biogene structuren sediment beter vast te houden (erosieremmen) of juist te laten sedimenteren.

Meerwaarde voor drie hoofddoelen

[Idealiter worden deze nog verder uitgewerkt naar niveau van kombergingsgebied/waterlichaam van de deltawateren.]

- a. Waterveiligheid: Uitbreiding van de arealen getijdennatuur (slikken en schorren) door ontpoldering en dijkverleggingen, kan bijdragen aan de waterveiligheid op kombergings niveau door extra ruimte te bieden voor waterberging (demping getijdynamiek). Dit vermindert de hoge waterstanden daarmee de dijkopgave. Ondiep water en begroeide voorlanden (of tussen dubbele dijken) zorgen voor verminderde golfoploop en daarmee dijkonderhoudopgave. Daarnaast zorgen ze voor beperkte gevolgschade mocht een dijk toch doorbreken.
- b. Zoetwaterbeschikbaarheid: De uitbreiding van wetlands en intergetijdengebieden helpt bij het verbeteren van de zoetwaterhuishouding door het vergroten van de opslagcapaciteit voor zoet water in de bodem en vermindering van zoutindringing in kwetsbare gebieden, zoals polders landwaards van brede dijkzones met begroeide voorlanden.
- c. Natuur: Ecologische uitbreidingen, zoals herstel van schorren en slikken, leveren een belangrijke bijdrage aan de verbetering van habitatkwaliteit en biodiversiteit. Door het vergroten van het areaal aan natuurlijke leefgebieden wordt de veerkracht van ecosystemen versterkt, wat een positief effect heeft op flora en fauna, maar ook bijdraagt aan de algehele veerkracht van de Zuidwestelijke Delta.

3.3 Rijn-Maasmonding

De Rijn-Maasmonding (RMM) is een estuarium, waarbij water en sediment vanuit zee en de grote rivieren samenkomen. Dit bijzondere samenspel is al vele duizenden jaren actief en heeft de basis gelegd voor het gebied, waar in de laatste 1000 jaar de impact van de mens steeds groter is geworden. De talrijke natuurlijke processen leiden tot een grote diversiteit aan gradiënten in de abiotiek (o.a. saliniteit, bodem, waterdiepte en droogvalduur), waar de karakteristieke estuariene biotiek van profiteert. Grote ingrepen in het systeem en een gebrek aan ruimte, vanwege vooral de bedijking en verstedelijking, hebben de estuariene natuurwaarden in de loop der jaren onder druk gezet en vrijwel overal zijn de kenmerkende estuariene soorten vervangen door minder specifieke soorten. Met name de afsluiting van het Haringvliet (1970) heeft hier een grote rol in gespeeld omdat de getijdendynamiek in de Zuidrand wegviel.

Korte systeembeschrijving volgens abiotische sleutelfactoren

A. Getijdynamiek:

De getijgolf dringt de RMM binnen via de enige nog open rivierarm, de Nieuwe Waterweg, en beweegt in ca. 4 uur langs de Noordrand (Nieuwe Maas en Lek) tot aan stuw Hagestein en bereikt via de tussenlopen (Spui, Oude Maas etc.) in ca. 6 uur de Zuidrand (Haringvliet, Hollands Diep en Biesbosch). Onderweg verandert de golf van amplitude: van ca. 1,8 m bij Hoek van Holland, tot ca. 1,1 m bij Hagestein en via de tussenlopen met ca. 1,0 m naar ca. 0,3 m in de hele Zuidrand, waar de getijslag beperkt is vanwege de afsluiting van het Haringvliet. Bij hogere rivierafvoeren als meer dan 4.500 m³/s in de RMM aankomt, neemt de getijslag toe als gevolg van een beperkt schijngetij doordat alleen tijdens eb op zee gespuid wordt.

De gemiddelde hoeveelheid water die tijdens een vloed periode het gebied in stroomt (ca. 4.500 m³/s) is een factor 2 groter dan de hoeveelheid rivierwater die het systeem gemiddeld vanuit het oosten bereikt (1850 m³/s via de Waal en Lek en 250 m³/s via de Maas). De dagelijkse verschillen, maximaal ca. 9.000 m³/s tijdens de piek in in- en uitstroom, zijn ook veel groter en de waterbeweging door het getij overtreft in vrijwel de hele RMM die van de rivier. Pas in de rivieren zelf neemt de getij-invloed geleidelijk af. Stroomsnelheden in de Nieuwe Waterweg lopen op tot ruim 1,5 m/s tijdens eb en 1 a 1,5 m³/s tijdens vloed. Verder stroomopwaarts neemt de snelheid af; zo bedraagt de vloedstroom in de Oude Maas en het Spui nog 0,6 m/s, terwijl dat in de Beneden Merwede nog maar 0,2 m/s is. Ten gevolge van de rivierafvoer is de ebstroom overal dominant en bedraagt, afhankelijk van de rivierafvoer, in de meeste andere lopen ca. 0,5 m/s. In de Zuidrand aangekomen valt bij gesloten Haringvlietsluizen zowel de eb als vloed stroming grotendeels weg en bedraagt nog slecht 1 tot 5 cm/s. Dit is het gevolg van een systeem dat naar verhouding veel te ruim is voor de hoeveelheid getijdenwater die het gebied bereikt. Bij hoge rivierafvoeren, als er veel rivierwater gespuid wordt via de Haringvlietsluizen, neemt de stroomsnelheid tijdens eb toe tot 0,5 m/s of meer. Tijdens stormvloed kan de instroom vanuit zee nog een factor 2 tot 2,5 groter zijn, waardoor de waterstanden in het hele Benedenrivierengebied in enkele uren tijd tot 1 à 2 m extra worden opgezet; het meest langs de Noordrand. De stroomsnelheden zijn dan ook veel groter, tot >2 m/s. De getijbeweging heeft momenteel weinig invloed op het ecologisch functioneren van de RMM omdat in de gebieden waar de getijbeweging nog groot is, zoals de Noordrand, vrijwel geen ruimte is voor intergetijdengebied en omdat er in de gebieden waar buitendijks wel ruimte is (de Zuidrand) vrijwel geen getij is en bovendien is afgesloten van zee, en daarom geen geleidelijke zoet-zoutovergang heeft. Er is daarom nog maar ca. 500 ha goed tot redelijk functionerend intergetijdengebied over van de ca. 9.000 ha die er voor 1970 was.

B. Rivierdynamiek:

De Rijn heeft een voor Europese begrippen hoge jaarafvoer, waarvan gemiddeld ca. 1.850 m³/s in de RMM aankomt. In de winter is de afvoer het hoogst (2.200 m³/s), maar ook in hoogzomer blijft ze relatief hoog (1.650 m³/s) dankzij de dan hoge aanvoer uit de Alpen. Pas in het najaar worden de laagste afvoeren bereikt (ca. 1.200 m³/s). Echter van jaar tot jaar kunnen deze afvoeren sterk verschillen: zo loopt gemiddeld eens in de 10 jaar, in de nazomer en herfst, de afvoer die de RMM bereikt, terug tot slechts 600 m³/s en loopt deze tijdens perioden met een hoge rivieraanvoer, in de winter, op tot meer dan 10.000 m³/s, waarvan ca. 15% afkomstig uit de Maas. De Maas voert jaargemiddeld ca. 250 m³/s af en heeft een groot seizoensverloop (500 m³/s in de winter en 100 m³/s in de zomer). De afvoerfluctuaties in de RMM hebben weinig effect op de waterstanden, omdat de waterstand door de zeewaterstand wordt bepaald en de dagelijkse variaties vanwege het getij veel groter zijn. Stroomopwaarts in de riviertakken neemt de invloed van de rivierdynamiek wel snel toe. Hoge afvoerpieken zijn er zowel bij Rijn als Maas vooral in de winter, meestal door een combinatie van smeltwater

en een periode met veel neerslag. Tot 5x meer rivierwater bereikt dan de RMM, maar de invloed op de waterstanden blijft nog steeds gering en wordt vooral bepaald door de snelheid waarmee via de Haringvliet kan worden gespuid. Als spuien tijdelijk niet mogelijk is, kan het peil wel snel oplopen tot ca. 1 meter per 12 uur. Gedurende het jaar stroomt gemiddeld 80% van het Rijnwater via de Nieuwe Waterweg, vanwege de sturing van de Haringvlietsluizen. Deze staan pas bij hoge afvoeren ($>6.000 \text{ m}^3/\text{s}$) volledig open. Bij verlaagde Rijn-afvoeren ($<1700 \text{ m}^3/\text{s}$) zijn ze op een restdebiet van $25 \text{ m}^3/\text{s}$ na geheel gesloten en bij nog lagere Rijn-afvoeren ($<1100 \text{ m}^3/\text{s}$) valt ook dat weg.

C. Morfodynamiek:

Sediment bereikt de RMM zowel vanuit zee en als vanuit de rivieren. Door de afsluiting van het Haringvliet is de getijstrooming veranderd, waardoor de waterlopen langs de Zuidrand nu te ruim zijn voor de hoeveelheid water die erdoorheen stroomt en er sedimentatie plaatsvindt. In de Merwedede en Hollands Diep bezinkt vooral rivierzand (ca. $0,7 \text{ Mton/jr}$), dat daar wordt opgebaggerd, en in het Haringvliet slib (vanuit zee en rivieren), dat voor een langzame verondieping zorgt. Tijdens harde wind wervelt een klein deel hiervan op, dat op de voormalige kwelders neer kan slaan, maar de hoeveelheden zijn zeer gering en hoogstens lokaal. In de Biesbosch slaat bij gebrek aan doorstroming veel rivierslib neer in de voormalige en ook in de nieuw gegraven kreek. Een deel van het rivierslib stroomt met het zoete water mee tot in de Noordrand, waar het zich in de grenszone tussen zoet en zout mengt met slib uit zee dat via de Nieuwe Waterweg naar binnen stroomt. Dit slib slaat vooral neer in het rustige water van de havens waar het na verloop van tijd wordt opgebaggerd en wordt afgevoerd. Ook ontstaat er lokaal bij de zouttong een natuurlijke sedimentdrempel van overwegend fijn sediment. Zand uit zee (ca. $1,8 \text{ Mton}$) slaat vooral neer in de verdiepte Nieuwe Waterweg, wordt daar opgebaggerd en ook uit het systeem afgevoerd. Een bijzondere plaats in het systeem nemen de tussenlopen tussen Noord- en Zuidrand in omdat daar erosie plaatsvindt. Dit is het gevolg van de afsluiting van de Haringvliet waardoor de Zuidrand een deel is geworden van de komberging van de Nieuwe Waterweg. Door de toegenomen stroomsnelheid in deze tussenlopen vindt hier erosie plaats, waarvan het materiaal met de dominante ebstrooming naar de Nieuwe Waterweg wordt gevoerd. Door het wegvallen van de getijslag is in de Zuidrand de golfdynamiek een dominante factor geworden voor de erosie van platen en slikken. In de eerste decennia na de afsluiting is hierdoor veel sediment afgeslagen en naar de diepe geulen verplaatst. Inmiddels zijn hier vooroevers aangelegd, wat het proces weer heeft stilgelegd. Samengevat zien we dat de morfodynamiek sterk wordt bepaald door het menselijk handelen en nergens meer volwaardig bijdraagt een de voor natuurwaarden benodigde estuariene dynamiek.

D. Zoetzoutdynamiek:

De belangrijkste invloed van de rivieren op de RMM is de aanvoer van zoetwater met daarin aanwezige nutriënten en andere stoffen. Tweemaal daags dringt het zoute water met de getijgolf de RMM binnen via de Nieuwe Waterweg. Onder gemiddelde omstandigheden komt het zoute water halverwege de Nieuwe Maas en in de monding van de Oude Maas het zoete rivierwater tegen, waarbij zoet en zout min of meer gescheiden blijven omdat het zout zich over de bodem beweegt en het zoet daarbovenop zeewaarts in de richting van de afvoer. De mate van gelaagdheid is sterk afhankelijk van de rivierafvoer en neemt af bij lagere rivierafvoeren. In de Oude Maas staat de grens meestal bijna verticaal en is de overgangzone kort. De grens waarbij het zoutgehalte in het water toeneemt, boven op de achtergrondwaarde van ca. 100 mg/l in de Rijn, ligt bij gemiddelde rivierafvoer in de Nieuwe Maas ter hoogte van de Erasmusbrug en in de Oude Maas ter hoogte van de Beerenplaat. Maar dit wisselt naargelang het springtij of doottij is en ook een hardere wind kan de grens in enkele uren $10 - 20 \text{ km}$ verder opschuiven. Bij hoge rivierafvoeren (als meer $>5.000 \text{ m}^3/\text{s}$ in de RMM aankomt) is de hele RMM tot aan de monding van de Nieuwe Waterweg bij eb gevuld met zoetwater en bereikt een deel van het zoete water ook de Noordzee. Bij lagere rivierafvoeren (als minder dan $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ in de RMM aankomt) komt het zout verder landinwaarts en bij zeer lage afvoeren ($<700 \text{ m}^3/\text{s}$) kan de Hollandsche IJssel en Lek bereikt worden en langdurige beperkingen geven voor de zoetwaterinname. Door via oostelijke aanvoerroutes water aan te voeren naar de Hollandsche IJssel en Lek kan verzilting daar lokaal effectief worden tegengegaan. In combinatie met storm kan het zoute water nog verder komen en dan kan zelfs de Zuidrand bereikt worden, waardoor daar het zoutgehalte oploopt. Wanneer dit samenvalt met een lage rivierafvoer en gesloten Haringvlietsluizen, blijft het zout in het Haringvliet en kan het elk getij terugstromen via het Spui naar de Noordrand. Hierdoor kunnen de concentraties bij het innamepunt Bernisse langdurig te hoog zijn voor zoetwaterinname. Voor het ecologisch functioneren van het estuarium in de huidige staat, spelen de zoet-zoutgrens en de bijbehorende brakwaterzone alleen een rol voor trekvissen die zich hier tijdens de optrek enige tijd in ophouden en acclimatiseren. Voor de rest is de rol beperkt, omdat de overgangzone

zich vrijwel geheel in de verstedelijkte watergangen bevindt. In het kader van het Kierprogramma zijn proeven gedaan om ook in het Haringvliet, waar beduidend meer ruimte is voor ontwikkeling van belangrijke habitats langs zoet-zout overgangen, een min of meer stabiele brakwaterzone te vormen, door tijdens vloed de Haringvlietsluizen gedeeltelijk open te zetten. Vanwege sterke stratificatie in dit rustige water is dit niet gelukt. Om stratificatie te voorkomen moet weer meer getijdendynamiek en stroming worden toegelaten.

Menselijke invloed & ingrepen

De invloed van de mens op de RMM was er al vroeg op het landgebruik (ontginning kleigebieden vanaf begin jaartelling en veengronden vanaf 800). Met name de inklinking had grote gevolgen voor het waterbeheer en maakte vanaf 1.200 dijkanaanleg nodig, waardoor de aanvoer van sediment stakte naar de gorzen en kleiige kommen. In de eeuwen daarna werden de eilanden aaneengesmeed door tussenliggende waterlopen af te dammen en ontstond het huidige grondplan van eilanden en waterlopen. Vanaf ongeveer 1500 was men ook in staat om rivieren vast te leggen, nieuwe lopen te graven en meren droog te leggen, wat leidde tot een verdere afname van het natuurlijk areaal. Met baggerwerk werden de rivieren op diepte gehouden, waarmee de morfodynamiek verder werd beheerst. Vanaf 1800 was men in staat om nieuwe rivierlopen te graven (Nw Merwede en Nw Waterweg), wat grote gevolgen had voor de water- en sedimentverdeling in de RMM. Zo nam door het uitdiepen van de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas de mate van verzilting in het achterland toe. Vanaf 1970 volgde tenslotte het afsluiten van de grotere zeearmen, Brielse Maas en Haringvliet, en het aanleggen van grote havencomplexen, die door een stelsel van op diepte gehouden vaargeulen met elkaar, de Noordzee en het achterland verbonden zijn. De estuariene dynamiek met getijstroming, natuurlijke plaatopbouw en zoet-zoutovergang is daardoor ook in de Zuidrand geheel verdwenen. Ook nam in de tussenlopen de stroming sterk toe waardoor deze lopen netto zijn gaan eroderen. Door de opeenvolging van klei- veen- en zandlagen in de bodem, ontstaan hierbij lokaal diepe ontgrondingskuilen, die gemonitord worden om te voorkomen dat ze een risico vormen voor de stabiliteit van oevers, dijken en infrastructuur. In totaal zijn er ruim 100 ontgrondingskuilen in het gebied. Wat de ecologie betreft is de RMM vandaag de dag in een toestand gekomen waar veel van de voor ecologie waardevolle getij-, zout- en sedimentdynamiek ingrijpend is veranderd en de kansen voor estuariene natuur zeer beperkt zijn.

Sedimentbalans

Tabel 3-10 Gewicht zand en slib dat de rivieren naar RMM voeren; gemiddelde over de periode 1991-2010. (Verhaal van het Sediment, Frings et al. 2017 en Frings et al., 2019).

	Zand (Mton/jaar)	Slib (Mton/jaar)
Waal	0,5	1,3
Lek	0,05	0,2
Maas	0,2	0,4
Totaal	0,7	1,9

De massa aan zand en slib die netto de Nieuwe Waterweg inkomt vanuit zee kent een grote variatie en is zeer onzeker, maar wordt door Cox et al. (2021) geschat op 1,83 Mton (+/- 1,43) aan slib en 1,91 Mton (+/-0,55) aan zand. NB. Baggervolumes zijn vaak veel groter (zie hieronder), maar die worden bepaald in m³ (natte) bagger.

Tabel 3-11 Gewicht zand en slib dat vanuit de Noordzee de RMM binnenkomt (Cox et al., 2021).

	Zand (Mton/jaar)	Slib (Mton/jaar)
Noordzee	1,8 (+/-1,43)	1,91 (+/-0,55)

Naast de specifieke ingrepen in het beheergebied laat RWS nautisch baggeronderhoud uitvoeren door de markt. In 2021 bedroeg dit volume ca. 1,7 miljoen m³ sediment, waarvan 300.000 m³ (zand) uit de Merwedens en een vergelijkbare hoeveelheid (zand en slib) uit het Hollands Diep. Een deel van dit materiaal werd tot voor kort op de markt gebracht, maar dat is nu niet meer toegestaan en sindsdien wordt het hergebruikt door er erosiekuilen mee aan te vullen. Gebaggerd slib wordt naar zee afgevoerd en gestort op de zgn. Loswal. Volgens Cox (2022) liep de totale massa aan baggerwerk in de vaarwegen en havens in de periode 2000 tot 2012 op van 4 tot 7 Mton. Dit is ongeveer de hoeveelheid sediment die vanuit de zee en de rivieren het gebied bereikt, wat betekent dat er weinig tot geen natuurlijke sedimentatie plaatsvindt in het gebied. Tussen 2012 en 2019 is extra baggerwerk uitgevoerd (tot 8 à 10 Mt/j) t.g.v. de verdieping van de Nieuwe Waterweg

en Nieuwe Maas. Door erosie en baggerwerkzaamheden laten bijna alle wateren in 2021 een lagere gemiddelde bodemligging zien dan in 2008: gemiddeld 1 m lager in de Oude Maas en de verdiepte Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas, maar ook de Lek, Dordtse Kil en de Merwedede laten een daling zien. In de Oude Maas varieert de mate van erosie sterk per locatie: in ontgrondingskuilen kan soms meerdere meters erosie plaatsvinden in enkele jaren tijd.

Tabel 3-12 Sedimentatiesnelheid per fysiotop zonder interventies voor de Rijn-Maasmonding.

Fysiotop	Snelheid (mm/jaar)	Motivatie / bron
<i>Noordrand</i>		
Slikken	19	Geen informatie over bekend. Maar het areaal is erg klein, en er is voldoende sediment beschikbaar. Daarom wordt aangenomen dat de slikken meegroeien met ZSS
Kwelders	19	Geen informatie over bekend. Maar het areaal is erg klein, en er is voldoende sediment beschikbaar. Daarom wordt aangenomen dat de slikken meegroeien met ZSS
Ondiep water	19	Als diep water
Diep water	ZSS (19 mm/jaar)	De nieuwe waterweg is sterk verdiept in de afgelopen jaren. De huidige diepte wordt in stand gehouden door baggeren. Aangezien de gebaggerde vaarwegdiepte gebaseerd is op het vrije wateroppervlak neemt de bodemhoogte toe met ZSS.
<i>Tussenwateren</i>		
Slikken	N.v.t.	Areaal is klein
Kwelders	N.v.t.	Areaal is klein
Ondiep water	-20 mm/jaar	Als diep water
Diep water	-20 mm/jaar	De Dordtse Kil is tussen 2000 en 2018 verdiept met ~10 cm (~5 mm/jaar); het Spui met ~0.8 meter (40 mm/jaar) (Cox et al., 2021). Het is waarschijnlijk dat deze negatieve trend doorzet, ook bij ZSS, omdat het systeem vooral reageert op historische menselijke ingrepen. Er wordt daarom uitgegaan van een erosiesnelheid van 20 mm/jaar.
<i>Zuidrand</i>		
Slikken	N.v.t.	Nauwelijks intergetijdengebied
Kwelders	N.v.t.	Nauwelijks intergetijdengebied
Ondiep water	N.v.t.	onbekend
Diep water	0 – 19	Het Hollands Diep zou 4 meter zijn aangeslibd zonder baggeronderhoud tussen 2000 en 2018, maar door baggerwerkzaamheden is de bodemverandering gering. (<10 cm) – Cox et al., 2021. Daarom wordt de bodemverandering in het HD gelijk gehouden aan ZSS (bij toenemende zeespiegel neemt de te onderhouden diepte toe), gelijk aan 19 mm/jaar. Bodemveranderingen in het Haringvliet zijn zeer gering (ongeveer 0).
<i>Getijdenwateren</i>		
Slikken	19	Geen informatie over bekend. Maar het areaal is erg klein, en er is voldoende sediment beschikbaar. Daarom wordt aangenomen dat de slikken meegroeien met ZSS
Kwelders	19	Geen informatie over bekend. Maar het areaal is erg klein, en er is voldoende sediment beschikbaar. Daarom wordt aangenomen dat de slikken meegroeien met ZSS
Ondiep water	19	Als diep water
Diep water	19	Alle getijdenwateren (de Lek, Merwedede) zouden enkele cm/s per jaar aanslibben als ze niet werden onderhouden (Cox et al., 2021). Ook hier geldt daarom dat de bodemstijgsnelheid gelijk wordt gehouden aan ZSS.

Huidige toestand fysiotopen

In de Rijn-Maasmonding komen de rivieren Rijn en Maas samen in een gebied dat in grote lijnen bestaat uit een netwerk van getijdenrivieren in het noorden en een (voormalige) zeearm met binnendelta in het zuiden. Het getij is tot ver bovenstrooms merkbaar en het water kan zoet, zout of brak zijn. We onderscheiden hierin 3 fysiotopen:

1. Kwelders: In de RMM is het kwelderareaal al eeuwenlang aan het afnemen door inpoldering, ophoging van buitendijks gebied, verstenen van oevers en aanleg van havens. Door het wegvallen van het getij in de Zuidrand na de afsluiting van het Haringvliet kwam in een klap bijna 6.500 ha (van de 9.000 ha) buiten bereik van het volledige getij en de natuurlijk zoet-zoutovergang te liggen. Dit areaal functioneert sindsdien ook niet meer als kwelder in die zin dat het regelmatig door getijden wordt overstroomd. Het zijn nu begroeide oeverlanden geworden die alleen nog incidenteel overstroomd, bv tijdens perioden van hoge rivierafvoer. Het nog resterende areaal kwelders is ook van een mindere kwaliteit omdat de dynamiek er zeer beperkt is. Sinds 1980 zijn enkele polders weer aangesloten op het buitenwater en langs de wateren in de noordrand is er sindsdien een heel bescheiden herstel van zoetwatergetijnatuur. In de zuidrand liggen grotere buitendijkse gebieden, maar is de getijslag te gering voor kweldervorming. Sedimentafzetting vindt er niet meer plaats waardoor successie de overhand heeft en kenmerkende pionier milieus verdwijnen. Doordat de afsluiting is de natuurlijke zoet-zoutgrens verdwenen en functioneert dit deel van het gebied als een laag dynamisch zoetwatermeer. Bij huidige inrichting zal met het stijgen van de ZSS het gemiddelde waterpeil binnengaats in de RMM meestijgen. Afhankelijk van de snelheid van ZSS en de hoeveelheid beschikbaarheid van sediment kunnen de bestaande kwelders die stijging volgen. De kans daarop is het grootst langs de Noordrand, waar iig voldoende sediment beschikbaar is om het beperkte buitendijkse areaal te voorzien. Langs de Zuidrand is vanwege het gebrek aan getij onvoldoende sediment beschikbaar en zullen de bestaande kwelders verdrinken. Andere laaggelegen gebieden in de Zuidrand komen dan gaandeweg wel binnen het bereik te liggen van het getij, maar ook daar is het sedimentaanbod in het water, zolang er geen getij is, te gering voor aangroei. De enige mogelijkheid om natuurlijke kweldervorming op gang te brengen is door het getij te herstellen langs de zuidrand waardoor naast de waterbeweging ook de sedimentstroom weer op gang komt. In het middengebied langs de tussenlopen is de getijslag na de afsluiting ongeveer gehalveerd en hier zijn nog buitendijkse arealen waar herstel mogelijk is, bv door kades weg te nemen. Het areaal is echter beperkt omdat hier ook veel gebieden zijn opgehoogd (oa met havenslib) en buiten het bereik van het getij zijn komen te liggen.
2. Slikken en platen. Tot begin 20^e eeuw waren nog uitgestrekte platen en slikken in het Haringvliet en de Biesbosch te vinden, die na de afsluiting van het Haringvliet grotendeels verdronken omdat het gemiddelde waterpeil ca. 50 cm hoger kwam te liggen en de getijslag en -stroming verdween. Door golfslag erodeerden daarna ook veel slikkige oevers waardoor uiteindelijk vrijwel niets resteert. Alleen langs de Noordrand zijn er lokaal nog slikken in het zoete getijdengebied en recent is in de Sophiapolder langs de Noord een flink areaal hersteld. De **verwachting** voor de toekomst is hetzelfde als bij de kwelders, alleen speelt bij herstel ook mee dat veel voormalige slikken en platen na de afsluitingen door erosie zijn verdwenen en de waterdiepte daar nu groter geworden is. Voor herstel is naast het introduceren van getij daarom ook weer voldoende zandig sediment nodig en voldoende hoge getijsnelheden om dat sediment tot op de platen te brengen. Dit kan alleen als de Haringvlietssluzen en dam volledig worden verwijderd, zodat de stroomsnelheden weer voldoende hoog worden voor natuurlijke plaatopbouw.
3. Permanent water. Sinds de afsluiting van de Haringvliet is het hydrologisch functioneren sterk veranderd en in navolging daarop ook de morfodynamiek. De noordelijke lopen zijn nog dynamisch, de zuidelijke vrijwel niet. Rivierwater domineert in een groot deel van het gebied en zoet-zoutovergangen zijn er alleen in de mondingen van de Oude Maas en Nieuwe Maas te midden van harde oevers. Het meeste water wordt als scheepvaartweg beheerd, wat betekent dat al het aangevoerde sediment wordt weggebaggerd. De meeste oevers zijn vastgelegd, zodat er geen sedimentuitwisseling meer is met de oeverzones, en er is weinig variatie zoals verschillen in waterdiepte en nevengeulen. Door de sterke stroming in de tussenwateren tussen de Noord- en Zuidrand vindt daar erosie plaats van de onderwaterbodem. Bij huidige inrichting van het systeem, zal met het stijgen van de ZSS ook het gemiddelde waterpeil binnengaats meestijgen en het areaal 'permanent overstroomd' verder toenemen. De invloed van de zee zal waarschijnlijk vaker tot verder binnengaats doordringen. Op het gebied van morfodynamiek worden geen grote veranderingen verwacht.

Tabel 3-13 Huidige toestand fysiotopen in de Rijn-Maasmonding m.b.t. areaal (boven), de mate waarin de estuariene dynamiek nog functioneert (midden) en de mate waarin de connectiviteit (gradiënten) nog op orde is.

Rijn-Maasmonding						
Arealen	Slikken-platen	Kwelders	Oevers begroeid (buiten bereik getij)	Ondiep water (-5 m tot GLW)	Diep water (onder -5m)	
Oppervlakte	850 ha (2%)	950 ha (2%)	17.650 ha (31%)	12.050 ha (25%)	16.850 ha (29%)	Arealen
Noordrand						areaal grotendeels afwezig
Tussenwateren						areaal beperkt aanwezig
Zuidrand						areaal in redelijke mate aanwezig
Getijdenrivieren						areaal nog in takt
Dynamiek	Getijden-dynamiek	Rivierdynamiek	Morfodynamiek			Dynamiek
Noordrand						dynamiek grotendeels verdwenen
Tussenwateren						dynamiek gedeeltelijk aanwezig, functioneert onvoldoende
Zuidrand						dynamiek nog gedeeltelijk aanwezig
Getijdenrivieren						dynamiek nog in natuurlijke staat
Connectiviteit	Zout-zoet verdeling	Tussen de gebieden	Tussen land-water			Connectiviteit
Noordrand						verbindingen grotendeels verdwenen
Tussenwateren						verbindingen deels aanwezig, functioneren onvoldoende
Zuidrand						verbindingen nog gedeeltelijk aanwezig
Getijdenrivieren						verbindingen nog in takt

Stuurknoppen

Herstel getijdynamiek. Verreweg de belangrijkste stuurknop voor het verbeteren van de natuurwaarden is het herstel van het getij in het Haringvliet, de dominante kracht van ieder estuarium. Het zorgt niet alleen voor meer hydrodynamiek, maar ook herstelt de beweging van sediment, waardoor vorming van platen en kwelders weer op gang kan komen. Voor de hele RMM betekent herstel van getij dat de disbalans van veel dynamiek in het noorden en weinig in het zuiden wegvalt, wat ook positief is voor de tussenlopen waar nu hoge stroomsnelheden en extra erosie speelt. Hiervoor is een grotere opening in de Haringvlietdam nodig dan alleen de variant stormvloedkering, omdat alleen de stroomsnelheden in aan de Zuidrand voldoende hoog zijn voor natuurlijke plaatopbouw.

Herstel areaal: Ook is er behoefte aan (veel) meer ruimte, vooral in de Noordrand, waar het watersysteem in een keurslijf ligt van stenen oevers en nauwelijks buitendijks gebied. Maar ook langs de Zuidrand is er de wens voor meer voorland waar dat ontbreekt, bv door dijken terug te leggen.

Rivierdynamiek: water afvoeren of bergen: Met het stijgen van de zeespiegel zal het oplopende deel van de verhanglijn van de rivier verder oostelijk opschuiven en moeten we overwegen of de Biesbosch niet meer een bergingsgebied is dan een doorstroomgebied bij hoge rivierafvoeren.

Morfodynamiek: sediment beter benutten: Sediment is een belangrijke bouwsteen voor het laten meegroeien van het estuarium. Er wordt nog steeds veel zand en slib aangevoerd, maar het beheer is in vrijwel de hele RMM gericht op het afvoeren en niet op het nuttig gebruiken. Door sedimentatie weer een plek te geven in het systeem kan het buitendijkse gebied meegroeien met de stijgende zeespiegel waardoor kwelders en slikken in stand kunnen blijven en de dimensies van de geulen niet verder toenemen, wat ook gunstig is voor een vermindering van de verzilting

Meerwaarde voor drie hoofdoelen

Tabel 3-14 Meerwaarde uitbreiding dynamiek in de Rijn-Maasmonding voor drie hoofdoelen

stuurknop	Hoogwateropgave	Zoetwateropgave	Natuuropgave
Herstel getijdendynamiek	1). Voorlanden hogen op, 2). Kleiner risico op erosiekuilen in tussentopen	1). Zouttong komt verder naar binnen (neg),	1). Bestaand voorland wordt weer intergetijdengebied 2). Vorming kwelders en platen komt weer op gang
Areaalvergroting	1). Meer ruimte voor waterberging, 2). Lagere stroomsnelheden 3). Bosontwikkeling (als golfremmer) op voorland wordt mogelijk	1). Meer ruimte voor zoetwaterbuffers	1). Uitbreiding naar arealen nodig voor duurzame instandhouding. 2). Meer ruimte voor wilgenvloebossen 3). Introductie nieuwe soorten door groot areaal behoeven.
Anders omgaan met rivierdynamiek	1). Meer ruimte voor waterberging, 2). Bosontwikkeling (als golfremmer) op voorland wordt mogelijk	1). Rivierwater anders verdelen over lopen en meer oostelijk innemen ipv in mondingsgebied.	1). Ruimte voor natuurlijke successie in Biesbosch. 2). Meer ruimte voor natuurlijke zoet-zoutovergangen.
Sediment beter benutten	1). Meer sediment beschikbaar voor meestijgen land, waardoor het begroeid blijft en niet verdrinkt. 2). Stormvloed dringt minder hoog en ver de zeearmen binnen.	1). Zouttong dringt minder ver de zeearmen in	1). Meer sediment beschikbaar voor meestijgen land en behoud van begroeide gebieden.

3.4 Bovenrivieren

Korte systeembeschrijving volgens abiotische sleutelfactoren

In deze factsheet richten we ons op het hoofdriversysteem bestaande uit de Rijntakken en de Maas waar geen invloed is van het getij. Op dit moment is dat oostelijk van de stuw bij Hagestein op de Lek, op de Waal bij de overgang naar de Boven Merwede bij Woudrichem en op de Maas bij Geertruidenberg. Een groot deel van onderstaande tekst volgt uit 'Het verhaal van de Rivier'¹

A. Rivierdynamiek

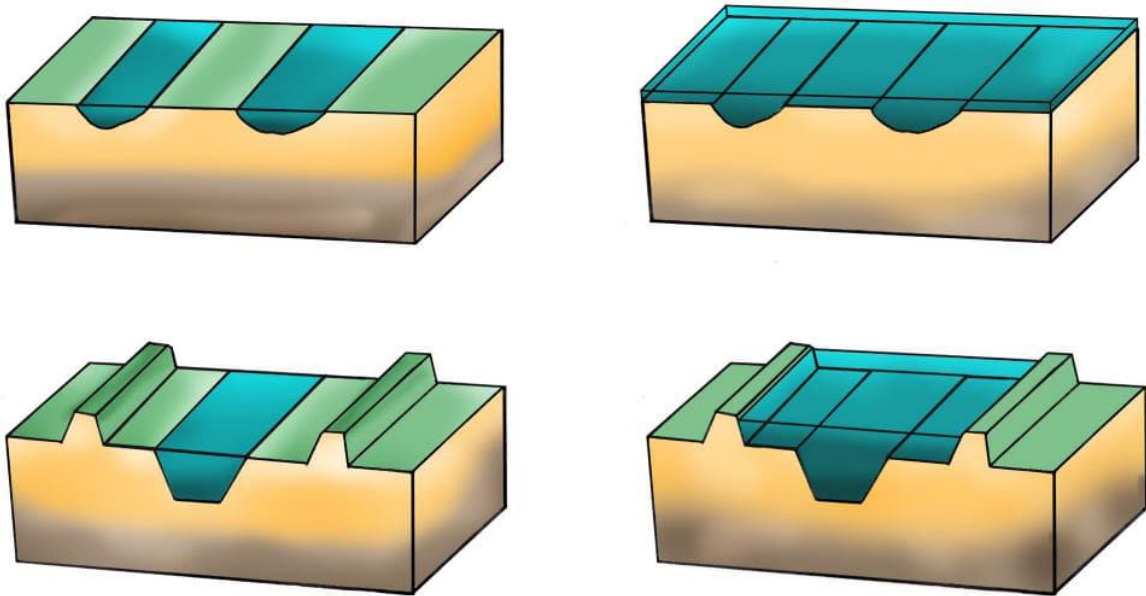
De Rijn en de Maas zijn heel verschillende rivieren. Ook zijn er grote verschillen tussen de verschillende Rijntakken en tussen verschillende trajecten in zowel Rijn als Maas. De Maas is een typische regenrivier met vooral in Zuid-Limburg plotselinge hoogwaters. In droge perioden is er soms wekenlang nauwelijks afvoer. De maandgemiddelden variëren van ongeveer 100 m³/s in de droogste maand tot meer dan 500 m³/s in de natste: een factor 5 verschil. Dit grillige afvoerregime komt doordat het stroomgebied grotendeels uit Middelgebergten (Ardennen) bestaat met weinig buffercapaciteit in de bodem, waardoor de rivier snel reageert op veel neerslag. Om de Maas bij lage afvoeren toch bevaarbaar te maken is deze over een grote lengte gekanaliseerd en gestuwd. De Rijn kent een veel minder grillig afvoerregime, met een 'betrouwbare' basisafvoer en hoogwaters waaraan (volgens de meest recente inzichten) een maximum lijkt te zitten. De maandgemiddelden variëren van ong. 1650 (droogste maand) tot zo'n 2750 m³/s (natste maand). Dit gematigde afvoerregime komt doordat de Rijn deels gevoed wordt door (sneeuw)smeltwater vanuit de Alpen, wat een flinke vertraging oplevert, maar ook door de grootte en vorm van het stroomgebied. Veel grote zijrivieren dragen bij aan de afvoer, en in zo'n groot stroomgebied is het zelden overal tegelijk droog of heel erg nat.

B. Morfodynamiek

Oorspronkelijk wandelden de rivieren in bredere stroomgordels door hun eerder in het laagland afgezette sedimenten. Ze voeren veel sediment aan(zand, klei en soms grind), waardoor ze zichzelf lokaal verstikten en ze zich moesten verleggen naar een route met minder weerstand. Voordat de rivieren waren bedijkt zetten zij in het laagland tijdens hoogwater zand af in een zone tot ca 1 km breed evenwijdig aan de rivier, de oeverwal, en daarachter klei in het komgebied. Door de regelmatige verleggingen ontstond in de loop van duizenden jaren een patroon van zandige stroomgordels temidden van kleiige kommen. Sinds de bedijking

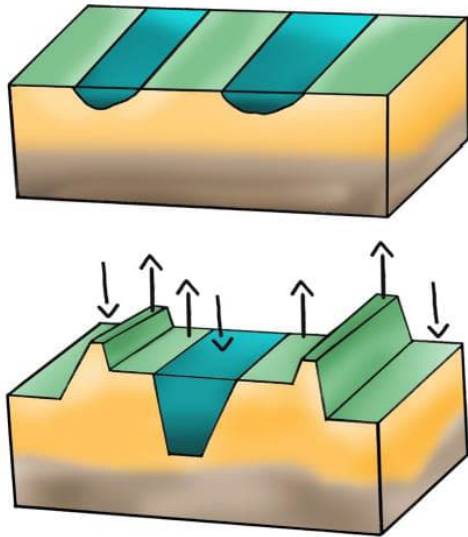
¹ <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/programma-projecten/rivierkennis/verhalenreeks-verhaal-rivier/verhaal-rivier/>

vanaf de 14e eeuw is het overstroombare gebied sterk afgenomen en is de morfodynamiek beperkt tot het buitendijkse gebied. (Figuur 3.1).



Figuur 3.1 Voor de bedijking stroomde het water van Rijn en Maas door meerdere geulen (linksboven) en zette de rivier zijn sediment over grote delen van ons land af (rechtsboven). Nu gaat de afvoer door één geul (linksonder) en kan de rivier zijn sediment bij hoogwater alleen tussen de dijken kwijt (rechtsonder) (uit: Verhaal van de Rivier)

Vanaf de normalisatie van de rivier aan het eind van de 19e eeuw is deze dynamiek verder aan banden gelegd door het vastleggen van de rivier. Sindsdien vond op de uiterwaarden vooral sedimentatie plaats en alleen in de bedding nog erosie. Door het vastleggen van het zomerbed en de aanleg van stuwen bovenstrooms is de aanvoer van sediment uit Duitsland afgenomen. Door dit tekort nemen met name de Rijnakken binnen Nederland in het bovenstroomse deel sediment op vanuit de bedding, die daardoor inslijt. Vanwege deze verdieping treden de rivieren daar nog maar weinig buiten hun oevers en omdat er vaak hoge zomerkades zijn die het overstromen verder beperken, kan sediment tegenwoordig bij hoogwater nog maar over het beperkte oppervlak van het winterbed worden afgezet. Verder stroomafwaarts is de insnijding minder groot en vindt nog wel sedimentatie plaats, vooral op de overgang naar het Benedenrivierengebied. Dit proces is versterkt sinds door de aanleg van de Haringvlietdam de getjebeweging is gedecimeerd en de transportcapaciteit van het water op de overgang naar de Rijn-Maasmonding (RMM) sterk is afgenomen. De aanvoer van riviersediment is overigens nooit van groot belang geweest voor de ontwikkeling van de Rijn-Maasmonding en de kustzone, daarvoor waren de hoeveelheden te beperkt. Een goede illustratie hiervan is de Biesbosch waar na de Elisabethvloed in 1421 een enorme binnensee ontstond die ca 500 jaar later nog maar gedeeltelijk was opgevuld. Het fijnere sediment dat de rivieren transporteren kan zich wel verder over de RMM verspreiden en komt vooral terecht in de Rotterdamse havens, het Hollands Diep en (via de IJssel) in het Ketelmeer. Het winterbed wordt intussen steeds hoger en het zomerbed, door de sterke versmalling van de geulen, steeds dieper (Figuur 3.2). Dat laatste geldt vooral voor de vrij afstromende rivieren. In de gekanaliseerde Maas en in de Nederrijn-Lek bezinkt achter de gesloten stuwen zand en slib dat bij hoogwater, als de stuwen opengaan, grotendeels weer wegspoelt.



Figuur 3.2 Ten opzichte van de rivieren van voor de ingrepen van de mens (boven) hebben de bedijking en normalisaties het gedrag van de rivieren en het rivierenlandschap drastisch veranderd (onder): het zomerbed daalt en het winterbed stijgt, de dijken worden steeds hoger en het land achter de dijken daalt. (uit: Verhaal van de Rivier)

Menselijke invloed & ingrepen

Menselijke ingrepen hebben de natuurlijke dynamiek van de Rijn en Maas sterk veranderd. De aanleg van dijken heeft geleid tot een sterke reductie van het overstroombare gebied en de aanleg van kribben en versteende oevers zorgde voor een rivier die niet meer vrij kan bewegen. Ingrepen zoals stuwen bij de Maas en zomerkades bij de Rijntakken legden de hydrodynamiek en in mindere mate de morfodynamiek nog verder aan banden. Doordat de overstromingsgebieden van de rivier verkleind zijn en de oevers zijn vastgelegd, kan de rivier alleen nog sediment opnemen vanuit het zomerbed; waardoor de rivier dieper is geworden en is de natuurlijke uitwisseling van water, sediment en biota tussen hoofdgeul en uiterwaarden sterk verstoord. De functie van de rivier om sediment op de uiterwaarden af te zetten en daarmee de grond vruchtbaarder te maken is sterk verminderd net als de mogelijkheid om sediment vanaf de oevers mee in transport te nemen bij hoogwater. Doordat de uiterwaarden minder vaak overstromen en grondwaterstanden als gevolg van uitschuring van het zomerbed zijn gedaald, vindt ook verdroging plaats wat leidt tot een verlies aan biodiversiteit. In grote delen van de uiterwaarden is de overstromingsfrequentie nu afgenomen tot nog maar eens in de 2 of 3 jaar, waar dat voorheen 20 tot 30 dagen was. Doordat het overstroombare areaal van de rivier versmald is (winterbed is verkleind) zijn de waterstanden bij hoogwater toegenomen. Deze menselijke ingrepen om de dynamiek aan banden te leggen hadden altijd als doel om andere functies vooruit te helpen: zo zorgde de aanleg van zomerkades voor meer beschikbare grond voor landbouw, het vastleggen van de rivier met kribben en stuwen voor een meer continue scheepvaart en de aanleg van de winterdijken voor een (veel) hogere waterveiligheid in de binnendijkse gebieden. De bodemdaling van het zomerbed die optrad na het vastleggen van de rivier heeft inmiddels ook negatieve gevolgen voor de scheepvaart, vooral door de bodembescherming in de rivier (zoals de vaste laag bij Nijmegen) die nu letterlijk als drempels voor de scheepvaart fungeren. Schepen kunnen hierdoor bij lage afvoeren minder zwaar worden beladen.

Bij de Rijn zien we inmiddels weer een kleine toename van het voor de rivier beschikbare oppervlak door de dijkverleggingen en bypasses in het kader van Ruimte voor de Rivier, maar in de Maasvallei heeft het ophogen van de noedkades (die na de overstromingen van 1993 en 1995 zijn aangelegd) tot primaire keringen, nog heel recent bijgedragen aan fors ruimteverlies.

Omdat sommige Rijntakken dreigden te verzanden of juist te veel water trokken, werd het reguleren van de afvoerverdeling bij Pannerden en de IJsselkop al vanaf de 19e eeuw in gang gezet; oa door de aanleg van het Pannerdens Kanaal reden om de afvoerverdeling over de Rijntakken bij de Pannerdensche Kop en de IJsselkop vast te leggen. Maar splitsingspunten en afvoerverdelingen zijn van nature instabiel en in het verleden zijn hier al vaak correcties doorgevoerd. Ongelijke erosie van het zomerbed (de Waal erodeert sneller dan de andere takken) leidt tot een verschuiving van de afvoerverdeling; er gaat steeds een beetje minder water naar de IJssel. Dit heeft negatieve gevolgen voor de vullingsgraad van het IJsselmeer en daarmee voor de zoetwatervoorziening van Noord-Nederland.

Voor de toekomst is de verwachting dat als gevolg van klimaatverandering we rekening houden met:

- hogere piekafvoeren en vaker hoogwaters.
- lagere waterstanden tijdens perioden van laagwater; perioden die bovendien langer kunnen duren. De Maas, als regenrivier, kan tijdelijk vrijwel stilvallen;
- verdergaande bodemerosie in het zomerbed;
- een verder scheefftrekken van de rivierafvoer naar de Waal ten kostte van het Pannerdens Kanaal en daarmee (vooral bij lage afvoeren) de watervoorziening van Noord-Nederland.
- meer verdroging van uiterwaarden doordat de grondwaterstand daalt als gevolg van lagere waterstanden in de rivier en daardoor verlies aan diversiteit van de riviernatuur.

Lagere en langer durende laagwaters betekenen dat er minder water te verdelen is en er onvoldoende water door de vrij afstromende rivieren stroomt om volledig beladen te kunnen varen. De Maasafvoer kan zover teruglopen dat het niet meer mogelijk is om de stuwpanden van voldoende water te voorzien om uitzakken te voorkomen. Bovendien leidt het vaker stilstaande water tot een verslechtering van de waterkwaliteit.

Vaker optredende lage Rijnafvoeren zorgen voor meer problemen bij het innemen van zoetwater in de RMM omdat de tegendruk wegvalt die nodig is om in de Nieuwe Waterweg de zouttong tegen te houden.

Sedimentbalans

De zandfractie in de Rijn is voornamelijk afkomstig uit het buitenlandse deel van het stroomgebied. In het tijdvak 1990-2010 werd via de Boven-Rijn per jaar gemiddeld 400.000 (+/- ca. 50%) m³ zand Nederland binnen gevoerd (Barneveld et al., 2022) applewebdata://37da079d-58f5-4d27-9fed-54d32848d430/. Daarvan stroomt het grootste deel 345.000 (+/- ca. 50%) m³ via de Waal en de rest via het Pannerdens Kanaal. De Waal ontvangt dus relatief het meeste, want terwijl deze riviertak 65% van het rivierwater afvoert, wordt daarmee 85% van het zandtransport doorgevoerd. De Neder-Rijn ontvangt bij de IJsselkop 53.000 (+/- ca 50%) m³ en de IJssel 29.000 (+/- ca 50%) m³. Bij deze twee riviertakken is de verhouding tussen debiet en zandvolume wel ongeveer vergelijkbaar. Zand wordt getransporteerd zodra de stroomsnelheid groter is dan 0,5 m/s (fijn zand) tot 0,7 m/s (grof zand) en verplaatst zich vooral 'stuiterend' over de bodem. Naarmate de afvoer toeneemt wordt een steeds groter deel in de waterkolom opgenomen. De stroomsnelheden in de uiterwaarden zijn momenteel vrijwel nergens hoog genoeg om zandtransport op gang te brengen, ook niet in de nevengeulen.

Het slibvolume dat de Rijn doorvoert is veel groter dan het zandvolume: tussen 1990 en 2010 kwam 2,1 Mton klei via de Boven-Rijn het land binnen. Tijdens lager dan gemiddelde afvoeren is het volume slib relatief gering (10-30 g/m³). Er wordt dan maar weinig slib vanuit de zijbeken stroomopwaarts in het systeem naar de rivier gevoerd. Slib kan, mits het los op de bodem ligt, al in beweging komen zodra het water licht gaat stromen. Bij toenemende afvoer neemt het gehalte in het water sterk toe. Dit fijne materiaal zweeft in het water en wordt over grote afstanden getransporteerd. Slib kan tijdens een periode van verhoogde afvoer vanuit het hele stroomgebied tot in Nederland gevoerd worden. De slibfractie is het grootst tijdens hoogwaterperioden, tot 1.200 g/m³ bij een Boven-Rijnafvoer van 6.000 m³/s. Omdat het slib vooral zwevend wordt getransporteerd volgt de verdeling over de verschillende Rijntakken ongeveer de verdeling van het water, d.w.z. ca 70% door de Waal en 15% door de beide andere riviertakken.

Onderweg zijn de hoeveelheden aan veranderingen onderhevig. Door erosie, van voornamelijk de bedding van het zomerbed in de Boven-Waal, het Pannerdens Kanaal en de Boven-IJssel, neemt het volume aan zand in benedenstroomse richting toe. Zo bedraagt de bodemerosie in de Waal tot aan Tiel per jaar ca 250.000 m³, wat betekent dat het volume onderweg met ca 60% toeneemt; waarvan een groot deel uit de Gelderse Poort afkomstig is. De hoeveelheid sedimenttransport varieert van jaar tot jaar en is sterk afhankelijk van de afvoer.

Stuurknoppen

Op het natuurlijk functioneren van de rivier gebaseerde beheermaatregelen in de Bovenrivieren omvatten: nevengeulen, uiterwaardverlagingen, kribverwijdering, zomerkadeverlaging of -verwijdering, langsdammen met oevergeul, dijkverleggingen en zandmotoren. Deze stuurknoppen hebben als doel om de natuurlijke dynamiek te herstellen, waterstanden bij hoogwater te verlagen, bodemerrosie in de hoofdgeul te verminderen en de ecologische kwaliteit van het gebied te verbeteren als ook de waterveiligheid en zoetwaterbeschikbaarheid te verbeteren. Een groot deel van deze ingrepen, met name die gericht zijn op de hoogwaterveiligheid, zijn in de afgelopen decennia al op grote schaal toegepast, langs zowel de Maas als de Rijnakken.

Meerwaarde voor drie hoofddoelen

- Waterveiligheid:** Verruiming van het winterbed door uiterwaardverlaging, nevengeulen en dijkverleggingen, kan bijdragen aan de waterveiligheid door waterstandsverlaging. Waterstandsvaling leidt vooral tot een kleinere faalkans door overloop. De andere faalmechanismen piping en macrostabiliteit zijn veel minder gevoelig voor een (veelal beperkte) waterstandsvaling. De waterveiligheidsopgave zal hierdoor niet drastisch afnemen.
- Zoetwaterbeschikbaarheid:** Het stoppen van de bodemerrosie in de rivieren zorgt ervoor dat de afvoerverdeling over Waal en Pannerdens kanaal niet verder verschuift en de grondwatervoorraad in de omgeving niet verder afneemt. Dit leidt echter nog niet tot een verbetering van de situatie; de rivierbodem is op veel plaatsen meer dan 2 meter gezakt en een stopzetten van de daling zorgt hoogstens voor een stabilisatie van de situatie. Om structureel de situatie te verbeteren is een forse ophoging van de bodem nodig van minimaal 1 meter.
- Natuur:** Veel ingrepen in het winterbed ten behoeve van de waterveiligheid, zoals de aanleg van nevengeulen en het vaker laten overstromen van de uiterwaarden, leveren een belangrijke bijdrage aan de verbetering van habitatkwaliteit en biodiversiteit. Door het vergroten van het areaal aan natuurlijke leefgebieden worden cruciale ecosystemen versterkt. Om de bodemerrosie van het zomerbed te stoppen of om te laten slaan in een ophoging zijn ook natuurlijke oplossingen mogelijk die de natuur versterken. Zo kan dmv nevengeulen en het verlagen van zomerkades de doorstroombaarheid van de uiterwaarden worden vergroot; wat tot een reductie van de stroomsnelheid in het zomerbed leidt, waardoor het zandtransport vertraagt een daarmee de erosie. Het weer hydrologisch verbinden van zomer- en winterbed is een belangrijke stuurknop waar de riviernatuur van profiteert.

Tabel 3-15 Huidige toestand fysiotopten in het rivierengebied m.b.t. areaal (boven), de mate waarin rivierdynamiek nog functioneert (midden) en de mate waarin connectiviteit op orde is (onder).

Rivierengebied								
Arealen	Slikkige en zandige oevers	Oevers begroeid	Ondiep stromend water	Ondiep stilstaand water	Diep stilstaand water	Zomerbed		
Oppervlakte	1000 ha (2%)	34500 ha (63%)	200 ha < 1%	5.000 ha (9%)	5600 ha (10%)	8.500 ha (16%)		
Bovenrijn-Waal							Arealen	
Nederrijn-Lek								areaal grotendeels afwezig
IJssel								areaal beperkt aanwezig
Maas								areaal in redelijke mate aanwezig
								areaal nog in takt
Dynamiek	Hydrodynamiek	Morfodynamiek					Dynamiek	
Bovenrijn-Waal								dynamiek grotendeels verdwenen
Nederrijn-Lek								dynamiek gedeeltelijk aanwezig, functioneert onvoldoende
IJssel								dynamiek nog gedeeltelijk aanwezig
Maas								dynamiek nog in natuurlijke staat
Connectiviteit	Tussen de gebieden	Tussen land-water	Met achterland				Connectiviteit	
Bovenrijn-Waal								verbindingen grotendeels verdwenen
Nederrijn-Lek								verbindingen deels aanwezig, functioneren onvoldoende
IJssel								verbindingen nog gedeeltelijk aanwezig
Maas								verbindingen nog in takt

3.5 Waddengebied

De Waddenzee is onderdeel van het waddengebied en staat internationaal bekend vanwege het uitgestrekte intergetijdengebied dat zich uitstrekt over Nederland, Duitsland en Denemarken. De buitenrand van de Waddenzee wordt gevormd door barrière eilanden die de dynamische condities op de Noordzee temperen en een complex van zandbanken, slikplaten en geulen met langs de randen van het vasteland en de eilanden kweldergebieden beschermen. De Waddenzee is het grootste Natura 2000 gebied van Nederland en staat op de UNESCO Werelderfgoedlijst vanwege haar grote natuurwaarde. Het gebied is onder andere van belang voor vele vogelsoorten op hun migratieroutes, voor grotere zeezoogdieren en voor vis en schelpdieren. In deze factsheet nemen we ook het Eems-Dollard estuarium mee als onderdeel van het Nederlandse Waddengebied.

Menselijke invloed & ingrepen

Het Waddengebied en de Eems-Dollard hebben door de eeuwen heen ingrijpende veranderingen ondergaan als gevolg van menselijke activiteiten, zoals inpolderingen, dijkbouw, en grootschalige waterbeheermaatregelen, waaronder de Zuiderzeewerken. Deze ingrepen waren vooral gericht op het beschermen van land tegen overstromingen, het creëren van landbouwgrond en zoetwaterberging, en het verbeteren van de vaarwegen. Echter, deze aanpassingen hebben de natuurlijke dynamiek van het gebied fundamenteel veranderd (Van der Spek, 1995).

De afsluitingen van de Zuiderzee en Lauwersmeer zijn voorbeelden van ingrepen die grote ecologische gevolgen hadden. Zo kunnen trekvissen deze barrière niet makkelijk nemen en is de invloed van zoet water sterk ingeperkt met gevolgen voor soorten afhankelijk van brakwater voor hun levenscyclus. De aanleg van de Afsluitdijk in 1932 veranderde de Zuiderzee in het IJsselmeer, waardoor de getijdendynamiek verdween en de natuurlijke uitwisseling van zout en zoet water werd stopgezet. Dit resulteerde in het verlies van brakwatermilieus die voorheen belangrijke leefgebieden waren voor diverse flora en fauna. Het Lauwersmeer, dat in 1969 werd afgesloten van de Waddenzee, onderging vergelijkbare veranderingen; het gebied ging van een dynamisch estuarium met getijdenwerking naar een zoetwatermeer met een stabiele waterstand en beperkte ecologische dynamiek. Daarnaast hadden deze afsluitingen en inpolderingen gevolgen voor de Waddenzee zelf. Door verandering in de getijdendynamiek is het morfologisch evenwicht in een aantal bekkens verstoort. Zo is het areaal intergetijdengebied flink afgenomen, waardoor minder natuurlijke vastlegging van fijn sediment plaatsvindt. Dat evenwicht is zich nog steeds aan het herstellen (Oost, 1995; Elias & Van der Spek, 2006).

In de Eems-Dollard hebben inpolderingen en de verdieping van vaargeulen geleid tot een sterke toename van sedimentconcentraties, waardoor het water troebel is geworden (Van Maren et al., 2015). Deze verhoogde turbiditeit beperkt de lichtpenetratie in het water, wat negatieve gevolgen heeft voor het onderwaterleven, zoals wieren en andere primaire producenten die afhankelijk zijn van zonlicht. De troebelheid verstoort ook de habitats van vissen en bodemdieren, wat uiteindelijk de gehele voedselketen beïnvloedt en de biodiversiteit ernstig onder druk zet.

Menselijke ingrepen hebben hiermee geleid tot knelpunten zoals verslechterde waterkwaliteit, verlies van leefgebieden, en verstoring van de natuurlijke sediment- en waterstromen. Het herstellen van de balans tussen menselijke gebruiksdoelen en ecologische duurzaamheid blijft daarom een grote uitdaging voor het beheer van deze gebieden.

Systeembeschrijving volgens veranderde abiotische sleutelfactoren

A. Getijdynamiek

De Waddenzee en Eems-Dollard worden sterk beïnvloed door getijden, wat resulteert in wisselende waterstanden en hoge stroomsnelheden. Deze dynamiek bevordert de aanvoer en afvoer van sediment, waardoor de kustlijn en sedimentverdeling voortdurend veranderen. De getijdendynamiek is een stuwende kracht in de Waddenzee, waar het vorm geeft aan zandplaten, geulen, en kwelders die van groot belang zijn voor de biodiversiteit. Na de Zuiderzeewerken is de invloed van getijden op het IJsselmeer en Lauwersmeer verdwenen. Dit heeft ook in de Waddenzee geleid tot een significante verandering van de natuurlijke dynamiek. De getijamplitude in het Marsdiep bekken is toegenomen, en door deze amplificatie en relatief verlies van plaatareaal (gelegen in de Zuiderzee) zijn met name de bekkens in de westelijke Waddenzee nog niet in evenwicht (naar verhouding weinig plaatareaal). Om weer in evenwicht te komen is er sprake van een

verhoogde sedimentimport wat leidt tot een gestage toename van areaal van wadplaten. De Eems-Dollard is sterk aan het opvullen door historische inpolderingen, en is de sedimentconcentratie is toegenomen door verlies aan natuurlijke bezinkplaatsen en vaarwegaanpassingen (van Maren et al., 2015). Deze toename in vertroebeling beïnvloedt de lichtbeschikbaarheid en heeft daarmee een negatief effect op de primaire productie en de natuurkwaliteit van het estuarium.

B. Rivierdynamiek

De rivierdynamiek wordt in het gebied voornamelijk bepaald door de afvoer van zoetwater via het IJsselmeer en de Eems, waarbij alleen de Eems in open verbinding staat met de Waddenzee. Door de afsluiting van de Zuiderzee en Lauwerszee is de natuurlijke uitwisseling van zoet en zout water in het IJsselmeer en Lauwersmeer drastisch verminderd en zijn graduele overgangen verandert in plotselinge overgangen tussen zoet en zout. Ook via de afwatering van de Dokkumer Dijk en Zoutkamperril op de Lauwerszee was oorspronkelijk een meer graduele invloed van zoet water aanwezig. De afsluitingen hebben de waterhuishouding en sedimentatiepatronen veranderd. Deze veranderingen hebben geleid tot veranderingen in de waterkwaliteit en een verschuiving in de flora en fauna met afname in biodiversiteit voor met name soorten kenmerkend voor brakke zones.

C. Morfodynamiek

De morfodynamiek van het gebied wordt gekenmerkt door voortdurende erosie en sedimentatie, beïnvloed door zowel natuurlijke processen als menselijke ingrepen. In de Waddenzee blijven zandplaten, slikken en geulen zich door sedimenttransport voortdurend aanpassen, terwijl in de Eems-Dollard de verdieping van vaargeulen en inpolderingen hebben geleid tot morfologische instabiliteit. De Waddenzee is zich morfologisch nog steeds aan het aanpassen aan de afsluiting van de Zuiderzee. Door afsluitingen en bedijkingen is de komberging van de Westelijke Waddenzee drastisch verminderd, waardoor (i) de geulen te ruim zijn voor de hoeveelheid water die in en uitstroomt en (ii) er naar verhouding te weinig plaatareaal is. Om weer in evenwicht te komen vindt er veel sedimentatie plaats in de geulen en op de platen. Dit betekent dat er nog steeds een vergrote sedimentvraag is in het westelijke deel van het Waddengebied. Dit heeft gevolgen voor de ontwikkeling en dynamiek van het ecosysteem, waaronder een verschuiving van sedimentafzettingen van intergetijden- naar subgetijdengebieden (Lodder et al., 2019; Huijsmans et al., 2022). In het oostelijke deel van de Waddenzee heeft zich in de Zoutkamperlaag een vergelijkbaar proces afgespeeld in reactie op de afsluiting van de Lauwerszee. Omdat het hier om een kleiner gebied gaat, is dit bekken inmiddels weer nagenoeg in evenwicht.

Langs de randen van de Waddenzee bevinden zich kwelders, die deels natuurlijk zijn ontstaan, maar kweldervorming is langs de vastelandskust gestimuleerd door de kwelderwerken. De kwelders vormen een zeer efficiënte invang van sediment en kunnen snel (verticaal) groeien. Daarnaast vormen de kwelders een belangrijk en soortenrijke habitatype binnen Natura2000.

Door verdieping en onderhoud van de vaargeulen in de Waddenzee vindt er toenemende sedimentatie plaats in de vaargeulen, waarvan het materiaal na baggeren wordt teruggebracht in het systeem op nabijgelegen verspreidingslocaties. Dit heeft de troebelheid van de Waddenzee verhoogd met lokale gevolgen voor de ecologie.

Het IJsselmeer en Lauwersmeer zijn nu zoetwatermilieus met gereguleerde waterstanden, waarbij de natuurlijke morfodynamiek nagenoeg stil is komen te liggen. Dit heeft geleid tot een vermindering van de morfologische diversiteit en het verlies van dynamische habitatstructuren die van groot ecologisch belang zijn.

D. Zoetzoutdynamiek

Het samenspel tussen zoet en zout water is een belangrijke factor in het Waddengebied. De afsluiting van de Zuiderzee en Lauwerszee heeft geleid tot het ontstaan van zoetwatermeren (IJsselmeer en Lauwersmeer) met beperkte zoet-zoutovergangen en als resultaat een groot verlies van brakwaterhabitat. In de Waddenzee zelf blijft de zoet-zoutgrens dynamisch, met name door de afvoer van de spuisluisen bij Kornwerderzand en Den Oever, wat zorgt voor diverse overgangen die bijdragen aan de hoge ecologische waarde van het gebied. In de Eems-Dollard wordt de zoet-zoutdynamiek beïnvloed door rivieren en getijden. De fluctuaties in zoet-zoutgrenszones hebben een grote invloed op de aanwezige ecosystemen en hun kwaliteit. Verder speelt dat door bodemdaling de laaggelegen polders steeds meer uitdagingen van verzilting waardoor discussies rond het herstellen van een zoutgradiënt in bijvoorbeeld het Lauwersmeer controversieel zijn.

Sedimentbalans

De sedimentbalans binnen het gebied is complex, met variërende sedimentinvoer, -uitvoer, en opslag. De Waddenzee importeert sediment, vooral vanuit de buitendelta's, terwijl in de Eems-Dollard sedimentconcentraties problematisch hoog zijn door menselijke ingrepen. Tabel 3-16 bevat de meest recente sedimentuitwisseling door de zeegaten, uitgesplitst in zand en slib. Het evenwicht tussen sedimentaanvoer en -verwerking komt verder onder druk te staan door zeespiegelstijging en menselijke activiteiten, wat ook kan leiden tot verdere ecologische degradatie.

Tabel 3-16 Sedimentimport per zeegat van de Waddenzee, uitgesplitst in zand (Elias et al., 2024) en slib (Colina Alonso et al., 2024). De zand en slibvolumes voor de Eems-Dollard zijn uit Elias et al. (2021).

Zeegat	Zand (miljoen m ³ /jaar)	Slib (miljoen ton/jaar)
Texels zeegat	1,25	0,2
Eierlandse Gat	-0,3	-0,02
Vlie	1,4	0,7
Amelander Zeegat	1,2	0,1
Friesche Zeegat	0,45	0,1
Groninger Wad	0,4	-0,01
Eems-Dollard	1,67	1,17

Het natuurlijke vermogen van gebieden langs de kust om mee te groeien met zeespiegelstijging wordt bepaald door de sedimentbeschikbaarheid in aangrenzende systemen, de mogelijkheid om het sediment in het gewenste gebied te krijgen en hoeveel sediment daar vervolgens kan worden vastgelegd. De hoeveelheid slib die passeert langs de Nederlandse kust is ongeveer 10 miljoen ton slib per jaar. Niet al dat slib kan worden ingevangen. Uitgaande van een dichtheid na consolidatie van 1500 kg/m³, is er 1-3 miljoen m³ slib per jaar beschikbaar voor gebieden om mee te groeien (op basis van invangpercentages tussen 10% en 30%).

Voor het meegroeien van de bodem van de Waddenzee en de aangrenzende kustzone is vooral zand nodig (naast slib). Indicatieve berekeningen aan de hoeveelheden sediment (zand en slib) nodig voor het kustfundament om mee te groeien en dat in de Waddenzee terecht kan komen via natuurlijk transport bij 2 m en 5 m zeespiegelstijging zijn samengevat in Tabel 3-17.

Tabel 3-17 Benodigde sedimentvolume (zand en slib) voor meegroeien van het kustfundament en van de Waddenzee (Haasnoot en Diermanse, 2022)

Benodigde sedimentvolume	2 m zeespiegelstijging	5 m zeespiegelstijging
Volledig handhaven kustfundament (voor kustonderhoud en waterveiligheid is potentieel minder nodig)	4,0 miljard m ³	5,5 miljard m ³
Volledig meegroeien kustfundament en Waddenzee (zowel geulen als wadplaten), bovengrens (voor behoud ecologische waarden en vanwege fysische meegroeibegrenzingsen is potentieel minder nodig)	8,0 miljard m ³	17 miljard m ³

De hoeveelheid zand die beschikbaar is in het gebied dat bestemd is voor zandwinning (het reserveringsgebied) tot 12 meter diepte is maximaal 15 miljard m³. Rekening houdend met Natura2000 gebieden en gebieden met windparken, kabels en leidingen neemt de hoeveelheid beschikbaar sediment in het wingebied af tot ongeveer 10 miljard m³. Een vergelijking tussen de zandbeschikbaarheid (nog exclusief slib) en de sedimentbehoefte laat zien dat er voorlopig geen knelpunten lijken te ontstaan, mits het zand beschikbaar blijft voor meegroeien van de Waddenzee en er ook slib wordt ingevangen.

Tabel 3-18 Sedimentatiesnelheid per fysiotop zonder interventies voor het Waddengebied.

Fysiotop	Snelheid (mm/jaar)	Motivatie / bron
<i>Westelijke Waddenzee</i>		
Slikken	8	Een inschatting voor aanslibbing onder zeespiegelstijging in de Waddenzee is gegeven door Huismans et al. (2022). De hoogst doorberekende zss is een lineaire toename van 2 mm naar 17 mm tussen 2020 en 2100, ofwel 76 cm. De berekende aanslibbing, gemiddeld over de platen, is hierbij gemiddeld voor de 3 Westelijke Waddenzee bekkens 65 cm. Gemiddeld over de periode van 80 jaar komt dit neer op een stijging van 8 mm/jaar. Dit lijkt een absolute bovengrens vanwege sedimentbeschikbaarheid. Met een oppervlak van 970 km ² aan intergetijdengebied in de NL Waddenzee komt dit neer op bijna 8 miljoen m ³ aan sediment wat jaarlijks bezinkt. Dit lijkt erg veel. Vooral slib zal bezinken op de platen vanwege een beperkt transportcapaciteit van zand. De slibbeschikbaarheid is 10-14 miljoen ton per jaar (Colina – Alonso et al., 2024) wat zou suggereren dat een groot deel van het beschikbare slib in de Nederlandse Wadden zal bezinken (terwijl hier nu 1 miljoen m ³ / jaar bezinkt)
Kwelders	17	Gemiddelde huidige sedimentatie snelheid op vastelandskwelders in westelijke en oostelijke Waddenzee. Uit Colina-Alonso et al. (2024). De hoge snelheid suggereert onafhankelijkheid van ZSS, en daarom overgenomen voor condities met ZSS. Huidige aanslibbing op eilandkwelders is veel lager (3 mm/jaar – mogelijk stijgen deze echter bij ZSS)
Ondiep water	2	Zie diep water
Diep water	2	Bij 17 mm/jaar importeert de Oostelijke Waddenzee 6 miljoen m ³ /j wat bij een oppervlakte van ~1500 km ² neerkomt op 4 mm/jaar (geulen en platen gecombineerd) – Lodder et al., 2022. Ongeveer een derde van de Westelijke Waddenzee is plaat, waar de aanslibbing hoger is (8 mm/jaar over 80 jaar gemiddeld, maar aangezien de stijgsnelheid toeneemt is de aanslibbing in 2100 hoger. Deze getallen worden niet door Huismans et al. (2022) gegeven). Daarom houden we hier 8 mm/ jaar aan voor het plaatareaal. Wanneer het plaatareaal 1/3 van het totaal is, is de bodemhoogte toename in de geulen 2 mm/jaar.
<i>Oostelijke Waddenzee</i>		
Slikken	8	Zie Westelijke Waddenzee voor uitleg. De berekende aanslibbing, gemiddeld over de platen, is hierbij voor de het berekende Oostelijk Waddenzee bekkens 63 cm. Gemiddeld over de periode van 80 jaar komt dit neer op een stijging van 8 mm/jaar.
Kwelders	17	Gemiddelde huidige sedimentatie snelheid op vastelandskwelders in westelijke en oostelijke Waddenzee. Uit Colina-Alonso et al. (2024). De hoge snelheid suggereert onafhankelijkheid van ZSS, en daarom overgenomen voor condities met ZSS
Ondiep water	2	Zie diep water
Diep water	2	Bij 17 mm/jaar importeert de Oostelijke Waddenzee 2.6 miljoen m ³ /j wat bij een oppervlakte van ~500 km ² neerkomt op 5.2 mm/jaar (geulen en platen gecombineerd) – Lodder et al., 2022. Ongeveer de helft van de Oostelijke Waddenzee is plaat, waar de aanslibbing hoger is (8 mm/jaar over 80 jaar gemiddeld, maar aangezien de stijgsnelheid toeneemt is de aanslibbing in 2100 hoger. Deze getallen worden niet door Huismans et al. (2022) gegeven). Daarom houden we hier 8 mm/ jaar aan. In dat geval is de bodemhoogte toename in de geulen ~2 mm/jaar.
<i>Eems-Dollard</i>		
Slikken	7	De platen in het Eems estuarium zijn in de periode 1990-2020 20 mm/jaar gestegen in het buitengebied, 1.7 mm/jaar in het binnengebied terwijl in de Dollard geen netto veranderingen zijn opgetreden (Elias et al., 2021). Aangezien de verschillende gebieden van vergelijkbare grootte zijn is een eerste orde benadering dat de platen gemiddeld 7 mm/jaar stijgen. Het is aannemelijk dat de aanslibbingssnelheden gaan toenemen bij hogere ZSS vanwege de toename in accommodatieruimte. Hier is echter geen eenduidige voorspellingen voor. Daarnaast groeit de Dollard nu überhaupt niet mee met ZSS, dus het is de vraag of ZSS wel tot een versnelling van aanslibbing gaat leiden.
Kwelders	6,5	Gemiddelde huidige sedimentatie snelheid op vastelandskwelders in westelijke en oostelijke Waddenzee. Uit Colina-Alonso et al. (2024). De hoge snelheid suggereert onafhankelijkheid van ZSS, en daarom overgenomen voor condities met ZSS
Ondiep water	4	Zie diep water
Diep water	4	De geulen in het Eems estuarium zijn in de periode 1990-2020 8 mm/jaar gestegen in het buitengebied maar 3 mm/jaar gedaald in het middengebied; in de Dollard zijn geen netto veranderingen opgetreden (Elias et al., 2021). Aangezien de verschillende gebieden van vergelijkbare grote zijn is een eerste orde benadering dat de geulen 4 mm/jaar stijgen. Deze veranderingen zijn sterk afhankelijk van menselijke ingrepen, nu (vaargeulonderhoud) en in het verleden. Het Eems estuarium is aan het opvullen (Pierik et al., 2022) als gevolg van landaanwinningen (Schrijvershof et al, 2024). Vanwege deze sterke menselijke sturing is het niet

Fysiotoop	Snelheid (mm/jaar)	Motivatie / bron
		waarschijnlijk dat zeespiegelstijging hier veel invloed op heeft. Daarom wordt 4 mm/jaar aangehouden voor de geulen.

Huidige toestand fysiotoop

Het gebied omvat diverse fysiotoop zoals zandplaten, geulen, wadden (slikken), kwelders (schorren) en (ondiepe) zoetwatermeren. Deze eenheden vormen de basis voor een rijkdom aan ecosystemen. Kwelders en platen zijn van belang voor kustbescherming en biodiversiteit.

Kwelders: Het kwelderareaal in de Waddenzee is op te delen in eilandkwelders en vasteland kwelders. In beiden is de natuurlijke dynamiek behoorlijk vastgezet. Langs de eilanden liggen de kwelders achter een relatief hoge stuifdijk aan de Noordkant die de kwelder afschermt van de dynamiek van de Noordzee. Ecologisch interessante dynamiek zoals overwash processen krijgen beperkt de ruimte. De vasteland kwelders, die grotendeels worden beschermd door een systeem van rijshouten dammen zijn ook relatief beperkt in dynamiek en zijn over het algemeen zwaar verouderd, waardoor de hoeveelheid pioniersvegetatie sterk is teruggelopen. Het toelaten van meer dynamiek gaat onherroepelijk leiden tot het verlies van kwelderareaal en dat is vanuit Natura2000 oogpunt eigenlijk onwenselijk. Daarnaast is het ongewis of dit gaat leiden tot nieuwe pioniersvegetatie en per wanneer. Echter, meer dynamiek en meer ruimte zijn de enige sleutelfactoren die potentieel kunnen leiden tot nieuwe kwelderontwikkeling.

Slikken en platen. De slikken en platen in de Waddenzee zijn belangrijk foerageergebied voor de talrijke vogelsoorten die de Waddenzee aandoen tijdens hun migratieroutes. De algemene verwachting is dat de slikken en platen niet voldoende mee kunnen komen met zeespiegelstijging vanwege sedimentbeschikbaarheid. Er zijn, zoals aangegeven, wel verschillen tussen het meegroeivermogen van platen in het westelijke en oostelijke deel van de Waddenzee. Het oostelijke deel kan beter meegroeien, maar ook daar niet voldoende om zeespiegelstijging op termijn bij te houden. Dus zonder sedimentstrategie zal areaal slikken verloren gaan. Naast zeespiegelstijging zal ook winning van zout en gas onder de Waddenzee zal het meegroeivermogen van de slikken en platen onder druk zetten.

Permanent water, de permanent overstroomde gebieden in de Waddenzee bestaan uit geulen met hoge stroomsnelheden maar ook ondiepere gebieden met lagere stroomsnelheden. Laagdynamisch habitat waar andere soorten kunnen vestigen, zoals mosselen en oesters, is van groot belang voor het ecologisch functioneren van het systeem.

Tabel 3-19 Huidige toestand fysiotoop in het Waddengebied m.b.t. areaal (boven), de mate waarin de estuariene dynamiek nog functioneert (midden) en de mate waarin de connectiviteit (gradiënten) nog op orde is.

Waddengebied						
Arealen	Slikken-platen	Kwelders	Ondiep water (-5 m tot GLW)	Diep water (onder -5m)		
Oppervlakte	141.800 ha (48%)	11.400 ha (4%)	96.600 ha (33%)	40.900 ha (14%)	Arealen	
Westelijke Waddenzee						areaal grotendeels afwezig
Oostelijke Waddenzee						areaal beperkt aanwezig
Eems-Dollard						areaal in redelijke mate aanwezig
						areaal nog in takt
Dynamiek	Getijden-dynamiek	Rivierdynamiek	Morfodynamiek		Dynamiek	
Westelijke Waddenzee						dynamiek grotendeels verdwenen
Oostelijke Waddenzee						dynamiek gedeeltelijk aanwezig, functioneert onvoldoende
Eems-Dollard						dynamiek nog gedeeltelijk aanwezig
						dynamiek nog in natuurlijke staat
Connectiviteit	Zout-zoet verdeling	Tussen de gebieden	Tussen land-water		Connectiviteit	
Westelijke Waddenzee						verbindingen grotendeels verdwenen
Oostelijke Waddenzee						verbindingen deels aanwezig, functioneren onvoldoende
Eems-Dollard						verbindingen nog gedeeltelijk aanwezig
						verbindingen nog in takt

Stuurknoppen

Belangrijke stuurknoppen zijn water, ruimte, dynamiek en sediment. Dit vertaalt zich in beheermaatregelen zoals het creëren van ruimte door het verleggen van dijk of verwijderen van dammen. Herinrichtingsmaatregelen, zoals de vismigratierivier kunnen worden ingezet voor (kleinschalig) herstel van zoet-zoutovergangen. Daarnaast kan sedimentbeheer een rol spelen, zoals het vasthouden van sediment om kweldervorming te stimuleren en het strategisch suppleren van sediment om de platen te helpen mee te groeien met zeespiegelstijging.

Meerwaarde voor drie hoofddoelen

- a. Waterveiligheid: Instandhouding van het complex aan platen, slikken en kwelders in de Waddenzee is essentieel vanuit zowel ecologisch als waterveiligheidsoogpunt. Wanneer de Waddenzee dieper wordt, heeft dit effecten op de golfhoogten en de getijpropagatie, met potentieel hogere waterstanden aan de kust. Uitbreiding van getijdegebieden en herstel van kwelders, bijvoorbeeld met dubbele dijken met wisselpolders kunnen potentieel bijdragen aan waterveiligheid door natuurlijke golfdemping, ruimte voor waterberging en het invangen van sediment om kustgebieden op te hogen.
- b. Zoetwaterbeschikbaarheid: Het vergroten van zoetwaterberging zoals verhoging van het waterpeil van het IJsselmeer kan mogelijk bijdragen bij aan de zoetwaterbeschikbaarheid en vermindert zoutindringing in kwetsbare laaggelegen gebieden. Ook het opslibben van polders kan de zoetwaterbeschikbaarheid verbeteren omdat de verzilting tegenwerkt en zoet water vanuit regen in de wortelzone beter vasthoudt.
- c. Natuur: Herstel en uitbreiding van natuurlijke habitats zoals wadden en kwelders verbeteren de biodiversiteit en versterken de ecologische veerkracht van het Waddengebied en Eems-Dollard.

3.6 IJsselmeer

Uit de natuurlijke processen die de Zuiderzee hebben gevormd is door menselijk ingrijpen het IJsselmeer ontstaan. De afsluiting van de Zuiderzee, de inpolderingen en de compartimentering hebben een uniek zoetwatermeer gevormd dat wordt gevoed door de IJssel en een aantal kleinere rivieren. Een grote diversiteit aan waterdieptes en bodemsoorten zijn een erfenis uit de Zuiderzee tijd, waarbij de estuariene dynamiek van weleer is vervangen door een gereguleerde en zeer beperkte zoetwater dynamiek.

Korte systeembeschrijving volgens abiotische sleutelfactoren

A. Getij-, wind en golfdynamiek:

De Zuiderzee kende een sterk afvlakkend getij van 1,5 meter bij de grens met de Noordzee tot circa 20 centimeter in grote delen van het komgebied.

Het IJsselmeersysteem kent geen getijdendynamiek meer. Wel is er een sterke golfdynamiek, waarbij golven van 1,5 meter hoogte kunnen ontstaan bij zware storm. De wind kan in stormperiodes door lange strijklengtes zorgen voor scheefstand in het waterpeil van het IJsselmeer van 0,5 – 1 meter.

B. IJsselmeer dynamiek en rivierdynamiek:

Het IJsselmeer kent een sterk gereguleerde peildynamiek omdat ze wordt ingezet als leverancier van meerdere waterdiensten:

- Komberging als onderdeel van de hoogwaterbeheersing, als 1) niet gespuid kan worden vanwege stormvloed of te hoog zeeniveau, 2) de rivieraanvoer door de IJssel en/of vanuit de regio heel groot is, of 3) een combinatie van beide;
- Voorraadberging in relatie tot de zoetwatervoorziening, als er sprake is van meteorologische droogte en de aanvoer door de IJssel tijdelijk tekortschiet om in de vraag te voorzien; Vanuit de voorraadberging worden grote delen van Flevoland, Noord-Holland, Friesland, Groningen, Drenthe en Overijssel voorzien van water.

In de winter is de kombergingsfunctie het belangrijkste, in de zomer de voorraadberging. De optelsom van beide zoetwater diensten resulteert in het vigerend peilbesluit. Hierin is opgenomen dat voor de zomerperiode (april tot en met september) een flexibel peilbeheer geldt voor zowel het IJsselmeer als het Markermeer met een meerpeil tussen -0,10 m NAP en -0,30 m NAP. In de winter mag dit verder uitzakken tot -0,40 m NAP.

De watervraag van het IJsselmeer loopt in de zomer op tot gemiddeld 390 m³ / sec. Peilhandhaving in het IJsselmeer is grootgebruiker en neemt bijna de helft van de watervraag voor zijn rekening.

Het percentage water dat vanuit de Rijn naar de IJssel stroomt, fluctueert naar gelang de afvoer die bij Lobith het land instroomt. Bij hoge Rijnafvoeren bedraagt het ongeveer 13% en bij lage afvoeren ca 20%. Vanwege de bodemdaling van de Boven-Rijn is het stuwregime van Driel steeds verder opgeschoven naar het hogere bereik. Deze verschuiving heeft tot gevolg gehad dat er tegenwoordig al bij hogere afvoeren extra water naar de IJssel gaat. Over de periode vanaf 1981 is het aandeel Rijnwater dat op jaarbasis het IJsselmeer bereikt dan ook toegenomen

Naast de IJssel ontvangt het IJsselmeer ook water vanuit de Overijsselse Vecht (met een afvoer die kan oplopen tot 350 m³/sec) en overige beken en boezemsystemen (met een maximale afvoer die kan oplopen tot vele honderden m³/sec). Omdat spuien slechts mogelijk is bij eb, is bergingsruimte in het IJsselmeer noodzakelijk.

C. Morfodynamiek:

Vanuit zee is er sinds de afsluiting geen aanvoer van sediment naar het IJsselmeer, de toevoerende rivieren zijn de enige overgebleven externe leverancier van sediment. De ca. 40.000 m³ zand die gemiddeld per jaar bij Pannerden de IJssel in komt bereikt het IJsselmeer niet, daarvoor zijn de stroomsnelheden in de IJsseldelta te laag. Fijn sediment bereikt het IJsselmeer wel; gemiddeld ontvangt het IJsselmeer ca. 320.000 ton slib uit de IJssel (12% van het totaal in de Rijn)

De belangrijkste component voor de morfodynamiek is de herverdeling van slib in de diepere delen van het IJsselmeer en Markermeer (inslibbing). Kleideeltjes die door de wind van de westelijke oevers afvloegen, worden naar het oosten getransporteerd en afgezet in de diepere delen, het voormalige centrale deel van de Zuiderzee. In 20 jaar tijd ontstonden hierdoor de zogenaamde IJsselmeerafzettingen, een sedimentatie laag die nu meer dan een meter hoog is. De voormalige zandbodem werd opgehoogd met zacht slib. Door de wind veroorzaakte golven zorgen ervoor dat het slib gemakkelijk weer opwaait uit de ondiepe delen en dit leidt op zijn beurt tot een toename van de troebelheid, met name in het markermeer. Bij harde westenwinden treedt opstuwing op waardoor lokaal schelpenbanken worden afgezet aan de Friese IJsselmeerkust. Het gebrek aan peildynamiek zorgt voor sterkere oevererosie en daarmee steilere overgangen van ondiepe naar diepe zones.

D. Zoet – zoutdynamiek:

Het IJsselmeer kent geen natuurlijke zoet – zout overgangen. Via de schutsluizen in de Afsluitdijk en door lekkage van de spuisluizen komt zout water binnen die met beheermaatregelen wordt bestreden.

De Zuiderzee kenmerkte zich door een gradiënt van zout oppervlaktewater aan de zijde van de Waddenzee via een groot brak oppervlaktewater in het centrale deel van de Zuiderzee tot de zoete delen nabij het vaste land waar de rivieren vanuit het achterland binnenstroomden. De Zuiderzee was daarmee het grootste brakwatersysteem dat Nederland ooit gekend heeft.

Menselijke invloed & ingrepen

Het IJsselmeer in zijn huidige vorm is ontstaan door het afsluiten van de Zuiderzee door de aanleg van de Afsluitdijk (1932). Vervolgens zijn de IJsselmeerpolders (laatste, Zuidelijk Flevoland, 1968) en de Houtribdijk (1976) aangelegd. Deze ingrepen veranderden een 3500 km² getij-gedreven brakwatergebied in 1500 km² polders en een gecompartmenteerd zoetwatermeer van 2000 km². Dit zorgde voor een snelle verzoeting van het watersysteem en een sterke afname van de oorspronkelijke schelpdieren, slakken, krabben, kreeften, garnalen en aasgarnalen; binnen een paar jaar waren er nog zeven van de 42 soorten over. Een deel daarvan was al in een jaar verdwenen. Vanaf 1935 werd het IJsselmeer bevolkt door 22 nieuwe soorten. Binnen twintig jaar was de onderzochte biodiversiteit met ruim veertig procent afgenomen. Het beheer van het IJsselmeersysteem met zeer beperkte toegestane peildynamiek en een tegennatuurlijk peil (hoog in de zomer en laag in de winter) heeft een grote invloed op de ontwikkeling van een bij een zoetwatermeer behorende fysiotopten met name in de rand- en oeverzones.

Sedimentbalans

Er is weinig bekend over de sedimentbalans van het IJsselmeergebied. Algemeen wordt aangenomen dat de interne herverdeling van sediment (typisch van oevers naar diepe geulen) dominant is ten opzichte van import en export. Zandtransport en daarmee gepaard gaande processen van erosie en sedimentatie zijn de morfologische motor voor kustontwikkeling. De drijvende kracht is de energie van wind en golven, die het zand noordwaarts stuurt aan de westkust en oostwaarts aan de zuidkust. Individuele stormen kunnen tot significante veranderingen leiden. De westkust en zuidkust zijn verschillend. De herverdeling van slib zorgt voor een uniformer reliëf en substraat in de diepe delen en steilere oevers in de ondiepe delen, wat nadelig uitpakt voor de kwaliteit en het areaal van kenmerkende ecotopen.

Doordat het IJsselmeerpeil relatief stabiel is, vindt er continue golfaanslag plaats op één beperkte zone van de oevers. Dit is de oorzaak van oeverafslag en het ontstaan van kleine klifjes. Zelfs in de sedimentatiezones vindt zo afslag plaats van stranden (zie de stranden van Hindeloopen, It Soal bij Workum en Makkum), waardoor stranden wegslaan en de lange ondiepe plateaus voor de stranden nog ondieper worden dan ze al zijn. Dit heeft op haar beurt weer gevolgen voor bijvoorbeeld rietontwikkeling (deze wordt door klifjes beperkt) en voor de waterkwaliteit. In rustige zones kan bij kalm weer blauwalgbloei ontstaan in de zomer.

Inkomend vanuit IJssel:

- Zand: 0.05 m³ / jaar
- Slib: 320.000 ton / jaar

Herverdeeld sediment:

- Zand: n.t.b. (naar verwachting wel aanwezig door golfwerking in oeverzones)
- Slib: n.t.b. (schatting maken hoeveel slib er per jaar in beweging is wat wordt herverdeeld)

De herverdeling van slib zorgt voor een uniformer reliëf en substraat in de diepe delen en steilere oevers in de ondiepe delen, wat nadelig uitpakt voor de kwaliteit en het areaal van kenmerkende ecotopen.

Tabel 3-20 Sedimentatiesnelheid per fysiotoop zonder interventies voor het IJsselmeergebied.

Fysiotoop	Snelheid (mm/jaar)	Motivatie / bron
<i>IJsselmeer</i>		
Begroeide oever	0	Geen transportmechanisme om sediment naar oevers te brengen.
Oeverzone	0	Geen transportmechanisme om sediment naar oevers te brengen.
Ondiep water	0,2	Totale oppervlakte IJsselmeergebied is 1250 km ² . Enige huidige sediment influx is de IJssel, in totaal 0,279 miljoen ton / jaar. (waarvan 0.05 miljoen zand) – Frings et al., 2019. Onder aanname van droge dichtheid van 1000 kg/m ³ komt dit neer op een aanslibbing / -zanding van 0,22 mm/j. Geen onderscheid diep – ondiep. Er lijkt geen mechanisme te bestaan waardoor de aanslibbing zal versnellen door ZSS, daarom is de huidige waarde ook geldig voor condities met ZSS
Diep water	0,2	
<i>Markermeer</i>		
Begroeide oever	0	Geen transportmechanisme om sediment naar oevers te brengen.
Oeverzone	0	Geen transportmechanisme om sediment naar oevers te brengen.
Ondiep water	0	Er is geen bron van sediment richting Markermeer (de Lucas Pardo, 2014)
Diep water	0	Er is geen bron van sediment richting Markermeer (de Lucas Pardo, 2014)

Huidige toestand fysiotoepen

De fysiotoepen behorend bij de Zuiderzee (kwelders, slikken, wadden en permanent getijdenwater) zijn verdwenen, daarvoor zijn 'meer' fysiotoepen in de plaats gekomen.

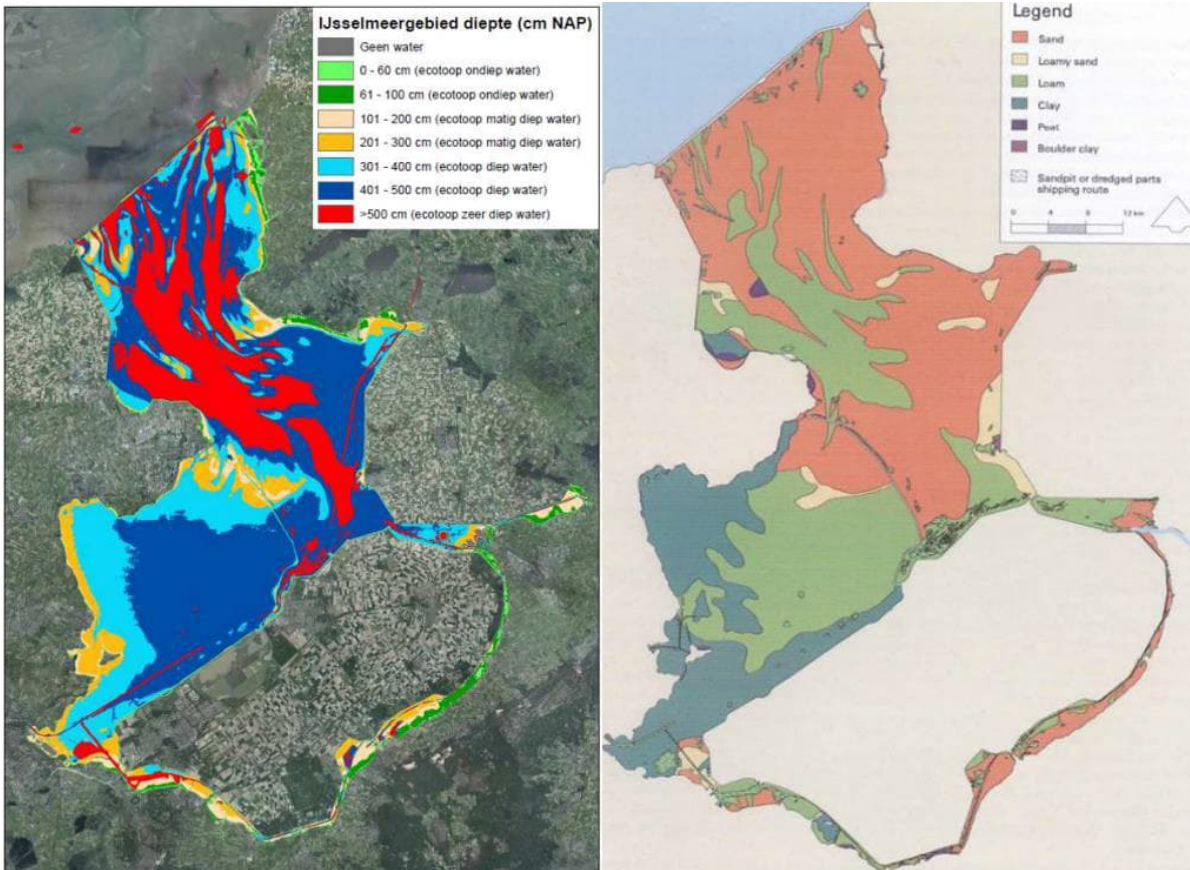
1 Zeer diep water: Gebieden dieper dan 5 meter bij een gemiddeld zomerpeil. Door de aanwezigheid van voormalige getijdengeulen tussen Enkhuizen en Stavoren is het areaal zeer diep water in ruime mate aanwezig in het IJsselmeer (26% van het areaal). In een groot deel van deze oorspronkelijk zandige geulen heeft sedimentatie plaatsgevonden van slib. In het Markermeer is de fysiotoop zeer diep water afwezig. In het Gooimeer, Markermeer en IJmeer zijn door zandwinning diepe delen ontstaan.

2 Diep water: Gebieden met een diepte tussen de 3 en 5 meter (bij gemiddeld zomerpeil). Het areaal diep water is de meest voorkomende fysiotoop in het IJsselmeergebied (60% van het areaal). Nagenoeg het gehele Markermeer bestaat uit diep water met een lange verblijftijd (> 1 jaar). De verblijftijd van water in de diepe delen van het IJsselmeer is korter (3 – 4 maanden) en in het Ketelmeer circa 3 dagen. In het Markermeer treedt sedimentatie (verslibbing) van de diepere delen in het oosten op door erosie van de kleiige bodem in het westen. In het IJsselmeer bestaat het areaal diep water nog voornamelijk uit zand omdat het slib eerst neerdaalt in de diepste delen.

3 Matig diep water: Gebieden met een diepte tussen de 1 en 3 meter (bij gemiddeld zomerpeil). Het areaal matig diep water is een veelvoorkomende fysiotoop aan de randen van het IJsselmeergebied (11% van het areaal). Ook aan de noordzijde van de houtribdijk is deze zone aanwezig. Door afwezigheid van peildynamiek is golfwerking door winddynamiek dominant, wat erosie kan veroorzaken op de onbegroeide delen.

4 Ondiep water: Oeverzone met een gemiddelde diepte < 1 meter en een minimumdiepte van 30 cm bij een gemiddeld zomerpeil (2% van het areaal). Onnatuurlijke peildynamiek en beperkte wateruitwisseling veroorzaken ecologische knelpunten. Ook leidt de beperkte peildynamiek ertoe dat door golfwerking oevers afslaan en bestaande gradiënten verdwijnen. Uitgebreide rietvelden ontbreken door de onnatuurlijke peildynamiek. Door erosie verdwijnt in met name het Markermeer slib, organisch materiaal en voedingsstoffen in diepere putten.

5 Laag gelegen terrein: Dit omvat de land – water overgangen van het IJsselmeersysteem tussen – 0,50 m NAP en + 0,10 cm NAP (1 % van het areaal). Vooral aan de oostoever van het IJsselmeer zijn nog 'buitendijkse' laaggelegen veengebieden te vinden met zandige oevers. Door bedijking rondom het IJsselmeer is het areaal laaggelegen terrein zeer gering. De beperkte peildynamiek leidt ertoe dat deze zones onvoldoende overstromen en slib afgezet krijgen, erosie door golfslag is een risico.



Figuur 3.3 Diepte IJsselmeersysteem in relatie tot ecotopen (L) en bodemsubstraat (R). Bron: Preverkenning IJsselmeergebied PAGW 2017 & Verkennende systeemanalyse IJsselmeergebied, Deltares 2022

Samengevat is in onderstaande tabel een overzicht gegeven van staat van de arealen, dynamiek en connectiviteit van de verschillende fysiotopten in het IJsselmeer, Markermeer en IJsseldelta.

In het IJsselmeer en Marker is het areaal diep water in ruimte mate beschikbaar, dit wordt minder naarmate de diepte minder wordt. De IJsseldelta is qua arealen nog redelijk intact.

Met de aanleg van de Afsluitdijk is de getijdendynamiek in het systeem verdwenen, de peildynamiek die ervoor in de plaats is gekomen functioneert onvoldoende voor de ecologie. De rivierdynamiek is afwezig in het Markermeer en fungeert door het peilbeheer onvoldoende in het IJsselmeer. De morfodynamiek functioneert in het hele systeem onvoldoende

Qua connectiviteit zijn de zoet – zout overgangen verdwenen, en heeft met name het Markermeer last van een afwezige tot onvoldoende functionerende connectiviteit. De IJsseldelta is qua connectiviteit vrijwel in takt.

Tabel 3-21 Huidige toestand fysiotopten in het IJsselmeergebied m.b.t. areaal (boven), de mate waarin de dynamiek nog functioneert (midden) en de mate waarin de connectiviteit (gradiënten) nog op orde is.

IJsselmeergebied					
Arealen	Begroeiide oever (boven -0,3 m)	Ondiep water (-0,3 tot -1 m)	Matig diep water (-1 tot -3 m)	Diep water (onder -3 m)	
Oppervlakte	4.834 ha (2%)	4.500 ha (2%)	31.875 ha (16%)	160.500 ha (79%)	Arealen
IJsselmeer					areaal grotendeels afwezig
IJsseldelta					areaal beperkt aanwezig
Markermeer					areaal in redelijke mate aanwezig
					areaal nog in takt
Dynamiek	Getijdynamiek (estuariën systeem)	Peildynamiek (zoetwatermeer)	Rivierdynamiek	Morfodynamiek	Dynamiek
IJsselmeer					dynamiek grotendeels verdwenen
IJsseldelta					dynamiek gedeeltelijk aanwezig, functioneert onvoldoende
Markermeer					dynamiek nog gedeeltelijk aanwezig
					dynamiek nog in natuurlijke staat
Connectiviteit	Zoet-zout verdeling (estuariën systeem)	Tussen de gebieden	Tussen land-water		Connectiviteit
IJsselmeer					verbindingen grotendeels verdwenen
IJsseldelta					verbindingen deels aanwezig, functioneren onvoldoende
Markermeer					verbindingen nog gedeeltelijk aanwezig
					verbindingen nog in takt

Stuurknoppen

Toestaan van natuurlijke peildynamiek: Een belangrijke stuurknop is het toestaan van meer peildynamiek in het IJsselmeer. Zowel het lager uitzakken van het peil in de (na)zomer als het hoger mogen opzetten in het vroege voorjaar, als ook het toestaan van verschillen tussen jaren, vergroot de kwaliteit van de ondiepe zones van het IJsselmeer en vergroot zowel de potentiële komberging als de voorraadberging. Daarnaast zorgt een hogere toegestane peildynamiek voor een verlaging van de zoetwatervraag en een vermindering van erosieve kracht van golfslag van de oevers.

Vergroten areaal oeverzones en land- water overgangen: De meest ondiepe fysiotopten van het IJsselmeer hebben behoefte aan meer en kwalitatief hoogstaand areaal. Door dijken aan de ene kant en steile overgangen aan de andere kant zitten deze fysiotopten in de knel. Meer structuur in het water op de grens van dieper en ondiepe zones en dijk teruglegging in combinatie met meer peildynamiek zou dit areaal kunnen vergroten en kunnen zorgen in voor meer vegetatie in de oeverzone die erosie tegengaat.

Brakwater zone gecontroleerd herstellen: De Zuiderzee was het grootste brakwater systeem dat Nederland ooit gekend heeft, vergelijkbaar met de Baltische zee. De afsluiting van de Zuiderzee heeft veel opgeleverd, maar ook veel gekost. Het aanleggen van de vismigratierivier levert een gecontroleerde zone op waar brak water weer zoet wordt voordat het in het IJsselmeer stroomt. Het is het verkennen waard of met de stijging van de zeespiegel een zachtere overgang tussen het IJsselmeer en de Waddenzee gecreëerd kan worden.

Meerwaarde voor drie hoofddoelen

Tabel 3-22 Meerwaarde uitbreiding dynamiek, vergroten areaal en herstellen brakwaterzone in het IJsselmeer voor drie hoofddoelen

	Hoogwateropgave	Zoetwateropgave	Natuuropgave
Toestaan van natuurlijke peildynamiek	Een hoger toegestaan waterpeil vergemakkelijkt het spuibeheer bij een stijgende zeespiegel en genereert extra bergingscapaciteit voor de afwatering van rivieren	Toestaan van meer natuurlijke peildynamiek vergroot de voorraadberging en verkleint de watervraag van het IJsselmeer om in droge tijden het niveau op peil te houden	De natuur profiteert van een zo natuurlijk mogelijke peilfluctuatie, met name de ondiepe zones van het IJsselmeer
Vergroten areaal oeverzones en land-water overgangen door o.a. dijk terugleggingen	Vermindert erosieve druk op de ondiepe zones	Zorgt voor een verbetering van de waterkwaliteit door werking van oevervegetatie als helofytenfilters	De meest kwetsbare en in omvang geringe fysiotopen in het IJsselmeer worden in omvang en kwaliteit verbeterd
Brakwaterzone gecontroleerd herstellen	Werkt mee met het natuurlijk systeem	Kan verziltingsdruk gecontroleerd toestaan en daarmee andere delen van het gebied zoet houden	Kan een deel van de brakwater fysiotopen die floreerde in het Zuiderzee tijdperk weer een plek geven

4 Referenties

- Barneveld, H., M. Boersema, F. Schuurman en H. de Vriend (2022). Het Verhaal van het sediment.
- Bijlsma, L., & Iedema, W. (1991). Het Veerse Meer uit de wachtkamer. *De Levende Natuur*, 92(2), 38-41.
- CBS and WUR (2022), Natural Capital Accounting in the Netherlands – Technical report. Statistics Netherlands (CBS) and Wageningen University and Research (WUR).
- Coen, I. (2008). De eeuwige Schelde? Ontstaan en ontwikkeling van de Schelde. Technical Report D/2007/3241/203 . Waterbouwkundig laboratorium. .
- Colina Alonso, A., van Maren, D. S., Oost, A. P., Esselink, P., Lepper, R., Kösters, F., ... & Wang, Z. B. (2024). A mud budget of the Wadden Sea and its implications for sediment management. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 153.
- Cox, J.R., Huismans, Y., Knaake, S., Leuven, J., Vellinga, N., van der Vegt, M., Hoitink, A., Kleinhans, M., 2021b. Anthropogenic effects on the contemporary sediment budget of the lower Rhine-Meuse Delta channel network. *Earth's Future* e2020EF001869
- Dam, G., van der Wegen, M., Taal, M., & van der Spek, A. (2022). Contrasting behaviour of sand and mud in a long-term sediment budget of the Western Scheldt estuary. *Sedimentology*, 69 (5), 2267–2283. Retrieved 2024-02-16, from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/sed.12992> (eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/sed.12992>) doi: 10.1111/sed.12992
- de Jong, Z., de Jong, D., & Mulder, J. (1992). Effecten van het veranderde getij voor de schorren in de Oosterschelde. . *De Levende Natuur*, 93(5), 138-142.
- de Vet, P.L.M., van Prooijen, B.C., Wang,Z.B., 2017. The differences in morphological development between the intertidal flats of the Eastern and Western Scheldt. *Geomorphology* 281, 31–42. doi:10.1016/j.geomorph.2016.12.031.
- de Vet, P.L.M., Van Prooijen, B.C., Colosimo, I., Steiner, N., Ysebaert, T., Herman, P.M.J., Wang, Z.B., 2020. Variations in storm-induced bed level dynamics across intertidal flats. *Scientific Reports* 2020 10:1 10, 1–15. doi:10.1038/s41598-020-69444-7.
- de Vet, P. L. M., B. C. van Prooijen, P. M. J. Herman, T. J. Bouma, D. S. van Maren, B. Walles, J. J. van der Werf, T. Ysebaert, E. van Zanten, Z. B. Wang (2024). Response of Estuarine Morphology to Storm Surge Barriers, Closure Dams and Sea Level Rise. Submitted to *Geomorphology*.
- Dillingh, D., Graveland, J., & Pieters, T. (2005). Het Schelde Getij (T RIKZ/ZDA/2005.801 .w). Rijksinstituut voor Kust en Zee.
- DNB & PBL (2020). Biodiversiteit en de financiële sector: een kruisbestuiving? Verkenning van risico's van biodiversiteits verlies voor de Nederlandse financiële sector. J. van Toor, D. Pijlic, G. Schellekens, M. van Oorschot and M. Kok.
- Doornbos, Sarah & Oerlemans, Natasja & Liempt, Willy & Bergers, Piet & Meyling, Adriaan & Harkes, Ingviid & Herder, Jelger & van der hoorn, Berry & Kalkman, Vincent & Roels, Bas & Sparrius, Laurens & Swaay, Chris & van Turnhout, Chris & Turnhout, Sander. (2017). Living Planet Report Zoute en zilte natuur in Nederland - 2017.
- Elias, E.P.L. & Van der Spek, A.J.F., 2006. Long-term evolution of Texel Inlet and its ebb-tidal delta (the Netherlands). *Marine Geology* 225: 5–21.
- Elias, E.P.L., Colina-Alonso, A., en van Maren, D.S. (2021). Morfologische veranderingen Eems-Dollard en Groninger Wad. *Deltares rapport 11203742-000-ZKS-0003*
- Elias, E.P.L., Quataert, E., Taal, M., Vermeer, N. (2024). Sedimentbalans Nederlandse Kust. *Deltares rapport 11207897-002-ZKS-0007*.
- Frings, R. M., Hillebrand, G., Gehres, N., Banhold, K., Schriever, S., & Hoffmann, T. (2019). From source to mouth: Basin-scale morphodynamics of the Rhine River. *Earth-science reviews*, 196, 102830.
- Haasnoot, M, F. Diermanse (ed.) (2022) Analyse van bouwstenen en adaptatiepaden voor aanpassen aan zeespiegelstijging in Nederland. *Deltares 11208062-005-BGS-0001*
- Hoeksema, H. J. (2002). Grevelingenmeer: van kwetsbaar naar weerbaar? Rijkswaterstaat, RIKZ.
- Huismans, Y., Van der Spek, A., Lodder, Q., Zijlstra, R., Elias, E., Wang, Z.B., 2022. Development of intertidal flats in the Dutch Wadden Sea in response to a rising sea level: spatial differentiation and sensitivity to the rate of sea level rise. *Ocean Coast Manag.* 216, 105969. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105969>

- Lodder, Q.J., Wang, Z.B., Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., de Looff, H., Townend, I.H., 2019. Future response of the Wadden Sea tidal basins to relative sea-level rise: an aggregated modelling approach. *Water* 11 (10). <https://doi.org/10.3390/w11102198>.
- Lodder, Q., Huismans, Y., Elias, E., de Looff, H., & Wang, Z. B. (2022). Future sediment exchange between the Dutch Wadden Sea and North Sea Coast-Insights based on ASMITA modelling. *Ocean & Coastal Management*, 219, 106067.
- Morales, J.A. (2022). Mitigation, Coastal Policies and Integrated Coastal Zone Management. In: *Coastal Geology*. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96121-3_30
- Mulder, J. (1992). De Oosterschelde op zoek naar een nieuwe vorm. . *De Levende Natuur*, 93(5), 134-137.
- Oost, A.P., 1995. Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian Inlet. A study of barrier islands, ebb-tidal deltas, inlets and drainage basins. *Geologica Ultraiectina* 126: 454 pp.
- Pardo, M. D. L. (2014). Effect of biota on fine sediment transport processes: A study of Lake Markermeer. PhD thesis, 209 p., Delft
- Pierik, H. J., Leuven, J. R. F. W., Busschers, F. S., Hijma, M., & Kleinhans, M. G. (2022). Depth-limiting resistant layers restrict dimensions and positions of estuarine channels and bars. *Depositional Record*(February), 9(2), 1–20. <https://doi.org/10.1002/dep2.184>
- Schrijvershof, R. A., van Maren, D. S., Van der Wegen, M., & Hoitink, A. J. F. (2024). Land reclamation controls on multi-centennial estuarine evolution. *Earth's Future*, 12(11), e2024EF005080.
- Smaal, A. C., & Van Stralen, M. R. (1992). Plankton en schelpdieren voor en na de oosterscheldewerken. *De Levende Natuur*, 93(5), 142-146.
- Taal, M., Quataert, E., Van der Spek, A., Huisman, B., Elias, E., Wang, Z. Vermeer, N. 2023. Sedimentbehoefte Nederlands kuststelsysteem bij toegenomen zeespiegelstijging. Deltares rapport 11207897-002-ZKS-0004.
- van der Wegen, M., Taal, M., en Vanlede, J. (2022). Kennisoverzicht impact Zeespiegelstijging Schelde-estuarium: Fysisch functioneren (hydrodynamica en morfologie). Deltares rapport 11206823-000-ZKS-0019.
- van der Spek, A.J.F., 1995. Reconstruction of tidal inlet and channel dimensions in the Frisian Middelzee, a former tidal basin in the Dutch Wadden Sea. In: Flemming, B.W. & Bartholomä, A. (eds): Tidal signatures in modern and ancient sediments. International Association of Sedimentologists, Special Publication 24: 239–258.
- Van Maldegem, D. (2004). Ontwikkeling morfologie Oosterschelde in relatie tot zandhongerproblematiek. RIKZ/AB/2004.809 x.
- Van Maldegem, Dirk & Dick de Jong, 2004. Opwassen of verdrinken: sedimentaanvoer naar schorren in de Oosterschelde, een zandhongerig gedempt getijdesysteem. RIKZ/AB/2003/826x
- Van Maren, D. S., van Kessel, T., Cronin, K., & Sittoni, L. (2015). The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration. *Continental Shelf Research*, 95, 1-14.
- Waterstaat, M. V. (2003). Verandering van de morfologie van de Oosterschelde door de aanleg van de Deltawerken.
- WUR (2010). Het biodiversiteitsbeleid in Nederland werkt (wur.nl). WOt document 225.
- Ysebaert, T., van der Hoek, D. J., Wortelboer, R., Wijsman, J. W., Tangelder, M., & Nolte, A. (2016). Management options for restoring estuarine dynamics and implications for ecosystems: A quantitative approach for the Southwest Delta in the Netherlands. *Ocean & Coastal Management*, 33-48.



Ministerie van Infrastructuur
en Waterstaat

NATIONAAL
DELTA PROGRAMMA



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

