

Kennisprogramma Zeespiegelstijging

Sedimentbehoefte Nederlands kustsysteem bij toegenomen zeespiegelstijging

In opdracht van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging Ministerie Infrastructuur en
Waterstaat / Deltacommissaris

Sedimentbehoefte Nederlands kuststelsysteem bij toegenomen zeespiegelstijging

Colofon

Deze publicatie maakt deel uit van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging, een initiatief van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en de deltacommissaris. Het programma levert kennis op over de gevolgen van zeespiegelstijging en hoe Nederland daarmee kan omgaan. Deze kennis wordt gebruikt bij de herijking van het Deltaprogramma in 2026. Meer informatie over het kennisprogramma en een overzicht van alle publicaties staat op kennisprogrammazeespiegelstijging.nl.

Opsteller: *Deltares*

Geschreven in opdracht van *Rijkswaterstaat WVL* voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging
Maart, 2023

Auteur(s)

Marcel Taal
Ellen Quataert
Ad van der Spek
Bas Huisman
Edwin Elias
Zheng Wang
Nienke Vermeer

Met bijdragen van RWS-WVL

Met bijdrage van Arcadis NL

Jelmer Cleveringa

Sedimentbehoefte Nederlands kuststelsysteem bij toegenomen zeespiegelstijging

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	
Referenties	
Trefwoorden	Zeespiegelstijging, Nederlandse kust, zandsuppleties

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	31-03-2023
Projectnummer	11207897-002
Document ID	11207897-002-ZKS-0004
Pagina's	114
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Marcel Taal	
	Ellen Quataert	
	Ad van der Spek	
	Bas Huisman	
	Edwin Elias	
	Zheng Bing Wang	
	Nienke Vermeer	

Samenvatting

Dit rapport is gemaakt in het kader van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. Het rapport geeft de kennis weer over de sedimentbehoefte van de Nederlandse zandige kust ten behoeve van de herijking van de voorkeursstrategie van het Deltaprogramma in 2026. Deze strategie is nu: zo veel als mogelijk handhaven van de kustlijn met zandsuppleties (*'zacht waar het kan, hard waar het moet'*). Deze strategie is nu geoperationaliseerd in zowel een gemiddelde jaarlijks te suppleren hoeveelheid zand als in een systematiek voor de verdeling daarvan. De systematiek voor de verdeling is gebaseerd op de 'momentane' ligging van de kustlijn, die wordt vergeleken met een referentielijn: de BasisKustlijn (BKL). Aangaande de gemiddeld jaarlijks te suppleren hoeveelheid zand is in de voorkeursstrategie opgenomen dat *'het kustfundament in duurzaam evenwicht met de zeespiegelstijging moet zijn'*. Om te kunnen bepalen hoeveel sediment hiervoor benodigd is, is in het verleden een rekenregel ontwikkeld. Deze rekenregel is verbeterd voor de situatie met meer zeespiegelstijging en continuering van het beheer met suppleties.

Dit rapport presenteert een nadere uitwerking van sedimentbehoefte voor 'een kustfundament dat in duurzaam evenwicht is met de zeespiegelstijging'. Het eerste aspect van duurzaam evenwicht blijft conform het huidige beleid: geen onttrekkingen toestaan in het hele gebied tussen de binnenduinrand en de doorgaande NAP -20 meter dieptelijn. Het vernieuwde aspect is de berekening van het deel van de kust dat daadwerkelijk moet meegroeien om de gebruiksfuncties van de kust te waarborgen. Hiervoor is gekeken naar het deel van de kust waarin gesuppleerd zand zich voornamelijk verspreidt. Dit is de 'actieve zone'. De hoeveelheid zand in deze zone bepaalt op korte en langere termijn de ligging van de kustlijn. Bij handhaving van de kustlijn blijven de gebruiksfuncties van de kust in stand, inclusief het meegroeien van het achterliggende duingebied voor waterveiligheid.

De geografische afbakening van het deel van de kust dat daadwerkelijk moet meegroeien voor behoud van de gebruiksfuncties van de kust volgt uit de morfologische ontwikkeling van het Nederlandse zandige kuststelsel. Het grootste deel van dit rapport wordt gewijd aan de beschrijving hiervan. De ruimtelijke begrenzingen zijn:

- (i) de actieve zone waarin momenteel ook kustlijnverzorging plaatsvindt;
- (ii) een actieve zone waar nu geen kustlijnverzorging gebeurt. Dit is het Waddengebied ten oosten van Schiermonnikoog en
- (iii) de zones die momenteel niet meedoen met de verspreiding van het suppletiezand, maar dat in de toekomst mogelijk wel gaan doen. Dit speelt voornamelijk in de voormalige buitendelta's van de afgesloten zeegaten in de Zuidwestelijke Delta. De ontwikkeling daarvan is op dit moment niet goed of onvoldoende nauwkeurig voorspelbaar om te weten of deze, net als de buitendelta's bij de Waddenzee, behoren tot de actieve zone.

Voor al deze typen gebieden is de sedimentbehoefte (vooral een zandbehoefte) berekend, als een som van de oppervlakte van het gebied vermenigvuldigd met de zichtwaarde van zeespiegelstijging, en de netto transporten uit het gebied.

De sedimentbehoefte van de actieve zone als bedoeld bij (i) is het belangrijkste. Het gaat immers om het gebied waarin nu het kustlijnonderhoud gebeurt. Deze behoefte is in een scenario met beperkte stijging van de zeespiegel (0,5 meter in 2100) 1,4 miljard m³ sediment. Als dit lage scenario wordt doorgetrokken in de tijd is de zeespiegel 1 meter hoger in 2200 en de sedimentbehoefte toegenomen tot 3 miljard m³. Een opgave van 1,1 miljard in 100 jaar komt gemiddeld overeen met de huidige hoeveelheid suppleties per jaar.

Bij scenario's met snellere zeespiegelstijging zijn de sedimentbehoefte uiteraard groter. Het groeit echter niet evenredig. Het gaat om 1,9 miljard m³ bij 1 meter stijging in 2100 en loopt op naar respectievelijk 4,2 en 7,1 miljard m³ bij 2 en 5 meter stijging in 2200. De onzekerheid in deze getallen, voornamelijk samenhangend met beperkingen in kennis van de begrenzing van deze actieve zone, is beperkt (rond de 7 a 8% of maximaal 0,5 miljard m³ bij het meest extreme scenario).

De zone zonder kustlijnzorg (zie ii) kent een lage sedimentbehoefte in het scenario met beperkte zeespiegelstijging (0,1 miljard m³ bij 0,5 m stijging in 2100), die oploopt tot 1,4 miljard m³ in het meest extreme scenario in 2200. De eventuele extra sedimentbehoefte die er is als alle zones onder (iii) meedoen aan de verspreiding van suppletiezand varieert van 0,35 miljard m³ (in 2100) tot 2,9 miljard m³ (meest extreme scenario, in 2200). De grootste sedimentbehoefte ligt, in alle scenario's, bij het Waddengebied. Dit was ook een uitkomst van het onderzoek Kustgenese 2.0.

De resultaten van dit onderzoek onderstrepen de voordelen van de adaptieve en flexibele wijze van kustonderhoud met suppleties via de principes van 'Building with Nature'. De onzekerheid rond de stijging van de zeespiegel is op zichzelf al een reden om zo veel als mogelijk gebruik te maken van deze wijze van kustonderhoud.

Daarmee is het essentieel om zorgvuldig om te gaan met de Nederlandse zandvoorraden en de beschikbaarheid daarvan. Er moet ook voor komende generaties genoeg zand beschikbaar blijven tegen aanvaardbare kosten. Verder investeren in de duurzaamheid en opschaalbaarheid van de voorkeurstrategie is een logische conclusie. Hieronder valt ook het verder ontwikkelen van de kennis van het morfologisch gedrag van de Nederlandse kust.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Aanleiding	9
1.1	Kennisprogramma Zeespiegelstijging en project Zandige Kust	9
1.2	Vraagstelling, interpretatie en aanpak	10
1.3	Leeswijzer	10
2	Conceptuele modellen voor sedimentbehoefte	11
2.1	Conceptuele modellen vertalen systeemkennis naar beleid en beheer	11
2.1.1	Algemene aspecten	11
2.1.2	Schaalniveaus in de conceptuele modellen	11
2.2	Sediment- en/of suppletiebehoefte	12
2.2.1	Generiek denkmodel kustontwikkeling en sedimentbehoefte	12
2.2.2	Denkmodel Kustgenese 2.0, rekenregel, evenwichten op lange tijdschaal	13
2.2.3	Sediment- en suppletiebehoefte cf. Kustgenese 2.0	14
2.2.4	Reflectie op de aannamen van de sedimentbehoefte volgens huidige rekenregel	15
2.3	De 'actieve zone' als basis voor berekenen sedimentbehoefte	15
2.3.1	Fysische onderbouwing van de actieve zone	15
2.3.2	Rol van kustlangs transport	16
2.3.3	Toets van het concept actieve zone met de sedimentbalans vanaf 1990	17
2.4	Uitwerking aangepast denkmodel actieve zone tot rekenregel(s)	18
2.4.1	De aangepaste rekenregel(s), algemeen	18
2.4.2	Bepalen oppervlakten	19
2.4.3	Uitwerking transporten	20
3	Conceptueel model en sedimentbehoefte per deel van de kust	22
3.1	Algemene aspecten van de conceptuele modellen en sedimentbehoefte	22
3.1.1	Scenario's zeespiegelstijging	22
3.1.2	Schaalniveaus	23
3.1.3	Ontwikkelingen onder invloed van zeespiegelstijging	23
3.1.4	Opbouw vervolg hoofdstuk	25
3.2	Grootschalig gedrag en sedimentbehoefte Hollandse kust	25
3.2.1	Ontwikkeling Hollandse kust 1970-2020	25
3.2.2	Schematisatie van de Hollandse kust	27
3.2.3	Invloed van een stijgend gemiddeld zeeniveau.	28
3.2.4	Berekening sedimentbehoefte in een rekenregel voor de Hollandse Kust	30
3.2.5	Relevante kennisleemtes	32
3.3	Grootschalig gedrag en sedimentbehoefte Waddenzee	33
3.3.1	Morfologie Waddenzee – conceptueel model	33
3.3.2	Het belang van de sedimenttransporten door de zeegaten	34
3.3.3	Wijze van berekening sedimenttransporten naar de Waddenzee	34
3.3.4	Uitkomsten berekening transporten door zeegaten	35
3.3.5	Kennisleemtes Waddenzee	36
3.4	Grootschalig gedrag en sedimentbehoefte kust en zeegaten van het Waddengebied	36

3.4.1	Zeegatsystemen	36
3.4.2	Ontwikkeling Waddeneilanden	40
3.4.3	Conceptueel model zeegat en buitendelta	42
3.4.4	Toepassing van de conceptuele modellen	43
3.4.5	Rekenregel zeegaten	45
3.4.6	Resultaten rekenregel voor de zeegaten van het Waddengebied	46
3.4.7	Relevante kennisleemtes zeegaten en buitendelta's	48
3.5	Grootschalig gedrag en sedimentbehoefte Groninger Wad	49
3.5.1	Inleiding en begrenzing	49
3.5.2	Morfologische ontwikkelingen	49
3.5.3	Conceptuele modellen voor sedimentbehoefte Groninger Wad	52
3.5.4	Resultaten toepassen rekenregel en reflectie	53
3.5.5	Relevante kennisleemtes	53
3.6	Grootschalig gedrag en sedimentbehoefte kust en buitendelta's Zuidwestelijke Delta	54
3.6.1	De Deltakust	54
3.6.2	Sedimenthuishouding Deltakust	57
3.6.3	Conceptueel model en effect zeespiegelstijging	58
3.6.4	Uitwerking actieve zone / rekenregel voor sedimentbehoefte Zuidwestelijke Delta	62
3.6.5	Relevante kennisleemtes Zuidwestelijke Delta	64
3.7	Grootschalig gedrag en sedimentbehoefte bij monding Westerschelde	65
3.7.1	Inleiding en begrenzing	65
3.7.2	Schelde-estuarium, sedimentbeheer en uitwisseling met de kust	66
3.7.3	Het mondingsgebied van de Westerschelde	66
3.7.4	Conceptuele modellen voor sedimentbehoefte rond monding Westerschelde	68
3.7.5	Bepaling sedimentbehoefte / uitwerking aangepaste rekenregel	71
3.7.6	Relevante kennisleemtes rondom monding Westerschelde	72
3.8	Transporten over de staatsgrenzen	73
4	Sedimentbehoefte per deel kuststelsel	74
4.1	Inleiding	74
4.2	Sedimentbehoefte deelsysteem Wadden	74
4.3	Sedimentbehoefte deelsysteem Hollandse kust	75
4.4	Sedimentbehoefte deelsysteem Delta, incl. monding Westerschelde	75
4.5	Synthese Nederlands kuststelsel	76
4.6	Vergelijking met resultaten Kustgenese 2.0	78
5	Conclusies en reflectie	80
5.1	Resultaten sedimentbehoefte onder zeespiegelstijging	80
5.2	Reflectie gegeven vragen over houdbaarheid van de voorkeursstrategie	81
5.3	Onzekerheden en vervolgonderzoek	81
6	Referenties	83
A	Overzicht onzekerheden	88
B	Transport naar bekkens Waddenzee, toelichting berekeningen ASMITA	92
B.1	Uitgevoerde berekeningen	92

B.2	Modelresultaten	93
B.3	Conclusies	97
C	Afleiden oppervlakte van de actieve zone	99
C.1	Methodiek	99
C.1.1	Methode afleiden smalle actieve zone	99
C.1.2	Methode afleiden actieve zone buitendelta's	101
C.2	Resultaten	104
D	Onderzoek zandtransporten vooroever	108
D.1	Transporten in de actieve zone	108
D.2	Transporten op de diepe vooroever	110
E	Methodiek sedimentbalans	112

1 Aanleiding

1.1 Kennisprogramma Zeespiegelstijging en project Zandige Kust

Dit rapport is gemaakt in het kader van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP ZSS). Dit programma loopt van 2019 – 2025. Een belangrijk doel ervan is het verkleinen van de onzekerheden over de stijging van de zeespiegel en de gevolgen voor Nederland. Het Kennisprogramma Zeespiegelstijging is ingericht via vijf sporen. Spoor 2 is gericht op de vraag tot hoeveel meter zeespiegelstijging de voorkeursstrategieën uit het Deltaprogramma volstaan en of aanpassingen mogelijk zijn om ze langer vol te houden. Spoor 2 kent drie onderdelen: Waterveiligheid, Zoetwater en Zandige Kust.

Box 1: Voorkeursstrategie Kust

De Voorkeursstrategie Kust komt voort uit de voor het eerst in 2014 geïntroduceerde deltabeslissingen, in het bijzonder de beslissing voor [Waterveiligheid](#) en de [Beslissing Zand](#). Het motto voor waterveiligheid langs de kust is ‘zacht waar het kan en hard waar het moet’ (gebruikmaken van zandsuppleties). Onderdeel hiervan is dat het ‘kustfundament duurzaam in evenwicht is met de zeespiegelstijging’ en ‘het benutten van de maatschappelijke meerwaarde bij het gebruik van zand’. De Nationale Visie Kust (2013: een veilige, aantrekkelijke en economisch sterke kust) legde hiervoor de basis. Samenwerking (voor ‘het benutten van de maatschappelijke meerwaarde’) gebeurt onder meer via het Kustpact uit 2017, voor wat betreft de recreatieve bebouwing van het strand.

Het onderzoeksproject *Zandige Kust* is geschematiseerd in Figuur 1-1. Dit rapport is het resultaat van het onderzoek dat in 2022 is uitgevoerd, gericht op het blok links boven: berekening van de sedimentbehoefte voor vijf zichtwaarden van zeespiegelstijging: 0.5, 1, 2, 3 en 5 meter.



Figuur 1-1: Doelen en fasering KP ZSS, thema Zandige Kust. Het kader omsluit onderzoek waarvoor aan Deltares opdracht is gegeven. VKS Kust = Voorkeursstrategie Kust.

Het rechter deel van Figuur 1-1 toont dat het onderzoek ook bijdraagt aan het aanscherpen van het beleidsadvies Kustgenese 2.0. Deze aanscherping zal Rijkswaterstaat in 2025 doen en is bedoeld om richting te geven aan de uitwerking van de voorkeursstrategie vanaf 2025.

1.2 Vraagstelling, interpretatie en aanpak

De vraag naar de sedimentbehoefte bij zichtwaarden van zeespiegelstijging is gesteld met het oog op de herijking van de voorkeursstrategie. Voor dit rapport is dit geïnterpreteerd als “*wat is de sedimentbehoefte van het deel van de kust dat daadwerkelijk moet meegroeien voor behoud van de gebruiksfuncties bij een zichtwaarde, gegeven het voortzetten van de huidige strategie*”.

Het onderzoek voor het project Zandige Kust is eind 2021 gestart met het inventariseren / opstellen / bespreken van conceptuele modellen die de morfologie en/of sedimentbehoefte beschrijven voor vier deelsystemen van het Nederlandse zandige kuststelsel: Waddenzee, (Hollandse kust met) diepe vooroever, Westerschelde (met monding) en Zeegaten. Dit leidde tot notities, die begin 2022 zijn besproken met een klankbordgroep van kustexperts. Hierna is de onderzoeksaanpak voor 2022 vastgesteld. De tussenresultaten (m.n. concept van de actieve zone dat in dit rapport wordt geïntroduceerd in 2.3) is in november 2022 besproken en afgestemd met de eerder genoemde klankbordgroep. De belangrijkste conclusie uit de voorbereidende fase is de nood aan een aangepaste methode, om de sedimentbehoefte te bepalen, van het deel van de kust dat daadwerkelijk moet meegroeien. Hiervoor is een aangescherpt denkmodel opgesteld, gebaseerd op de identificatie van de ‘actieve zone’. Dat is het deel van de kust waarin, op de tijdschaal van het kustbeleid, sinds 1990, gesuppleerd zand zich voornamelijk verspreidt. Meerdere opties worden naast elkaar gezet in dit rapport. Dit maakt het mogelijk verschillende beleidsscenario’s voor de toekomst, vergelijkbaar met het beleidsadvies Kustgenese 2.0, te ontwikkelen (meer hierover in 2.2.4).

Box 2: Zand of slib of sediment?

Bij studies over sedimentbehoefte is er altijd het risico dat er verwarring ontstaat wanneer wordt verwezen naar zowel zand als slib, of dat juist alleen zand wordt bedoeld. In algemene zin kan gesteld worden dat, wanneer de werking van een systeem en de morfologische ontwikkeling wordt bedoeld het juist is om van sediment te spreken, ook al zal voor delen ervan gelden dat ze vrijwel uitsluitend uit zand bestaan. Evenzo geldt in algemene zin dat als het gaat om suppleties het uitsluitend gaat om zand.

In de context van het uitvoeren van toekomstige suppleties om de kustlijn in stand te houden wordt in dit rapport vrijwel overal de aanname gehanteerd dat uitgegaan kan worden van behoefte aan zand. Er wordt immers onder de huidige strategie niet met slib gesuppleerd. Echter, wanneer in een studie gekeken wordt naar historische ontwikkeling van systemen met een significant percentage slib in de bodem, wat in getijsystemen als de Waddenzee, het Eems-estuarium en de Westerschelde het geval is, is dit onjuist. De onzekerheden die dit meebrengt (voornamelijk als bodemontwikkelingen in het getijsysteem worden vertaald in transporten uit de kustzone) worden bij die onderwerpen toegelicht.

1.3 Leeswijzer

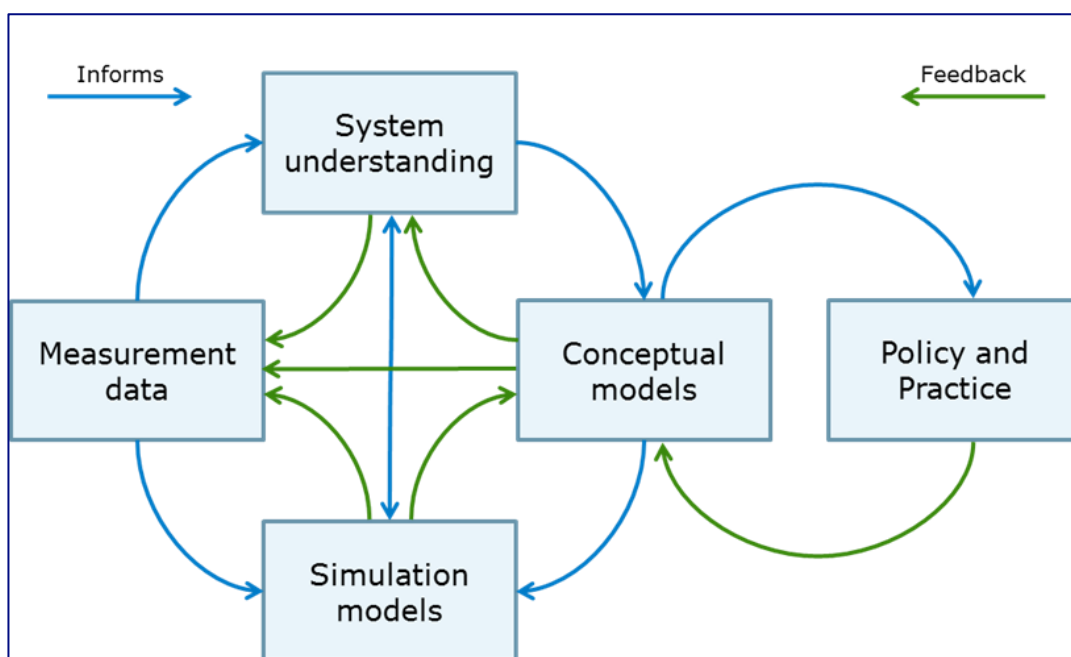
De tot nu toe gebruikte methode om de sedimentbehoefte te bepalen (rekenregel, methode om te komen tot suppletiebehoefte, beiden uit Rijkswaterstaat 2020) en de redenen voor aanpassing naar ‘actieve zone’ zijn uiteengezet in hoofdstuk 2 van dit rapport. De uitwerking van de actieve zone per deel van het kuststelsel staat in hoofdstuk 3. Eerst worden de morfologische werking en conceptuele modellen daarvoor besproken. Daarna volgt de berekening van de oppervlaktes en transporten die in de rekenregel voor de actieve zone ingevuld moeten worden, om zo de sedimentbehoefte te bepalen. Een uitgebreide uitleg van de bepaling van oppervlaktes staat in bijlage C. In hoofdstuk 4 staan alle berekeningen bij elkaar en wordt de synthese gemaakt voor heel Nederland. In hoofdstuk 5 wordt gereflecteerd op de resultaten.

2 Conceptuele modellen voor sedimentbehoefte

2.1 Conceptuele modellen vertalen systeemkennis naar beleid en beheer

2.1.1 Algemene aspecten

Het begrip 'conceptueel model' (soms aangeduid met 'denkmodel') wordt veel gebruikt in deze rapportage. Soms verwijst het direct naar de methoden en rekenmodellen om de sedimentbehoefte te berekenen, vaker naar een vertaling van de kennis van het kuststelsel naar de context van beleid en beheer. Figuur 2-1 (ontleend aan Lodder et al. 2023) toont hoe conceptuele modellen de schakel zijn om systeemkennis beschikbaar te maken voor besluitvorming in beleid en beheer. Het is een beschrijving van een (kust)stelsel dat goed begrepen kan worden, ook door niet-experts, door de gebruikte taal en visualiseringen, zoals diagrammen die samenhangen tonen (zoals causale diagrammen en 'cognitive maps').

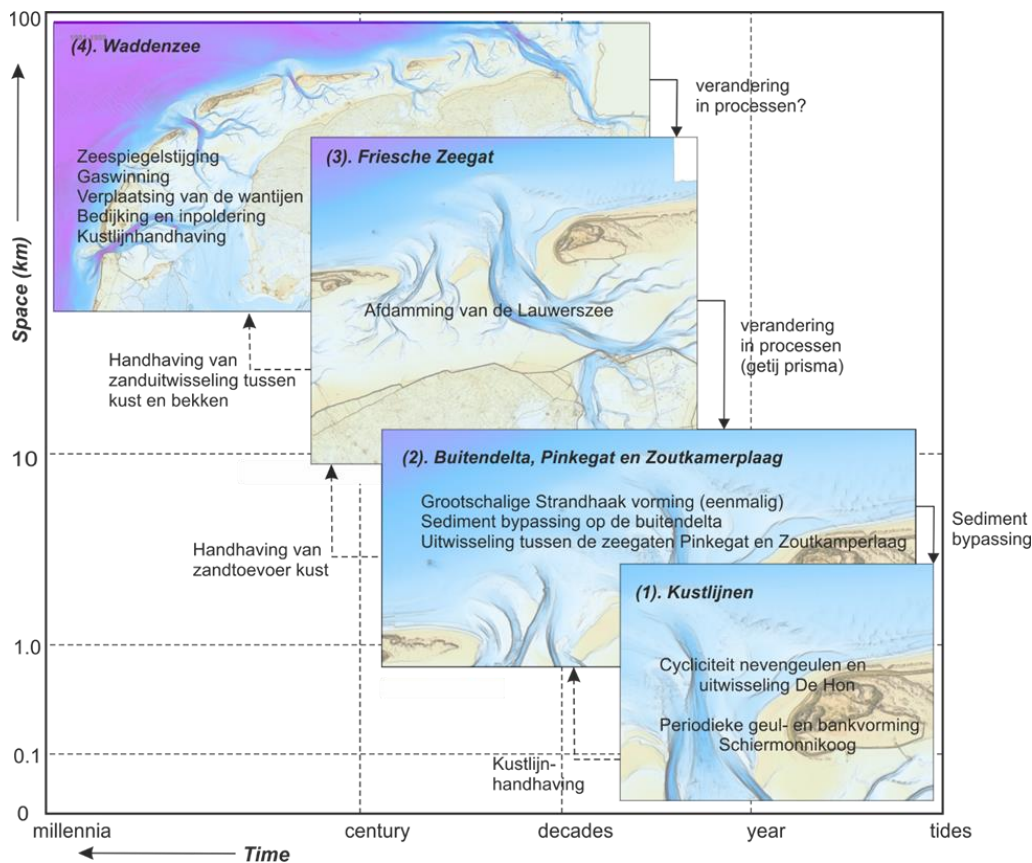


Figuur 2-1: Samenhang types kennis en intermediaire positie van conceptuele modellen naar beleid & beheer (Lodder et al. 2023)

De rekenregel voor het bepalen van de sedimentbehoefte (zie 2.2.2) is een goed voorbeeld van een vertaling van de systeemkennis naar beleidscontext. Het helpt om te weten tot op welk niveau de systeemkennis nodig is en te bepalen waar onzekerheden in de kennis zitten die van invloed zijn in de besluitvorming.

2.1.2 Schaalniveaus in de conceptuele modellen

De methodiek die in dit rapport is uitgewerkt is gestoeld op een algemene aanpak die gebruik maakt van de schaalcascade (zie Figuur 2-2 en toelichting in tekstbox 3). Voor elk van de schaalniveaus en iedere vraagstelling kunnen aparte (meer gerichte) conceptuele modellen nodig zijn. De (veelal verbeterde, in vergelijking met wat beschikbaar was) conceptuele modellen en de toepassing in bepaling van sedimentbehoefte staan allen in hoofdstuk 3.



Figuur 2-2: Illustratie schaalcascade, gebaseerd op de situatie ten westen van Schiermonnikoog

Box 3: Toelichting schaalcascade

Een belangrijk en succesvol hulpmiddel voor het koppelen van verschillende tijd- en ruimteschalen in morfologische systemen is de schaalcascade. Uitgangspunt is dat een morfologische ontwikkeling en de sturende processen een specifieke tijd- en ruimteschaal hebben. Ontwikkelingen op verschillende tijd- en ruimteschalen zijn weliswaar gekoppeld, maar hoeven niet allemaal meegenomen te worden bij de bestudering van een specifieke ontwikkeling. Variatie op een kleinere schaal dan het onderwerp van studie is alleen van belang als deze resulteert in een residueel effect. Zo niet dan kan het als ruis worden beschouwd. Variatie op veel grotere schaal kan worden beschouwd als een externe randvoorwaarde.

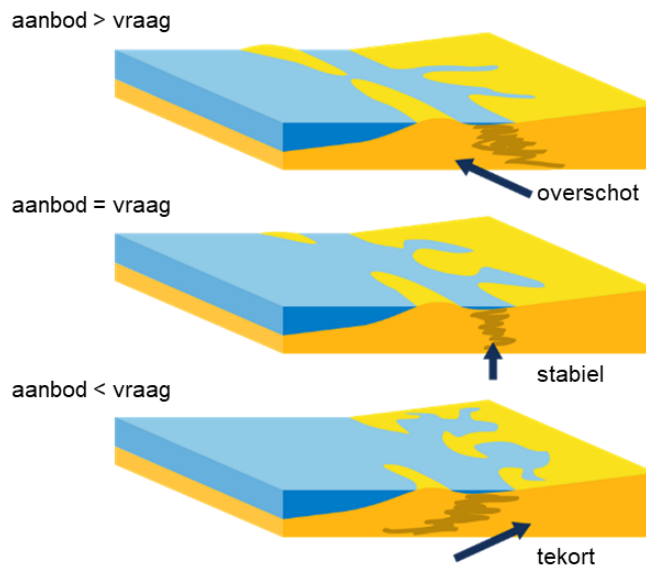
2.2 Sediment- en/of suppletiebehoefte

2.2.1 Generiek denkmodel kustontwikkeling en sedimentbehoefte

Het Nederlandse kustbeleid is gericht op waterveiligheid en het handhaven van kustfuncties door bestrijden van structurele erosie. In de Nota Ruimte (2004) staat de doelstelling “Waarborging van de veiligheid tegen overstromingen vanuit zee met behoud van de (inter)nationale ruimtelijke waarden waarbij de gebiedsspecifieke identiteit een belangrijke kernkwaliteit is.” De huidige voorkeursstrategie heeft vergelijkbare (feitelijk dezelfde) doelstellingen, zie box 1 in 1.1.

Het beleid is gebaseerd op meewerken met de natuur (sinds 1990: “zacht waar het kan, hard waar het moet”) en kennis over de ontwikkeling van kusten op lange tijdschalen. Die kennis zegt dat deze ontwikkeling bepaald wordt door vraag, aanbod en transport van sediment

(Figuur 2-3). Een 'vraag' naar sediment in een kuststelsel ontstaat onder meer door zeespiegelstijging en door transporten het stelsel uit. Het 'aanbod' van sediment is zowel natuurlijke aanvoer als gestuurd door menselijk ingrijpen. Suppleties zorgen voor extra aanbod in een kustvak en laten dit kustvak stabiel blijven bij een toenemende sedimentvraag. Door bij toenemende vraag, door bijvoorbeeld zeespiegelstijging, het aanbod te vergroten, kan een kustvak dus meegroeien.



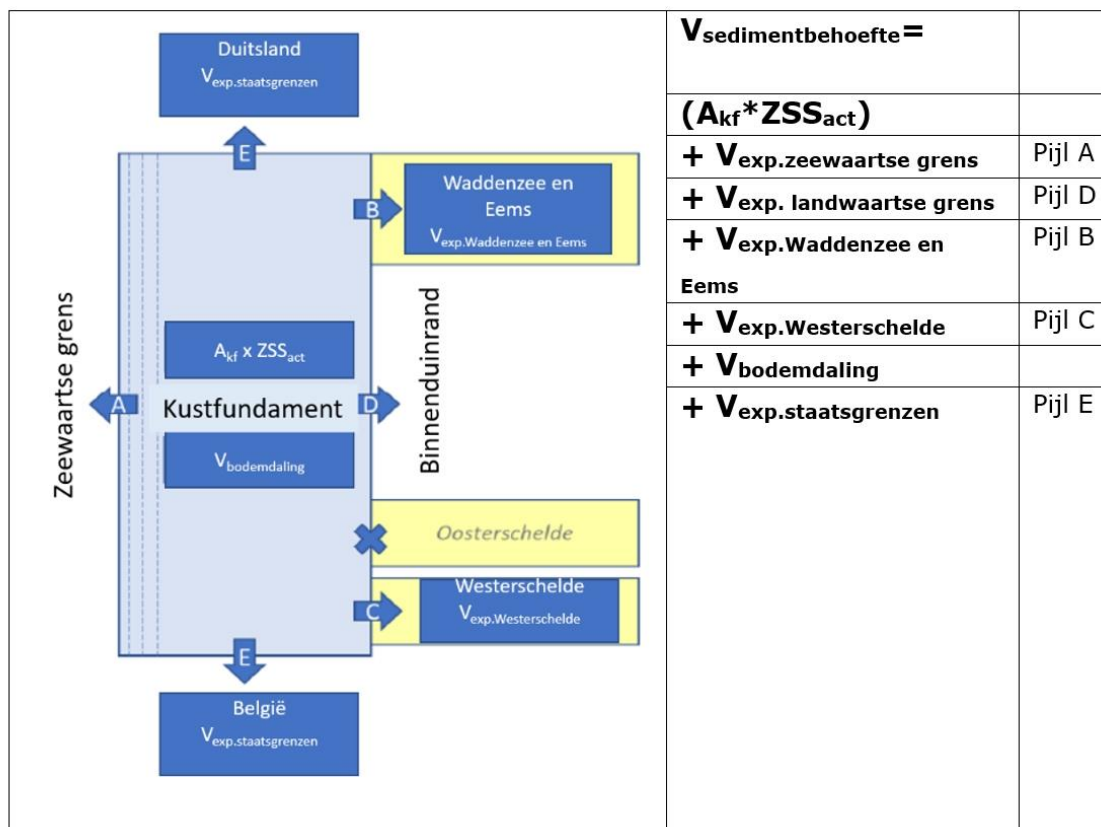
Figuur 2-3: Verband tussen sedimentaanbod en lange termijn kustontwikkeling (naar Nichols, 1989). De pijlen geven aan dat de kustlijn zich uitbouwt, stabiel blijft of zich terugtrekt

2.2.2 Denkmodel Kustgenese 2.0, rekenregel, evenwichten op lange tijdschaal

De sedimentbehoefte in het Nederlandse kustbeleid is geoperationaliseerd in de 'rekenregel sedimentbehoefte kustfundament' (Lodder, 2016 en 2018, Rijkswaterstaat, 2020, Figuur 2-4). Deze operationalisering is onder meer nodig om een afspraak te kunnen maken tussen 'beleid' en 'uitvoering' over het (gemiddelde) jaarlijkse suppletievolume. De definitie van het kustfundament, liggend tussen de binnenuinrand en de doorgaande -20 meter lijn, dient echter ook een ander doel: in dit gebied zijn geen onttrekkingen toegestaan.

De aanname bij gebruik van de rekenregel in Figuur 2-4 is dat er een gebied is aan te geven dat op een lange tijdschaal, langer dan 20 jaar tot aan eeuwen, mee moet groeien met de zeespiegel (vraag en aanbod in balans) om de kustfuncties te waarborgen. Tweede aanname is dat de transporten binnen dat gebied zodanig zijn dat met verdeling daarbinnen op die lange tijdschaal geen extra rekening hoeft te worden gehouden. De sedimentbehoefte is dan de som van "oppervlakte maal zeespiegelstijging" (alles moet meegroeien) en het compenseren van alle netto transporten uit het kustfundament.

In het syntheserapport Kustgenese 2.0 (Rijkswaterstaat, 2020) is de begrenzing van het 'mee te groeien' gebied minder zeewaarts gelegd dan de formele begrenzing van het kustfundament, op een reeks van overwegingen aangaande gemeten transporten op en morfologische ontwikkelingen van de diepe vooroever. Zo kwam de uniforme (landelijke) zeewaartse grens uit op -15 tot -18 meter, met een gekozen tussenvariant van -16,5 meter. De sedimentbehoefte van de Nederlandse kust is met de aangepaste grenzen opnieuw berekend (Deltares 2020a, 2020d).



Figuur 2-4: De rekenregel sedimentbehoefte kustfundament zoals gepresenteerd in Rijkswaterstaat, 2020.

Eén aanbeveling die op basis van Kustgenese 2.0 is gedaan is het opnieuw bekijken van de onderliggende aannamen, in het bijzonder het oppervlak dat sedimentbehoefte heeft bij een mogelijke versnelling van de stijging van de zeespiegel.

2.2.3 Sediment- en suppletiebehoefte cf. Kustgenese 2.0

De suppletiebehoefte is niet hetzelfde als de sedimentbehoefte. De suppletiebehoefte is de hoeveelheid zand die (gemiddeld jaarlijks) nodig is om het beleid 'handhaven van de kustlijn' uit te voeren. De handhaving van de kustlijn gebeurt gegeven het in stand houden van de functies en waarden van de kust. In tegenstelling tot de sedimentbehoefte (gebaseerd op een aanname van een evenwicht tussen aanbod en vraag naar sediment op lange tijdschalen) speelt bij de bepaling van de suppletiebehoefte de menselijke afweging. Waar structurele erosie niet wordt geaccepteerd moet de kustlijn gehandhaafd worden (referentie: BasisKustLijn).

Het syntheserapport Kustgenese 2.0 berekent naast de sedimentbehoefte cf. de rekenregel ook (cf. Lodder et al. 2020) wat de laatste 12 jaar aan suppleties is uitgevoerd. Dit zou een goede voorspelling kunnen zijn voor de hoeveelheid suppleties die de komende 15 jaar nodig zijn, als tenminste mag worden aangenomen dat de zeespiegelstijging in die periode niet significant verandert.

Hierna presenteert het syntheserapport Kustgenese 2.0 vier mogelijke beleidsopties om tot een **suppletie**behoefte voor de komende jaren te komen. Die variëren van direct gebruiken van de cijfers van de laatste twaalf jaar tot en met volledig uitgaan van de sedimentbehoefte volgens de rekenregel en meenemen van alle onzekerheden.

2.2.4 Reflectie op de aannamen van de sedimentbehoefte volgens huidige rekenregel

Het huidige Nederlands kustbeleid zegt dat *'het kustfundament in duurzaam evenwicht met de zeespiegelstijging moet zijn'*. Duurzaam evenwicht omvat, zie hierboven, enerzijds geen onttrekkingen en anderzijds een gebied dat moet meegroeien met de zeespiegelstijging. De omvang van dit gebied was aanvankelijk aangenomen als 'het gehele kustfundament' en is in Rijkswaterstaat, 2020 verkleind door de zeewaartse grens te leggen op -15 tot -18 meter. Beide aangenomen begrenzingsen kunnen echter niet bevestigd worden met de observaties van de laatste 30 jaar, de periode van het huidige beleid. De geobserveerde ontwikkeling van de kust tijdens die periode leert dat de netto transporten binnen het kustfundament niet groot genoeg zijn om vanuit de plaatsen waar gesuppleerd is het zand te verdelen over het hele kustfundament. Het suppletiezand verspreidt zich, op de tijdschaal van het kustbeleid sinds 1990, voornamelijk in een gebied dat hier steeds als de 'actieve zone' aangeduid zal worden. Andere delen van de kust (c.q. het kustfundament) zijn uiteraard ook 'actief', maar niet actief in de zin dat ze significant meedoen in het verspreiden van het suppletiezand.

De verbeterde aanname over 'duurzaam evenwicht' is dat de hoeveelheid zand in deze actieve zone op korte en langere termijn de ligging van de kustlijn bepaalt en dat dit het gebied is dat moet meegroeien met de zeespiegel. Omdat de zeewaartse grens van de actieve zone overal minder diep ligt dan van het 'mee te groeien gebied' dat in Kustgenese 2.0 is bepaald leidt dit tot een lagere sedimentbehoefte, wat vooral veel verschil maakt bij een snellere stijging van de zeespiegel.

Om de sedimentbehoefte van de actieve zone te berekenen is een aangepaste versie van de rekenregel nodig. Dit wordt uitgelegd en onderbouwd in de volgende sectie. De rekenregel kan gebruikt worden voor:

- (i) de actieve zone waarin momenteel ook kustlijnverzorging plaatsvindt;
- (ii) een actieve zone waar nu geen kustlijnverzorging gebeurt, in het bijzonder het Waddengebied ten oosten van Schiermonnikoog en
- (iii) de zones die momenteel niet meedoen met de verspreiding van het suppletiezand, maar dat in de toekomst mogelijk wel gaan doen. Dit speelt voornamelijk in de voormalige buitendelta's van de afgesloten zeegaten in de Zuidwestelijke Delta. De ontwikkeling daarvan is te slecht voorspelbaar om te weten of deze, net als de buitendelta's bij de Waddenzee, behoren tot de actieve zone.

Voor al deze typen gebieden berekent dit rapport de sedimentbehoefte (vooral zandbehoefte). In de bepaling van de oppervlaktes en transporten zitten nog onzekerheden voor wat betreft het optreden en grootte van processen en morfologische ontwikkelingen. Die presenteert dit rapport apart en zijn in het bijzonder van toepassing voor de actieve zone als onder (i). Met het geheel is het mogelijk weer verschillende beleidsopties uit te werken, net als in synthesesrapport Kustgenese 2.0 (zie eind sectie 2.2.3).

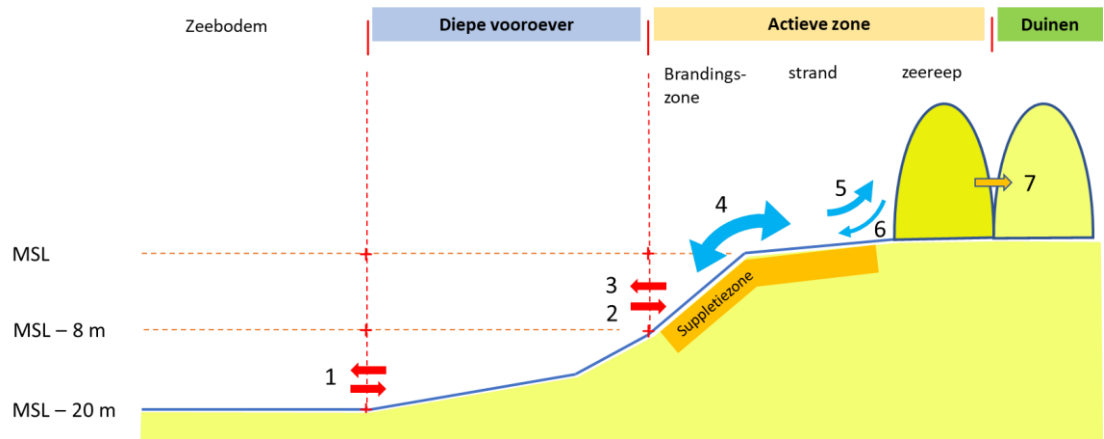
2.3 De 'actieve zone' als basis voor berekenen sedimentbehoefte

Hiervoor is uiteengezet dat de aannamen voor het 'met de zeespiegel mee te groeien gebied' opnieuw tegen het licht moeten worden gehouden. Daarom presenteert dit rapport voor alle verschillende typen / delen van het kuststelsel een conceptueel model van de morfologische ontwikkeling, onder de huidige wijze van kustonderhoud (voorkeursstrategie). Hierin is de 'actieve zone' als het gebied dat een relevante sedimentbehoefte heeft voor het duurzaam handhaven van de kustlijn, het belangrijkste generieke (en nieuwe) element.

2.3.1 Fysische onderbouwing van de actieve zone

Data (zie 2.3.3) over de laatste dertig jaar tonen aan dat actieve zone bestaat en bepaald kan worden. In deze zone worden de zandsuppleties aangebracht. Het blijkt dat suppleties zich vrijwel alleen verspreiden waar voldoende energie is voor transport (door wind op het strand

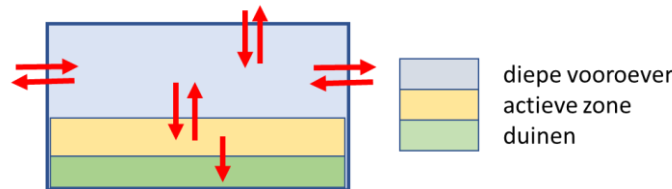
en door golven onder water). Die energie is er in de branding (ondiepe vooroever), op het strand en op de zeereep.



Figuur 2-5: Kustdwarse schematisatie. De transporten binnen de actieve zone (4, 5 en 6) zijn veel groter dan de transporten naar de andere zones (pijlen 2, 3 en 7). De uitwisseling met de zeebodem (zeewaartse grens kustfundament), pijl 1, heeft geen of zeer kleine invloed op de ontwikkeling van de actieve zone. De gekleurde balken bovenin corresponderen met het bovenaanzicht in Figuur 2-6.

Zeewaarts van de actieve zone, op de diepere vooroever, is er minder energie. Dit deel van de kust blijkt de afgelopen dertig jaar niet of nauwelijks te hebben gereageerd op het suppletiebeleid. Hetzelfde geldt voor het duingebied achter de zeereep, waar de ontwikkeling vooral gestuurd wordt door het duinbeheer (IJff et al. 2018 en De Groen et al. 2019) en waar momenteel nauwelijks aanvoer van zand is¹.

Samenvattend kent het kustfundament dus drie zones: diepe vooroever, actieve zone en duinen landwaarts van de zeereep. Dit is geschematiseerd in Figuur 2-5 (via een zijaanzicht, gericht op kustdwarse transportprocessen) en in Figuur 2-6 (bovenaanzicht). Het transport tussen de drie zones is aangegeven met de pijlen 2, 3 en 7 in Figuur 2-5.



Figuur 2-6: Schematisch bovenaanzicht met drie zones als onderdeel van het kustfundament, met aandacht voor alle transporten die niet binnen de actieve zone plaatsvinden.

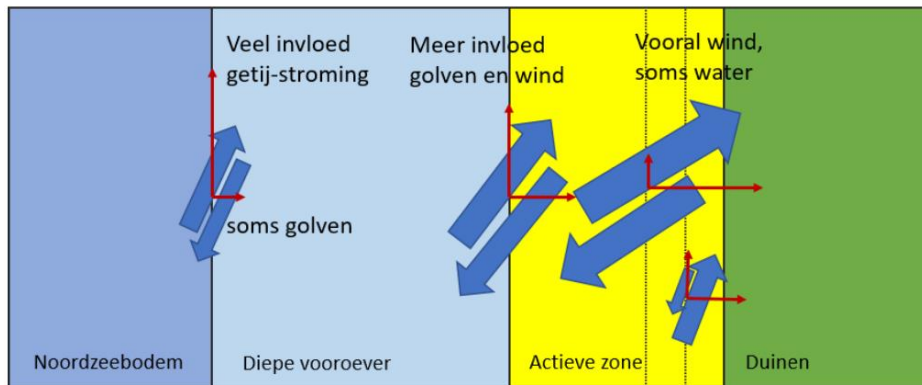
2.3.2 Rol van kustlangs transport

De vraag ligt voor welke invloed kustlangs transport heeft op de sedimentbehoefte van de actieve zone. Voor een specifiek kustvak is dit zonder meer van invloed op de morfologische ontwikkeling². De kustlangse transporten hebben echter geen invloed op de sedimentbehoefte in de actieve zone op nationale schaal. Het kustlangs transport op de ondiepe vooroever is vrijwel overal van de actieve zone in het ene kustvak naar een actieve zone in het aangrenzende kustvak. Alleen als kustlangs transport leidt tot transport naar een deel van

¹ Het niet doorstuiven naar heeft geen effect op de waterkerende functies van de duinen omdat in het totale duningebied voldoende zand is.

² Er wordt daar ook onderzoek naar gedaan, ook in het project Zandige Kust, voor zowel de transporten op de ondiepe als de diepe vooroever, zie bijlage D.

de kust dat niet tot een actieve zone behoort zal de sedimentbehoefte toenemen. Dit komt alleen voor (afhankelijk van beleidskeuze) bij Schiermonnikoog (zie 3.5). Het kustlangs transport op de diepe vooroever (buiten de actieve zone) is overigens wel van belang voor de ontwikkeling van de diepe vooroever zelf (o.m. Deltares, 2020b en Grasmeijer et al. 2022.). Op de diepe vooroever en bij de overgang naar de Noordzeebodem is kustlangs transport groter dan kustdwars transport. Zie ook de illustratie met uitleg in Figuur 2-7.



Figuur 2-7: Schematisatie van het verloop van de relatieve invloed op netto transport van getij, golven en wind in kustdwarse en kustlangse richting. De rode pijlen geven kwalitatief aan wat de verhouding is van de transporten in kustlangse en kustdwarse richting. De blauwe pijlen zijn niet op schaal en louter illustratief.

2.3.3 Toets van het concept actieve zone met de sedimentbalans vanaf 1990

In 2022 is gestart met het bepalen van de grootschalige zandbalans van de Nederlandse kust, als update van eerdere studies (o.a. Van der Spek en Lodder, 2015, Elias et al., 2017 en Elias, 2019). In de sedimentbalans van de Waddenzee in Kustgenese 2.0 (Elias, 2019) zaten significante onzekerheden in de sedimentvolumes, veroorzaakt door het onderschatten van verliezen naar de eilanden en onnauwkeurigheden in bodemdata (Vaklodingen) en hoeveelheden suppleties. Uit recente studies binnen KPP B&O Kust (Elias et al. in prep) volgt dat de volumeveranderingen in de eilandkoppen en -staarten juist een belangrijk onderdeel vormen in de sedimentbalans van de (Wadden)kustzone. Daarnaast is de verwachting dat de Jarkus-data een betere schatting kunnen geven van de volumes bij de centrale eilandkust (en Hollandse Kust) dan de vaklodingen. Deze nieuwe inzichten en methodieken ('sedimentbox', uitgelegd in Bijlage E) worden gebruikt om een grootschalige sedimentbalans van de Nederlandse Kust te maken. Dit is onderzoek dat in 2023 wordt voortgezet en afgerond. Dan zal er ook een volledige rapportage zijn.

Voorliggend rapport maakt gebruik van de eerste resultaten van de grootschalige sedimentbalans. Dat geeft inzicht in de ontwikkeling van de Hollandse Kust gedurende 30 jaar beleid gebaseerd op zandsuppleties. Tabel 2-1 laat zien dat het totale sedimentvolume in de actieve zone van de Hollandse Kust (van Groote Keeten tot Hoek van Holland) is toegenomen met ruim 163 miljoen (mln.) m^3 sinds 1990. Wanneer dit volume wordt vergeleken met het in de actieve zone aangebrachte volume zand (ruim 171 mln. m^3)³, volgt hieruit een transport uit de actieve zone van 8 mln. m^3 sinds 1990. Een belangrijke kanttekening hierbij is dat er onzekerheden zitten in de berekening van de suppletievolumes, in het bijzonder de verschillen tussen 'in-situ' en 'beun' volumes (orde 10 – 15%). Ook de methode van berekenen van de volumes in de actieve zone zorgt, maar in mindere mate, voor onzekerheid. Dit wordt gekwantificeerd in 2.4.2 en opgepakt / uitgewerkt in vervolgonderzoek naar de sedimentbalans.

³ Dit omvat alle suppleties. De Zandmotor en versterkingen Zwakke Schakels (waaronder de Hondsbossche Duinen), omvatten samen 81 mln. m^3 van het totaal van 171 mln. m^3 , zie Tabel 2-1. Dit sediment bevat wel een 'slijtlaag', maar is niet allemaal bedoeld om te verspreiden

Ondanks de onzekerheden rondom de hierboven gepresenteerde getallen kunnen toch belangrijke conclusies worden getrokken over het conceptuele model van de 'actieve zone'. De uitkomsten tot nu toe zijn al zo duidelijk dat de hoofdlijnen helder zijn. Er blijkt beperkt transport uit de actieve zone, 8 miljoen m³ in 30 jaar, te zijn, dus ca. 0,25 mln. m³ per jaar. Deze 0,25 mln. m³ per jaar lijkt bovendien van dezelfde orde als ingeschat kustlans transport bij Groote Keeten noordwaarts (in het kustvak 'Zeegat van Texel', onderdeel van het Waddengebied). Dat wil zeggen dat het getransporteerde zand waarschijnlijk alsnog in de actieve zone blijft, en niet (of in veel mindere mate) naar de diepe vooroever verdwijnt.

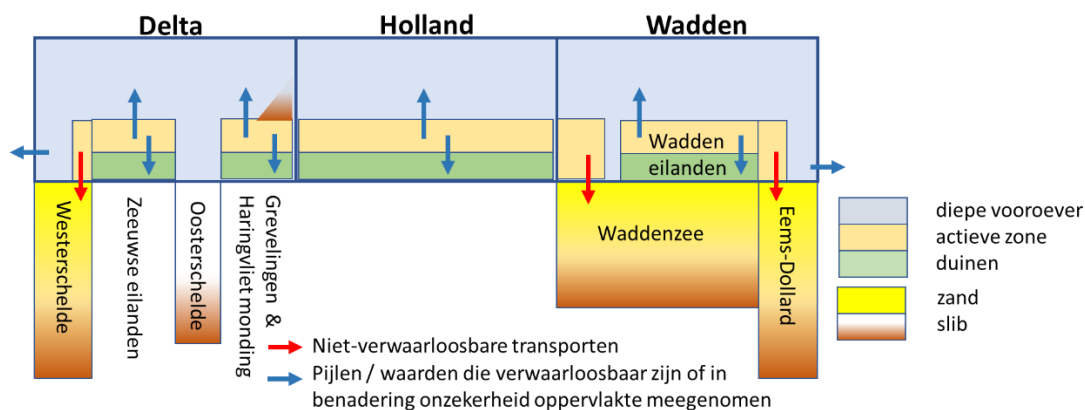
Tabel 2-1: Analyses sedimentbalans van de actieve zone voor vijf delen van de Hollandse kust en vergelijking met de suppletievolumes (bron: suppletiedatabase Rijkswaterstaat). HPZ = Hondsbossche en Pettemer Zeewering, tegenwoordig HBD = Hondsbossche Duinen. Het zandvolume van de Zandmotor en versterkingen van Zwakke Schakels, waaronder de Hondsbossche Duinen, zijn deel van het totaal van 171 mln. m³. Alle getallen in miljoenen m³ sediment

	Toename sedimentvolume actieve zone				Suppleties 1990-2021	
	Duin	Strand	Vooroever	Actieve zone totaal	Suppleties (totaal)	Zwakke schakels, Zandmotor
Groote Keeten – HPZ / HBD	2.9	0.9	6.8	10.6	11.7	0
HPZ / HBD	10.7	10.5	21.5	42.7	47.4	35.0
HPZ / HBD – IJmuiden	9.2	3.2	10.8	23.2	23.6	0
IJmuiden - Scheveningen	18.5	10.9	11.1	40.5	33.4	6.6
Scheveningen – Hoek van Holland	15.8	14.8	16.0	46.7	55.5	39.4
Totaal Hollandse Kust (sinds 1990)	57.1	40.3	66.2	163.7	171.6	81.0

2.4 Uitwerking aangepast denkmodel actieve zone tot rekenregel(s)

2.4.1 De aangepaste rekenregel(s), algemeen

Het voorafgaande laat zien dat de hoeveelheid sediment in de actieve zone op een tijdschaal van enkele tot enkele tientallen jaren de ligging van de momentane kustlijn (MKL)⁴ bepaalt.



Figuur 2-8: Illustratie aangepaste rekenregel. De zandkleurig/beige gebieden 'actieve zone' moeten volledig meegroeien met de zeespiegel. De oppervlakte ervan is veel kleiner dan het kustfundament (omvat diepe

⁴ Deze wordt vergeleken met de referentie: BasisKustLijn (BKL). Suppleties worden, vanwege kosten- en milieuaspecten, bij voorkeur in de brandingszone c.q. ondiepe vooroever aangebracht en alleen waar nodig op het strand. Bij hoge uitzondering wordt zand toegevoegd als directe versterking van de zeereep.

vooroever, actieve zone èn duinen). Rode pijlen zijn transporten naar bekkens en estuaria. Transporten die verwaarloosd kunnen worden ten opzichte van de overige sedimentbehoefte zijn blauw. Alle pijlen kunnen beide kanten op wijzen. De aanname is dat er geen sedimenttransport is door de Oosterscheldekering.

Bij het uitwerken van het concept 'actieve zone' tot rekenregels kan allereerst gewerkt worden met de aanname dat ook in de toekomst het kustonderhoud is gericht op handhaven van de kustlijn (met als referentie de BKL) en dat de suppleties die nodig zijn voor de handhaving plaatsvinden en zich verspreiden in de zone die we nu als 'actief' identificeren. Dit is verbeeld in Figuur 2-8.

Het voorafgaande impliceert een grote verandering. Gebruik van de actieve zone betekent dat een veel kleinere oppervlakte mee moet groeien met de zeespiegel voor 'duurzaam behoud'. Er is wel een belangrijke onzekerheid omdat er enerzijds gebieden zijn die wel suppletiezand ontvangen uit een 'actieve zone', maar in het huidige beleid niet worden onderhouden door kustlijnverzorging. Anderzijds zijn er gebieden die momenteel niet meedoen met de verspreiding van het suppletiezand, maar dat in de toekomst mogelijk wel gaan doen. Deze zijn apart in beeld gebracht in de drie categorieën die eind 2.2.4 zijn geïntroduceerd.

De aangepaste rekenregel voor sedimentbehoefte heeft een opzet cf. de 'oude' rekenregel :

$$\text{Sedimentbehoefte} = \text{"oppervlakte gebieden die moeten meegroeien"} * \text{zeespiegelstijging}^5 + \text{netto transporten uit die gebieden}$$

Hieronder volgt de uitwerking voor de termen in de aangepaste rekenregel, eerst voor de oppervlaktes, vervolgens voor de transporten.

2.4.2 Bepalen oppervlakten

Het bepalen van de oppervlaktes (dus de begrenzing) van de drie categorieën actieve zone(s) gebeurt door in detail te kijken naar de morfologische ontwikkeling van de kust. Het eenvoudigst is dit voor kusten waar de actieve zone gekarakteriseerd wordt door een zeereep (eerste duinenrij), strand en ondiepe vooroever, zoals bij de Hollandse Kust en (centrale) eilandkust van de Waddeneilanden en Zeeuwse Delta.

De zeewaartse grens van de actieve zone ligt voor deze delen van de kust, kustdwars gezien, op het punt waar (het verschil in) retourtransport 3 en kustwaarts transport 2 (zie Figuur 2-5) zo beperkt is dat er (vrijwel) geen morfologische ontwikkeling is te zien. Dit punt is voor elke 'meetraai' (JarKus) langs de hele Nederlandse kust, met de gegevens over de periode 1965-2022, bepaald. Het punt is visueel afgeleid op basis van het buigpunt van de min of meer gelijkmatige diepe vooroever naar het steilere bankprofiel. Dat is niet een standaarddiepte. Er is momenteel geen indicatie dat deze punten (die samen een lijn vormen) sterk zee- of landwaarts zal verplaatsen bij een gestegen zeespiegel (ze verplaatsen niet omdat we blijven suppleren). De morfologische ontwikkeling bij kustversterkingen en de Zandmotor (zie Figuur 3-9) ondersteunt deze aanname.

Wanneer er een getijgeul dicht langs de kust ligt, wordt de zeewaartse grens aan de zeezijde van de geul gekozen. Dit is ter compensatie van de verwachte toename in sedimentverliezen van de kustzone naar de getijgeul ten gevolge van de zeespiegelstijging. De landwaartse begrenzing van de actieve zone ligt landwaarts van de zeereep en is bepaald op basis van de meest landwaartse duintop sinds 1965, inclusief een marge om de landwaartse helling

⁵ Lees hier 'relatieve zeespiegelstijging', dus inclusief bodemdaling. De bodemdaling kan echter als ondergeschikt aangenomen worden op de tijdschaal en zichtwaarden waar dit rapport zich op richt.

van de zeereep mee te nemen. Dit alles is uitgewerkt, beschreven en geïllustreerd per deel van het kuststelsysteem en in overzicht gepresenteerd in Bijlage C.

Voor buitendelta's is het bepalen van de actieve zone minder evident. Na de bespreking van het algemene conceptuele model ervan (in 3.3.4) wordt in 3.4.5 een methodiek voor het bepalen van de actieve zone van buitendelta's voorgesteld.

De aannames en keuzes in het bepalen van deze begrenzingsen bevatten een onzekerheid. De zeewaartse grens van de actieve zone is niet exact te bepalen en het is ook niet uitgesloten dat er enig transport over de grens naar de diepe vooroever en aanpassing van de zeewaartse helling van de ondiepe vooroever plaatsvindt, in het bijzonder als de zeespiegel sterker is gestegen. Deze gecombineerde onzekerheid wordt gekwantificeerd door voor de hele Nederlandse kust, zonder de buitenzijde van de buitendelta's (lengte 250 km, zie de berekening in Bijlage C) een breedte van 250 meter extra mee te groeien gebied aan te nemen als proxy voor deze combinatie van onzekerheden⁶. De 250 meter is beredeneerd als een onzekerheid aan de landwaartse zijde van 50 meter en aan de zeewaartse zijde van 200 meter⁷. Dit leidt voor heel Nederland tot een onzekerheid die rekenkundig overeenkomt met een mee te groeien oppervlak van 63 km² op een totaal van ruim 870 km² in de meest 'krappe variant'. Daarvan is 43% gerelateerd aan de Hollandse kust, 22% aan het deelsysteem Wadden en 35% aan de Zuidwestelijke Delta.

Hiernaast is er de oppervlakte van de actieve zone waar nu geen kustlijn zorg gebeurt (in het bijzonder ten oosten van Schiermonnikoog, sectie 3.4.7), net als de oppervlaktes van 'de zones die momenteel niet meedoen met de verspreiding van het suppletiezand, maar dat in de toekomst mogelijk wel gaan doen' (zie sectie 3.6 en sectie 3.7). De wijze waarop de oppervlaktes daarvan bepaald zijn, wordt steeds daar behandeld.

Hiermee zijn twee typen onzekerheden benoemd, maar er zijn er meer. Het benoemen en berekenen van alle onzekerheden gebeurt bij bespreking van de conceptuele modellen in Hoofdstuk 3 en daar wordt ook een oordeel gegeven over de prioriteit die het verminderen ervan moet hebben (bij secties over prioritair kennisleemten). Onzekerheden die de houdbaarheid van de voorkeursstrategie beperken omdat ze tot *meer* behoefte aan zand voor suppleties leiden zijn van bijzonder belang. Om alle onzekerheden naast elkaar te kunnen zien is Bijlage A opgenomen.

2.4.3 **Uitwerking transporten**

De netto transporten bestaan enerzijds uit de netto kustdwarse transporten (zie Figuur 2-5 en Figuur 2-6), die optreden langs de hele kustlijn:

$$\textit{netto kustdwars transport} = \textit{netto transport duinen} + \textit{netto transport diepe vooroever}$$

en anderzijds uit de transporten naar de zanddelende getijsystemen (zoals ook opgenomen in de rekenregel die in Kustgenese 2.0 is gebruikt en te zien in Figuur 2-8):

$$\textit{transporten zanddelende systemen} = \textit{transport bij monding Westerschelde (incl. staatsgrens)} \\ + \textit{transport bekkens Waddenzee} + \textit{transport bij Groninger Wad (incl. Eems en staatsgrens)}$$

⁶ De onzekerheid wordt dus bepaald als een toeslag op de oppervlakte, en dus niet als een reguliere foutmaat, bijvoorbeeld een gemiddelde waarde +/- een standaard deviatie.

⁷ Uiteraard past dit niet bij de hele Nederlandse kustlijn, maar hiermee is wel een voldoende orde-grootte schatting mogelijk van de onzekerheid en kan ze in perspectief worden gezet van de berekende totalen en invloed van de beleidskeuzen.

De definitie van de actieve zone en de wijze van bepaling ervan betekent dat het netto kustdwars transport (zeer) klein is in vergelijking met de sedimentbehoefte in de actieve zone bij een stijgende zeespiegel. Het verschil tussen het netto kustdwars transport en de sedimentbehoefte neemt toe bij een sneller stijgende zeespiegel. De sedimentbehoefte groeit namelijk lineair met de snelheid van stijging. Zelfs als de kustdwarse transporten uit de actieve zone dat ook zouden doen, dan nog zullen de absolute verschillen groeien. Het is echter zelfs zeer waarschijnlijk dat de transporten uit de actieve zone veel minder of niet veranderen onder zeespiegelstijging. De belangrijkste aandrijvende kracht (lokale waterbeweging) wordt namelijk niet of nauwelijks gestuurd door de zeespiegelstijging (het is daar nog steeds even diep, de bodem is meegegroeid). Dit maakt het mogelijk het kustdwarse transport uit de actieve zone in Figuur 2-8 als verwaarloosbaar, uiteraard met onzekerheid, aan te nemen.

3 Conceptueel model en sedimentbehoefte per deel van de kust

3.1 Algemene aspecten van de conceptuele modellen en sedimentbehoefte

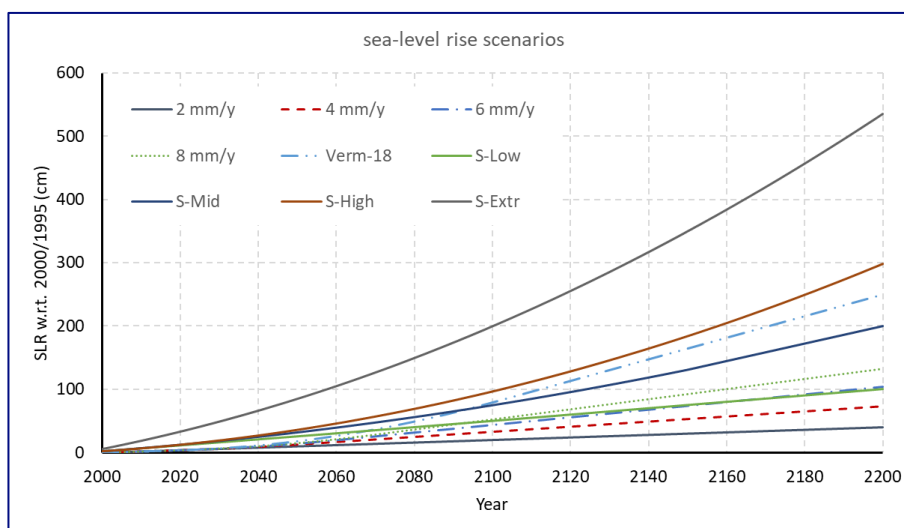
Zoals beschreven in Hoofdstuk 2 wordt de sedimentbehoefte van de kust bij de zichtwaarden berekend door de oppervlakte van de relevante delen van het kuststelsel te vermenigvuldigen met de stijging van het gemiddeld zeeniveau van 0,5 m, 1 m, 2 m, 3 m en 5 m.

3.1.1 Scenario's zeespiegelstijging

Bij de berekening van de sedimentbehoefte bij een stijgende zeespiegel speelt ook de snelheid van stijging een rol. Hoe sneller de stijging, hoe korter de tijd van het systeem om zich aan te passen. Dit speelt met name bij de import van sediment in de getijdebekkens. In de berekende sedimentbehoeften bij de zichtwaarden worden vier scenario's gebruikt: 'laag', 'mid', 'hoog' en 'extreem' (Tabel 3-1). Ze beschrijven hoe de zichtwaarden bereikt worden in de jaren, en zijn gebaseerd op Vos (2021). Het verloop van de zeespiegelstijging in de tijd is te zien in Figuur 3-1, waarin behalve de vier beschouwde scenario's ook de scenario's beschouwd in Kustgenese 2.0 (Lodder et al., 2022) zijn afgebeeld.

Tabel 3-1: De scenario's volgens welke in de berekeningen de zichtwaarden van de zeespiegelstijging bereikt worden in 2100 en 2200. NB: zichtwaarde '5 m zeespiegelstijging' wordt in het jaar 2190 bereikt, niet in 2200.

scenario's van zeespiegelstijging voor berekening sedimentbehoefte							
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	2190

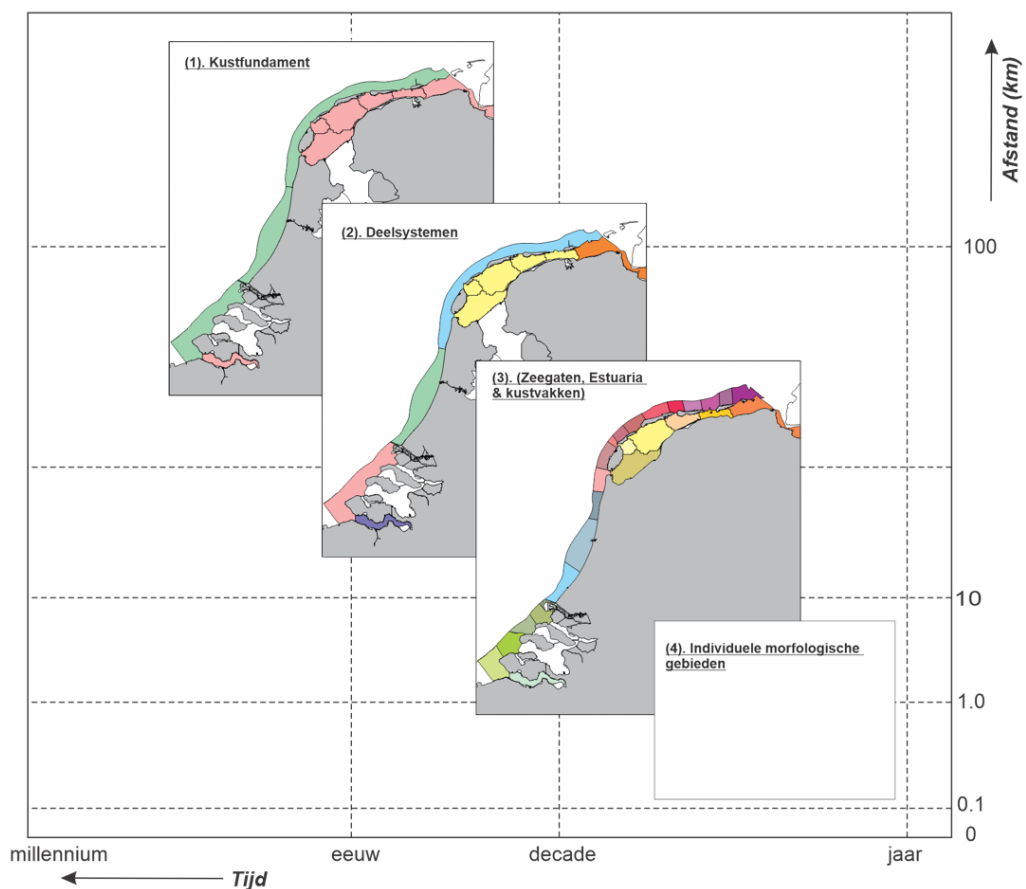


Figuur 3-1: Overzicht gebruikte scenario's van zeespiegelstijging bij berekeningen met ASMITA, gebaseerd op Vos, 2022. Voor het koppelen aan de zichtwaarden (0,5 m, 1 m, 2 m, 3 m en 5 m) zijn zowel beperkte versnellingen van stijging van de zeespiegel (0,5 m in 2100, 1 m in 2200) als extreme stijgingen (2 m in 2100, 5 m in 2200) en tussenliggende waarden (1 m in 2100, 2 en 3 m in 2200) gebruikt.

3.1.2 Schaalniveaus

Voor het structureren van de systeemkennis, het opstellen van conceptuele modellen en vervolgens bepalen van de sedimentbehoefte voor de delen van het kuststelsel zijn vier schaalniveaus gebruikt (zie Figuur 3-2):

1. Gehele Nederlandse kuststelsel: kustfundament en sedimentdelende getijdebekkens;
2. Deelsystemen van het kuststelsel: Waddenkust, Hollandse kust en kust Zuidwestelijke Delta, naast de sedimentdelende bekken en estuaria (Waddenzee, Eems-Dollard en Schelde-estuarium);
3. Kustvakken, met begrenzing op mate waarop ze te bestuderen en te duiden zijn qua morfologische ontwikkeling op een tijdschaal van 30-50 jaar. Dit is ook de tijd- en ruimteschaal waarop er kennis is van de effecten van 30 jaar kustonderhoud via zandsuppleties.
4. Individuele morfologische gebieden. Deze zijn voor het project Zandige Kust onder meer van belang bij het opstellen van sedimentbalansen. Deze rapportage zoomt niet verder in dan schaalniveau 3. De morfologische ontwikkelingen zijn wel gebruikt bij het bepalen van de grenzen van de actieve zones.



Figuur 3-2: Schaalcascade Nederlandse kust.

3.1.3 Ontwikkelingen onder invloed van zeespiegelstijging

Effecten zeespiegelstijging op getij langs kust

Een analyse met een waterbewegingsmodel (Veenstra et al., 2020) laat zien wat de effecten zijn van een hoger zeeniveau op de getijbeweging langs de Nederlandse kust. Overigens is de morfologie in het model niet aangepast aan een hogere stand van de zeespiegel. Hierom zijn deze resultaten een eerste indicatie.

Door de toename van de diepte van de Noordzee gaat de getijgolf sneller lopen en neemt de getijslag toe. Bij een stijging van de middenstand van 1 m nemen de hoogwaters langs de Nederlandse kust tot 5% extra toe. In de Waddenzee en Oosterschelde loopt dit op tot 15%. De laagwaterstanden zijn tot 5% lager.

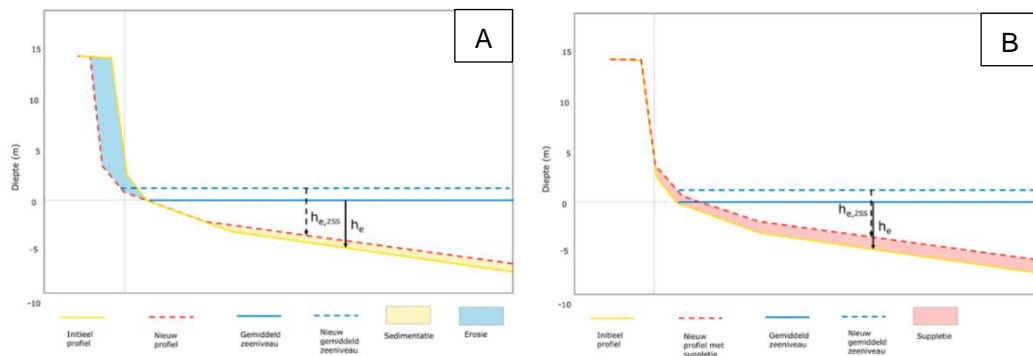
Een vergelijking van de resultaten van simulaties met een middenstandsverhoging van 0,1 tot en met 2,0 m verhoging laat zien dat met toenemende stijging van de middenstand het getij sneller gaat lopen en de getijamplitudes toenemen. De variatie in de hoog- en laagwaters langs de kust blijft echter vrijwel gelijk, alle waterstanden schuiven in dezelfde mate mee omhoog.

Samengevat: met een stijgend zeeniveau vervroegt het getij (gaat sneller) en neemt de getijslag toe. Het is niet duidelijk of dit ook significant effect heeft op de snelheden van de getijstrooming, en daarmee op zandtransporten, en op de aanvoer van slib uit de zuidelijke Noordzee. Tevens is niet op voorhand duidelijk wat dit betekent voor de interactie van het Noordzeegetij met de getijbeweging in de estuaria en getijdebekkens. Alleen voor de Oosterschelde is hier onderzoek naar gedaan en wordt het effect op de morfologische ontwikkeling van de buitendelta besproken (zie 3.6.3). Voor de andere delen van de Nederlandse kust blijven deze effecten buiten beschouwing.

Stormklimaat

Eventuele veranderingen in het stormklimaat zullen grote effecten hebben op de ontwikkeling van de diepe vooroever. Dat geldt wellicht ook voor de uitwisseling van zand met de ondiepe vooroever. Dit wordt niet meegenomen in het Kennisprogramma Zeespiegelstijging, evenals andere effecten van klimaatverandering op de hydrodynamica van de kust.

Ontwikkeling kustprofiel bij zeespiegelstijging en relatie met suppleties



Figuur 3-3: A: Schematische weergave van de aanpassing van het kustprofiel na zeespiegelstijging volgens de theorie van Bruun (1962). De afbeelding toont het bovenste deel van het profiel, sedimentatie loopt verder zeewaarts door.

B: Schematische weergave van een gesuppleerd kustprofiel na zeespiegelstijging. Indien er evenveel zand gesuppleerd is als de opgetreden toename van het gemiddelde zeeniveau treedt er geen landwaartse verplaatsing van het evenwichtprofiel op. (Bron: Rijkswaterstaat, 2020)

Onderzoekers gaan ervan uit dat het kustprofiel zich voortdurend aanpast aan de stand van de zeespiegel en de heersende golfcondities. Een kustprofiel in evenwicht (dwars op de kust) wordt ook wel het evenwichtprofiel genoemd. In theorie blijft de vorm van het kustprofiel gelijk bij een stijging van de zeespiegel (Bruun, 1962). Het gevolg daarvan is dat het evenwichtprofiel landwaarts verplaatst waarbij de ondiepe kustzone zand verliest, met kustachteruitgang tot gevolg, en de diepere kustzone zand ontvangt. Bruun gaat ervan uit dat het geërodeerde volume zand gelijk is aan het in dieper water afgezette volume (zie Figuur 3-3A). Deze voorstelling van zaken is te eenvoudig, met name kustlangs sedimenttransport zal de kustdwarse uitwisseling van zand sterk beïnvloeden. Desalniettemin laat deze eenvoudige benadering duidelijk zien wat het effect van zeespiegelstijging op het kustprofiel

is en dat dit sedimentbehoefte veroorzaakt. Door toevoegen van zand (via zandsuppleties) wordt het initiële profiel verhoogd, en blijft het profiel op zijn evenwichtsdiepte ondanks zeespiegelstijging. Hierdoor gaat er minder zand verloren uit de ondiepe kustzone, wat de landwaartse terugtrekking van de kustlijn beperkt of stopt (zie Figuur 3-3B). Dit principe is de inhoudelijke basis van het suppletiebeleid. Het sluit aan bij het denkmodel van 'vraag' en 'aanbod' van sediment als basis van kustontwikkeling (zie 2.2.1).

3.1.4 Opbouw vervolg hoofdstuk

In de volgende sectie wordt als eerste de Hollandse kust besproken. De ontwikkeling van de Hollandse kust is namelijk relatief eenvoudig te beschrijven en samen te vatten in een conceptueel model. Daarna volgen, in volgorde van toenemende complexiteit, de Waddenkust en de Deltakust. De complexe situaties rond de mondingen van de estuaria Eems en Westerschelde worden in separate secties besproken.

3.2 Grootschalig gedrag en sedimentbehoefte Hollandse kust

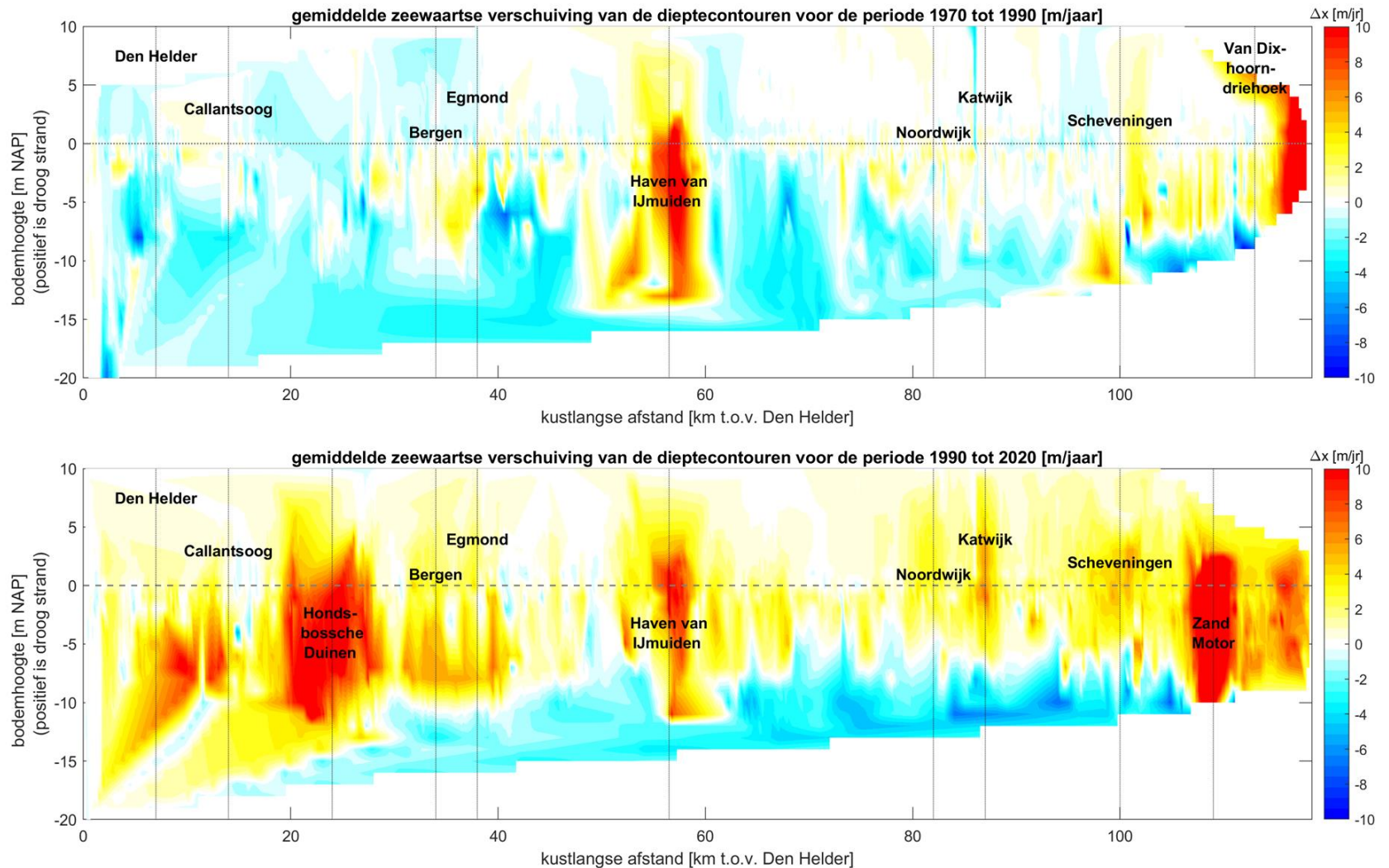
Voor het inschatten van de effecten van versnelde zeespiegelstijging op de Hollandse kust analyseren we het langjarig gedrag van het kustprofiel aan de hand van de jaarlijkse Jarkus-metingen sinds 1965. De ontwikkelingen sinds de invoering van het suppletiebeleid in 1990 zijn voornamelijk de basis van het conceptuele model van de systeemwerking.

3.2.1 Ontwikkeling Hollandse kust 1970-2020

Figuur 3-4 geeft een overzicht van de ontwikkeling van de Hollandse kust tussen Den Helder (links in figuur) en Hoek van Holland (rechts in figuur), zoals die is afgeleid uit de jaarlijkse kustmetingen (Jarkus) sinds 1970. De verplaatsing van de hoogte- en dieptelijnen van de zeereep, het strand en de vooroever tussen NAP + 10 m en NAP -20 m geeft aan of de kust voor- of achteruit gaat.

De bovenste afbeelding laat de veranderingen over de periode 1970-1990 zien, dat is de periode vóórdat het suppletiebeleid ingevoerd werd. Het algemene beeld is lichtblauw, wat duidt op landwaartse verplaatsing en dus erosie van het hele kustprofiel. Opvallend is de sterke uitbouw van de kust net ten noorden van Hoek van Holland door de aanleg van de Van Dixhoorndriehoek, en ten noorden en zuiden van IJmuiden als gevolg van de verlenging van de havenhoofden aldaar. Een overwegende achteruitgang van de kust zien we in het noorden, samenhangend met de ontwikkeling van de geulen in de buitendelta van het Zeegat van Texel.

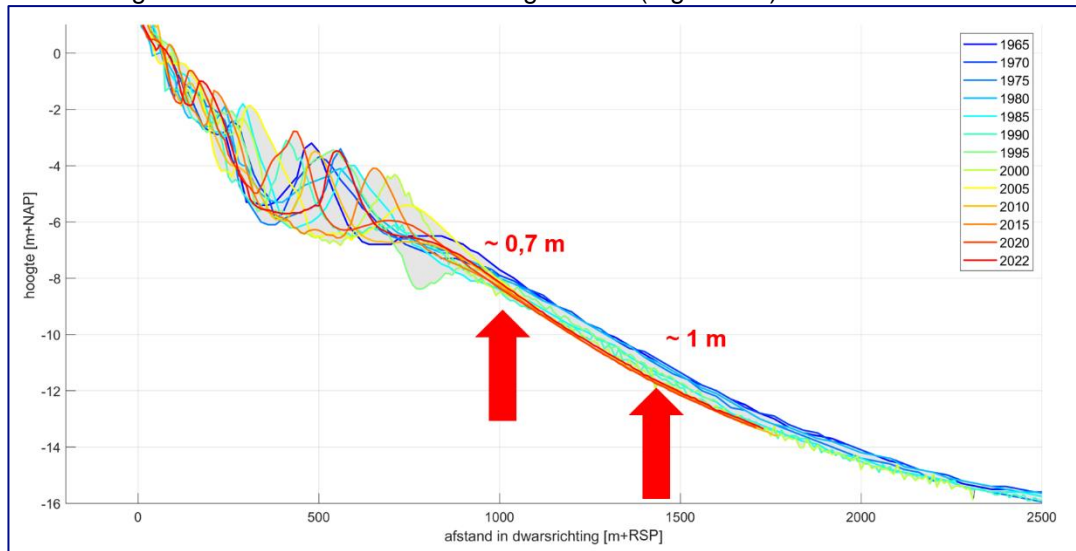
De onderste afbeelding toont de veranderingen over de periode 1990-2020 en demonstreert de gevolgen van de kustlijnhandhaving en grote ingrepen. Na 1990 zien we het ondiepe deel van het kustprofiel vrijwel overal zeewaarts verplaatsen. In het oog springen de aangroei van de kust ten noorden van Callantsoog, de aanleg van de Hondsbossche Duinen, de doorgaande aangroei van het kustprofiel bij IJmuiden en de aanleg van de Zandmotor. Met uitzondering van noordelijk Noord-Holland verplaatsen de dieptelijnen dieper dan ca. -8 m landwaarts. Het diepere deel van de vooroever is nog steeds licht erosief.



Figuur 3-4: Overzicht van de jaargemiddelde verplaatsing van dieptelijns langs de Hollandse kust op basis van jaarlijkse kustlijnmetingen in de periodes vóór de start van kustlijnhandhaving (1970-1990, boven) en daarna (1990-2020, beneden). Blauwe kleuren zijn landwaartse verplaatsing (erosie!), gele en rode kleuren zeewaartse verplaatsing.

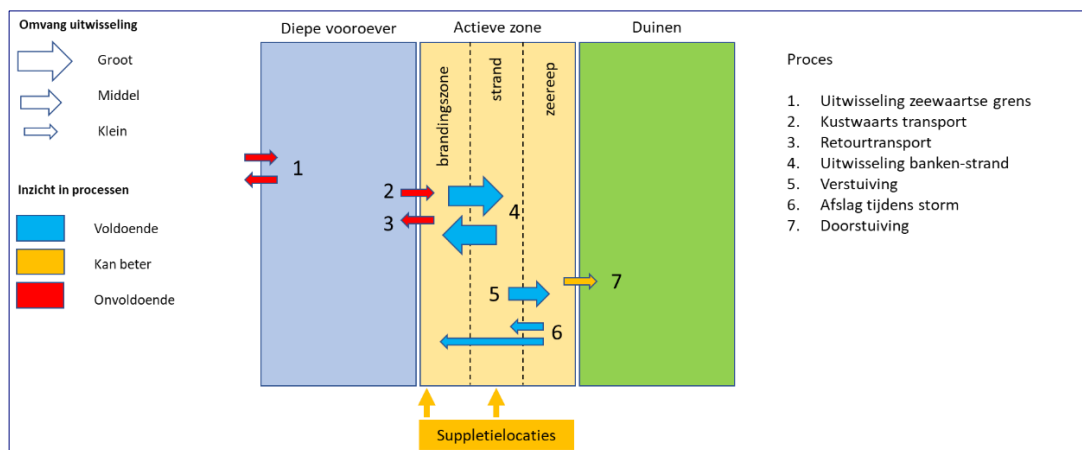
De ontwikkeling van Jarkusraai 43.00 tussen Egmond en Castricum van 1965 (blauw) tot 2022 (rood) in Figuur 3-5 toont de doorgaande erosie van de diepe vooroever. Dieper dan -8 m is een systematische verdieping van de vooroever te zien, in de orde van 0,5 tot 1 m in 50 jaar. Dit houdt in dat bijvoorbeeld de -10 m contour zo'n 100 m landwaarts is verschoven. Ondieper dan -8 m zien we met name de ontwikkeling van brandingsbanken gedurende deze periode. NB De dieptes in deze figuur zijn allen ten opzichte van NAP, dus de langs de Nederlandse kust gemeten relatieve zeespiegelstijging van ca. 2 mm per jaar, dat is dus 10 cm over de getoonde periode, is verwaarloosbaar klein ten opzichte van de in de figuur getoonde bodemveranderingen.

De effecten van 30 jaar suppleren lijken zich vrijwel alleen voor te doen in de ontwikkeling van brandingszone, strand en zeereep. Tussen 1990 en 2020 zijn de zeereep, het strand en de brandingszone van de Hollandse kust uitgebouwd (Figuur 3-4).



Figuur 3-5: Ontwikkeling Jarkusraai 43.00, tussen Egmond en Castricum, van 1965 (blauw) tot en met 2022 (rood). De profielontwikkeling toont doorgaande erosie (verdieping en landwaartse verplaatsing van dieptelijnen) dieper dan NAP -8 m. Dit deel doet blijkbaar niet mee met de verspreiding van suppletiezand. De zeevaartse uitbouw van het profiel boven NAP -8m is lastiger te zien.

3.2.2 Schematisatie van de Hollandse kust

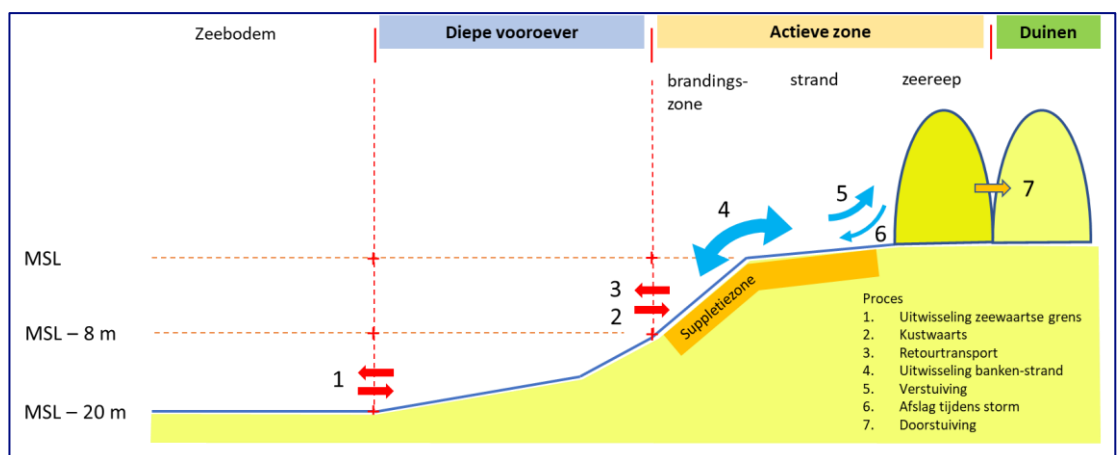


Figuur 3-6: Schematisch bovenaanzicht van het kustfundament bij de gesloten Hollandse kust. De pijlen stellen de zandtransporten over het kustprofiel voor. Met name het inzicht in de uitwisseling van de diepe vooroever met de Noordzeebodem en de brandingszone is onvoldoende. De grootte van de pijlen geeft de orde grootte van de uitwisseling, de kleur zegt iets over het inzicht in de uitwisseling.

Figuur 3-6 toont een schematisch bovenaanzicht van het kustfundament zoals we dat definiëren voor de gesloten kust. We kunnen 3 zones onderscheiden, van zee naar land achtereenvolgens (1) de diepe vooroever, (2) de actieve zone die bestaat uit de brandingszone, het strand en de zeereep, en (3) de duinen (zie ook sectie 2.2.4). Alle zones wisselen zand uit met 'hun burens', zowel kustlangs als kustdwars. De pijlen geven de kustdwarse uitwisseling van zand tussen de zones weer. De grootte van de pijlen geeft de orde van grootte van de uitwisseling weer, de kleur zegt iets over het inzicht in de uitwisseling en de onderliggende processen. De diepe vooroever wisselt uit met de aangrenzende Noordzeebodem en de ondiepe vooroever, de brandingszone. De brandingszone levert zand aan het strand in de vorm van aanlandende zandbanken en ontvangt zand tijdens stormafslag van strand en duinen. Zand verstuift van het strand naar de zeereep, afslag van het duinfront tijdens storm levert zand aan het strand. NB We maken hier dus onderscheid tussen de dynamische zeereep, wat wil zeggen dat hij aangroeit door windtransport en afslaat bij storm, en de achterliggende duinen die gevoed worden met door of over de zeereep stuivend zand. Brandingszone, strand en zeereep wisselen het meest intensief zand uit, vandaar dat deze eenheden worden samengenomen als 'actieve zone'. Zandsuppleties worden hierin aangebracht, op de ondiepe vooroever of op het strand.

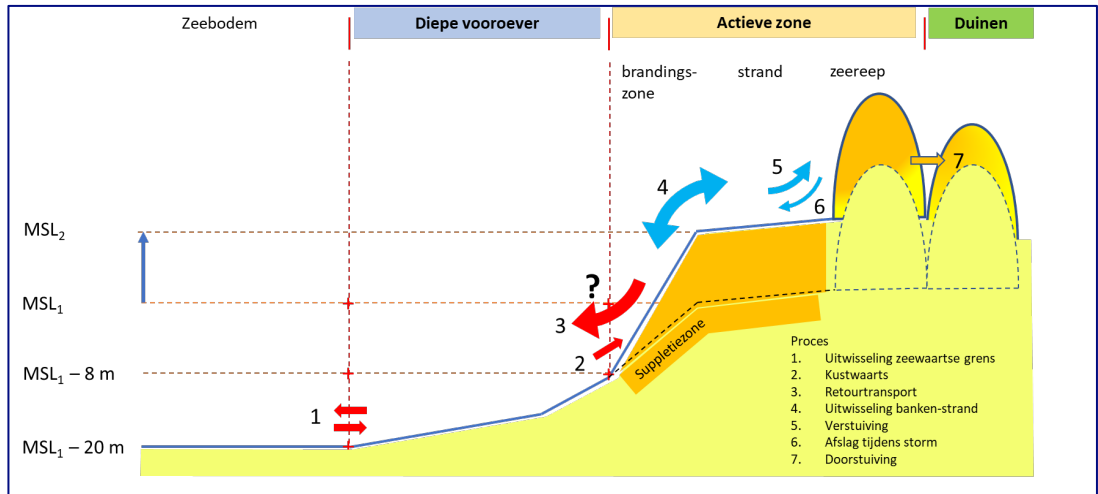
3.2.3 Invloed van een stijgend gemiddeld zeeniveau.

Om de effecten van zeespiegelstijging op de zandverdeling over het kustprofiel in te schatten, bekijken we het kustprofiel in zijaanzicht (Figuur 3-7). De grootste uitwisseling van zand is in de actieve zone. Daarbuiten zijn de netto transporten aanzienlijk kleiner. Daarnaast worden zandsuppleties in de actieve zone aangebracht, op de zeewaartse rand van de brandingszone en/of op het strand. Dit betekent dat bij voortzetting van de huidige kustlijn-handhaving en de bijbehorende suppletiepraktijk, ook bij een stijgend zeeniveau het zand vooral in de actieve zone aangebracht wordt. Figuur 3-8 toont het effect op termijn hiervan.



Figuur 3-7: Schematisch overzicht van de kustdwarse uitwisseling van zand tussen zeebodem, diepe vooroever, de actieve zone bestaand uit brandingszone, strand en zeereep en achterliggend duingebied. De nummering van de uitwisselingspijlen correspondeert met die in Figuur 3-6. De grootte van een pijl geeft de orde van grootte van de uitwisseling weer.

De actieve zone, bestaand uit brandingszone, strand en zeereep, groeit mee met het zeeniveau. Doorstuivend zand laat een deel van de achter de zeereep gelegen duinen (beperkt) meegroeien. Hoeveel zand er doorstuift naar het achterliggende duingebied is afhankelijk van het zeereepbeheer. De grootte van de uitwisseling met de diepe vooroever is niet bekend. Uitwisseling van zand over de zeewaartse grens van de diepe vooroever heeft geen of een zeer kleine invloed op de ontwikkeling van de actieve zone.

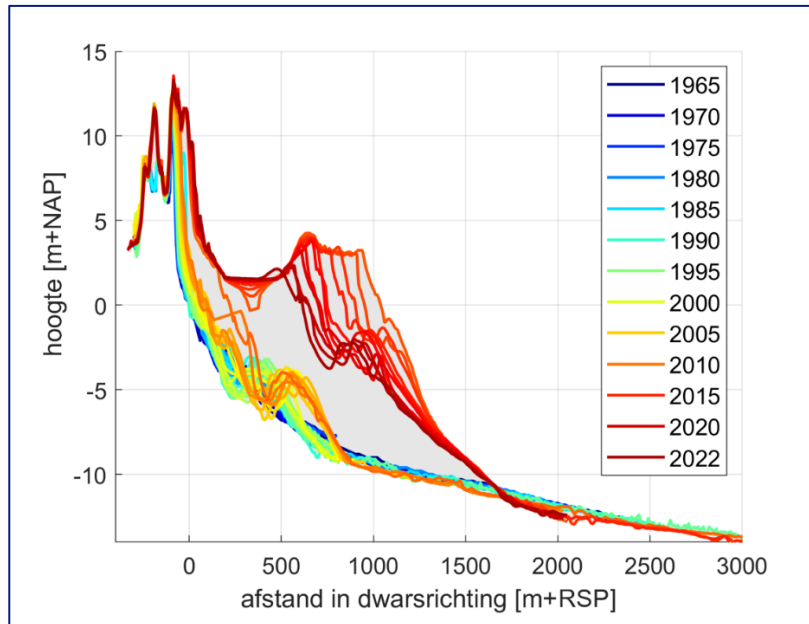


Figuur 3-8: Schematisch overzicht van het effect van voortzetting kustlijnhandhaving door suppleties in de actieve zone bij een stijging van de zeeniveau van MSL_1 naar MSL_2 (donkerblauwe pijl). De actieve zone, bestaand uit brandingszone, strand en zeereep, groeit mee met het zeeniveau. Doorstuivend zand laat de achter de zeereep gelegen duinen ten dele meegroeien (meegroeien van zeereep en duinen is veel kleiner dan deze figuur suggereert). De grootte van de uitwisseling met de diepe vooroever (pijlen 3 en 4) is niet bekend. De uitwisseling met de zeebodem over de zeewaartse grens van het kustfundament (pijl 1), heeft geen of zeer kleine invloed op de ontwikkeling van de actieve zone.

De diepe vooroever erodeert op dit moment, het is niet bekend wat hiervan de oorzaak is en waar het geërodeerde sediment naartoe verplaatst wordt. Deze erosie is mogelijk de laatste fase van de laat-Holocene aanpassing van het kustprofiel (van der Spek et al., 2023). De erosie kan geïnterpreteerd worden als een aanpassing van het profiel. Het evenwichtsprofiel ligt blijkbaar dieper dan de huidige zeebodem. Als deze aanname juist is zal bij een stijging van het gemiddeld zeeniveau de diepe vooroever dichterbij die evenwichtsligging komen en stoppen met eroderen. Dit impliceert dat de diepe vooroever geen duidelijke sedimentbehoefte heeft.

Een punt van aandacht is het effect van een doorgaande aanvulling van de zandvoorraad in de actieve zone naast een eroderend of stabiel dieper profiel. Bij gelijkblijvende randvoorwaarden (golven, getij, wind) kan een verticaal meegroeïende actieve zone die grenst aan een niet-meegroeïende diepe vooroever, tot een toename van transport over de ondergrens van de actieve zone (op ca. 8 m. diepte) naar de diepe vooroever leiden. Hoe groot die toename zal zijn is onbekend en moet uitgezocht worden.

Om een indruk te krijgen van de gevolgen van deze relatieve (want het is lokaal nog steeds een vrijwel 'horizontale bodem') verstelling, kunnen we de ontwikkeling van het profiel van aangelegde vooroevers bekijken. Het ophogen van de actieve zone is vergelijkbaar met de kunstmatige uitbouw van het kustprofiel zoals bij de Zandmotor en de zandige versterkingen van Zwakke Schakels. Figuur 3-9 geeft de ontwikkeling weer van Jarkusraai 108.83 welke de Zandmotor ter hoogte van Solleveld doorsnijdt. Hier treedt geen grootschalig transport naar dieper water op, alleen de bovenkant van het profiel (hoger dan NAP -8 m) verplaatst landwaarts in de tijd (zowel voor als na de aanleg van de Zandmotor) door kustlangse afvoer van het zand. Dit suggereert dat het transport over de ondergrens van de actieve zone niet groot is.



Figuur 3-9: Ontwikkeling Jarkusraai 108.83, ter hoogte van Solleveld (Zandmotor, Delflandse kust), tussen 1965 (donkerblauw) en 2022 (donkerrood). De grijze zone geeft de maximale uitbouw van het kustprofiel en de zeereep weer. Opvallend is de teruggang van het ondiepe kustprofiel (ondieper dan NAP -8 m) als gevolg van de kustlangse herverdeling van zand, terwijl het diepere deel van het profiel stabiel blijft. Wel is er enige ontgronding aan de voet van het profiel als gevolg van contractie van de getijstrooming om het zandlichaam.

3.2.4 Berekening sedimentbehoefte in een rekenregel voor de Hollandse Kust

Op basis van het voorafgaande is de ontwikkeling van de sedimentbehoefte van de kust van Noord- en Zuid-Holland (ten noorden van Hoek van Holland), bij een stijgend gemiddeld zeeniveau, geschematiseerd tot het meegroeien van de actieve zone. Deze zone bestaat uit de brandingszone (ondergrens variabel, ligt rond NAP -8 m), het strand en de zeereep. Hierbij blijft de BasisKustLijn (BKL) op zijn plaats, er is geen landwaartse verplaatsing van de actieve zone als gevolg van het stijgend zeeniveau. Wel houden we rekening met een eventuele aanpassing van de zeewaartse helling van de brandingszone als gevolg van het meegroeien. De uitwisseling van zand met de aanliggende gebieden, de diepe vooroever en de achter de zeereep liggende duinen, is beperkt. Hoe groot deze uitwisseling is, is op dit moment niet bekend. De aanpassing van de zeewaartse helling van de brandingszone en de uitwisseling van zand met aangrenzende gebieden worden meegenomen in de bepaling van de sedimentbehoefte door het meerekenen van een extra oppervlakte. Hiervoor is een strook van 250 meter breed gekozen (zie 2.4.2).

De rekenregel (zie 2.4.1) voor de Hollandse kust kan nu vereenvoudigd worden tot:

$$\text{Sedimentbehoefte} = \text{oppervlakte actieve zone} * \text{zeespiegelstijging}$$

Deze oppervlakte is bepaald cf. de methodiek van Bijlage C. De resultaten zijn:

Tabel 3-2: Oppervlaktes actieve zone per deelgebied, exclusief marge voor onzekerheid

		Opp. actieve zone [km ²]	
Hollandse Kust	Noord: IJmuiden – Groote Keeten	53	127
	Zuid: Hoek van Holland - IJmuiden	74	

Correctie voor onderhoud BKL langs Hollandse kust

Langs de Hollandse kust wordt nu meer zand gesuppleerd dan volgens de rekenregel voor dat deel van de kust nodig is. Daar is een verklaring voor: de kustlijn is lokaal niet in evenwicht en op de meer erosieve plaatsen (in dit rapport de 'bolwerken' genoemd⁸) wordt zand aangebracht dat zich verplaatst naar de actieve zone van delen van de kust waar dit extra zand niet nodig is, ook gegeven de ligging van de BKL. De Hollandse kust bouwt zich daarom gemiddeld uit. Het is niet zeker wanneer in de toekomst dit niet meer geldt en sediment- en suppletiebehoefte als gelijk kunnen worden verondersteld.

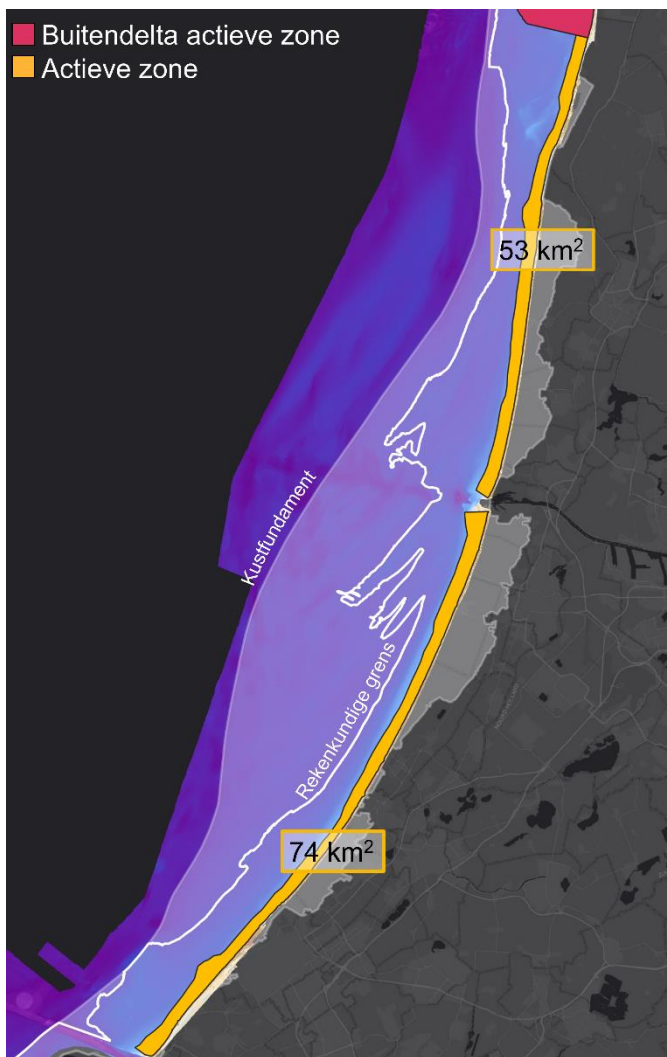
Voor de toekomstige sedimentbehoefte is het belangrijk de maximale onderschatting te kennen als met het extra suppleren voor deze instandhouding van de bolwerken geen rekening wordt gehouden (lees: alleen met meegroeien van de actieve zone wordt gerekend). Die maximale onderschatting is gesteld op het huidige verschil in sediment- en suppletiebehoefte: ca. 2,5 mln. m³ per jaar, cf. de inzichten uit Kustgenese 2.0. Dit is als maximum aan te nemen omdat het onwaarschijnlijk is dat het verschil in sediment- en suppletiebehoefte nog toeneemt. Het wordt namelijk gestuurd door het netto kustlangs transport binnen een kustvak vanaf de suppletielocatie. De aandrijvende krachten achter dat transport zullen niet toenemen omdat de gemiddelde diepte in de actieve zone niet verandert.

De oppervlaktes uit Tabel 3-2 en de aanname dat ook in de toekomst er steeds 2,5 mln. m³ per jaar extra suppleties nodig zijn langs de Hollandse kust leiden tot de sedimentbehoeften volgens Tabel 3-3.

Tabel 3-3: Sedimentbehoefte per deel van de Hollandse kust, per zichtwaarde, in mln. m³

Sedimentbehoefte Hollandse kust - totaal							
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	2190
Hollandse kust - noord	27	53	107	53	107	160	266
Hollandse kust - zuid	37	74	148	74	148	222	371
in stand houden bolwerken	200	200	200	450	450	450	425
TOTAAL HOLLANDSE KUST	264	327	455	577	705	832	1062

⁸ Het gaat om (delen van) kustplaatsen waar de BKL, vanuit morfologisch evenwicht, verder zeewaarts ligt dan in de kustdelen ten zuiden en noorden ervan. Het is een soort 'uitbouw', een bolwerk, en het onderhoud ervan leidt er langzaam toe dat aanliggende kustdelen zeewaarts groeien, totdat de kustlangse transporten (binnen de actieve zone) in evenwicht zijn. Dit kan nog zeer veel tijd in beslag nemen en die tijd is in dit onderzoek niet nader gekwantificeerd.



Figuur 3-10: visualisatie van de oppervlaktes die de sedimentbehoefte van de Hollandse kust bepalen

3.2.5 Relevante kennisleemtes

Om het conceptueel model verder te onderbouwen en onzekerheden te verkleinen zouden in de komende jaren een aantal kennisleemtes opgevuld moeten worden door middel van aanvullend onderzoek. Relevante kennisleemtes voor het model voor de Hollandse kust zijn:

1. Wat was de historische morfologische ontwikkeling van de diepe vooroever? En wat stuurt deze ontwikkeling aan? Inzicht hierin verschaft meer duidelijkheid over de toekomstige ontwikkeling van de diepe vooroever.
2. Inzicht in de kustdwarse uitwisseling van zand tussen de diepere zeebodem, de diepe vooroever en brandingszone bij stijgend zeeniveau in het algemeen, en specifiek inzicht in zeewaartse zandtransporten vanuit de actieve zone naar de diepe vooroever: Onder welke omstandigheden? Hoeveel? Verandert dit met de verticale groei van de actieve zone?
3. Op de diepe vooroever van de kust van centraal Holland komen een aantal zandbanken voor, de zogenaamde 'shoreface-connected ridges'. Deze banken wisselen zand uit met de vooroever. Hun rol in de zandbalans is niet duidelijk: voeden deze zandbanken de vooroever met zand? En zo ja, hoe dan: kustlangs transport of kustdwars? Of voedt zeewaarts transport over de vooroever de banken? Daarbij is de centrale Hollandse kust relatief stabiel. Spelen de shoreface-connected ridges een rol hierin? En wat is dan de link met de langetermijnontwikkeling van de Hollandse kust?

4. Het is niet duidelijk hoe de extra sedimentbehoefte op plaatsen waar de kustlijn lokaal niet in evenwicht is zich op de lange termijn ontwikkelt. Hoe lang blijft dit ca. 2,5 mln. m³ per jaar?

3.3 Grootschalig gedrag en sedimentbehoefte Waddenzee

Voor het inschatten van de effecten van versnelde zeespiegelstijging op de Waddenzee maken we gebruik van systeemkennis, vastgelegd in conceptuele modellen, en kwantitatieve benaderingen met behulp van het geaggregeerde model ASMITA. Voor dit rapport is het in het bijzonder van belang hoe de transporten door de zeegaten zich ontwikkelen onder zeespiegelstijging. Deze zijn onderdeel van de aangepaste rekenregel.

3.3.1 Morfologie Waddenzee – conceptueel model

Op de grootste ruimteschaal is de Waddenzee onder te verdelen in getijbekkens met de elementen getijgeulen, platen en kwelders. De platen kunnen zowel zandig als slibrijk zijn. In deze getijbekkens komen geen rivieren uit die sediment aanvoeren, al het sediment wordt via de zeegaten aangevoerd. De bron van zand is de Noordzeekustzone. Omdat zandsuppleties de zandvoorraad van de kust aanvullen, spelen suppleties een belangrijke rol in het aanbod. De externe bron van slib is de concentratie van slib in het kustwater. Het slib dat via de spuisluizen in de Afsluitdijk de Waddenzee inkomt is hierop een uitzondering. De getijbekkens wisselen water en sediment (zand en slib) uit over de wantijen.

Wang et al. (2018) geven een overzicht van de morfodynamiek van de Nederlandse Waddenzee. Een belangrijk uitgangspunt hierbij is de balans van vraag naar en aanbod van sediment (Nichols, 1989; zie Figuur 2-3). Relatieve zeespiegelstijging (absolute zeespiegelstijging + bodemdaling) schept ruimte om sediment af te zetten. Dit kan als de “vraagkant” beschouwd worden. Het aanbod wordt bepaald door de beschikbare sedimentvoorraad in het brongebied en de transportcapaciteit van de aanvoerende processen (getij en golven). Zijn vraag en aanbod in balans, dan is het systeem stabiel. Als er meer sediment aangevoerd wordt dan nodig om aan de vraag te voldoen, vullen bekkens op, het totale plaatoppervlak en de gemiddelde plaathoogte nemen toe, de gemiddelde geuldiepte neemt af. Als er minder sediment aangevoerd wordt neemt de gemiddelde diepte in het bekken toe en het plaatoppervlak en de gemiddelde plaathoogte nemen af. Aangezien de landwaartse grenzen van de Waddenzee uit dijken bestaan en daarmee vastliggen, zal de Waddenzee niet landwaarts uitbreiden bij zeespiegelstijging. Zolang de positie van de eilanden gehandhaafd wordt door middel van zandsuppleties zal ook de kustlijn niet significant verplaatsen.

De ontwikkelingen in de bekkens van de Waddenzee en vooral die van de wadplaten erin, zijn van belang voor de ecologische waarden en voor de bescherming tegen overstromingen. De bekkens van de Waddenzee nemen (met uitzondering van het Eierlandse Gat) allen in sedimentinhoud toe (zie b.v. De Leeuw, 2020).⁹ Er is wel een duidelijk verschil in de balans van vraag naar en aanbod van sediment tussen de oostelijke en westelijke bekkens.

De Waddenzee ten westen van het wantij van Terschelling heeft veel ruimte om sediment af te zetten. Het oppervlak aan intergetijdeplaten is daar in verhouding klein en neemt slechts langzaam toe. De zandvoorraad in het aangrenzende kustgebied is voldoende. Wellicht is de aanvoercapaciteit voor zand onvoldoende om het plaatareaal in de westelijke Waddenzee snel te laten groeien. In de oostelijke Waddenzee, waar een groot deel van het bekken uit wadplaten bestaat, is dit anders. Daar is beperkt ruimte om meer sediment af te zetten en vullen de bekkens langzaam verder op: plaatareaal neemt verder toe, geuldiepte neemt af.

⁹ Dit levert ook problemen op in de toegankelijkheid (getuige de problematiek bij de vaarweg naar Ameland en in de Boontjes bij Harlingen).

3.3.2 Het belang van de sedimenttransporten door de zeegaten

De sedimenttransporten door de zeegaten van het Waddengebied zijn een cruciale factor voor zowel de ontwikkeling van de bekkens in de Waddenzee als de ontwikkeling van de buitendelta's en Noordzeekusten van de eilanden. Beide deelsystemen hebben een sedimentbehoefte die in de toekomst zal toenemen bij versnelde zeespiegelstijging. Voor de vraagstelling van dit rapport is de sedimentbehoefte van de Noordzezijde van het Waddengebied van belang.

De wadplaten in de bekkens zijn momenteel geheel afhankelijk van sedimenttransport door de zeegaten om mee te groeien. Onder versnelde zeespiegelstijging kan het gebeuren dat dit te weinig is en dat ze dan in oppervlakte en/of hoogte afnemen. Momenteel is dat, zie hiervoor, niet het geval. In Wang et al. (2018) is uiteengezet tot welke snelheid van zeespiegelstijging meegroeien van de bekkens in de Waddenzee aannemelijk is.

De totale transportcapaciteit van de processen in/rond een zeegat bepaalt hoeveel sediment er het bekken in of uit gebracht wordt. De transportcapaciteit van een zeegat is de resultante van de stroomsnelheid en de sedimentconcentratie. Deze transportcapaciteit hangt dus af van de getijbeweging, al dan niet versterkt door de wind, de opwoeling van sediment door golven en van de samenstelling en korrelgrootteverdeling van het sediment. Aangezien de diverse zeegaten verschillen in bijvoorbeeld grootte en oriëntatie, zullen ook de transportcapaciteiten verschillen. Zowel de vloed- als de ebstroming verplaatsen aanzienlijke sedimentvolumes door het zeegat, de netto import of export is aanzienlijk kleiner.

3.3.3 Wijze van berekening sedimenttransporten naar de Waddenzee

Om de rekenregel toe te passen voor deelsysteem Wadden is de netto uitwisseling tussen een buitendelta en getijdebekken nodig. Deze is voor dit rapport berekend met ASMITA. Deze modelsoftware is gebaseerd op evenwichtsrelaties, waarmee relatief gemakkelijk en snel langetermijnsimulaties kunnen worden uitgevoerd (zie bijvoorbeeld Stive en Wang, 2003; Townend et al., 2016a; 2016b). Voor de zeegaten van het Groninger Wad ten oosten van Schiermonnikoog is er geen ASMITA model beschikbaar. Sectie 3.4.7 gaat hierop in.

Op basis van ASMITA simulaties kan worden vastgesteld dat bij een toename van de snelheid van zeespiegelstijging de zandimport van de Waddenzee toeneemt. Die toename is echter niet evenredig met de toename van de snelheid van zeespiegelstijging en bovendien verschilt hij voor de grotere en kleinere bekkens. Uit de formuleringen in ASMITA volgt dat een getijbekken vertraagd reageert op een toename van de zeespiegelstijging: eerst moet de gemiddelde diepte van het bekken toenemen, waarna het bekken meer sediment gaat importeren. Als de snelheid van zeespiegelstijging snel toeneemt, neemt ook deze vertraging toe waardoor de import steeds verder achterblijft. Er wordt dan niet voldoende sediment aangevoerd om de platen mee te laten groeien. Dit zal zich vertalen in een afname van het plaatoppervlak en de plaathoogte, het zogenaamde 'verdrinken' van het bekken. Overigens is dit een geleidelijk proces, de tijdschaal waarop de platen helemaal kunnen verdwijnen is erg lang, orde eeuwen (Lodder et al. 2019).

Huismans et al. (2022) geven een meer gedetailleerd inzicht in de verdrinking van platen. Als de sedimentaanvoer achterloopt op de vraag neemt het plaatvolume af.¹⁰ Voor grote bekkens zal dat resulteren in vooral afname van het plaatoppervlak, voor kleine bekkens in afname van de plaathoogte. Het oppervlak van een bekken bepaalt het benodigde sedimentvolume

¹⁰ In Haasnoot et al. (2022) is een beschouwing opgenomen over de mogelijkheden om in de toekomst, als dit onderdeel van het kustbeleid zou worden, de wadplaten sneller te laten groeien, zodat een groter deel daarvan de zeespiegelstijging zou kunnen bijhouden. Op dit moment voorziet de voorkeursstrategie niet in maatregelen in de Waddenzee of in de zeegaten die specifiek gericht zijn op het extra inbrengen van sediment. Deze zijn nu overigens ook niet mogelijk binnen de natuurwetgeving.

voor meegroeien: grote bekkens moeten dus meer importeren. Bovendien hebben grote bekkens een groot, relatief laag plaatoppervlak waardoor ze kwetsbaar zijn en sneller verdrinken bij toenemende waterdiepte in vergelijking met kleine bekkens. Een verdrinkend bekken importeert maximaal, waardoor het in de kustzone beschikbare zandvolume cruciaal is voor de ontwikkeling van het bekken.

De numerieke simulaties met ASMITA zijn gedaan voor de periode 2020 – 2200 (cf. het deelproject 'Waterveiligheid' van Spoor 2 van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging), gebruik makend van de 4 scenario's voor de snelheid van zeespiegelstijging (zie 3.1.1). De gebruikte schematisatie bouwt voort op het onderzoek dat is gedaan voor Kustgenese 2.0 (Wang en Lodder, 2019, Lodder et al., 2022)¹¹. Een uitgebreid overzicht van de methode (en extra resultaten in vergelijking met 3.3.4) staat in Bijlage B. De resultaten tonen dat de totale import van sediment niet alleen afhangt van de opgetreden zeespiegelstijging maar ook van het scenario.

Er zijn geen aanwijzingen dat de resultaten van ASMITA de transporten systematisch juist meer onderschatten of overschatten. Wel staat vast dat het niet corrigeren voor een fractie slib in het berekende sedimenttransport een overschatting van de zandbehoefte in de kustzone betekent. Deze 'fout' kan flink oplopen tot ca één-derde van het volume. Zie voor een eerste indicatie van de impact op de berekende sedimentbehoefte Bijlage A. Omdat voor de doelstelling van dit rapport voornamelijk een mogelijk hogere sedimentbehoefte van belang is, is deze onzekerheid (die de sedimentbehoefte kan verlagen) in de berekeningen nog niet meegenomen.

3.3.4 Uitkomsten berekening transporten door zeegaten

Tabel 3-4 geeft resultaten voor de cumulatieve transporten door zeegaten in 2100 en 2200 onder vier scenario's van zeespiegelstijging (Figuur 3-1). Ze worden gebruikt om in 3.4.6 te komen tot de sedimentbehoefte van het deelsysteem Wadden. Meer resultaten in Bijlage B.

Tabel 3-4: Sedimentimport per zeegat, onder verschillende scenario's, als berekend met ASMITA, in mln. m³. Voor transport naar de bekkens van het Groninger Wad zijn er geen berekeningen met ASMITA.

Sedimentimport getijbekkens Waddenzee vanaf 2020 (mln. m ³)							
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	2190 ¹²
Zeegat van Texel	257	267	278	560	602	611	594
Eierlandse Gat	19	49	113	50	139	205	304
Zeegat van het Vlie	152	157	162	382	422	406	359
Zeegat van Ameland	64	79	111	176	240	258	266
Pinkegat	19	36	72	43	87	127	204
Zoutkamperlaag	28	38	67	77	121	149	206
TOTAAL IMPORT BEKKENS	539	626	803	1288	1611	1756	1933

¹¹ In het onderzoek voor Kustgenese 2.0 zijn transporten in de huidige situatie (met een zeespiegelstijging van ca. 2 mm per jaar) met ASMITA berekend. Ze zijn in de synthese van Kustgenese 2.0 uiteindelijk niet gebruikt omdat ze voor de sedimentbehoefte komende 15 jaar als minder betrouwbaar ingeschat in vergelijking met de uitkomsten van de data-analyse van de afgelopen decennia en daarop gebaseerde extrapolatie voor de komende 15 jaar.

¹² In de aangeleverde scenario's treedt de 5 meter op in 2190.

3.3.5 Kennisleemtes Waddenzee

Toekomstige ontwikkelingen in de Waddenzee zijn alleen van belang voor dit rapport als ze de uitwisseling van zand en slib met de kustzone beïnvloeden. In deze sectie komen kennisleemtes aan bod die direct betrekking hebben op de berekening van de uitwisseling met ASMITA. Meer generieke vragen worden behandeld in sectie 3.4, kust en zeegaten van het Waddengebied.

In het kader van andere projecten wordt er gewerkt aan het detailleren van met name de schematisatie van de getijbekkens in ASMITA, denk hierbij aan het toevoegen van bijvoorbeeld kwelders en slib. De resultaten hiervan zijn nog niet beschikbaar. Daarnaast zijn er voor het verbeteren van de voorspelling van de effecten van versnelde zeespiegelstijging op de Waddenbekkens een aantal relevante kennisleemtes, waar nog niet in voorzien wordt.

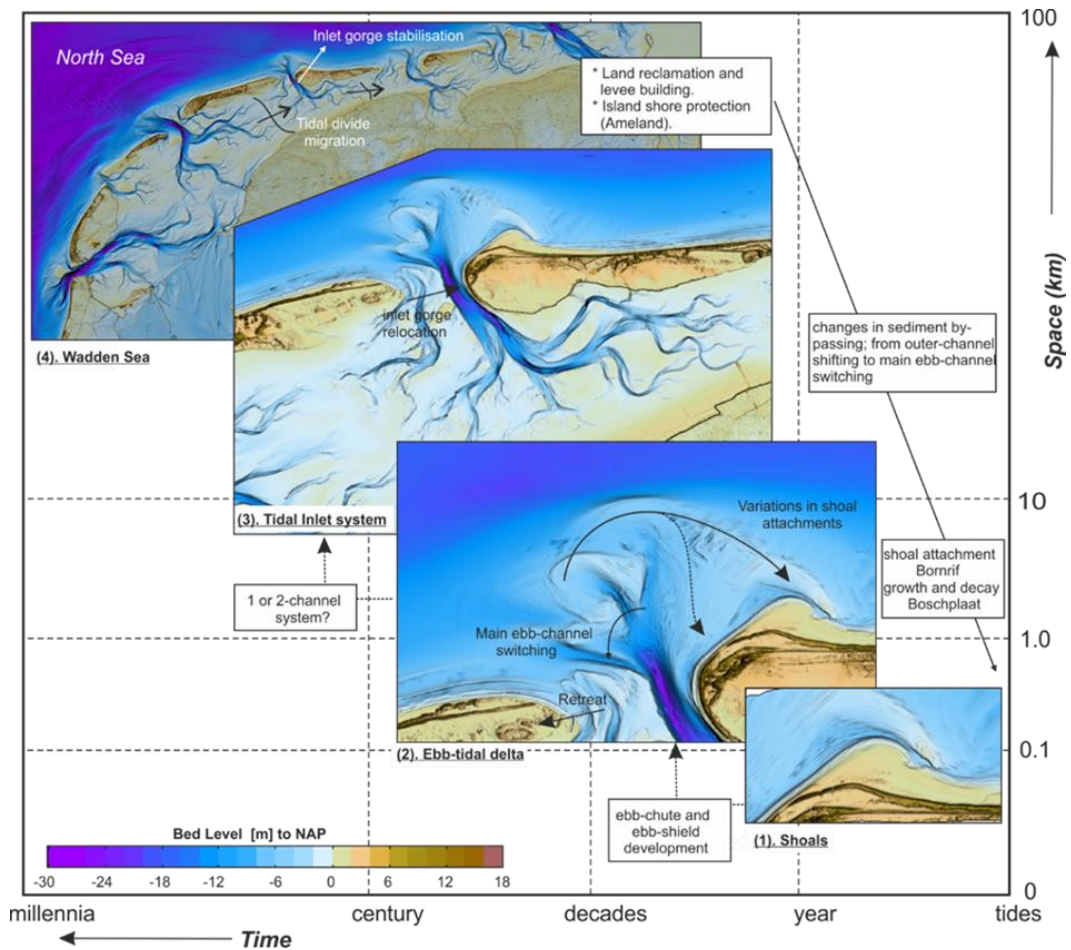
- Er is op dit moment geen ASMITA model voor het Groninger Wad beschikbaar. Voor een berekening van de potentiële sedimentvraag van dit gebied moet dit model gebouwd worden.
- Wat zijn de effecten van zeespiegelstijging op de buitendelta van een zeegat en zijn deze goed geïmplementeerd in ASMITA?
- Wat is de invloed van de ontwikkeling van aanliggende kusten (door zeespiegelstijging en suppleties) op de buitendelta? Is dit goed in ASMITA geïmplementeerd?
- Hoe kunnen de parameters in de ASMITA modellen die de tijdschalen bepalen, beter worden bepaald?

De getijdebekkens van de Waddenzee laten een grote variatie zien in de karakteristieken van geulen (bv. diepte, lengte, patronen) en wadplaten (bv. hoogte, oppervlakte, waterbergende functie). Deze aspecten zijn niet geschematiseerd in ASMITA maar bepalen wel voor een belangrijk deel de ontwikkeling in de toekomst. Het bepalen van deze parameters voor de verschillende bekkens en ze opnemen in de schematisaties in ASMITA is essentieel. Daarnaast kan hiermee een beter beeld van toekomstige ontwikkelingen worden verkregen.

3.4 Grootschalig gedrag en sedimentbehoefte kust en zeegaten van het Waddengebied

3.4.1 Zeegatsystemen

Als opgemerkt in 2.1.2 en 3.1.2 is de schaalcascade een belangrijk hulpmiddel bij het beschrijven en begrijpen van kustgedrag op verschillende tijd- en ruimteschalen. Figuur 3-11 toont de schaalcascade voor een zeegatsysteem, in dit geval het Zeegat van Ameland.



Figuur 3-11: Een schaalcascade voor de dominante processen op de buitendelta van het Zeegat van Ameland (uit Elias et al., 2019).

Op het hoogste morfologische niveau in een zeegatsysteem (Figuur 3-11; niveau 3) onderscheiden we de volgende elementen:

1. Het zeegat zelf, dat bestaat uit een of meerdere relatief diepe getijgeulen;
2. Het zeewaarts daarvan gelegen ondiepe bankengebied, de buitendelta of ebdelta;
3. De aangrenzende eilanden, waarbij we op basis van het overheersende transport onderscheid maken in de staart van het bovenstroomse eiland en de kop van het benedenstroomse eiland en
4. Het achter het zeegat gelegen getijdebekken.

De ruimteschaal van deze elementen is in de orde van 10 km en meer, de bijbehorende tijdschaal waarop deze elementen veranderen is jaren tot tientallen jaren. Deze elementen komen bij alle zeegatsystemen voor, al verschillen ze in grootte en oriëntatie. Zo liggen het Zeegat van Texel en het Eierlandse Gat open naar het westen en daarmee voor de overheersende westenwinden. De andere zeegaten in het Waddengebied hebben een noord-zuid oriëntatie waardoor de overheersende westenwinden een ander effect hebben. De meeste buitendelta's langs de waddenkust zijn van elkaar gescheiden, met uitzondering van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag. Een schaalniveau lager zijn deelgebieden te onderscheiden van de buitendelta met een eigen, specifiek gedrag (Figuur 3-11; niveau 2). Op het laagste niveau onderscheiden we individuele zandbanken.

In de afgelopen jaren is de ontwikkeling van het Zeegat van Ameland in detail bestudeerd, met name binnen het Rijkswaterstaat/Deltares programma KPP Beheer & Onderhoud Kust,

het Kustgenese 2.0 project en het daaraan gekoppelde NWO onderzoeksprogramma SeaWad. De hier gegeven voorbeelden zijn voor een belangrijk deel gebaseerd op de resultaten van de genoemde projecten. Deze kennis is vertaald naar de andere zeegaten.

Zeegat

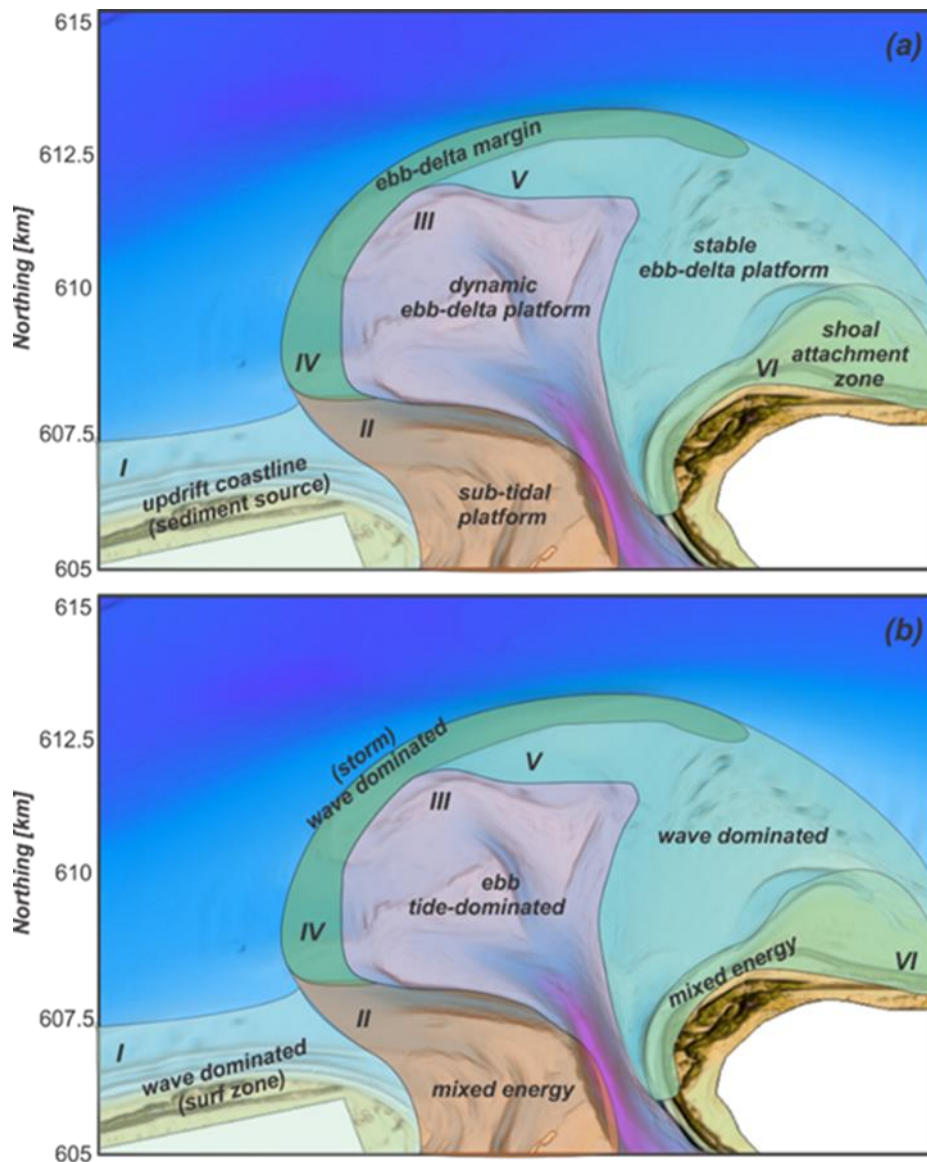
Een zeegat wordt gedomineerd door de getijstroming welke het achterliggende bekken vult en leegt. Per getij stroomt er een groot volume water in en uit, de netto debieten zijn fors kleiner. Het netto debiet kan aanzienlijk vergroot worden door andere processen. Zo resulteert een krachtige westenwind in de westelijke Waddenzee in een aanzienlijke toename van de stroming over het wantij achter Terschelling. Een deel van dit (extra) water verlaat de Waddenzee via het Zeegat van Ameland. Dit leidt tot een toename van het ebdebiet in dit zeegat (van Weerdenburg et al., 2021). Modellsimulaties suggereren dat zeespiegelstijging leidt tot een toename van het getijverschil in de Waddenzee (zie 3.1.3). Hierdoor kunnen de getijdebieten door de zeegaten toenemen.

Buitendelta

De vorm en omvang van de buitendelta worden bepaald door de balans tussen aanvoer van zand door de ebstroming en herverdeling van het zand door golfwerking. Het zandvolume van de buitendelta hangt samen met de grootte van het getijdebiet. Het aangevoerde zand wordt aan het einde van de ebgeul afgezet op een ebschild, een hoefijzervormige ondiepte (Figuren 3-11, 3-12). Golven die breken op deze ondiepte voeren het zand af en verplaatsen het over de buitendeltaplatform in de richting van het benedenstroomse eiland, meestal in de vorm van zandbanken. De verhouding tussen zandaanvoer door de ebstroming en herverdeling door golfwerking bepaalt de grootte en vorm van de buitendelta. Een getijgedomineerde buitendelta zal zich ver in zee uitstrekken, een golfgedomineerde delta steekt minder ver in zee en strekt zich verder langs de aangrenzende eilandkop uit. Uiteraard kan dit variëren in de tijd. Daarnaast zijn op de buitendelta deelgebieden te onderscheiden met een eigen specifieke verhouding van processen en transporten (Figuur 3-12).

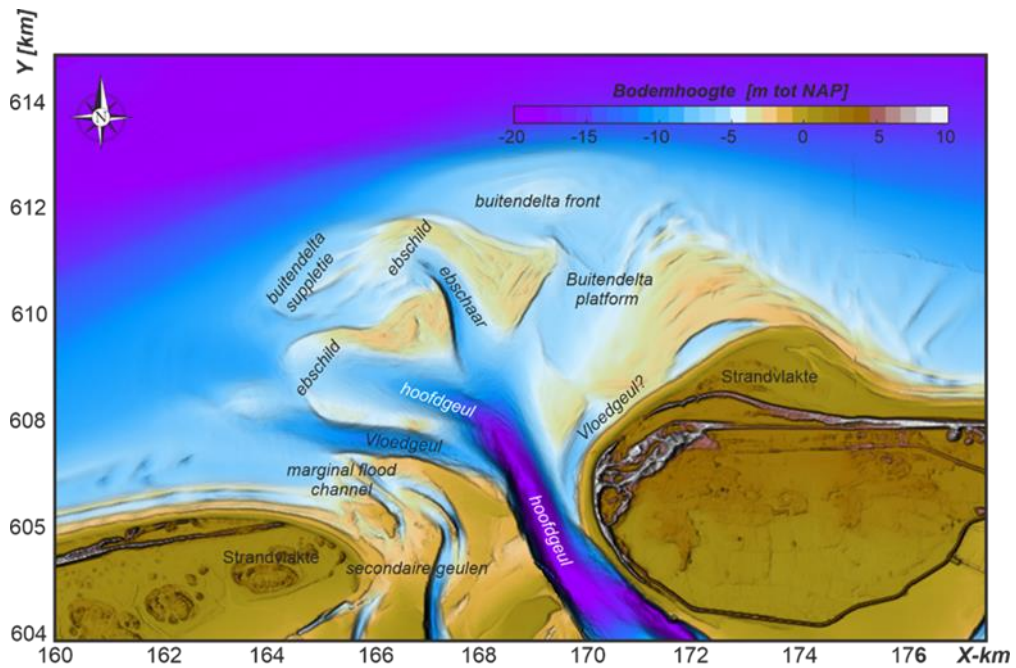
De belangrijkste vloedgeul op de buitendelta ligt langs de kust van de staart van het bovenstroomse eiland (Figuur 3-13). Golfgedreven kustlangse stroming bepaalt de ontwikkeling van deze eilandstaart. De kop van het benedenstroomse eiland wordt beïnvloed door golfwerking en getijstroming in kortsluitgeulen die hier regelmatig de kust eroderen.

In de literatuur wordt een buitendelta vaak beschouwd als een golfbreker die de aangrenzende kusten afschermt. Procesmetingen in en rond het Zeegat van Ameland laten zien dat dit alleen opgaat voor golven die hoger zijn dan 2 m. Kleinere golven breken niet op de rand van de buitendelta en lopen over de buitendelta door naar de kustlijn van de eilanden (Elias et al., 2022).

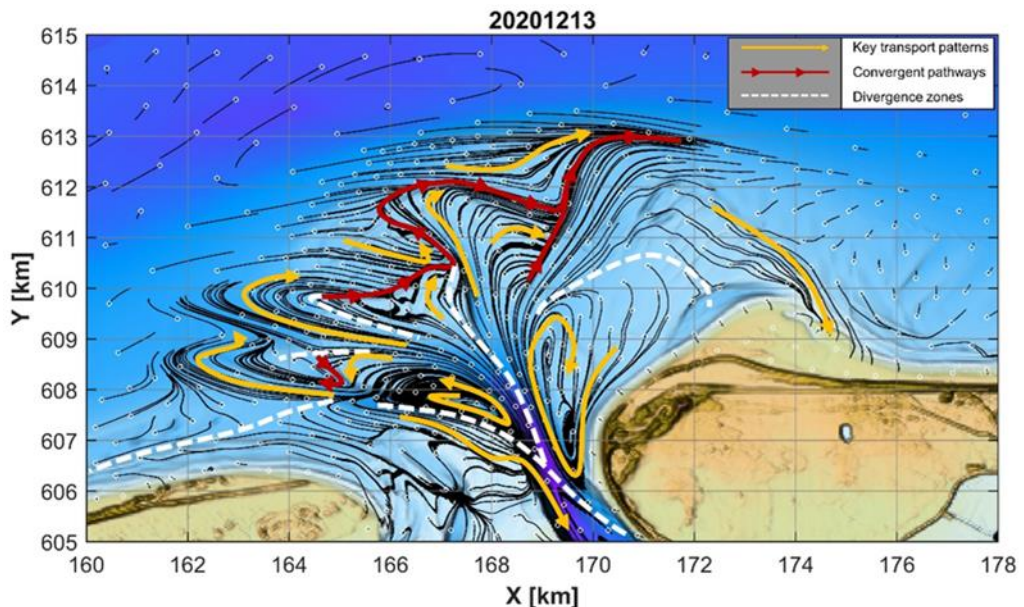


Figuur 3-12: Overzicht van de grotere eenheden op de buitendelta van het Zeegat van Ameland (boven) en de achterliggende processen (onder) (uit Elias et al., 2022). De Romeinse cijfers zijn bedoeld om de beide figuren met elkaar te verbinden.

Een buitendelta wordt vaak als zandvoorraad voor het achter het zeegat liggende bekken beschouwd. Dit blijkt maar ten dele waar te zijn. Analyse van de verplaatsing van deeltjes gedurende een getijcyclus met *SedTRAILS* (Figuur 3-14) laat zien dat het grootste deel niet naar het bekken maar over de buitendelta en naar het benedenstroomse eiland beweegt. Dit geldt ook voor deeltjes die aan de westzijde van de buitendelta worden ‘losgelaten’. Het grootste deel van het zand passeert aldus het zeegat (dit wordt *bypassing* genoemd). Alleen de deeltjes die ‘losgelaten’ worden bij de staart van het bovenstroomse eiland bewegen het bekken in, via de vloedgeul. Hieruit concluderen we dat de buitendelta vooral het benedenstroomse eiland voedt met zand. Tijdens storm, met name uit het noordwesten, wordt er veel water opgestuwd langs de kust dat via het zeegat het bekken instroomt. De grote golven zullen dan veel zand opwoelen dat eveneens het bekken in gebracht wordt. Onder deze condities transporteert er wel zand van de buitendelta het bekken in.



Figuur 3-13: Overzicht van de geulen en platen op de buitendelta van het Zeegat van Ameland in 2021. Aan de noordwestelijk rand van de buitendelta is de pilotsuppletie zichtbaar (uit Elias, 2021).

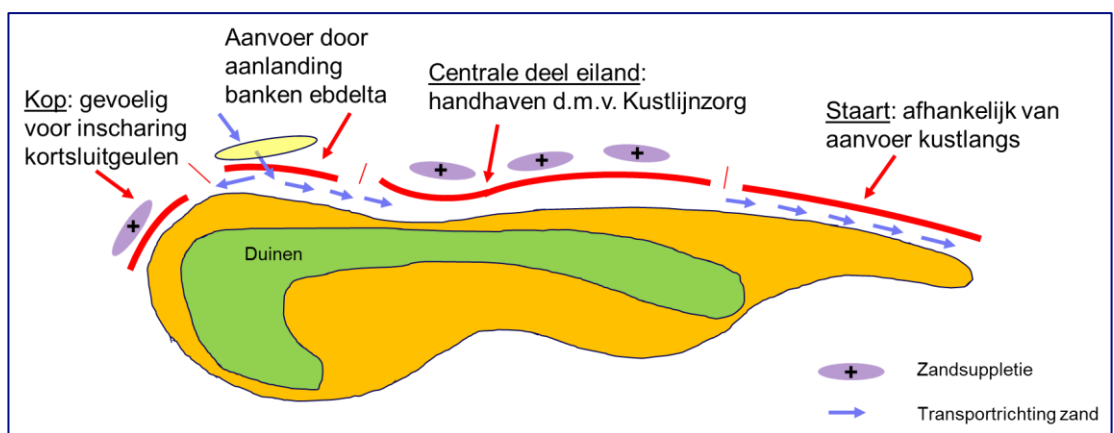


Figuur 3-14: Zandtransportpatronen op de buitendelta van het Zeegat van Ameland zoals bepaald met SedTRAILS voor jaargemiddelde condities en de bodem van 2020. De beginpunten van de geanalyseerde trajecten worden weergegeven door de witte cirkeltjes en de verplaatsing van de deeltjes met de zwarte lijnen. De belangrijkste transportpatronen zijn weergegeven met de gele en rode pijlen. De witte lijnen geven de grenzen tussen gebieden met verschil in transportrichting weer. (uit Elias, 2021; bron: Lambregts, 2021).

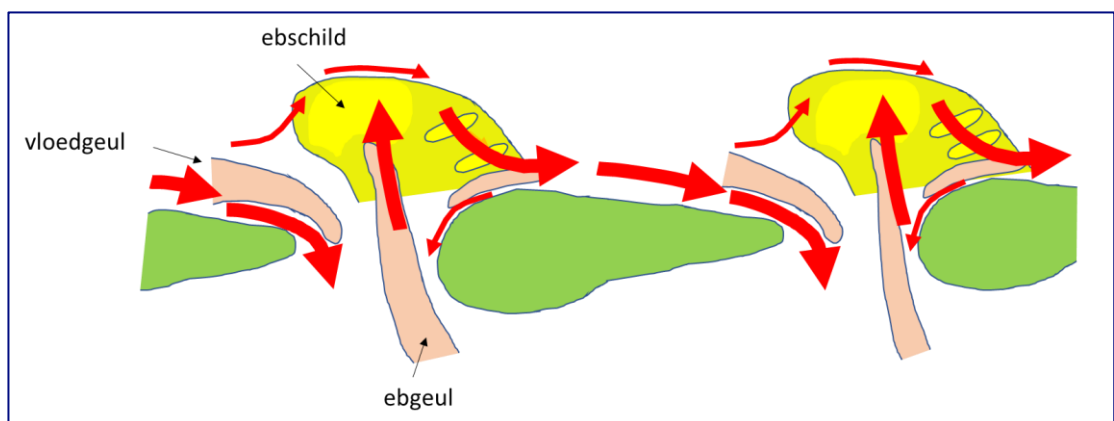
3.4.2 Ontwikkeling Waddeneilanden

De kust van een Waddeneiland delen we op in de eilandkop, het centrale deel van het eiland en de eilandstaart (Figuur 3-14). De ontwikkeling van de eilandkoppen en -staarten wordt beschreven bij het zeegat. Het centrale deel van het eiland is te beschouwen als een rechte kust. Het gedrag hiervan is vergelijkbaar met de Hollandse kust, zie 3.2.

De kust van een Waddeneiland wordt door de aangrenzende buitendelta gevoed met zand. Zandbanken op de buitendelta migreren naar de kust en verhelen met het eiland, waardoor de kust vooruit gaat (Figuur 3-15). Onder invloed van golven uit het westelijke kwadrant wordt dit zand met de tijd weer afgevoerd, waardoor de kust op het aanlandingspunt weer achteruit gaat. Het aangelande zand wordt vooral in oostelijke richting getransporteerd, een klein deel wordt afgevoerd naar het westen en uiteindelijk richting het zeegat (zie het splitsingspunt in Figuur 3-14 en Figuur 3-15). Het oostwaartse transport voedt de kust van het eiland. Echter, de herverdeling van het zand langs de kust verloopt langzaam, waardoor de kustlijn lokaal toch achteruit kan gaan. Dit moet dan, indien nodig, met suppleties opgevangen worden. De staart van het eiland wordt niet gesuppleerd omdat er geen BKL is vastgesteld en/of omdat vanwege de prioriteit van de functie natuur handhaving achterwege wordt gelaten in de praktijk. Het zand van de staart kan vrij het bekken in getransporteerd worden. Daar een buitendelta vooral het benedenstroomse eiland van zand voorziet, dat vervolgens kustlangs getransporteerd wordt en uiteindelijk voor een deel het volgende zeegat ingevoerd wordt, betekent dat een buitendelta op langere tijdschaal een bijdrage levert aan de voeding met zand van het volgende, benedenstroomse bekken (Figuur 3-16). Dit suggereert dat er meer zand in de kustzone beweegt dan er het bekken in gaat.



Figuur 3-15: Schematische weergave van de ontwikkelingstrends van een Waddeneiland. De kop van het eiland wordt gevoed door zandbanken welke aanlanden vanaf de buiten- of ebdelta, het aangeleverde zand wordt herverdeeld langs de kust van het eiland. Het grootste deel wordt verplaatst naar het oosten, een klein deel naar het westen.

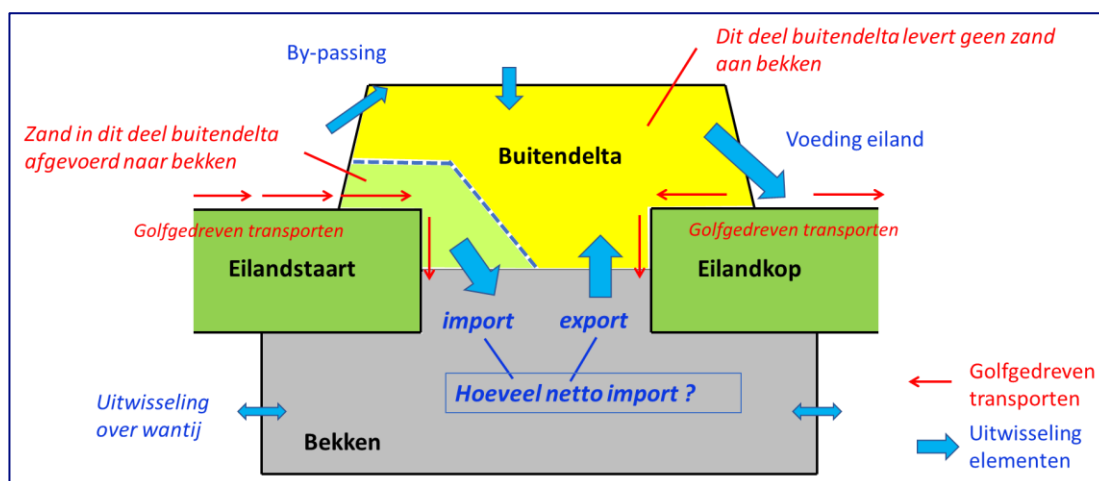


Figuur 3-16: Schematische weergave van de flux van zand langs de Noordzeekust van de Waddeneilanden en de uitwisseling met de getijdebekken.

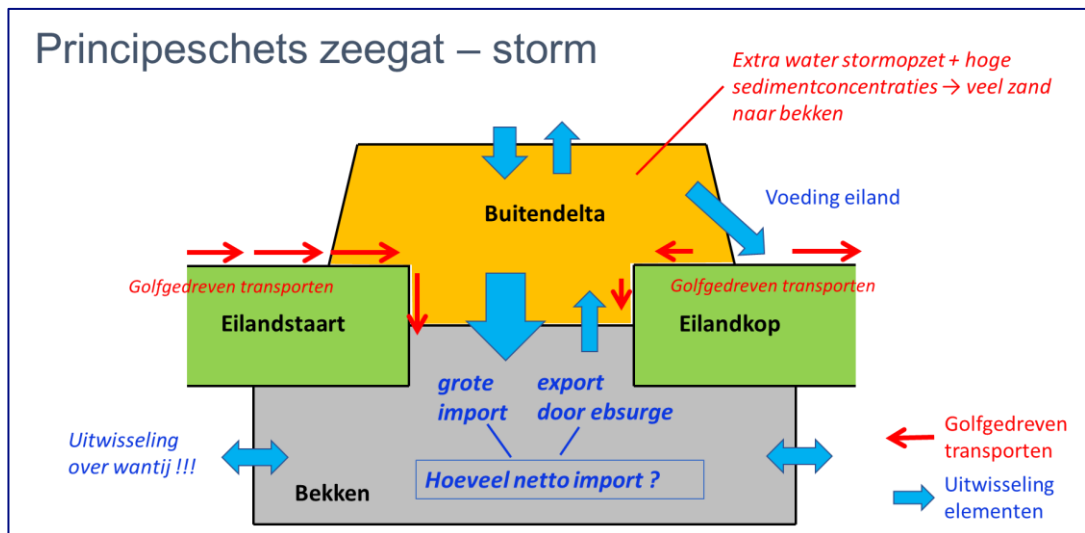
3.4.3 Conceptueel model zeegat en buitendelta

Bovenstaande informatie over de zanduitwisseling rond een zeegat kan worden samengevat in een conceptueel model dat de belangrijkste uitwisselingen tussen de verschillende elementen weergeeft. Figuur 3-17 schetst het conceptuele model dat is gebaseerd op de gedetailleerde kennis van de ontwikkeling van het Zeegat van Ameland. De golfgedreven zandtransporten (rode pijlen) langs de kusten van de eilanden brengen zand het zeegat in. Door golfrefractie om de buitendelta gaat het transport op de eilandkop ook naar het bekken. Het getijtransport is maar voor een klein deel naar het bekken gericht: alleen de bij de eilandstaart gelegen vloedgeul brengt zand naar het bekken. De rest van de buitendelta levert zand aan het benedenstroomse eiland, waarbij er onderscheid gemaakt kan worden in verschillende tijd- en ruimteschalen. Zo landen er regelmatig (orde enkele jaren) door golfwerking gevormde en verplaatste swashbars aan op de kust van het benedenstroomse eiland. Het toegevoegde zand wordt vervolgens herverdeeld waarbij het grootste deel door golfgedreven transport in oostelijke richting verplaatst wordt. De aanlanding van grote zandbanken zoals het Bornrif (zie Figuur 3-11; niveau 1), ontstaan als gevolg van een geulverlegging op de buitendelta, hebben een langere tijdschaal van decennia. Door zo'n aanlanding gaat de waterlijn flink vooruit, maar op termijn van decennia gaat de waterlijn weer achteruit omdat het zand kustlangs afgevoerd wordt door de golven. Omdat het om een groot volume zand gaat duurt dat langer.

Resumerend is te stellen dat onder gemiddelde condities de golfgedreven transporten langs de eilandkusten en het sedimenttransport door de vloedgeul het bekken voeden. Ook zal het bekken sediment uitwisselen met zijn burens door transport over de wantijen. Windgedreven stroming speelt hierbij een belangrijke rol. Hoe groot deze transporten zijn op jaarbasis is slecht bekend. Gezien de overheersende westenwinden ligt het voor de hand dat er een netto verplaatsing over de wantijen is naar het oosten. Dit conceptuele model geldt in principe voor alle zeegaten, al zullen er altijd onderlinge verschillen zijn.



Figuur 3-17: Principeschets van de uitwisseling van zand rond een zeegat onder gemiddelde condities. Zie tekst voor toelichting.



Figuur 3-18: Principeschets van de uitwisseling van zand rond een zeegat tijdens storm. Door de hoge sedimentconcentraties en het opgestuwde water zullen de sedimenttransporten groter zijn dan onder gemiddelde condities. Zie tekst voor toelichting

Tijdens storm zijn de golven hoger en langer waardoor er meer zand wordt opgewoeld en de golfgedreven transporten toenemen. Tegelijkertijd wordt er veel water opgestuwd langs de kust dat via het zeegat het bekken instroomt. Onder deze condities zal er wel zand van de gehele buitendelta het bekken in getransporteerd worden, zie Figuur 3-18. Na het luwen van de storm neemt de ebsurge, het terugstromen van het opgestuwde water, een deel van het extra aangevoerde sediment weer mee het bekken uit. Het netto-effect zal er echter positief zijn, het bekken in gericht. Het optreden van deze incidentele extra sedimentaanvoer naar het bekken is slecht voorspelbaar.

3.4.4 Toepassing van de conceptuele modellen

Deze sectie beschrijft hoe het conceptuele model voor zeegaten en eilandkusten toegepast wordt om de sedimentbehoefte van de Waddenkust te berekenen. De sedimentbehoefte van het zeegat (welke bestaat uit de buitendelta en de eilandkop en -staart, waarbij de 'verliezen' naar de Waddenzee meegenomen worden) wordt eerst besproken, daarna die van de centrale eilandkust.

Buitendelta's

Het uitgangspunt bij het bepalen van de sedimentbehoefte van een buitendelta is de vraag: wat wil je in stand houden? Het gaat hierbij dus niet om het per se handhaven van het totale oppervlak of de gemiddelde diepte van de buitendelta maar om het handhaven van het functioneren van de buitendelta. Uit het conceptueel model blijkt dat de belangrijkste rol van de buitendelta de voeding is van de kust van het benedenstroomse eiland door aanlanding van zandbanken, gevolgd door kustlangse herverdeling van het zand. Het in stand houden van deze zandflux is hiermee de belangrijkste functie van de buitendelta.

Voor de sedimentbehoefte van de buitendelta is het in stand houden van de zandaanvoer naar het benedenstroomse eiland op een tijdschaal van decennia het uitgangspunt. Hierbij maken we onderscheid tussen het actieve deel van de morfologie dat betrokken is bij de bankencyclus op de buitendelta, en het inactieve deel dat vooral als platform fungeert waarover het zand verplaatst wordt. Het volume zand dat aanwezig is in de migrerende zandbanken beschouwen we als "actief volume". Dit "actieve volume" moeten we handhaven om de bypassing van zand naar het benedenstroomse eiland in stand te houden. Het actieve volume is vast te stellen uit de morfologische ontwikkeling van de buitendelta. Als beginpunt

van de ontwikkeling kiezen we de oudste, digitaal beschikbare bodems van de buitendelta's. Zand dat sinds dat beginmoment niet is afgezet of geërodeerd beschouwen we als inactief¹³. Op basis hiervan is een oppervlak te construeren: de 'minimumbodem'. Het zandvolume dat boven deze minimumbodem ligt is het actieve volume. Figuur 3-19 illustreert dit principe aan de hand van de ontwikkelingen over de periode 2005-2021.

Vooralsnog gaan we ervan uit dat het hele actieve zandvolume gehandhaafd moet worden. Dat betekent dat we de minimumbodem als mee te groeien oppervlak kiezen. Aan de hand van de minimumbodem wordt een representatieve dieptecontour als zeewaartse grens van de buitendelta gekozen. Minimumbodems worden voor ieder zeegat bepaald.

Hierbij moet opgemerkt worden dat een buitendelta een minimum omvang moet hebben om het mechanisme van bankaanlandingen te handhaven: de banken moeten op de juiste locatie aanlanden om het eiland te kunnen blijven voeden. Deze omvang hangt samen met de grootte van het zeegat en zal per zeegat dus verschillen. Het in stand houden van deze minimumomvang is deel van de sedimentbehoefte. Bij de keuze van de minimumbodem moet hiermee rekening gehouden worden.

Eilandkoppen en eilandstaarten

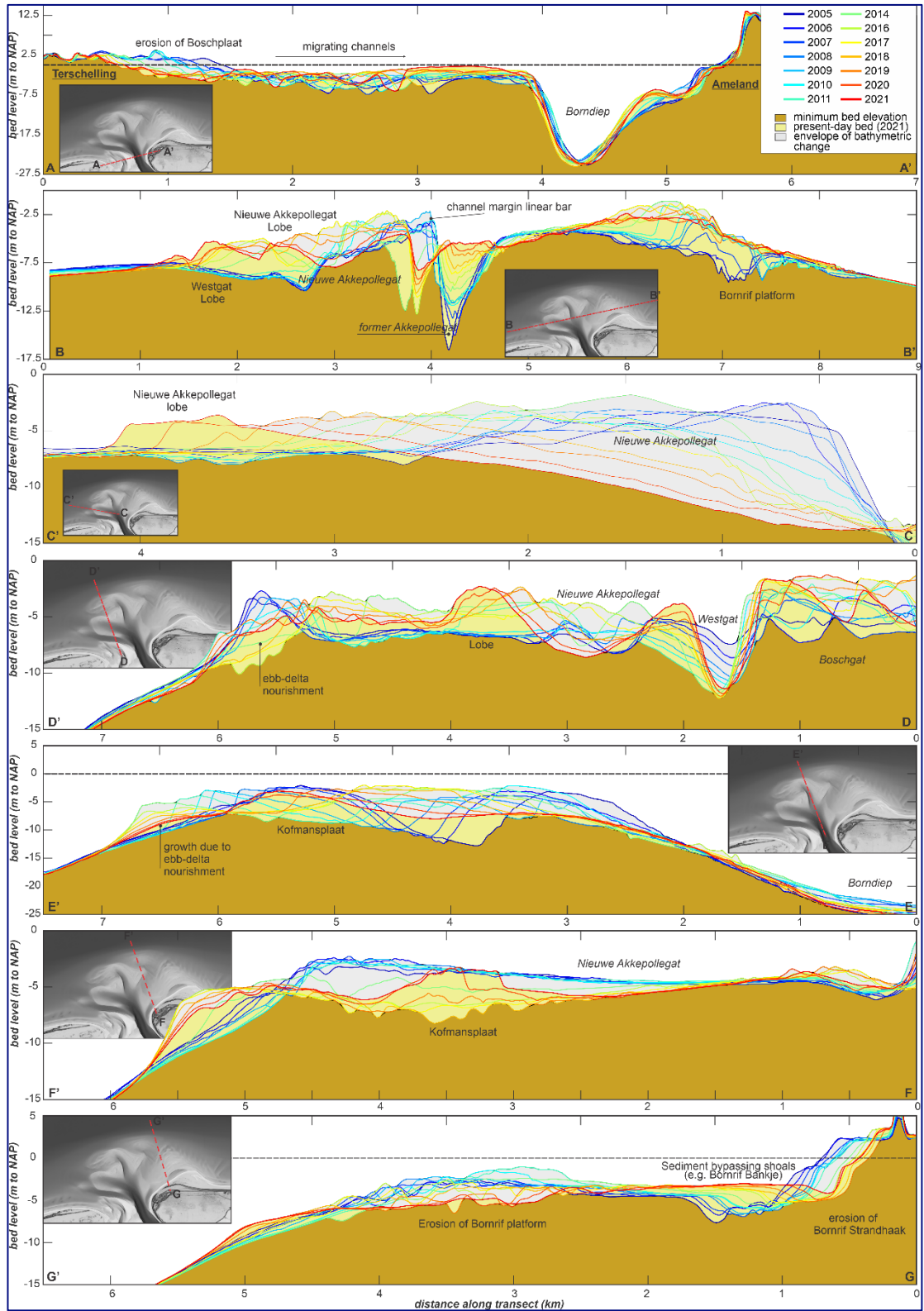
Ook voor de eilandkoppen en -staarten moeten actieve oppervlakten bepaald worden. De grens van deze delen met de centrale eilandkust ligt daar waar de buitendelta begint. Op eilandstaarten kunnen natuurlijke duinen, al dan niet onderbroken door washovers, en stuifdijken aanwezig zijn, verder bestaan de staarten uit zandvlaktes. Aan de zeewaartse zijde worden de staarten begrensd door de buitendelta's, aan de landwaartse zijde wordt de grens van de actieve zone op de top van de zeereep of stuifdijk gelegd, op dezelfde wijze als bij de Hollandse kust. Indien de staart uit een zandvlakte bestaat wordt de grens bij de GHW-lijn gelegd. Het oppervlak aan de 'wadzijde' van de GHW-lijn wordt geacht sediment te ontvangen vanuit de Waddenzee, en blijft daarmee verder buiten beschouwing bij het vaststellen van het actieve oppervlak.

Ook de eilandkoppen worden aan de zeewaartse zijde begrensd door de buitendelta. Op de eilandkoppen komen duinbogen voor die de landwaartse begrenzing van de eilandkop vormen. De grens wordt op de top van de buitenste duinenrij gelegd, vergelijkbaar met de Hollandse kust. De grens met het bekken wordt gelegd bij de kortste verbindinglijn door de zeegaten (= grens kustfundament). Dit is in meer detail uitgelegd in Bijlage C.1.2

Centrale eilandkusten

De grenzen van het actieve deel van de centrale eilandkusten worden identiek gesteld aan die bij de Hollandse kust: de zeewaartse grens ligt bij de onderzijde van de brandingszone, de landwaartse grens ligt op de top van de zeereep. Bijlage C geeft extra informatie.

¹³ De zeespiegelstijging is hierop niet van invloed. Op die tijdschaal past het passieve deel zich aan volgens de bekende empirische relaties. Het heeft waarschijnlijk geen serieuze invloed op de zandfluxen over de buitendelta.

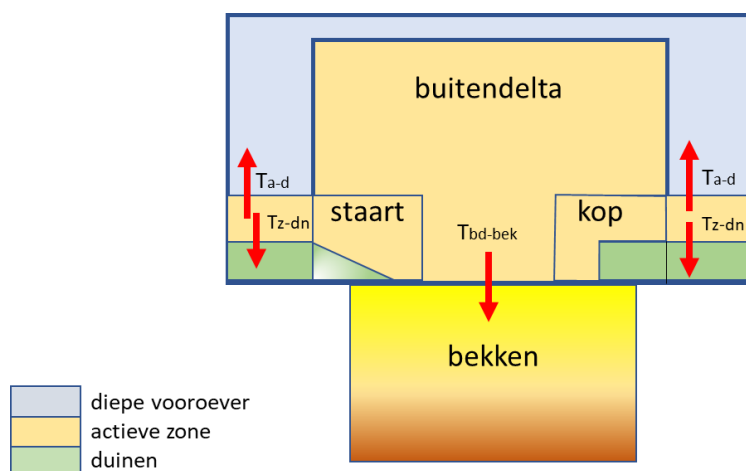


Figuur 3-19: Morfologische ontwikkeling van de buitendelta van het Zeegat van Ameland sinds 2005 middels een aantal representatieve doorsneden. Het 'monsterbruine' deel van het profiel is inactief over de periode 2005-2021 en vormt een 'minimumbodemp' voor de ontwikkelingen over dit interval. (Bron: Elias et al., 2022).

3.4.5 Rekenregel zeegaten

De sedimentbehoefte van een zeegat bestaat uit de optelsom van de sedimentbehoeften van de deelsystemen buitendelta, eilandstaart en eilandkop en de berekende 'export' uit het

kuststelsysteem naar de Waddenzee. Om deze sedimentbehoefte te berekenen worden de actieve oppervlakken (Figuur 3-20) vermenigvuldigd met de zeespiegelstijging. De omvang van de 'export' naar het achterliggende Waddenbekken is afhankelijk van de snelheid van zeespiegelstijging (zie 3.3.3). Voor een zichtwaarde zijn er daardoor, afhankelijk van of deze snel (2100) of minder snel (ca. 2200) wordt bereikt, verschillende sedimentbehoeften van een zeegat te berekenen.



Figuur 3-20: Schematisch bovenaanzicht van de actieve oppervlakken van de elementen buitendelta, eilandkop en eilandstaart, die samen met de export naar het bekken de sedimentbehoefte van een zeegat bepalen. Op de eilandstaart zijn niet altijd duinen of stuifdijken aanwezig. Zie 3.4.4 voor een nadere beschrijving van de afbakening. De actieve zone van de centrale eilandkusten wordt conform het model voor de Hollandse kust berekend.

3.4.6 Resultaten rekenregel voor de zeegaten van het Waddengebied

Om te komen tot de sedimentbehoefte van het deelsysteem Wadden, per zeegatsysteem, moeten de oppervlakten van de actieve zones (zie Tabel 3-5) en de transporten door de zeegaten bekend zijn (zie Tabel 3-4). De resultaten van die berekening staan in Tabel 3-6.

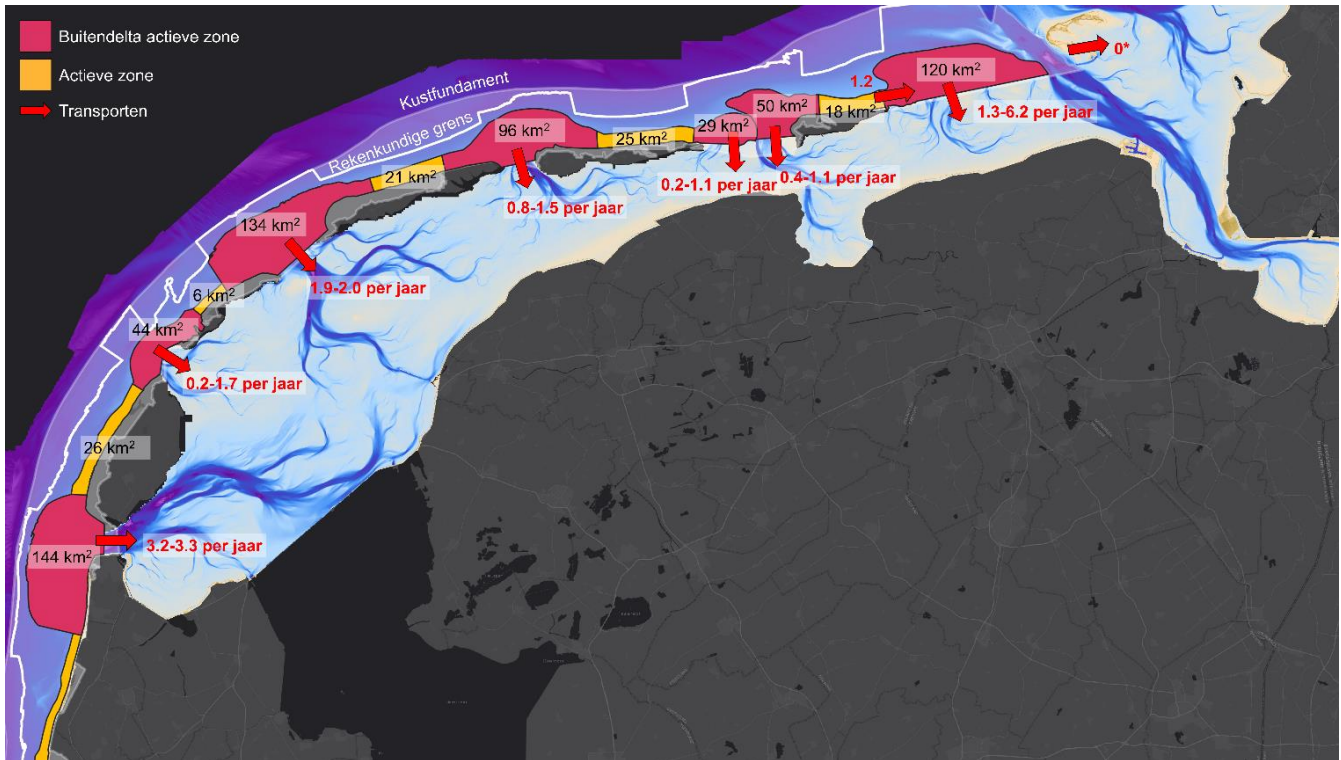
Tabel 3-5: Oppervlaktes actieve zone per deelgebied

		Oppervlakte actieve zone [km ²]	
Wadden centrale eilandkust	Texel	26	96
	Vlieland	6	
	Terschelling	21	
	Ameland	25	
	Schiermonnikoog	18	
Wadden buitendelta's	Zeegat van Texel	144	495
	Eierlandse gat	44	
	Zeegat van het Vlie	134	
	Zeegat van Ameland	94	
	Pinkegat	29	
	Zoutkamperlaag	50	

Tabel 3-6: Sedimentbehoefte deelsysteem Wadden per zeegatsysteem in mln. m³. Het transport richting Groninger Wad is 1,2 mln. m³ per jaar, zie 3.5

Sedimentbehoefte Waddenkust - totaal							
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	2190 ¹⁴
1. Centrale eilandkusten							
Texel	13	26	53	26	53	79	132
Vlieland	3	6	12	6	12	18	30
Terschelling	10	21	41	21	41	62	103
Ameland	12	25	49	25	49	74	123
Schiermonnikoog	105	114	132	234	252	271	295
- Schiermonnikoog centraal	9	18	36	18	36	55	91
- export Groninger Wad	96	96	96	216	216	216	204
2. Buitendelta's, incl. zeegaten, eilandkoppen en -staarten, en export naar bekken							
Zeegat van Texel - totaal	329	411	566	704	890	1043	1314
- buitendelta	72	144	288	144	288	432	720
- export naar bekken	257	267	278	560	602	611	594
Eierlandse Gat - totaal	41	92	200	93	226	335	521
- buitendelta	22	43	87	43	87	130	217
- export naar bekken	19	49	113	50	139	205	304
Zeegat van het Vlie - totaal	219	291	429	516	689	807	1027
- buitendelta	67	134	267	134	267	401	668
- export naar bekken	152	157	162	382	422	406	359
Zeegat van Ameland - totaal	111	173	298	270	427	539	735
- buitendelta	47	94	187	94	187	281	469
- export naar bekken	64	79	111	176	240	258	266
Pinkegat - totaal	33	64	129	71	144	212	346
- buitendelta	14	28	57	28	57	85	142
- export naar bekken	19	36	72	43	87	127	204
Zoutkamperlaag - totaal	53	88	167	127	221	299	457
- buitendelta	25	50	100	50	100	150	251
- export naar bekken	28	38	67	77	121	149	206
TOTAAL EILANDKUSTEN	143	192	287	312	407	504	683
TOTAAL BUITENDELTA'S	247	493	986	493	986	1479	2467
TOTAAL EXPORT BEKKENS	539	626	803	1288	1611	1756	1933
TOTAAL WADDENKUST	929	1311	2076	2093	3004	3739	5083

¹⁴ In de aangeleverde scenario's treedt de 5 meter op in 2190.



Figuur 3-21: Visualisatie van de oppervlaktes en transporten die de sedimentbehoefte van de Waddenzee bepalen. De gegeven range van de transporten gaat over alle scenario's van zeespiegelstijging (Figuur 3-1). Bij het Groninger Wad staat 120 km² als oppervlakte. In dit rapport wordt echter 80 km² gebruikt: (zie 3.5.2).

3.4.7 Relevante kennisleemtes zeegaten en buitendelta's

Om het conceptueel model voor zeegaten en buitendelta's verder te onderbouwen en onzekerheden te verkleinen zouden in de komende jaren een aantal kennisleemtes opgevuld moeten worden door middel van aanvullend onderzoek. Relevante kennisvragen c.q. kennisleemtes zijn:

1. Hoe veranderen getij- en golfgedreven stromingen, en daarmee de sedimenttransporten in het zeegat, op de buitendelta en op de eilandkoppen bij zeespiegelstijging?
2. Wat is het effect van een grotere sedimentvraag van het bekken op de transporten door het zeegat? Volgens de formulering van ASMITA moet er eerst een overdiepte, en daarmee dus een grotere sedimentvraag, ontstaan in het bekken voordat de sedimentimporten door het zeegat toenemen. Werkt dit in de natuur ook zo?
3. Welk deel van een buitendelta is op de lange tijdschaal actief? En wat is de invloed van zeespiegelstijging daarop?

Dit moet inzicht geven in een eventuele ontwikkeling van actieve en passieve sedimentvolumes op een buitendelta.

4. Wat is het effect van zeespiegelstijging op de morfologische ontwikkeling van de buitendelta?

Volgens een eerste, globale verkenning leidt een stijging van het gemiddeld zeeniveau tot meer getijverschil in de Waddenbekkens? Indien dat zo is, zullen de getijdebiëten door de zeegaten toenemen.

(a) Volgens de bekende empirische relaties zal een groter debiet resulteren in een grotere doorsnede van het zeegat en een toename van het zandvolume in de buitendelta. Waar dit zand vandaan zal komen en of dit leidt tot een grotere sedimentvraag is onduidelijk en moet nader onderzocht worden.

- (b) Een toename van het getijdebiet verandert de verhouding tussen de getij- en golfenergie op de buitendelta. Dat kan resulteren in een andere morfologie, met gevolgen voor de zanduitwisseling tussen buitendelta en benedenstroomse eilandkop. Dit moet nader onderzocht worden.
5. De schaalcascade is cruciaal voor het begrijpen van de werking van een buitendelta op verschillende tijd- en ruimteschalen. Op dit moment is de invulling van de schaalniveaus vooral kwantitatief. Om inzicht in toekomstige ontwikkelingen te krijgen is verdere detaillering van de morfodynamiek op verschillende schaalniveaus gewenst. Hiervoor is kwantificering nodig van de karakteristieken van de verschillende elementen van de buitendelta, zoals geulen, banken, platforms e.d.

3.5 Grootschalig gedrag en sedimentbehoefte Groninger Wad

3.5.1 Inleiding en begrenzing

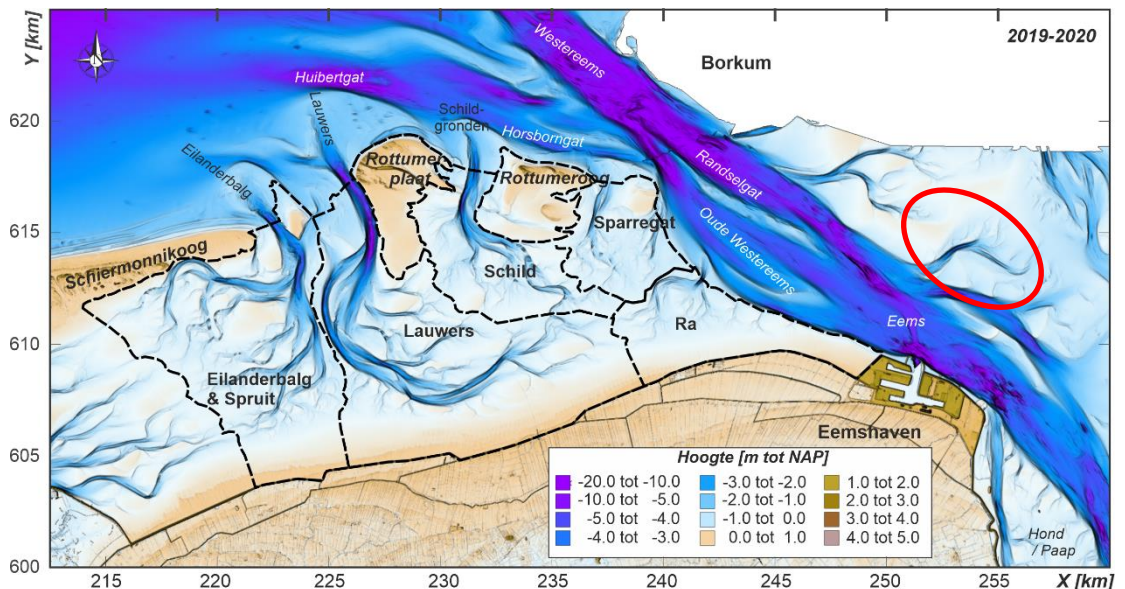
Het Nederlandse kuststelsysteem omvat twee estuaria, die beiden bovendien een staatsgrens bevatten dan wel er zeer nabij liggen. Voor het bepalen van sediment- c.q. suppletiebehoefte zijn dit speciale gebieden, waarvoor ook specifieke conceptuele modellen nodig zijn. Hierom zijn er aparte secties gewijd aan het kuststelsysteem ten oosten van Schiermonnikoog (deze) en de monding van de Westerschelde (3.7), met een uitgebreidere beschrijving van de morfologie en de ontwikkelingen erin. In beide gevallen zijn er (deel)gebieden waarin nu geen kustlijnverzorging plaatsvindt, maar waarvoor de toekomstige beleidskeuze anders kan zijn.

Begrenzing Groninger Wad

In dit rapport staat de aanduiding 'Groninger Wad' voor het totale gebied ten oosten van het wad van Schiermonnikoog en ten westen van het Eems-estuarium, zie Figuur 3-22. Het omvat de eilanden Simonszand, Rottumeroog en Rottumerplaat en de buitendelta's van de zeegaten Eilanderbalg, Lauwers en Schild, gezamenlijk aangeduid als 'buitendelta Groninger Wad' en de bijbehorende bekkens, uiteraard 'bekkens Groninger Wad' genoemd.

3.5.2 Morfologische ontwikkelingen

De morfologie, morfologische ontwikkelingen en de sedimentbalans van het Groninger Wad en Eems-estuarium zijn uitvoerig beschreven in Elias et al. (2021).



Figuur 3-22: Een overzicht van de onderverdeling in deelsystemen/kombergingsgebieden in het Groninger Wad. Tabel 3.7 bevat de kentallen van deze gebieden. De grens tussen Nederland en Duitsland is niet aangegeven. Bron: Elias & Cleveringa (2021). Gebied onder ellips is de Eemshornplaat

Figuur 3-22 geeft een overzicht van de situatie waarin de ligging van geulen en platen goed zichtbaar is. Tabel 3.7 geeft de morfologische kentallen die bij Figuur 3-22 horen. Het Groninger Wad bestaat uit 5 deelsystemen, van west naar oost, Eilanderbalg en Spruit, Lauwers, Schild, Sparregat en Ra. De laatste deelsystemen stromen niet zeewaarts uit maar in het Eems-estuarium. Ze hebben daar geen of een kleine buitendelta. Aan de zeezijde stromen de geulen uit over een grote ondiepte (de Eemsmonding). Tussen die monding en de buitendelta's van het Groninger Wad ligt het Huibertgat. Deze geul kan worden gezien als de scheiding tussen de buitendelta's van het Groninger Wad en de Eemsmonding en vormt daarmee de noordelijke afbakening van de actieve zone.

Tabel 3.7. Morfologische kentallen van de gebieden uit Figuur 3-22. Bron: Elias & Cleveringa (2021).

Gebied	Totale oppervlakte [km ²]	Oppervlakte geulen [km ²]		Oppervlakte platen [km ²]		Sedimentvolume platen [mln. m ³]	
		GLW	GHW	GLW	GHW	GLW	GHW
<i>Eilanderblag</i>	77	20	75	58	3	57	2
<i>Lauwers</i>	96	27	87	69	9	85	5
<i>Schild</i>	31	9	31	23	0	17	0
<i>Sparregat</i>	21	4	21	18	0	11	0
<i>Ra</i>	29	3	28	27	2	31	2
<i>Rottumerplaat</i>	15	0,3	6	15	9	35	6
<i>Rottumeroog</i>	14	0,4	11	14	3	23	2
Totaal Gr. Wad	284	62	259	222	25	259	15

Over de periode 1990-2019 is door Elias et al. (2021) een sedimentbudget opgesteld. In totaal neemt het gehele balansgebied met 91 mln. m³ in sedimentvolume toe. De grootste toename treedt op in de Eems, nabij het platengebied Hond-Paap waar de achterliggende geul (Bocht van Watum opvult). Ten oosten hiervan neemt ook het ondiepe banken- en geulengebied Eemshornplaat sterk in volume toe. Slibafzetting speelt een grote rol in deze gebieden.

De volumeveranderingen van het bekkendeel van het Groninger Wad zijn relatief beperkt (ca. 12 mln. m³; Tabel 3-8) maar er treden wel grote verplaatsingen van de geulen in de zeegaten op. De eilandstaart van Schiermonnikoog is zo'n 3 km oostwaarts uitgebouwd sinds 1986. Hierdoor wordt de Eilanderbalg richting de Lauwers gedrukt. Het tussenliggende eiland Simonszand is daarbij sterk in omvang afgenomen. De kleine zeegaten Lauwers, Schild en Sparregat zijn sinds 1986 aanwezig. De tussengelegen eilanden, Rottumeroog en Rottumerplaat, verplaatsen zich vooral landwaarts. Het volume van de eilanden neemt daarbij toe met 14 mln. m³. Een verlies van sediment treedt wel op in de diepere kustzone van de Eemsmonding. Het is mogelijk dat dit verlies samenhangt met een verkleining van de Eemsmonding, een terugtrekking zoals ook in de Westerscheldemonding bij de Vlakte van de Raan te zien is. De meetnauwkeurigheid kan hier ook een rol spelen. Door het grote oppervlakte geeft een kleine meetfout al een grote netto volumeverandering.

Door de structurele terugtrekking van de zeegaten tussen 1986 en 2019 is de bepaling van de actieve zone via de methodiek zoals is uiteengezet in Bijlage C minder geschikt. De aldus bepaalde oppervlakte van 120 km² is waarschijnlijk te groot omdat hierin ook de oude ligging is meegenomen. Als de terugtrekking meegenomen wordt in de analyse dan ligt het oppervlakte waarschijnlijk rond de 80 km².

Tabel 3-8: Overzicht van de netto veranderingen per deelgebied van Groninger Wad en Eems-estuarium over de periode 1990-2019/2020.

Gebied	Oppervlakte [km ²]	Netto ΔVol. [10 ⁶ m ³]		
		Totaal	Zand	Slib
Eilanden	46	15	14	1,5
Kustzone	242	-42	-41	-0,50
Bekkens Gr. wad	169	12	8,5	3,5
Eems (platen)	209	106	62	44
Eems (geulen)	162	-1,4	9,6	-11
Dollard	92	0,12	-0,63	0,75
Totaal	919	91	52,5	38,5

Het vaststellen van de netto transporten tussen de kust, Groninger Wad en het Eems-Dollard estuarium is geen eenvoudige taak. Op basis van de bodemhoogteveranderingen en de sedimentsamenstelling, presenteren Elias et al. (2021) een sedimentbalans van het gehele gebied (incl. de Eems) waarin ook rekening is gehouden met bodemdaling, baggeren en verspreiden van sediment, en met invang van sediment in kwelders. Op basis van deze studie kan worden geconcludeerd dat vanaf de eilanden en kustzone er ca 0,7 mln. m³ per jaar is getransporteerd (vrijwel geheel zand) en naar de bekkens en het Eems-estuarium samen is de totale aanvoer ruim 5 mln. m³ sediment per jaar. Van deze ruim 5 mln. m³ is ongeveer de helft slib. Een belangrijk deel van de aanzanding is op de Eemshornplaat (rode ellips in Figuur 3-22). Sedimenttransport vanaf het Duitse deel van de Waddenzee heeft een belangrijke rol in deze aanzanding. Binnen Kustgenese 2.0 is geconcludeerd dat er een verlies van 1,2 mln. m³/jaar optreedt naar het Eems-Dollard estuarium. Gezien de grote onzekerheden in de sedimentbalans (bijv. de zand-slib onderverdeling en de relatief grote verliezen in de diepere kustzone) moet deze schatting met voorzichtigheid worden benaderd. In dit rapport is uitgegaan van een gemiddeld jaarlijks transport oostwaarts ter hoogte van Schiermonnikoog van 1,2 mln. m³/jaar¹⁵, zie ook Figuur 3-23.

Uit het oogpunt van de actieve zone, kan geconcludeerd worden dat de zanduitwisseling vanaf de buitendelta's van het Groninger Wad naar het Eems-Dollard estuarium beperkt is. De toevoer van zand naar de buitendelta van het Groninger Wad gebeurt vanuit de actieve zone van de eilandkust van Schiermonnikoog. De grote uitbouw van eilandstaart van Schiermonnikoog laat zien dat het merendeel van dit transport direct ingevangen wordt. Daarnaast nemen ook in de naastliggende zeegaten, de eilanden en de oostzijde van het Groninger Wad de zandvolumes toe. Het lijkt onwaarschijnlijk dat er grote verliezen vanuit de actieve zone 'buitendelta Groninger Wad' naar de Eems-Dollard zullen plaatsvinden.

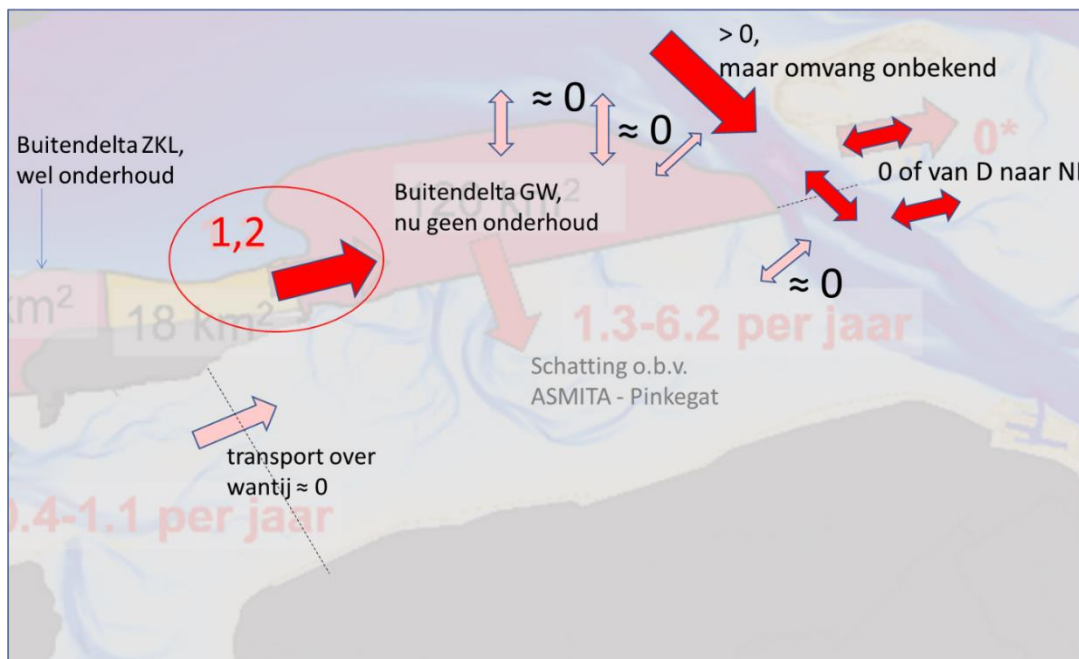
Tabel 3-9: Overzicht sedimentvolumebalans (1990-2019/2020) van Groninger Wad en Eems-estuarium

[10 ⁶ m ³]	Netto ΔVol.	Netto baggeren, verspreiden (Eems, havens)	Bodem-daling	Kwelders	Totaal im/exp.
Eilanden	15		6	-	-20
Kustzone Gr. wad	-42				
Bekkens Gr. wad	12		22	6	153
Eems (platen)	106	6		0,4	
Eems (geulen)	-1,4			0,5	
Dollard	0,12			1,8	

¹⁵ Dit valt binnen de marge die Van der Werf, 2022 berekent voor oostwaarts transport over de staatsgrens, zie 3.8.

3.5.3 Conceptuele modellen voor sedimentbehoefte Groninger Wad

Voor het bepalen van de sedimentbehoefte is gebruik gemaakt van het in 2.2.4 uitgelegde onderscheid tussen actieve zone waar wel en geen kustlijn zorg plaatsvindt. Onderbouwing van de berekening is getoond in Figuur 3-23, waarin de belangrijkste conclusies uit recente rapporten over de transporten rond Groninger Wad en Eems-estuarium zijn samengevat.



Figuur 3-23: Overzicht beste schattingen netto jaarlijkse transporten rond Groninger Wad en Eems-estuarium.

De actieve zone van Groninger Wad kent geen kustlijn zorg. Daar is geen BasisKustLijn vastgesteld en is de voorkeursstrategie 'meebewegen met de natuur'. Het is echter niet uit te sluiten dat op langere termijn een andere optie binnen het beleid gekozen wordt als blijkt dat voor behoud van de gebruiksfuncties van de vastelandskust het Groninger Wad wel mee moet groeien. Dan zal er gesuppleerd kunnen gaan worden om de buitendelta's van het Groninger Wad te onderhouden. De daarbij optredende sedimentbehoefte is ook berekend. Het is echter een beleidskeuze of dit wordt meegenomen.

Met de 1,2 mln. m³ per jaar die vanaf de actieve zone langs de rechte eilandkust van Schiermonnikoog richting het oosten gaat moet afhankelijk van die beleidskeuze, anders worden omgegaan¹⁶.

- Als de sedimentbehoefte van de actieve zone van het Groninger Wad niet wordt meegenomen is er 1,2 mln. m³ per jaar 'transport uit de actieve zone waarin wel kustlijn zorg gebeurt'. Dat moet in de berekening worden meegenomen
- Als de sedimentbehoefte van de actieve zone van het Groninger Wad wel wordt meegenomen is de 1,2 mln. m³ per jaar slechts transport tussen twee actieve zones en vervalt, zie 3.5.4. Volgens Figuur 3-23 zijn er geen verdere transporten om rekening mee te houden.

Bij het nadenken over sedimentbehoefte bij een versnelde zeespiegelstijging zou natuurlijk ook in acht moeten worden genomen of er sedimentbehoefte ontstaat (en mogelijk actief ingevuld gaan worden door sedimentbeheer dat nu nog niet onderdeel is van het beleid) in

¹⁶ Dit transport lijkt representatief voor de toekomst, ook bij versnelde zeespiegelstijging, (cf. redenatie uit 2.3.2).

het Eems-estuarium. Het bepalen van een sedimentbehoefte van het Eems-estuarium valt echter buiten dit rapport, net als voor het Schelde-estuarium.^{17 18}

3.5.4 Resultaten toepassen rekenregel en reflectie

De sedimentbehoefte bij het Groninger Wad, te gebruiken bij de beleidskeuze hier wel kustlijn­zorg in de toekomst aan te nemen, is gepresenteerd in Tabel 3-10. De berekening is gebaseerd op de oppervlakte van de buitendelta (80 km², zie hiervoor) en een raming van wat er richting de bekkens van het Groninger Wad wordt getransporteerd (zie kader hieronder). In lijn met wat hiervoor is uitgelegd en getoond in Figuur 3-23 kan de 1,2 mln. m³ per jaar die wordt aangevoerd vanaf Schiermonnikoog van de totale behoefte worden afgetrokken. Het is dan een transport binnen de actieve zones.

Box 4: Sedimenttransport van de buitendelta's van het Groninger wad naar de bekkens

Een schatting van de toekomstige transporten onder zeespiegelstijging is voor het Groninger Wad nog niet gemaakt met ASMITA. In de huidige studie zal hiervoor dus een aanname gedaan moeten worden.

Kijkende naar de morfologische karakteristieken komt het Pinkegat het meest overeen met de zeegaten van het Groninger Wad. De ASMITA resultaten van het Pinkegat zijn gebruikt als eerste orde afschatting van de toekomstige import van het totale Groninger Wad door te verscalen aan de hand van de ratio van de oppervlakten van de bekkens. De oppervlakte van de bekkens van het Groninger Wad is 5,8 x die van het bekken van het Pinkegat.

Tabel 3-10: Sedimentbehoefte Groninger Wad in miljoenen m³ onder verschillende zichtwaarden, met correctie voor het jaarlijks transport van 1,2 mln. m³ van Schiermonnikoog oostwaarts. NB Transporten naar het Groninger Wad zijn gebaseerd op die van het Pinkegat, vermenigvuldigd met de ratio van de oppervlaktes van de betreffende bekkens (opp. Groninger Wad = 5,8 x opp. Pinkegat).

Mogelijke sedimentbehoefte Waddenkust ten oosten van Schiermonnikoog – nu géén kustlijn­zorg!

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	2190 ¹⁹
Buitendelta's	40	80	160	80	160	240	400
naar bekken Groninger Wad	110	209	418	249	505	737	1183
aanvoer van Schiermonnikoog	-96	-96	-96	-216	-216	-216	-204
TOTAAL	54	193	482	113	449	761	1379

3.5.5 Relevante kennisleemtes

Als de wens bestaat het conceptueel model voor het Groninger Wad en de Eems-Dollard verder te onderbouwen en onzekerheden te verkleinen, moeten in de komende jaren een aantal kennisleemtes opgevuld worden door middel van aanvullend onderzoek. Relevante kennisleemtes, in volgorde van belang, zijn:

¹⁷ Een verschil met eerdere berekeningen van sedimentbehoefte, gekoppeld aan het kustfundament is dat toen een deel van het meest zee­waartse gedeelte van het estuarium ook is meegenomen. Dit gebied is geen deel van de (actieve zone van) de buitendelta.

¹⁸ Belangrijk verschil met de monding van de Westerschelde is de ligging van de staatsgrens en de mogelijke invloed die de Vlake van de Raan kan hebben op gebruiksfuncties. Voor die Vlake van de Raan wordt (zie 3.7) wel een mogelijke sedimentbehoefte berekend als beleids­optie. In de monding van de Eems ligt geen vergelijkbaar gebied waarop een beleids­optie gebaseerd kan worden.

¹⁹ In de aangeleverde scenario's treedt de 5 meter op in 2190.

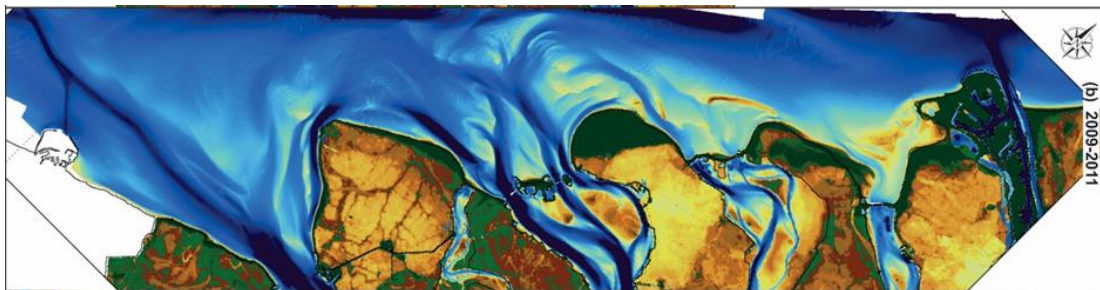
1. Systeemgedrag van het Groninger Wad: een nadere analyse ontbreekt maar is wel gewenst;
2. Bodemdaling Groninger Wad: de dalingschotel van het Slochteren gasveld in Groningen strekt zich tot onder het Groninger Wad uit, deze extra sedimentvraag moet vastgesteld en meegenomen worden in bovengenoemde analyse;
3. Een inschatting van de toekomstige ontwikkeling van het Groninger Wad en de impact van zeespiegelstijging zijn nodig om voortzetting van het huidige beheer te beoordelen²⁰;
In het verlengde hiervan: opstellen van scenario's voor beheer van het Groninger Wad (wel of niet actief behouden van de voorliggende eilanden).
4. Wat is de toekomstige ontwikkeling Eems-Dollard en eventuele impact op transporten vanuit het Groninger Wad?

Hiernaast zijn er uiteraard veel kennisvragen te formuleren in verband met het toekomstig beheer van het Eems estuarium. Deze vallen buiten dit project en omvatten onder meer het systeemgedrag in relatie tot het beheer, de verdeling van zand en slib en de betekenis van de bodemdaling door gaswinning.

3.6 Grootschalig gedrag en sedimentbehoefte kust en buitendelta's Zuidwestelijke Delta

3.6.1 De Deltakust

De kust van de Zuidwestelijke Delta, hier afgekort tot Deltakust, strekt zich uit van de noordzijde van Maasvlakte 2 tot en met de Westerscheldemonding. De Deltakust bestaat, van noord naar zuid, uit de zandige kustlijn van Maasvlakte 2, de mondingen van de afgesloten zeegaten Haringvliet en Grevelingen, de buitendelta van de Oosterschelde en de monding van de Westerschelde tot aan de grens met Vlaanderen bij Het Zwin. De buitendelta's in dit gebied grenzen aan elkaar of overlappen zelfs gedeeltelijk.



Figuur 3-24: Overzicht van de Deltakust, de gezamenlijke mondingsgebieden van, van links naar rechts, Westerschelde, Oosterschelde, Grevelingen en Haringvliet. NB Maasvlakte 2 ontbreekt in dit overzichtskaartje. Bron: Elias et al. (2017).

Kenmerkend voor de kusten van de (voormalige) eilanden Voorne, Goeree, Schouwen, Noord-Beveland en Walcheren en voor de kust van Zeeuws-Vlaanderen zijn de getijgeulen die zich dicht onder de kust bevinden. De meeste geulen in de Haringvliet- en Grevelingenmondning zijn sinds de afsluitingen inmiddels grotendeels opgevuld met zand en vooral veel slib.

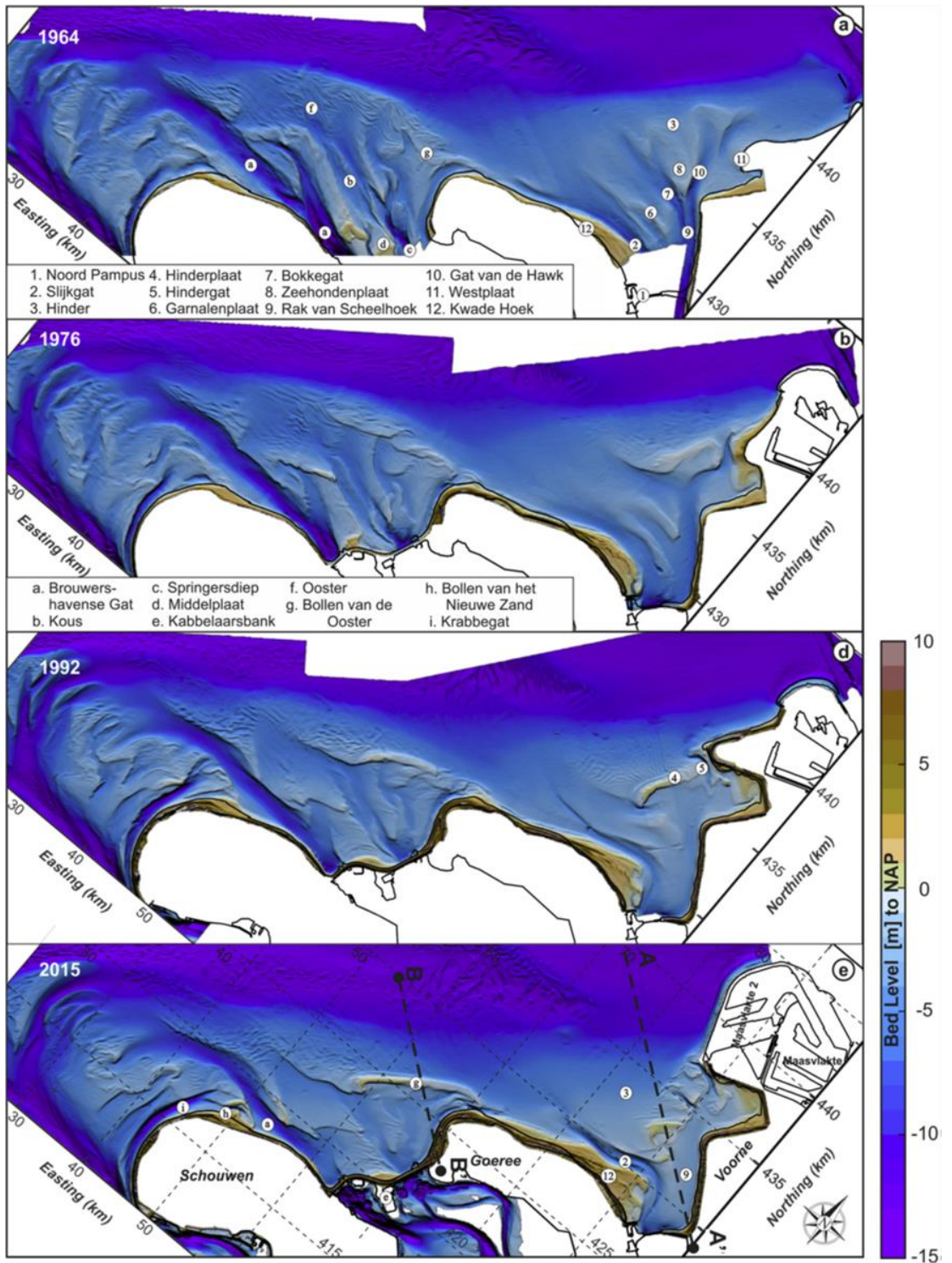
²⁰ NB Een eventuele wijziging in het beheer van het Groninger Wad kan gewenst zijn uit oogpunt van de veiligheid van de dijken langs de noord-Groningse kust.

Elias et al. (2017) geven een beschrijving van de ontwikkeling van dit kustgebied sinds de aanleg van de Deltawerken. Van der Spek & Elias (2021) presenteren de details van de veranderingen in de voormalige buitendelta's van Haringvliet, inclusief die van de Brielse Maas, en de Grevelingen, na de afsluitingen van deze zeegaten in respectievelijk 1970 en 1971. NB Na de afsluitingen zijn de buitendelta's strikt genomen geen buitendelta meer, maar we zullen ze hier toch zo blijven noemen, omdat ze grotendeels nog wel de morfologische kenmerken van buitendelta's vertonen (zoals de geulen, platen). De afsluitingen leidden tot een sterke erosie van de zeewaartse zijde van de buitendelta's en de vorming van zandbanken evenwijdig aan de vooroever, het afvlakken van het bankenreliëf en de opvulling van de getijdegeulen, zie Figuur 3-25. De opvulling met sediment is in de Haringvliet buitendelta verder gevorderd dan in de buitendelta van de Grevelingen.

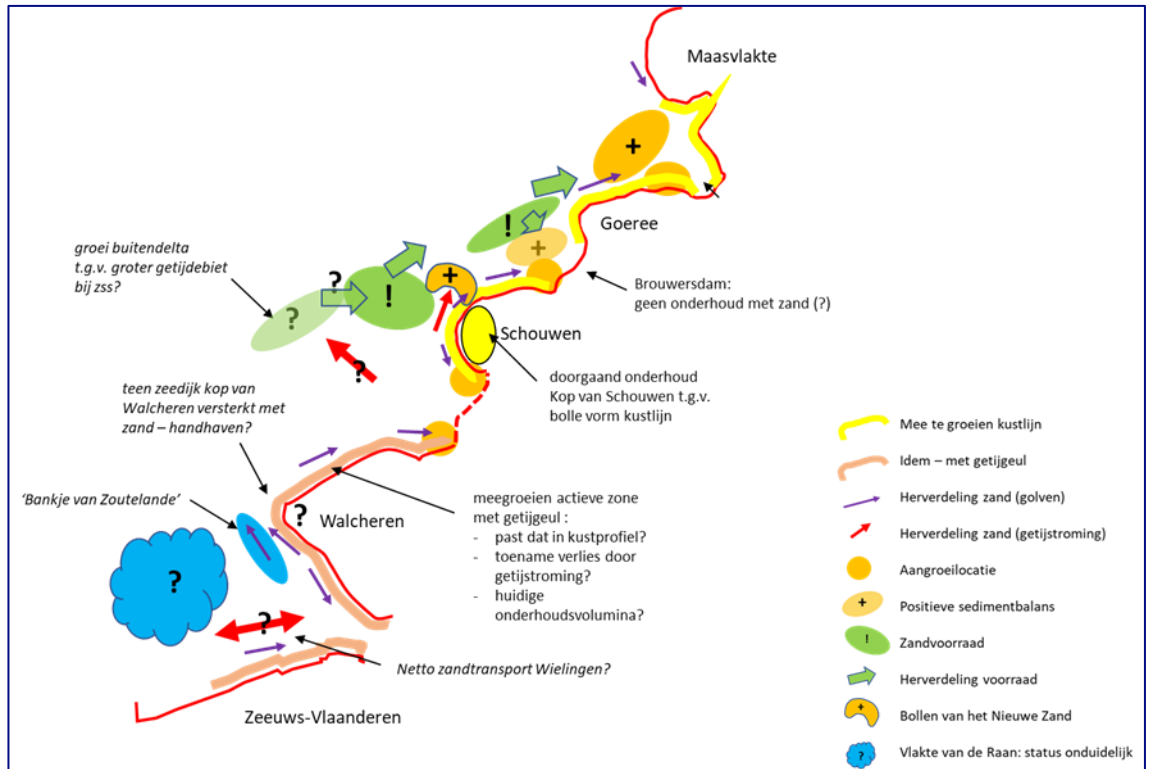
Langs de Deltakust zijn de volgende geschematiseerde elementen te vinden (zie Figuur 3-26):

- Eilandkusten waarvoor een BKL is gedefinieerd en waar een actieve zone te definiëren is die moet meegroeien bij stijging van de zeespiegel: Voorne, Goeree, en de noordkust van Schouwen;
- Eilandkusten met een grote, functionerende getijdegeul direct onder de kust, waar een BKL is gedefinieerd en waar een actieve zone te definiëren is die moet meegroeien bij zeespiegelstijging: de Kop van Schouwen, Noord-Beveland, Walcheren, Zeeuws-Vlaanderen. De aanwezigheid van de grote getijdegeulen leidt wellicht tot extra zandverlies.
- De kust van Maasvlakte 2 waarvoor geen BKL is gedefinieerd maar die wel met zandsuppleties wordt onderhouden;
- Afsluitdammen (Haringvliet, Grevelingen, Neeltje Jans) en zeedijken (Westkapelle), deze groeien niet mee. Versterking in de toekomst wordt hier verder buiten beschouwing gelaten. De aansluiting van de zandige kust op dammen en dijken verdient extra aandacht.
- Combinaties van harde en zachte elementen:
 - De Veerse Dam wordt inmiddels beschouwd als één geheel met de kusten van Walcheren (Breezand) en Noord-Beveland vanwege het voorliggende zandstrand;
 - De zeedijk tussen Westkapelle en Domburg op Walcheren is versterkt door zand op de teen aan te brengen. Deze zandige versterking moet in principe meegroeien.

De Westerscheldemonding wordt apart behandeld in 3.7.



Figuur 3-25: De ontwikkeling van de voormalige buitendelta's van Haringvliet en Grevelingen sinds de afsluitingen van de zeegaten in respectievelijk 1970 en 1971. Bron: Van der Spek & Elias, 2021.



Figuur 3-26: Schematisch overzicht van de elementen en de zandhuishouding van de Deltakust inclusief een aantal te beantwoorden vragen.

3.6.2 Sedimenthuishouding Deltakust

De interactie tussen de mondingsgebieden die deel uitmaken van de Deltakust is niet overal gelijk. De buitendelta's van Oosterschelde, Grevelingen en Haringvliet wisselen sediment uit, waarbij het netto transport naar het noorden gaat, zowel langs de zeezijde van de buitendelta's als rechtstreeks via kortsluitgeulen. Zo voedt het noordgaand netto zandtransport in het Krabbengat, een geul tussen de Kop van Schouwen en de ondiepte Banjaard, de Bollen van het Nieuwe Zand, een plaatgebied aan de zuidzijde van de Grevelingen buitendelta (Figuur 3-25, Figuur 3-26).

De uitwisseling tussen de mondingen van Oosterschelde en Westerschelde lijkt beperkt. Het tussenliggende gebied (de Domburger Rassen) is relatief diep (Figuur 3-24), waardoor sediment daar zal worden afgezet in plaats van toegevoegd te worden aan één van beide gebieden.

Haringvlietmonding

De Haringvlietmonding is sinds de afsluiting aanzienlijk ondieper geworden, het gebied is het eindpunt van een aantal netto sedimentfluxen (Figuur 3-26). Allereerst verplaatsen de golven zand van de zeewaartse rand van de buitendelta in landwaartse richting, waardoor het oppervlak van de buitendelta afneemt en de gemiddelde diepte eveneens. De erosie van de zeewaartse rand van de buitendelta van de Grevelingen voedt een aanzienlijk netto transport in noordoostelijke richting. Hierdoor groeit de kust van Goeree aan, vooral bij de Kwade Hoek op de noordelijke punt van het eiland. Netto zuidwaarts transport langs de kustlijn van Maasvlakte 2 levert eveneens zand aan de Haringvlietmonding. Deze zandtransporten worden versterkt door het aanbrengen van suppleties op de genoemde kustvakken. Tenslotte wordt er slib aangevoerd via de spuisluizen, wat ook bijdraagt aan de verondieping van het gebied.

Grevelingenmonding

Een deel van het zand dat erodeert van de zeewaartse rand van de Grevelingen buitendelta wordt verder landwaarts afgezet. Hierdoor wordt het gebied ondieper en groeit de zandbank Bollen van de Ooster. Getijtransport brengt zand van de Oosterscheldemonding naar de Grevelingenmonding via het Krabbengat. Dit zand wordt afgezet op de Bollen van het Nieuwe Zand voor de noordwestkust van Schouwen (Figuur 3-26, Figuur 3-27). Wellicht brengt de vloeddominante getijstrooming zand van de ondieptes van de Banjaard naar de Grevelingenmonding. Golven die breken op de ronde Kop van Schouwen zullen zand in noordelijke en zuidelijke richting langs de kust verplaatsen waardoor suppleren hier noodzakelijk blijft (Figuur 3-26). Golfgedreven transport langs de noordoever van Schouwen brengt zand naar het oosten waar het in de oksel van de Brouwersdam wordt afgezet. In de voormalige getijgeul Brouwershavense Gat bezinkt vooral slib.

Oosterscheldemonding

De Oosterscheldemonding kan worden onderverdeeld in een noordelijk deel dat zand uitwisselt met de noordelijker gelegen buitendelta's van Grevelingen en Haringvliet, en een zuidelijk deel dat weinig actief lijkt en niet veel interactie heeft met de aangrenzende monding van de Westerschelde. De getijgeul Roompot-Zuid, voor de noordwestkust van Walcheren, heeft geen afzettingsgebied (Figuur 3-27, D, E). De geulen en platen in het centrale deel van de Oosterscheldemonding hebben niet veel interactie met de aangrenzende kusten.

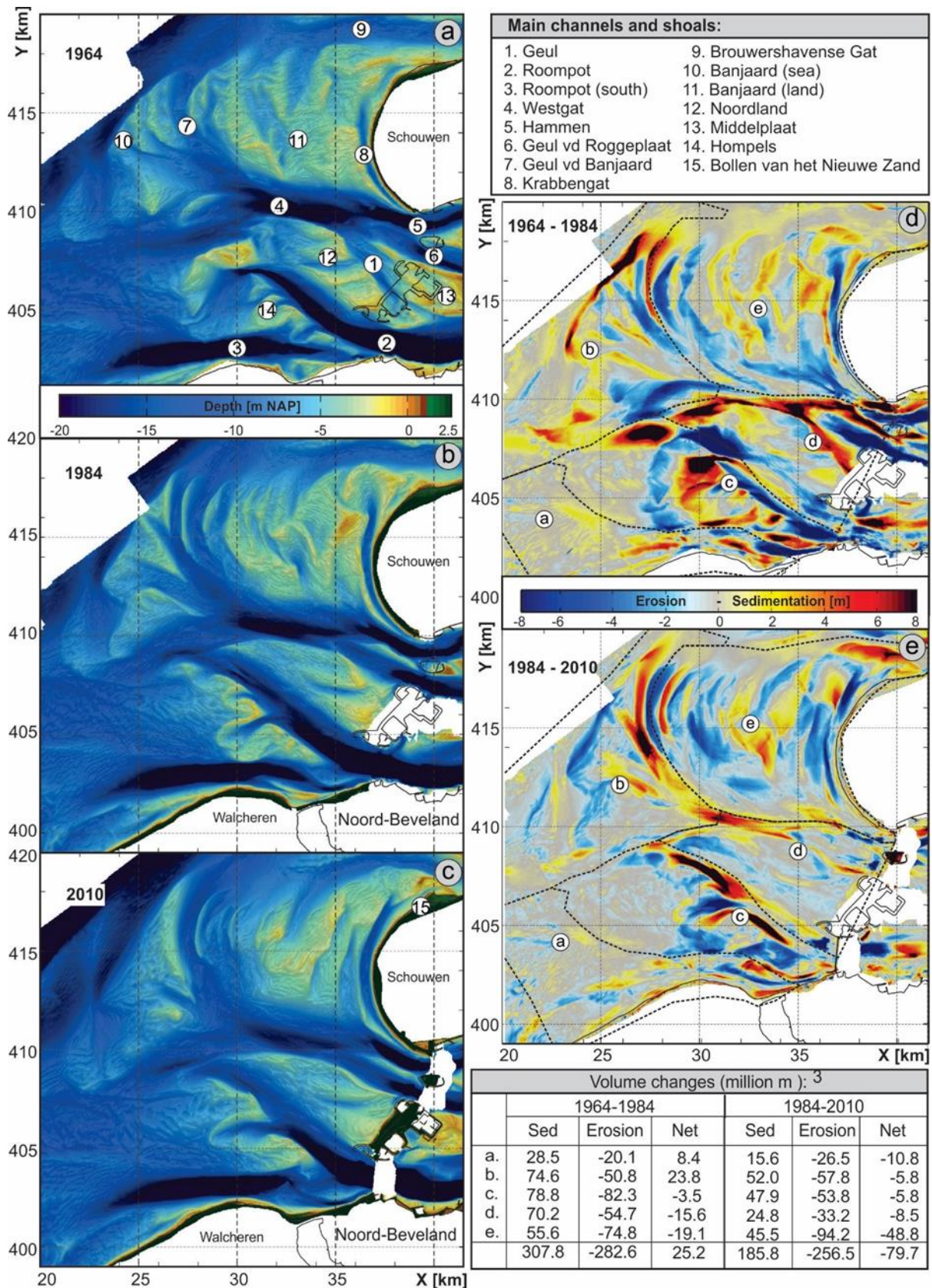
3.6.3 Conceptueel model en effect zeespiegelstijging

Conceptueel model

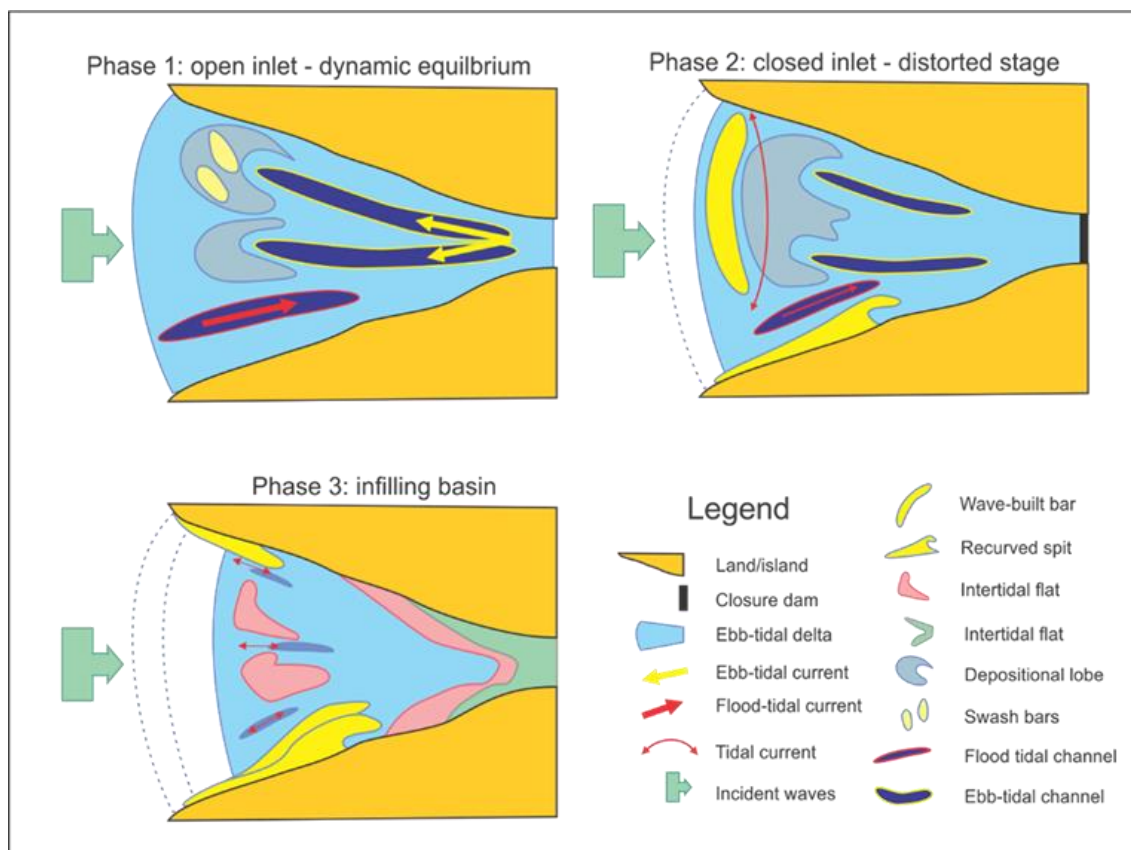
Zoals reeds opgemerkt, zijn de onderlinge verschillen tussen de buitendelta's van de Deltakust groot, daardoor is er geen eenduidig conceptueel model af te leiden.

1. De 'krimpende' buitendelta's van Haringvliet en Grevelingen

Voor de 'krimpende' buitendelta's van het afgesloten Haringvliet en Grevelingen hebben Van der Spek & Elias (2021) een conceptueel model geïntroduceerd bestaande uit drie fasen, zie Figuur 3-28. Het concept laat zien dat na afsluiting, waardoor ebstroming en de daaraan gerelateerde zandaanvoer grotendeels wegvallen (Fase 2), de golven de zeewaartse rand van de buitendelta eroderen en een zandbank evenwijdig aan de kust opbouwen. Op het zeewaartse deel van de buitendelta gaat de kustlangse getijstrooming overheersen, het binnenste, landwaartse deel vult op. Golfgedreven zandtransport brengt zand landwaarts langs de eilandkusten en bouwt 'zandspits'. Met het verstrijken van de tijd (Fase 3) gaat het landwaarts zandtransport verder, de spits groeien aan. Tevens zet slib zich af in geulen en op de ondiepe delen. Het gebied verlandt van achteren uit, de waterlijn verschuift zeewaarts. De Grevelingenmonding bevindt zich in Fase 2, de Haringvlietmonding in Fase 3.



Figuur 3-27: Bathymetrie Oosterschelde buitendelta in 1964 (A), 1984 (B) en 2010 (C). De morfologische ontwikkeling over de periode 1964-1984 verschilt aanzienlijk van de 1984-2010. Deelfiguren (D) en (E) laten de sedimentatie-erosiepatronen over deze perioden zien. Bron: Elias et al. (2017).



Figuur 3-28: Conceptueel model voor de ontwikkeling van een buitendelta na een significante afname van de kustdwarse getijstrooming, gebaseerd op de ontwikkeling van de Haringvliet en Grevelingen buitendelta's tussen 1964 en 2015. Zie tekst voor uitleg. Bron: Van der Spek & Elias (2021).

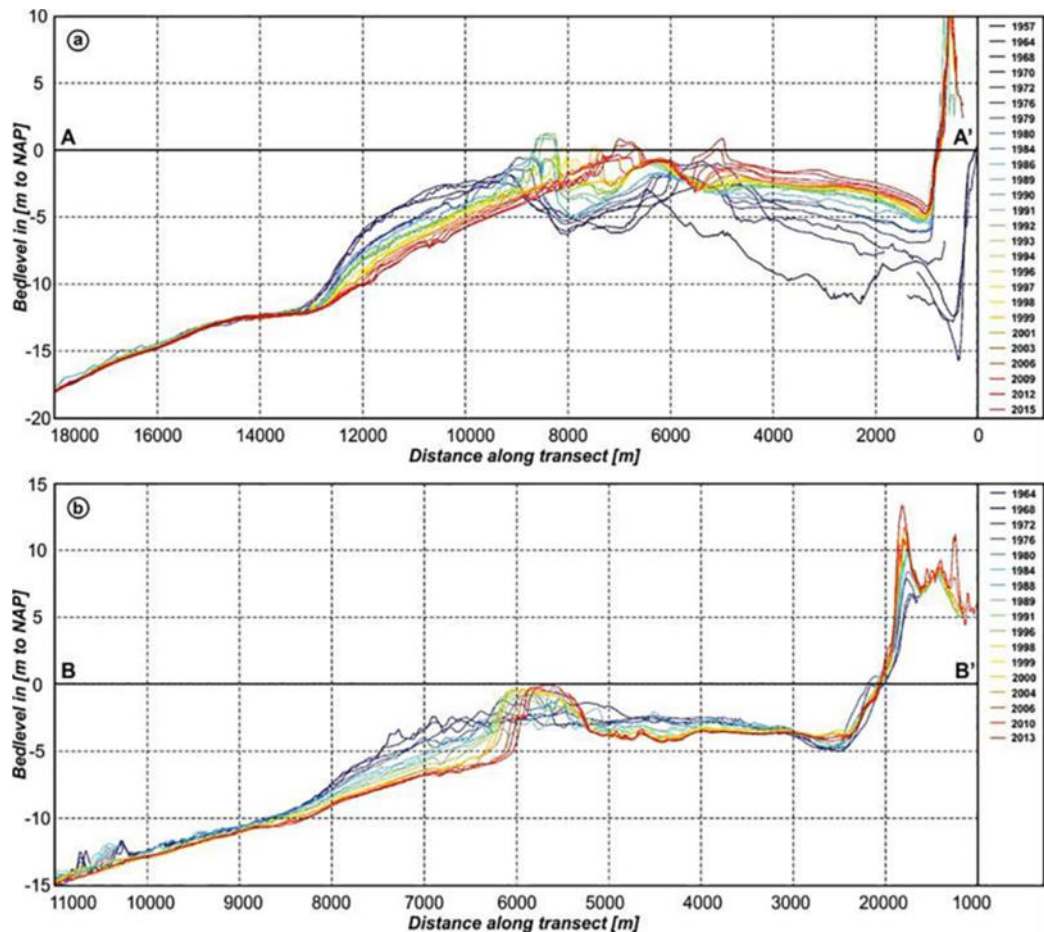
De cruciale vraag is 'Heeft een 'krimpende' buitendelta sedimentbehoefte?' Dit is op twee manieren te beschouwen.

a. De profielen van de buitendelta's in Figuur 3-29 laten zien dat het zand van de zeewaartse rand van de buitendelta's in landwaartse richting verplaatst wordt en ten goede komt aan de kustlijn van de eilanden. Dit sediment is op te vatten als een sedimentvoorraad die de kust voedt en op termijn verheelt met de kustlijn. De natuurlijke sedimentaanvoer naar de kustlijn is dus groot, waardoor de sedimentbehoefte voor het onderhouden van de kustlijn relatief beperkt blijft. De buitendelta zelf hoeft in deze beschouwing niet gehandhaafd te worden en wordt niet beschouwd als zelfstandige mee te groeien entiteit.

b. De buitendelta moet wel gehandhaafd worden omdat ze een rol speelt in het kuststelsel (bescherming achterliggende kust; in stand houden zandfluxen). De buitendelta moet ook meegroeien met de zeespiegel en heeft een sedimentbehoefte.

2. De actieve buitendelta van de Oosterschelde

Voor de Oosterschelde buitendelta kunnen we dezelfde redeneerlijn en conceptueel model als voor de buitendelta's in het Waddengebied toepassen. Het uitgangspunt is het in stand houden van de zandfluxen, waarbij het actieve zandvolume en de omvang van de buitendelta maatgevend zijn voor de grootte van deze zandfluxen.



Figuur 3-29: Profielontwikkeling sinds de afsluiting van de zeegaten van de buitendelta's van het Haringvliet (boven) en de Grevelingen (onder). Zie Figuur 3-25, situatie 2015, voor de locatie van de profielen. Opvallend is de erosie van zeewaartse front van beide buitendelta's en de grootschalige sedimentatie in de Haringvlietmond (boven). Bron: Van der Spek & Elias (2021).

Effect zeespiegelstijging

Ondanks dat er geen directe uitwisseling van zand is tussen de Oosterschelde en zijn monding, zijn er toch morfologische effecten van zeespiegelstijging te verwachten. Modellsimulaties met verhoging van de zeespiegel waarbij de morfologie niet verandert (Veenstra et al., 2020; Jiang et al., 2020), laten zien dat het getijverschil in de Oosterschelde bij zeespiegelstijging toeneemt. Hierdoor zal het getijdebiet door de stormvloedkering eveneens groter worden. Een toename van het getijdebiet leidt tot uitschuring van de getijgeulen in de buitendelta en netto transport van zand naar de rand van de delta. Hierdoor bouwt de buitendelta zeewaarts uit, maar wellicht nemen ook de zandtransporten in noordelijke richting in grootte toe. Het effect op de ondiepte Banjaard is niet op voorhand duidelijk. Een eventuele toename van de stroomsnelheden van het getij bij een hogere zeespiegel heeft effect op de morfologie van dit gebied. Als de hoogte van de Banjaard afneemt, zal de golfaanval op de Kop van Schouwen toenemen. De getijtransporten in het Krabbengat voor de Kop van Schouwen nemen wellicht toe, waardoor de Bollen van het Nieuwe Zand verder kunnen uitbouwen.

De golfgedreven transporten langs de kust van noordwest Walcheren en Noord-Beveland naar het noordoosten zullen blijven bestaan. Aangezien er geen overschot aan zand in dit deel van de buitendelta is, zullen de getijtransporten beperkt zijn (wat overigens niet geldt voor de golfgedreven zandtransporten).

Als gevolg van zeespiegelstijging zullen de Bollen van de Ooster, de langgerekte zandbank in de Grevelingenmonding, waarschijnlijk verder landwaarts opschuiven. De opvulling van de Haringvlietmonding met sediment wordt waarschijnlijk vertraagd door zeespiegelstijging, al kan dit (deels) teniet gedaan worden door een toename van de sedimenttransporten.

3.6.4 **Uitwerking actieve zone / rekenregel voor sedimentbehoefte Zuidwestelijke Delta**

De morfologie van de buitendelta's langs de Deltakust is nog in ontwikkeling in reactie op de afsluitingen van de zeegaten. Hoe de morfologie er uiteindelijk uit zal zien en hoe snel die ontwikkeling zal verlopen is niet bekend en dus moeilijk te voorspellen. Het effect van een verhoogde zeespiegelstand zal in zijn algemeenheid een vertraging van deze ontwikkeling zijn, waarbij de te bereiken evenwichtssituatie wellicht ook anders wordt. De uitkomst van de optelsom van deze twee onbekende ontwikkelingen kan op dit moment niet met enige zekerheid voorspeld worden. In de Zuidwestelijke Delta is daarom, voor gebieden bij afsluitingen door de deltawerken, onderscheid gemaakt tussen een 'huidige actieve zone (waar kustlijn­zorg plaats vindt en suppleties zich verspreiden) en de rest van de buitendelta. Dit laatste zijn zone gebieden die momenteel niet meedoen met de verspreiding van het suppletiezand, maar dat in de toekomst mogelijk wel gaan doen.

Hierom wordt de sedimentbehoefte voor twee varianten berekend. De eerste gaat uit van een *smalle actieve zone* (een minimumvariant). De tweede gaat uit van de gehele oppervlakte van de (voormalige) buitendelta (een maximumvariant), cf. de beschrijving in het deel over zeegaten (3.3.4 en Bijlage C voor de gedetailleerde uitwerking). Er moet van worden uitgegaan dat beiden niet juist zijn en dat de werkelijke sedimentbehoefte binnen de te bepalen range valt.

De resultaten van de bepaling van de oppervlaktes staan in Tabel 3-11 en de berekening van de sedimentbehoefte in Tabel 3-12

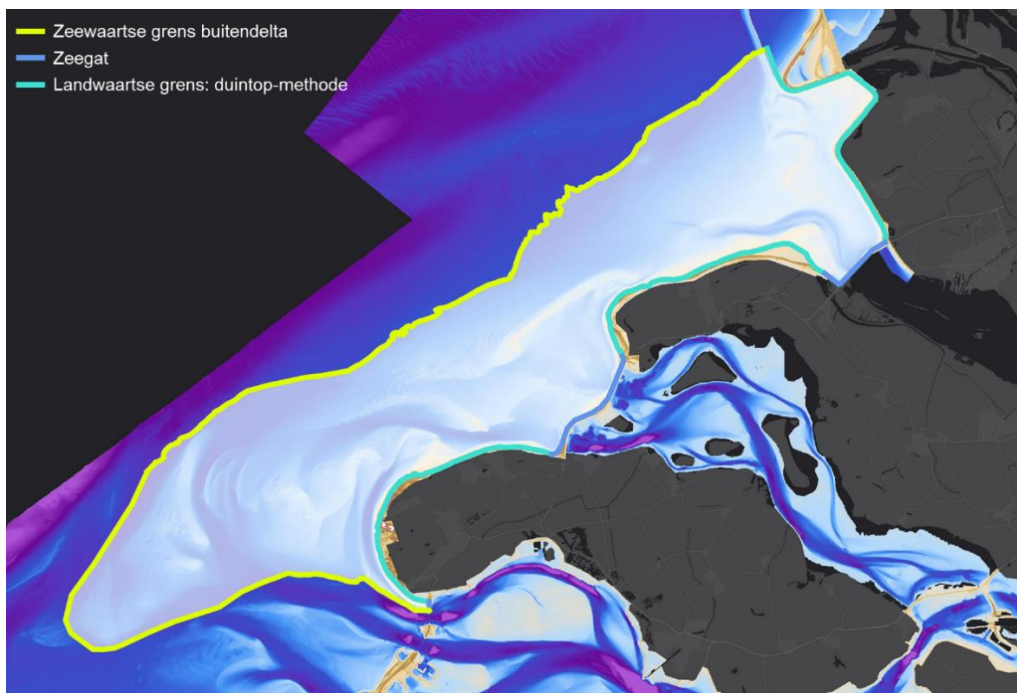
Minimumvariant

De minimumvariant is gebaseerd op het waargenomen morfologisch gedrag van de te onderhouden eilandkusten over de laatste 30 jaar. Deze 'krappe variant' beschouwt alleen de actieve zones van de eilanden van de Deltakust, de Maasvlakte en Zeeuws-Vlaanderen, waarbij rekening wordt gehouden met extra sedimentverlies door de aanwezigheid van grote functionerende getijgeulen direct voor de kust. In die gevallen is de zeewaartse grens van de actieve zone gelegd aan de zeezijde van de geul (zie Figuur C-2 in Bijlage C). De hele geul wordt geacht mee te doen met het verspreiden van suppleties, zodat deze in zijn geheel meegroeit met de zeespiegel, een conservatieve aanname.

Het complex van zandbanken en getijgeulen voor de kust van zuidwest Walcheren is als actieve, te behouden zone aangemerkt vanwege de bescherming tegen golfaanval van de achterliggende kust. Van deze actieve elementen wordt het oppervlak bepaald. Alle andere elementen van de buitendelta's hebben in deze variant geen sedimentbehoefte.

Maximumvariant

De maximum- of 'ruime variant' gaat ervan uit dat de actieve oppervlakken van de buitendelta's moeten meegroeien. De zeewaartse grenzen van de actieve oppervlakken worden vastgesteld aan de hand van de profielontwikkeling van de buitendelta's. Figuur 3-30 laat zien dat de ondergrens van de profielverandering voor de buitendelta's van Haringvliet en Grevelingen op respectievelijk -12 m en -10 m ligt. Voor de actieve buitendelta van de Oosterschelde is deze ondergrens op -18 m gesteld. Het hele oppervlak van de buitendelta tussen de achterliggende kust en de betreffende dieptecontour wordt als actief beschouwd en heeft daarmee dus een sedimentbehoefte. Het zuidelijk deel van de buitendelta van de Oosterschelde ligt vrij diep en heeft geen sedimentbehoefte toegekend gekregen.



Figuur 3-30: Begrenzings van de actieve zone voor de buitendelta van Haringvliet en Grevelingen en Oosterschelde. De Maasvlakte maakt hier geen deel van uit.

Tabel 3-11: Oppervlakttes actieve zone per deelgebied, exclusief marge voor onzekerheid

		Oppervlakte actieve zone [km ²]	
Delta eilandkust	Maasvlakte	7	58,2
	Voorne	4,2	
	Goeree - noordkust	12	
	Goeree - westkust	4	
	Schouwen - noordkust	5	
	Schouwen - kop	8	
	Noord-Beveland en NW Walcheren	18	
Delta buitendelta's	Haringvliet	373	373
	Grevelingen		
	Oosterschelde		

Tabel 3-12: Sedimentbehoefte deelsysteem Deltakust per (voormalig) zeegat, excl. monding van de Westerschelde, in mln. m³

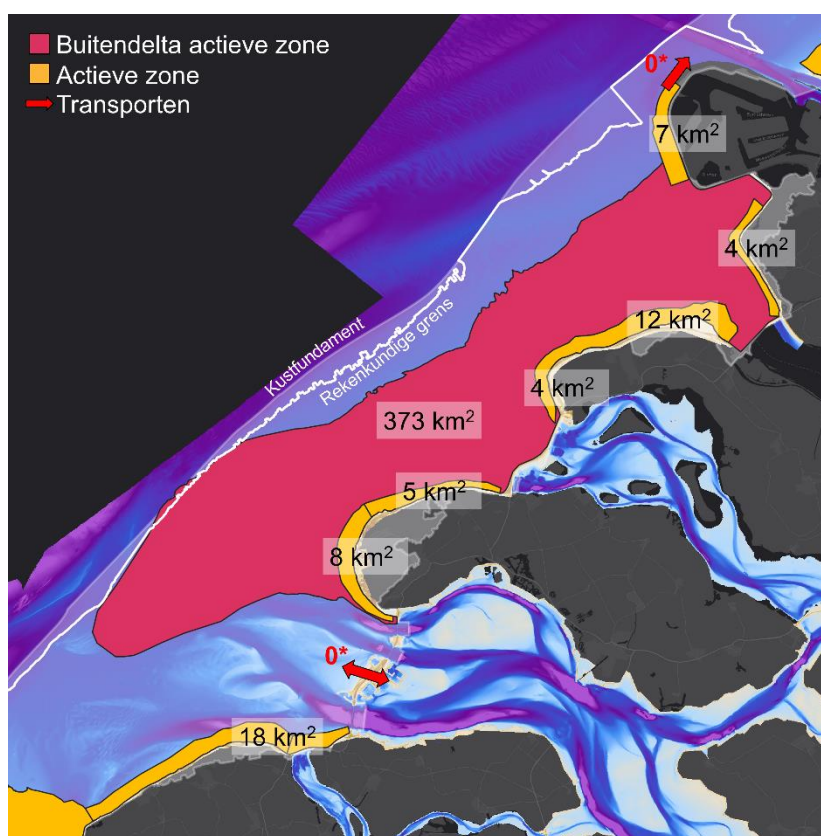
Sedimentbehoefte Deltakust - totaal							
zichtwaarde	0,5 m	1 m	2 m	1 m	2 m	3 m	5 m
scenario zeespiegelstijging	laag	hoog	extreem	laag	mid	hoog	extreem
eindjaar	2100	2100	2100	2200	2200	2200	2190 ²¹
1. Actieve zones eilandkusten							
Maasvlakte 2	4	7	14	7	14	21	35
Haringvlietmonding	8	16	33	16	33	49	81
- Voorne	2	4	8	4	8	13	21
- Goeree - noordkust	6	12	24	12	24	36	60

²¹ In de aangeleverde scenario's treedt de 5 meter op in 2190.

Grevelingenmondning	5	10	19	10	19	29	48
- Goeree - westkust	2	4	8	4	8	13	21
- Schouwen - noordkust	3	5	11	5	11	16	27
Oosterscheldemondning	13	26	51	26	51	77	128
- Schouwen - kop	4	8	15	8	15	23	38
- Walcheren NW, N-Beveland	9	18	36	18	36	54	90
DELTAKUST TOTAAL actief	29	59	117	59	117	176	293

2. Deltakust – actieve en mogelijk actieve zones (ruime variant)

ruime variant buitendelta's	187	373	746	373	746	1119	1866
DELTAKUST TOTAAL ruim	216	432	863	432	863	1295	2159



Figuur 3-31: Visualisatie van oppervlaktes en transporten die de sedimentbehoefte van de Deltakust bepalen

3.6.5 Relevante kennisleemtes Zuidwestelijke Delta

Om het conceptueel model voor de mondingsgebieden van de Deltakust verder te onderbouwen en onzekerheden te verkleinen moeten in de komende jaren een aantal kennisleemtes opgevuld worden door middel van aanvullend onderzoek. Relevante kennisleemtes zijn:

1. Veranderingen in zanduitwisseling tussen de buitendelta's van de Deltakust bij zeespiegelstijging; en
2. Gedrag van de getijgeulen bij de eilandkoppen en -kusten bij zeespiegelstijging.

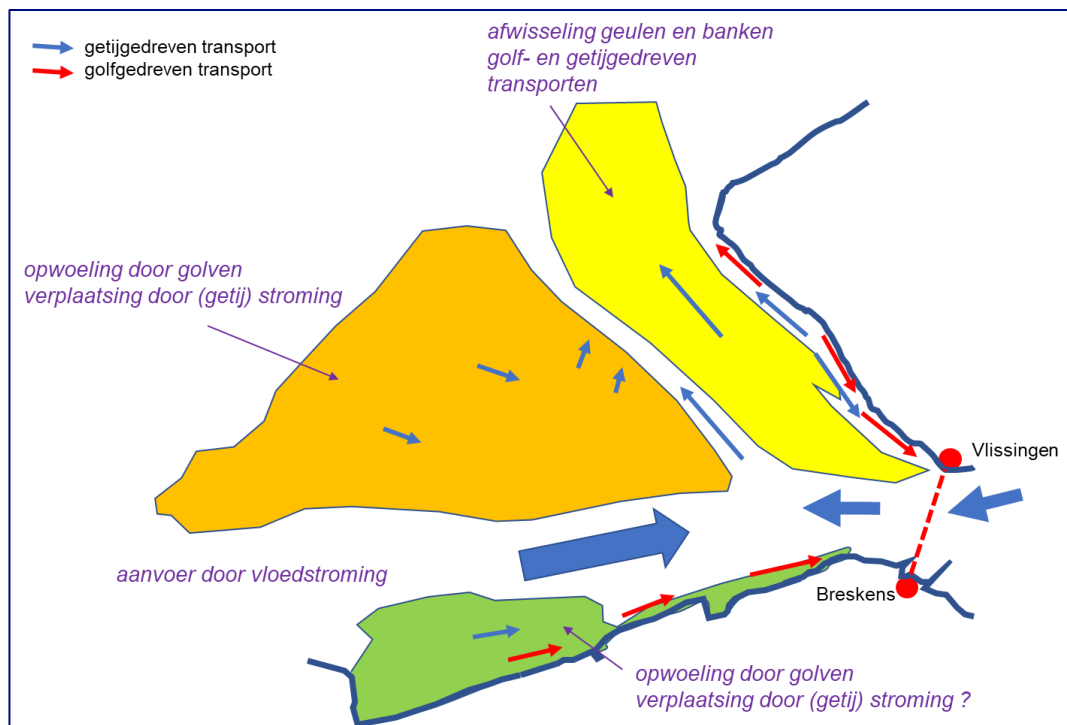
3.7 Grootschalig gedrag en sedimentbehoefte bij monding Westerschelde

3.7.1 Inleiding en begrenzing

De monding van de Westerschelde is een complex gebied, onder meer als gevolg van de aanwezigheid van het Schelde-estuarium en de landsgrens met België. Voor het bepalen van de sedimentbehoefte van dit speciale gebied, is een specifiek conceptueel model nodig. Hierom wordt voor de monding van de Westerschelde een meer uitgebreide beschrijving van de morfologie en de ontwikkelingen daarin gegeven. Dit leidt tot onderscheid in enerzijds de actieve zones, deels als onderdeel van een buitendelta) en anderzijds een groot gebied (Vlakte van de Raan) met schijnbaar geen relevante morfologische ontwikkeling. De Vlakte van de Raan zou echter in de toekomst wel 'actief' kunnen worden als er suppleties gaan plaatsvinden om deze te onderhouden. Dat is een beleidskeuze (zie ook 2.2.4).

Begrenzing deelsystemen

De monding van de Westerschelde²² bestaat uit vier deelgebieden met verschillend morfologisch gedrag. Ten eerste is dit de Westerschelde zelf, een estuarium met een meergeulenstelsel waarin veel sedimentbeheer plaatsvindt. Zeewaarts van de denkbeeldige lijn tussen Vlissingen en Breskens zijn nog drie gebieden te onderscheiden, naast de geulen, zie Figuur 3-32. De meest centrale daarvan is de grote 'Vlakte van de Raan' (oranje). Aan de noordoostzijde daarvan (geel, langs de kust van Walcheren) ligt een deel met de karakteristieken van een actieve buitendelta (interactie van geulen en banken) zoals bij andere zeegetaten te zien is. Ten zuiden van de Vlakte van de Raan, gescheiden daarvan door de grote geul 'Wielingen' ligt een, morfologisch gezien, geïsoleerd gebied (groen, langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen). Dit strekt zich uit tot de haven van Zeebrugge in het westen. Hieronder volgen eerst de morfologische beschrijvingen van de vier deelgebieden. Daarna wordt de rekenregel voor sedimentbehoefte toegepast.



Figuur 3-32: Overzicht van de monding van de Westerschelde met belangrijkste sturende processen. NB De grootte van de transportpijlen geven NIET de omvang van de transporten aan.

²² Feitelijk is dit de monding van het Schelde-estuarium. De Westerschelde is het Nederlandse deel ervan. Het estuarium begint in Gent (waar een stuw ligt). In Vlaanderen heet het estuarium (Boven- en Beneden-) Zeeschelde.

3.7.2 Schelde-estuarium, sedimentbeheer en uitwisseling met de kust

Er is veel onderzoek gedaan naar het functioneren van het Schelde-estuarium en de invloed van het sedimentbeheer (baggeren, storten, zandwinning) erop. Nederland en Vlaanderen doen dit samen, conform de Scheldeverdragen (Scheldeverdrag 2005a en b). Het platform voor gezamenlijk beleid en beheer (en onderzoek en monitoring in dienst daarvan) is de Vlaams-Nederlandse Schelde Commissie (VNSC). Veel publicaties staan op vnsc.eu en scheldemonitor.be. Van der Wegen (in prep., begin 2023 gereed) geeft een kennisoverzicht over de impact van (versnelde) zeespiegelstijging op het functioneren van het estuarium.

De dominante invloed van het sedimentbeheer op de morfologische ontwikkeling van het estuarium is aangetoond door vele studies die zijn uitgevoerd onder de VNSC. Hieronder zijn Taal et al. (2013), Depreiter et al. (2014) en Barneveld et al. (2018a en b). Deze studies, aangevuld met modelstudies zoals uitgevoerd door Rübke et al. (2014), maken duidelijk dat, bij de huidige zeespiegelstijging, het sedimentbeheer zeer dominant is in de ontwikkeling van het estuarium²³. Dit geldt daarmee ook voor de uitwisseling van sediment tussen het estuarium en kust. Berekeningen over het transport tussen estuarium en kustzone worden voornamelijk gedaan door het opstellen van sedimentbalansen. Het berekende transport is daarmee gevoelig voor het ontstaan en opvullen van accommodatieruimte in het estuarium. Als de opvulling van accommodatieruimte in het westelijkste deel van de Westerschelde (voornamelijk) gebeurt met zand heeft dit significante invloed op de netto uitwisseling (o.m. Elias et al., in prep.). Ook de kustsuppleties hebben een invloed (zie de studie van Rübke et al.). Accommodatieruimte die deels wordt opgevuld met slib is over het hele estuarium van belang (zie b.v. Cleveringa en Dam, 2013)²⁴.

Besluitvorming over sedimentbeheer in de Westerschelde vindt voornamelijk plaats via vergunningverlening en opvolging daarvan in het Vlaams-Nederlandse baggeroverleg. Sinds de [Evaluatie van het Verdrag Beleid en Beheer Schelde-estuarium 2014 - 2018](#) is sedimentbehoud (voorkomen van onttrekkingen) in het estuarium een speerpunt. In het beleid en beheer wordt op dit moment niet actief gestuurd op sedimentimport om mee te groeien met de zeespiegel. Bij besluitvorming, waaronder een vernieuwing van de vergunning per 1 januari 2029, zijn uiteraard ook andere effecten van het sedimentbeheer van belang, in het bijzonder de ontwikkeling van ecologisch waardevolle gebieden.

3.7.3 Het mondingsgebied van de Westerschelde

In de Westerscheldemonding kunnen we drie voor deze studie relevante deelgebieden onderscheiden: de Vlakte van de Raan in het noordwesten, het geulen en bankengebied voor de kust van zuidwest Walcheren en de kustzone van Zeeuws-Vlaanderen. Deze gebieden worden achtereenvolgens besproken.

Vlakte van de Raan

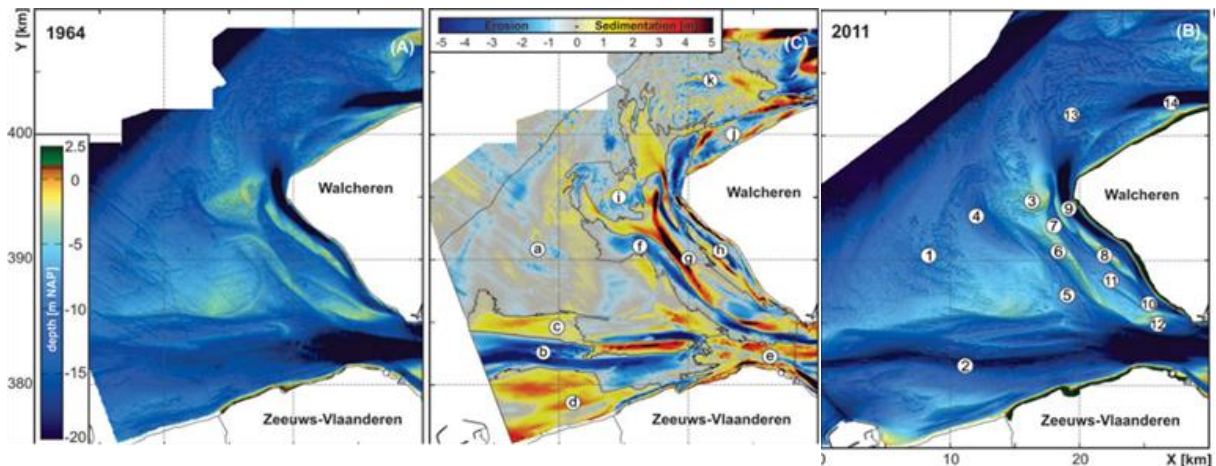
De Vlakte van de Raan is een relatief ondiep gebied in het noordwestelijk deel van de monding van de Westerschelde (Figuur 3-32 en Figuur 3-33). De diepte neemt af van ca. -8 m in het zeewaartse deel tot ca. -5 m in het landwaartse, oostelijke deel. De Vlakte wordt in het oosten begrensd door de geulen Deurloo-West en Geul van de Walvischstaart, en aan de

²³ Hetzelfde geldt voor Vlaamse studies (o.m. Vandenbruwaene et al., 2016; Wang et al., 2015; Plancke et al., 2021; Vos et al., 2021) naar de sedimentbalans van de Zeeschelde, waaruit is af te leiden dat de jaarlijkse zandwinning nabij Antwerpen, in Schaar van Ouden Doel, van ca. 1 miljoen m³ per jaar van grote invloed is op het langjarige transport bij de grens. Deze randvoorwaarde leidt uiteindelijk weer tot de berekening van grotere transporten tussen monding en Westerschelde.

²⁴ Dit volgt uit de wijze waarop de uitwisseling berekend wordt via een sedimentbalans. Er wordt begonnen met kennis/aannamen over transport bovenstrooms, veelal de Vlaams-Nederlandse grens. Vervolgens worden bodemopnamen van opvolgende jaren vergeleken en de aanname is dat de verschillen daartussen zijn veroorzaakt door transport. Uiteraard wordt gecorrigeerd voor zandwinning, baggeren en storten.

zuidzijde door de geulen Scheur en De Spleet. De diepteveranderingen over de periode 1964-2011 zijn beperkt (zie Figuur 3-33-C; het sedimentatiegebied (c) aan de zuidwestzijde van de Vlakte betreft een stortgebied voor baggerspecie). De Vlakte is eerder een relict uit vroeger tijden (Van der Werf et al., 2020) toen de huidige Westerscheldemonding onderdeel was van een overstromde kustvlakte, dan een actieve morfologische eenheid.

De geulen Deurloo-West en Geul van de Walvischstaart scheiden de Vlakte van de Raan van de kustzone van zuidwest Walcheren, welke een geheel andere dynamiek heeft (zie sectie 3.7.4). De Vlakte van de Raan heeft daardoor geen grote betekenis voor de kust van zuidwest Walcheren en hooguit een passieve, afschermdende rol voor de kustlijn van Zeeuws-Vlaanderen. Op basis van deze constatering is het zeer de vraag of de Vlakte van de Raan een reële sedimentbehoefte heeft.



Figuur 3-33: Ontwikkeling van de Westerscheldemonding tussen 1964 en 2011. Het middelste paneel (c) laat het sedimentatie-erosie patroon zien, gebaseerd op de diepteverschillen tussen beide bathymetrieën. Legenda: 1. Vlakte van de Raan; 2. Wielingen; 3. Rassen; 4. Deurloo-West; 5. Geul van de Walvischstaart; 6. Elleboog; 7. Geul van de Rassen; 8. Bankje van Zoutelande; 9. Oostgat; 10. Sardijngeul; 11. Deurloo-Oost; 12. Nolleplaat; 13. Domburger Rassen; 14. Roompot- Zuid. Bron: Elias et al. (2017).

Kustzone ten zuidwesten van Walcheren

De kust van zuidwest Walcheren wordt begrensd door de geul Oostgat. Het Oostgat is relatief diep, de oever van Walcheren is hierdoor steil. Het diepere deel van de oever is in het recente verleden door middel van een geulwandsuppletie versterkt, het ondiepe deel van de oever (het strand) moet regelmatig aangevuld worden met zand. Golfgedreven transporten verdelen dit zand langs de kust van Walcheren. Aan de andere zijde van het Oostgat ligt een gebied dat bestaat uit morfologisch actieve zandbanken (Bankje van Zoutelande, Rassen, Elleboog) en getijgeulen (Deurloo-Oost, Geul van de Rassen, Geul van de Walvischstaart, Deurloo-West), zie Figuur 3-33 voor locaties en het sedimentatie-erosiepatroon over de periode 1964-2011.

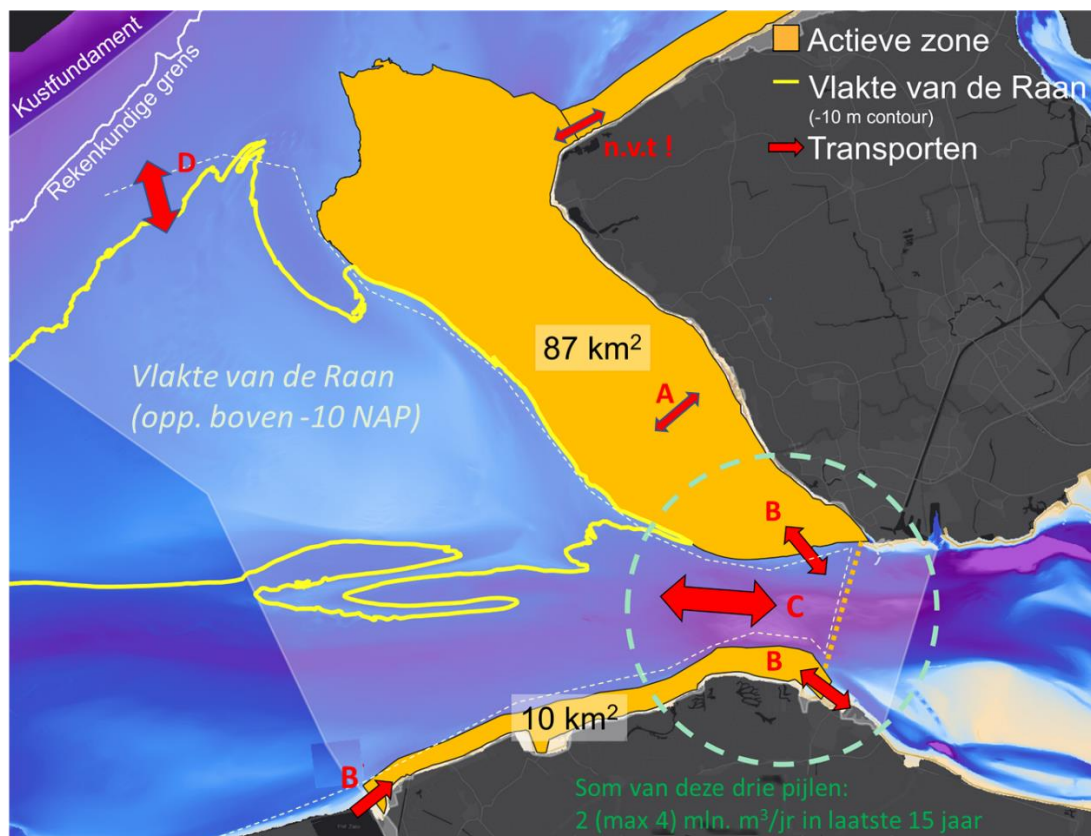
Een kenmerk voor de dynamiek van een buitendelta is de interactie tussen ebstroming en golfwerking, welke leidt tot vorming en verplaatsing van zandbanken (zie 3.4.1). Het hier beschreven gebied van zandbanken en geulen voor de zuidwestkust van Walcheren is het enige deel van de Westerscheldemonding dat deze typerende dynamiek van een buitendelta vertoont. Of deze dynamiek een directe relatie heeft met de sedimenthuishouding van de zuidwestkust van Walcheren en het Oostgat is niet op voorhand duidelijk. Wel spelen de banken waarschijnlijk een rol in de afscherming van de kust van zuidwest Walcheren bij storm. Op basis van deze argumenten gaan we er nu van uit dat dit bankengebied een sedimentbehoefte heeft.

Kustzone langs Zeeuws-Vlaanderen

Het oostelijke deel van de kust van Zeeuws-Vlaanderen grenst aan de geul Wielingen, het westelijk deel aan de geul Appelzak. Deze kust is tussen 2009 en 2016 versterkt met zand in het kader van het programma Zwakke Schakels (later onderdeel van HWBP). De ontwikkeling van het hogere deel van het kustprofiel wordt gestuurd door golfgedreven zandtransporten, die van het diepere deel van het profiel door getijgedreven transporten. Gezien de overheersende (zuid)westenwinden en het vloeddominante getij zullen de netto transporten langs de Zeeuws-Vlaamse kust naar het oosten, richting de Westerschelde gaan. Uiteraard zijn de morfologische ontwikkelingen langs de Vlaamse kust²⁵ van invloed op die van Zeeuws-Vlaanderen.

3.7.4 Conceptuele modellen voor sedimentbehoefte rond monding Westerschelde

De sedimentbehoefte is bepaald voor de actieve zone met kustlijnzorg (oranje in Figuur 3-34, gebaseerd op bodemdata en systeemkennis) en voor de Vlakte van de Raan. Dit is een 'zone die in de toekomst mogelijk ook suppleties verspreidt' (zie 2.2.4). De sedimentbehoefte van de actieve zones (gepresenteerd in Tabel 3-13) is gelijk aan de oppervlakte ervan maal de zeespiegelstijging plus het netto kustlangse transport uit die zones (pijlen B). De eventuele sedimentbehoefte van de Vlakte van de Raan is gelijk aan de oppervlakte maal de zeespiegelstijging plus netto transporten uit het gebied. De aanname die in dit rapport wordt gehanteerd is dat de pijl die in Figuur 3-34 is aangeduid met C geheel uit de Vlakte van de Raan afkomstig is. Een tweede aanname is dat het transport dat is aangeduid met D niet hoeft te worden meegenomen in de sedimentbehoefte van de Vlakte van de Raan.



Figuur 3-34: Actieve zones (oranje), met oppervlaktes ervan en indicatieve begrenzingen van Vlakte van de Raan boven -10 meter NAP (gele lijn) en het gehele deel van de monding dat buiten de actieve zones met kustlijnzorg valt (dunne, gestreepte lijn). Aangegeven zijn vier typen sedimenttransport.

²⁵ Zoals de verondieping ten oosten van Zeebrugge (effect havendammen en verspreiding baggerspecie) en de afname van de omvang van de geul Appelzak. Ook de Vlaamse kust wordt onderhouden met zandsuppleties.

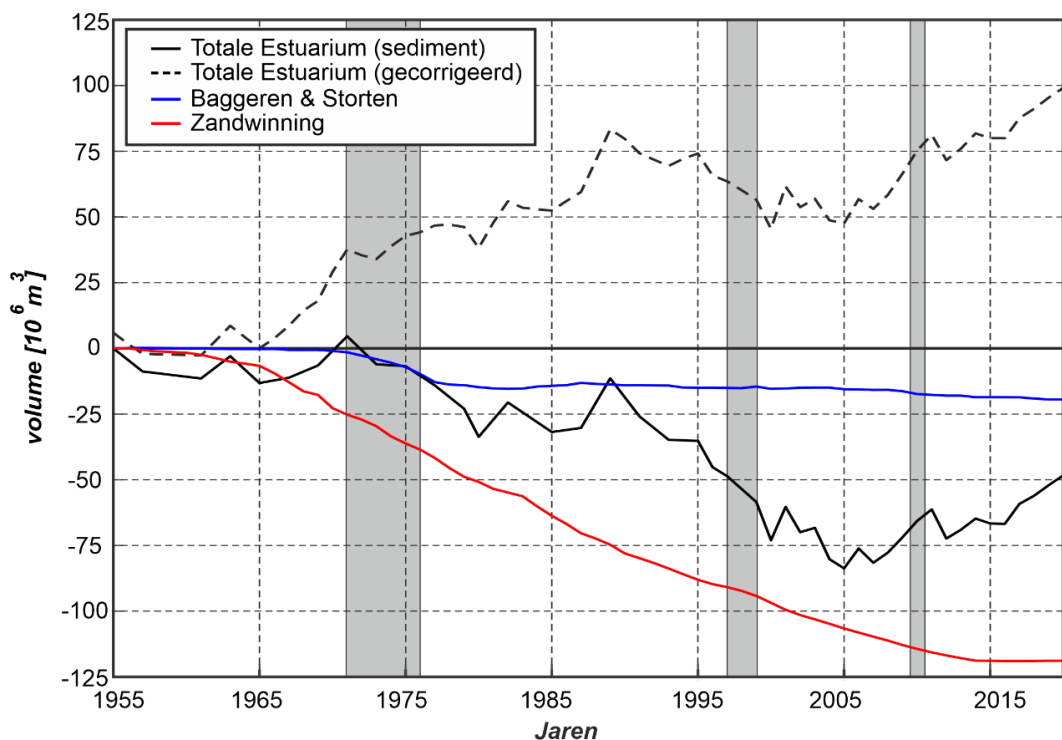
Net als bij de sectie over het Groninger Wad is opgemerkt over een eventuele sedimentbehoefte van het Eems-estuarium geldt ook voor de Westerschelde (of eigenlijk het hele het Schelde-estuarium) dat deze een sedimentbehoefte bij versnelde zeespiegelstijging kan krijgen. Als deze actief ingevuld gaat worden heeft dat betekenis voor de toekomstige behoefte aan zand waar Nederland rekening mee kan / wil houden. Het bepalen van die eventuele sedimentbehoefte en de afweging hoe ermee om te gaan valt buiten de scope van dit rapport.

Voordat de berekeningen voor de sedimentbehoefte worden gepresenteerd volgt hieronder eerst een uitleg hoe de transporten zijn berekend.

Omvang sedimenttransporten in mondingsgebied Westerschelde

De vraag naar de omvang van de uitwisseling van zand en slib over de (meer administratieve dan morfologische) lijn Vlissingen-Breskens (binnen de groene ovaal van Figuur 3-34) kan voor het grootste deel beantwoord worden via Elias et al. (in prep.) en Schrijver (2020). Zij analyseerden de bodemontwikkeling en transporten binnen het estuarium en konden daaruit afleiden welke uitwisseling van zand en slib er was tussen kustfundament en Westerschelde (over bovengenoemde lijn Vlissingen-Breskens) in de laatste halve eeuw. Dat is een periode waarin menselijk ingrijpen dominant was. De gemiddelde toename van het sedimentvolume van de Westerschelde over de laatste 15 jaar is 2 mln. m³ per jaar.

Zowel Elias et al. (in prep.) als Schrijver (2020) berekenen een gemiddeld lange-termijn sedimenttransport over de lijn Vlissingen-Breskens. Elias et al. concluderen dat er in de periode 1955-2020 gemiddeld 2 mln. m³ per jaar is geïmporteerd door de Westerschelde. Deze waarde ligt iets boven de berekende import door Schrijver (2020). Deze studie geeft een gemiddelde import van 1,5 mln. m³ per jaar over de periode 1975-2018. Beide studies laten zien dat er een korte periode van export optrad tussen 1994 en 2005. Deze export was ongeveer 1 mln. m³ per jaar. De huidige import (gemiddeld over de periode 2005-2020) ligt met 2,5 mln. m³ per jaar iets boven het lange-termijn gemiddelde. Hiervan is een deel (ca. 10%) slib (zie Figuur 3-35).



Figuur 3-35: Volumeontwikkeling Westerschelde volgens Elias et al. (in prep.) tussen 1955 en 2018. Data van vóór 1970 zijn met grotere onzekerheden omgeven. De netto toename die rond 2005 is ingezet lijkt minstens deels samen te hangen met het stoppen van de zandwinning (rode lijn, cumulatieve waarde) en verschillen tussen baggeren en storten (blauwe lijn, cumulatieve waarde).

De verdere analyses in Elias et al. (in prep.) suggereren dat ca. 4 mln. m³ sediment per jaar een aannemelijke bovengrens is voor netto 'natuurlijk' transport in de langsrichting van het estuarium, gegeven sedimentbeheer vergelijkbaar met de afgelopen decennia. Dit lijkt ook een aannemelijk maximum voor het 'natuurlijk' sedimenttransport over de lijn Vlissingen-Breskens. Het is nog niet duidelijk of zulk transport beschouwd moet worden als afkomstig uit de actieve zone, zie de prioritaire kennisleemte in 3.7.6.

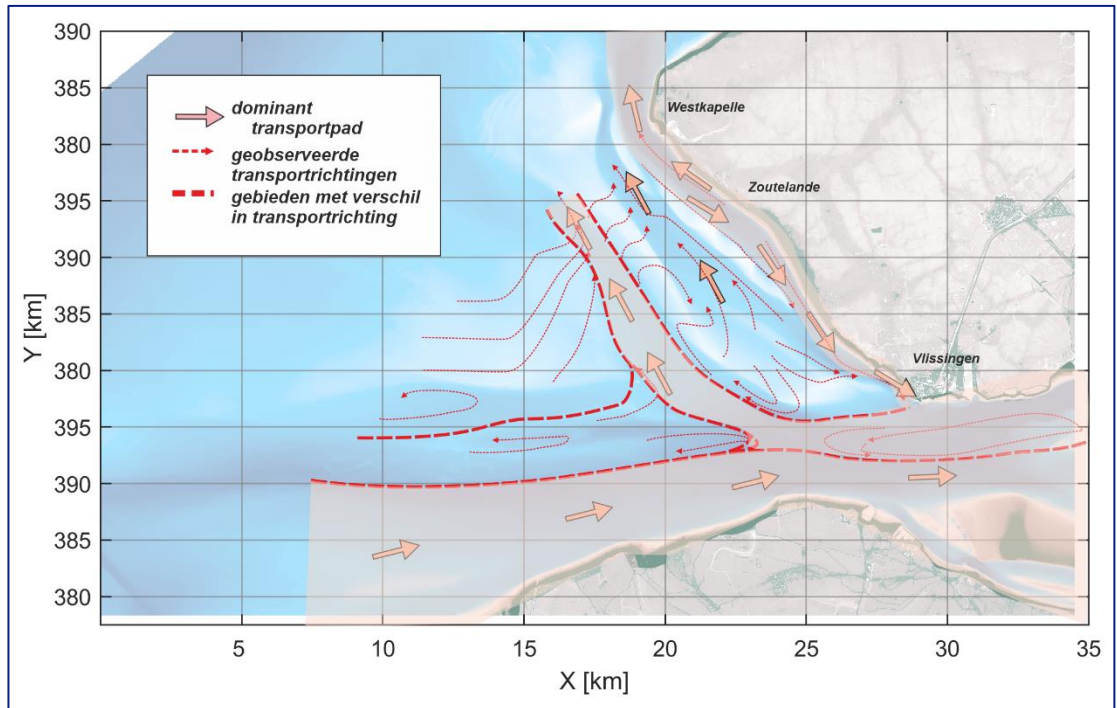
Dit laat zien hoe lastig het is om de bijdrage van transport naar het Schelde-estuarium vanuit de actieve zone(s) goed in te schatten. Een in ieder geval robuuste aanname is dat de omvang van dit transport meer door het morfologisch beheer in het estuarium bepaald zal worden dan door de snelheid van zeespiegelstijging. Het aanhouden van een langjarig transport naar de Westerschelde vanuit de monding van in totaal 2 mln. m³ per jaar, met een bovenwaarde van 4 mln. m³, lijkt een redelijke aanname, er uiteraard van uitgaand dat (cf. huidige uitwerking voorkeursstrategie) er niet actief extra sediment in het estuarium wordt gebracht (en zeker niet uit de actieve zone). De vraag is nog in welke mate de ontwikkeling van de laatste 15 jaar representatief zal zijn²⁶ voor een toekomst met versnelde zeespiegelstijging. In de studie van Rübke et al. (2020) wordt beredeneerd dat er waarschijnlijk een afname van sedimentimport in het estuarium zal optreden door veranderingen in de getij-asymmetrie. Het lijkt daarmee niet nodig rekening te houden met een nog grotere import van sediment langs natuurlijke weg in de Westerschelde.

Sedimenttransportpaden in mondingsgebied Westerschelde

Er is een goede aanname nodig over de herkomst van sediment dat netto de Westerschelde in is getransporteerd. Dit is in ieder geval deels slib in een hoeveelheid die ongeveer gelijk is aan wat vanuit de Zeeschelde wordt aangevoerd (Elias et al., in prep.). Een langjarige afname van sediment in het mondingsgebied is lastig vast te stellen door de grote oppervlakte ervan.

Door te kijken naar transportpaden kan extra inzicht worden verkregen. Figuur 3-32 en Figuur 3-34 gaven al drie mogelijke transportpaden aan. Figuur 3-36 toont de beschrijving uit Elias et al., 2020. Hieruit volgt dat de dominante transportpaden richting het estuarium door het Oostgat (deel van de actieve zone van Zuidwest Walcheren) en de Wielingen (geen deel van de actieve zone) lopen.

²⁶ De waarde voor netto uitwisseling gedurende de laatste 15 jaar (na stoppen van de zandwinning in de Westerschelde) is representatiever dan de periode daarvoor.



Figuur 3-36: Een conceptuele beschrijving van de jaargemiddelde sedimenttransporten in de monding van de Westerschelde gebaseerd op een SedTRAILS visualisatie.

Zonder verder onderzoek (uit te voeren in het vervolg van dit project) is het niet goed mogelijk de 2-4 mln. m³/jaar transport over de lijn Vlissingen – Breskens (zie Figuur 3-34) te verdelen over de transportpaden.

De meest bruikbare aanname is dat de helft zand is dat uit de actieve zone komt en de andere helft enerzijds correspondeert met slib dat in het estuarium is achtergebleven en anderzijds zand is uit het deel van de monding buiten de actieve zones met kustlijn­zorg. De onzekerheid rondom dit getal is dan 100% (het kan ook 2 maal zo veel zijn). Met deze extra 1 mln. m³/jaar zand sediment­behoefte is in dit rapport gerekend. Hiernaast is er nog de beleidsmatige keuze (ander type onzekerheid) of de Vlakte van de Raan ook een sediment­behoefte heeft op lange termijn (zie 3.7.5).²⁷

3.7.5 Bepaling sediment­behoefte / uitwerking aangepaste rekenregel

In voorgaande sectie is het transport van zand uit de actieve zone berekend. Deze export is vastgesteld op 1 mln. m³ zand per jaar, met een onzekerheid van ook 1 mln. m³/jaar. Voor het bepalen van de sediment­behoefte van de monding zijn vervolgens de oppervlakten van actieve en mogelijk actieve zones nodig, zie Tabel 3-13:

Tabel 3-13: Oppervlaktes voor bepaling sediment­behoefte, per deelgebied, exclusief onzekerheidsband

		Opp. actieve zone [km ²]	Opp. mogelijk actieve zone [km ²]
Kusten	Zuidwest- Walcheren	87	
	Zeeuws-Vlaanderen	10	
Mogelijk meedoen met verspreiden suppleties in toekomst	Vlakte van de Raan		168

²⁷ Als deze keuze gemaakt wordt betekent dat anders gekeken moet worden naar de onzekerheid rond de aanname dat de helft van het transport naar de Westerschelde uit de actieve zone komt. De andere helft (ook 1 mln. m³/jaar) is transport vanaf de Vlakte van de Raan. Het is bij die keuze een 'zekerder' onderdeel van de sediment­behoefte

Tabel 3-14 presenteert de sedimentbehoefte van de monding van de Westerschelde. Als alleen de actieve zone wordt beschouwd loopt deze, afhankelijk van het scenario, op van ca. 130 mln. m³ in 2100 tot ca 650 mln. m³ bij 5 meter stijging. Als de Vlakte van de Raan ook onderhouden gaat worden betekent dit meer dan een verdubbeling in alle scenario's. Op basis van de morfologische analyse hiervoor lijkt het niet nodig in de tabel extra sedimentbehoefte bij de grens met Vlaanderen mee te nemen.

Tabel 3-14: Sedimentbehoefte bij de monding van de Westerschelde, in mln. m³ per jaar, onderverdeeld in verschillende type zones, actief onder de huidige kustlijn en mogelijk actief in de toekomst.

Sedimentbehoefte Westerscheldemonding - totaal							
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	2190 ²⁸
1. Actieve zones eilandkusten							
Walcheren - zuidwestkust	44	87	174	87	174	261	435
Zeeuws-Vlaanderen	5	10	20	10	20	30	51
export naar Westerschelde	80	80	80	180	180	180	170
WESTERSCHELDEMONDING TOTAAL actief	129	177	274	277	374	472	656
2. In toekomst mogelijk actieve zones							
Vlakte van de Raan	84	168	335	168	335	503	838
Meer transport naar Westerschelde uit actieve zone	80	80	80	180	180	180	170
WESTERSCHELDEMONDING TOTAAL mogelijk actief	164	248	415	348	515	683	1008
WESTERSCHELDEMONDING TOTAAL	345	609	1137	709	1237	1767	2815

In Tabel 3-14 is ook de onzekerheid van grotere export naar de Westerschelde opgenomen à 1 mln. m³/jaar. Dit is het verschil tussen het aangenomen transport vanuit de actieve zones en de waargenomen totale import in de Westerschelde van 2 mln. m³/jaar. Het is nu niet duidelijk waar dit sediment vandaan komt. Dit kan vanaf de Vlakte van de Raan komen, maar ook worden aangevoerd door de Wielingen van verder weg, waaronder Vlaams grondgebied.

3.7.6 Relevante kennisleemtes rondom monding Westerschelde

Om het conceptueel model voor de sedimentuitwisseling in de Westerscheldemonding verder te onderbouwen en de onzekerheden te verkleinen moeten in de komende jaren een aantal kennisleemtes opgevuld worden door middel van aanvullend onderzoek. De belangrijkste onzekerheid is het netto transport van zand tussen kustfundament en estuarium. In de komende twee jaar zou een conceptueel model gemaakt moeten worden dat zowel de korte en lange tijdschalen incorporeert.

Transport tussen kustfundament en estuarium is nu gekoppeld aan de virtuele lijn Vlissingen-Breskens. Netto transporten over die lijn volgen uit sedimentbalansen van het Schelde-estuarium. Recent werk komt tot netto 2 mln. m³ per jaar. De zandverliezen per jaar van de kusten van Zeeuws-Vlaanderen en Zuidwest Walcheren, die met supplementies aangevuld worden, zijn echter veel kleiner.

²⁸ In de aangeleverde scenario's treedt de 5 meter op in 2190.

In Figuur 3-34 is een conceptueel model gepresenteerd dat met het concept 'actieve zone' in de monding van de Westerschelde rekening houdt. Het is gebaseerd op het toevoegen aan het estuarium van een zeewaarts deel. De begrenzingen daarvan zijn waarschijnlijk (maar nadrukkelijk onderwerp van onderzoek) de Wielingen en één van de geulen nabij Walcheren (Sardijngeul - Oostgat, Deurloo-Oost - Geul van de Rassen of Geul van de Walvischstaart - Deurloo-West). Het berekende netto zandtransport tussen Westerschelde en monding is in zo'n denkmodel vooral een herverdeling binnen het estuarium (inclusief het deel in het mondingsgebied). De sedimentbehoefte van de actieve zone (waar gesuppleerd wordt voor de kusten van Zeeuws-Vlaanderen en Zuidwest Walcheren) volgt dan uit de stijging van de zeespiegel en de transporten vanuit die zone naar het estuarium. De kennisvraag kan kort worden samengevat als: wat zijn de grenzen van het "deel van het estuarium ten westen van de lijn Vlissingen-Breskens"?

3.8 Transporten over de staatsgrenzen

In de secties 3.4.7 en 3.7 is vanuit het concept van de actieve zone en de conceptuele modellen van de lange termijn morfologische ontwikkeling een redenatie uiteengezet, waarin ook de transporten over beide staatsgrenzen zijn meegenomen.

In Kustgenese 2.0 is aangenomen dat de transporten over de grenzen met Vlaanderen en Duitsland elkaar opheffen. Er zijn geen fysische gronden voor deze aanname, maar er is momenteel ook geen alternatief. Rijkswaterstaat heeft hierom de vraag gesteld over de sedimenttransporten over de beide staatsgrenzen. Hiervoor is een aparte studie uitgevoerd: Van der Werf, 2022. Hij laat zien dat de aanname niet heel onwaarschijnlijk is. Hij komt, op basis van een beknopte literatuurstudie op netto transporten bij de Vlaamse grens van $1,3 \pm 0,8$ mln. m^3 /jaar het kustfundament in en bij de Duitse grens op $1,9 \pm 1,0$ mln. m^3 /jaar het kustfundament uit. Bij beide grenzen is de begrenzing van het kustfundament ruimer dan de actieve zone.

Wat dit alles betekent voor het netto transport over beide staatsgrenzen samen, in en uit de actieve zones, en hoe dit moet terugkomen in de berekeningen voor de sedimentbehoefte, is niet duidelijk. Vooralsnog is er geen reden om een andere aanname te doen dan dat de transporten over de staatsgrenzen elkaar opheffen. Bij deze afweging speelt mee dat het relatieve belang van de uitwisseling over de staatsgrenzen steeds minder bepalend is voor de sedimentbehoefte (de behoefte in de actieve zone neemt veel sterker toe omdat die lineair schaal met de opgetreden zeespiegelstijging).

4 Sedimentbehoefte per deel kuststelsysteem

4.1 Inleiding

Deze rapportage is bedoeld om schattingen te geven van de totale sedimentbehoefte (oftewel de totale "instandhoudingsopgave") bij verschillende zichtwaarden van opgetreden zeespiegelstijging. Vanuit de vraagstelling 'houdbaarheid voorkeursstrategie' kan de totale hoeveelheid suppletiezand die nodig is bij een zichtwaarde vergeleken worden met de beschikbaarheid van zand.

De sedimentbehoefte is berekend voor drie soorten gebieden (zie 2.2.4). Allereerst is dit gedaan voor de 'actieve zone' waarin momenteel ook kustlijnzorg plaatsvindt. Dit past bij (het voortzetten van) de huidige wijze van kustonderhoud (voorkeursstrategie). De sedimentbehoefte voor deze zone is relatief zeker. Daarna is de sedimentbehoefte berekend voor de 'actieve zone' waar nu geen kustlijnzorg gebeurt (die ligt ten oosten van Schiermonnikoog). Tenslotte is de sedimentbehoefte in kaart gebracht voor gebieden die in de toekomst mogelijk wel tot de 'actieve zone' gaan behoren (speelt voornamelijk in de Zuidwestelijke Delta). De keuze hoe hiermee om te gaan is een beleidsafweging.

Voor elk deel van de drie deelsystemen van de kust (Wadden, Hollandse kust, Delta) presenteert dit hoofdstuk de totalen van de berekeningen uit Hoofdstuk 3. Desgewenst kunnen de totalen omgerekend worden naar gemiddelde jaarlijkse hoeveelheden door ze over 80 en 180 jaar te delen. Het is echter zeer onwaarschijnlijk dat Nederland daadwerkelijk zo lang dezelfde jaarlijkse hoeveelheid zal suppleren. Er zal juist adaptief gereageerd worden op de toename van de sedimentbehoefte, wat immers een zeer groot voordeel is van de huidige (bijzonder succesvolle) strategie. De te suppleren volumina zullen daarbij in de toekomst omhoog gaan, als de snelheid van stijging van het (gemiddeld) zeeniveau toeneemt. Om geen verwarring of onduidelijkheid te scheppen worden alleen in Tabel 4-7 jaargemiddelde getallen getoond. Die zijn bedoeld om de grote getallen eenvoudig te interpreteren in termen van 'x maal de hoeveelheid die Nederland nu jaarlijks suppleert'. Dit geeft een beeld van de toekomstige kosten en milieubelasting.

4.2 Sedimentbehoefte deelsysteem Wadden

In 3.4.6 is de sedimentbehoefte van de **actieve zone met kustlijnzorg** van alle zeegaten en de centrale eilandkusten tot en met het Friesche Zeegat berekend. Samengevat zijn deze:

Tabel 4-1: Sedimentbehoefte actieve zones Wadden met kustlijnzorg in 2100 / 2200 (mln. m³).

Sedimentbehoefte actieve zones Waddenkust							
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	2190
Meegroeien buitendelta's	247	493	986	493	986	1479	2467
Transporten naar bekkens	539	626	803	1288	1611	1756	1933
Meegroeien eilanden (centraal)	48	96	192	96	192	288	480
Transport oostwaarts	96	96	96	216	216	216	204
TOTAAL WADDENKUST actief	930	1311	2078	2093	3006	3740	5084

In 3.5.4 is de sedimentbehoefte van het Groninger Wad getoond, die gekwalificeerd is als een 'actieve zone zonder kustlijnzorg' (Tabel 4-2). Vergelijking van Tabel 4-1 en Tabel 4-2 laat zien dat het meenemen van het Groninger Wad de sedimentbehoefte vergroot met 6 % (laag scenario in 2100) tot 27% (het meest extreme scenario).

Tabel 4-2: Sedimentbehoefte actieve zones Wadden zonder kustlijnzorg in 2100 / 2200 (mln. m³).

Sedimentbehoefte mogelijk actieve zones Waddenkust – nu géén kustlijnzorg							
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	2190
Groninger Wad + buitendelta's	54	193	482	113	449	761	1379

4.3 Sedimentbehoefte deelsysteem Hollandse kust

In 3.2.4 zijn de berekeningen voor de sedimentbehoefte van de 'actieve zone' voor de Hollandse kust gepresenteerd. In het bijzonder in de huidige situatie en lage scenario's van zeespiegelstijging wordt de sedimentbehoefte van de actieve zone gedomineerd door de noodzaak bij kustplaatsen een kustlijn in stand te houden die niet in evenwicht is met de rest van de kust.

Tabel 4-3: Sedimentbehoefte actieve zones Hollandse Kust per zichtwaarde in 2100 / 2200 (mln. m³).

Sedimentbehoefte Hollandse kust – inclusief extra behoefte 'bolwerken'							
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	2190
TOTAAL HOLLANDSE KUST	264	327	455	577	705	832	1062

4.4 Sedimentbehoefte deelsysteem Delta, incl. monding Westerschelde

In 3.6.4 en 3.7.5 zijn de berekeningen voor de voor de sedimentbehoefte van de 'actieve zone' voor het deelsysteem Delta gepresenteerd. Samengevat zijn deze:

Tabel 4-4: Sedimentbehoefte actieve zones deelsysteem Delta, minimale variant, inclusief transport naar de Westerschelde per zichtwaarde in 2100 / 2200 (mln. m³).

Sedimentbehoefte Deltakust, inclusief Westerscheldemonding – minimale variant							
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	2190
TOTAAL DELTAKUST minimaal	158	236	392	336	492	647	949

Daarnaast zijn berekeningen voor zones die in de toekomst mogelijk gaan meedoen met de verspreiding van suppletiezand. Dat zijn ten eerste de volledige buitendelta's van de afgesloten bekkens. Of deze sedimentbehoefte gaan krijgen is afhankelijk van de morfologische ontwikkeling, die nu niet te voorspellen is. Het al dan niet sedimentbehoefte hebben van de Vlakte van de Raan is juist afhankelijk van toekomstige keuzes in het beleid. De morfologische ontwikkeling daarvan is beter voorspelbaar. Vergelijking van Tabel 4-4 en Tabel 4-5 leert dat het verschil tussen de twee opties die zijn bekeken (een minimale, krappe, optie en een maximale, ruime, optie) tot een factor vier

verschillen met elkaar. Voor de komende decennia zal de behoefte zeker dichterbij de minimale optie liggen.

Tabel 4-5: Sedimentbehoefte zones die in toekomst mogelijk meedoen in verspreiden van suppletiezand, per zichtwaarde in 2100 / 2200 (mln. m³).

Sedimentbehoefte mogelijk actieve zones Deltakust							
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	2190
Ruimste variant buitendelta's	187	373	746	373	746	1119	1866
Vlakte van de Raan	164	248	415	348	515	683	1008

Bij de monding van de Westerschelde is er nog een extra onzekerheid omdat het netto transport vanuit de monding, over de lijn Vlissingen-Breskens, niet precies genoeg gekend is. Dat wordt in Tabel 4-6 apart vermeld.

4.5 Synthese Nederlands kuststelsysteem

Deze synthese is een samenvatting van (delen van) eerdere tabellen. Gepresenteerd worden, cf. de onderverdeling uit 2.2.4, achtereenvolgens de totalen voor de actieve zones met en zonder kustlijnzorg en de zones waarvan het onzeker is of ze in de toekomst mee gaan doen met de verspreiding van suppleties. Daarnaast zijn twee andere onzekerheden gekwantificeerd. De eerste is de onzekerheid in de bepaling van de begrenzing van de actieve zone, de aanpassing van de zeewaartse helling en het verwaarlozen van kustdwars transport (zie 2.4.2). Deze onzekerheid is van toepassing op alle actieve zones behalve de kusten die deel zijn van buitendelta's (die zijn al ruim begrensd). Het is een behoefte cf. een oppervlak van 250 meter breed en de lengte van het betreffende stuk kust. Voor heel Nederland gaat het om 250 km kustlijn en dus om 63km² extra oppervlakte. In Bijlage A staat Tabel A-1, die de lengte en het oppervlak per kustvak geeft. Een tweede algemene onzekerheid is de kennisleemte over de transporten naar de Westerschelde, als hierboven gemeld.

Tabel 4-6: Totale sedimentbehoefte Nederlandse kust per zichtwaarde in 2100 / 2200 (mln. m³). Achtereenvolgens actieve zones, onzekere zones en andere gekwantificeerde onzekerheden

Sedimentbehoefte Nederlandse kust - totaal							
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	2190 ²⁹
1. Meegroeien actieve zones – met kustlijnzorg, inclusief export							
Wadden	930	1311	2078	2093	3006	3740	5084
Hollandse kust	264	327	455	577	705	832	1062
Delta	158	236	392	336	492	647	949
TOTAAL	1351	1875	2924	3007	4202	5220	7095
2. Meegroeien actieve zones – ZONDER kustlijnzorg, inclusief export							
Groninger Wad	54	193	482	113	449	761	1379

²⁹ In de aangeleverde scenario's treedt de 5 meter op in 2190.

3. Mogelijk actieve zones in toekomst							
buitendelta's Deltakust	187	373	746	373	746	1119	1866
Vlakte van de Raan	164	248	415	348	515	683	1008
4. Onzekerheden in sedimentbehoefte							
extra breedte actieve zone	31	63	125	63	125	188	313
Meer transport naar Westerschelde uit actieve zone	80	80	80	180	180	180	170
Totaal meegroeien zones en onzekerheden	1.787	2.751	4.692	3.903	6.037	7.970	11.660

Tabel 4-6 laat zien dat de meeste onzekerheid volgt uit onbekenden in de Zuidwestelijke Delta en bij het Groninger Wad. Ook is te zien dat de oppervlaktes van mee te groeien zones steeds sterker de sedimentbehoefte bepalen. Dit volgt uit de formulering van de rekenregel: oppervlakte x zeespiegelstijging. Momenteel (zie toelichting bij Tabel 4-8) is meer dan de helft van de sedimentbehoefte van de kustzone het gevolg van transporten naar bekkens en estuaria en deze nemen niet lineair toe met de snelheid van zeespiegelstijging. Dat wordt met de tijd relatief minder.

Om een indruk te geven van wat dit gemiddeld per jaar is over de hele periode van het scenario is Tabel 4-7 gemaakt. Dit kan vergeleken worden met de huidige suppletieopgave van 10-12 mln. m³/jr.

Tabel 4-7: Gemiddelde sedimentbehoefte per jaar voor de Nederlandse kust per zichtwaarde in 2100 / 2200 (mln. m³ per jaar). De getallen zijn de waarden uit Tabel 4-6, gedeeld door de duur van het scenario.

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	2190 ³⁰
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 – ZONDER kustlijnzorg, inclusief export							
Groninger Wad	0.7	2.4	6.0	0.6	2.5	4.2	8.1
3. Mogelijk actieve zones in toekomst							
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

³⁰ In de aangeleverde scenario's treedt de 5 meter op in 2190.

Gevoeligheid van suppletieopgave voor snelheid van zeespiegelstijging

Bovenstaande geeft ook inzicht in de gevoeligheid van de jaarlijkse suppletieopgave voor de snelheid van zeespiegelstijging. Als wordt aangenomen dat de transporten uit de actieve zones constant blijven in de toekomst (niet helemaal juist, zie sommen ASMITA) betekent elke mm stijging per jaar (momenteel ca 3 mm/jaar) een (extra) sedimentbehoefte in de actieve zone van 1 mln. m³ per jaar geeft.³¹

Deze afschatting laat ook zien dat in het huidige kustonderhoud de sedimentbehoefte door (relatieve) zeespiegelstijging rond de 3 mln. m³ moet liggen. De grootste oorzaak van sedimentbehoefte zijn nu transporten uit de actieve zone (met de grootste waarden in het deelsysteem Wadden, zie o.m. Tabel 3-6) en door extra suppleties langs de Hollandse Kust door de ligging van de BKL (geen morfologisch evenwicht met omgeving). Zie ook Tabel 4-7.

4.6 Vergelijking met resultaten Kustgenese 2.0

De laatste ca. twintig jaar zijn berekeningen voor de sedimentbehoefte gebaseerd op een rekenregel voor het hele kustfundament (Lodder, 2016) . In Kustgenese 2.0 vond een aanpassing plaats. Voor de bepaling van de sedimentbehoefte is toen een zogenaamde rekenkundige zeewaartse grens van het Kustfundament ingevoerd. Dit was de basis voor de sedimentbehoefte en suppletiescenario's uit het beleidsadvies 2020.

Nieuw in deze studie is een aanpassing in het denkmodel door sedimentbehoefte te verbinden aan de zone waarin suppletiezand wordt verspreid. Hierin is onderscheid gemaakt tussen zones waarin nu wèl en (nog) niet wordt gesuppleerd. Een tweede aanpassing van het denkmodel is het concept van het actief volume in buitendelta's. Dat is op een iets andere wijze beredeneerd dan dit bij een rechte kustlijn (als de Hollandse kust).

De toepassing van het concept actieve zone leidt onder de condities van een sneller stijgende zeespiegel tot lagere waarden voor de sedimentbehoefte dan voorheen is ingeschat. Dit verschil is er voornamelijk omdat de oppervlaktes die verondersteld zijn te 'moeten meegroeiën' veel kleiner zijn dan eerder is aangenomen. Andere verschillen met Kustgenese 2.0 zijn de beschikbaarheid van berekeningen voor de transporten door de zeegaten bij versnellende zeespiegelstijging en nieuwe kennis over sedimenttransporten bij het Groninger Wad en de monding van de Westerschelde. Tenslotte is er recent (Stolte et al, 2023) een nieuwe waarde voor de zeespiegelstijging over de afgelopen dertig jaar: 2,86 mm/jr.

Ter check (om vertrouwen in de methode aan te geven) kan met de methodiek van dit rapport de sedimentbehoefte onder de huidige zeespiegelstijging (2,86 mm/jr.) worden berekend, in behoefte per jaar. In Tabel 4-8 staan de resultaten, met onderscheid naar actieve zones (met en zonder kustlijnzorg), zones die mogelijk gaan meedoen met verspreiden van suppleties en de onzekerheid in de breedte van de actieve zone.

Tabel 4-8: Ter check: sedimentbehoefte bij huidige stijging van de zeespiegel cf. concept actieve zone

Deelgebied	Sedimentbehoefte
Wadden	8,0
Hollandse kust	2,9
Delta	1,4
TOTAAL	12,3

³¹ Zie dit rekenvoorbeeld: het verschil tussen scenario '2m in 2100' en '0,5 m in 2100' is 20 mln. m³ per jaar gemiddeld. Het verschil in stijgsnelheid tussen beide scenario's is 1500 mm in 80 jaar, bijna 20 mm per jaar.

Groninger Wad	0,4
buitendelta's Deltakust	1,1
extra breedte actieve zone	0,2
Maximaal excl. VI. van de Raan	14
Vlakte van de Raan	1,5
Maximaal excl. VI. van de Raan	15,5

Het blijkt dat de sedimentbehoefte van de 'actieve zone' iets groter is dan de in Kustgenese 2.0 uitgerekende *suppletie*behoefte van 10,1 mln. m³/jaar. Wanneer de onzekerheden erbij worden opgeteld komt het geheel maximaal op 15,5 mln. m³/jaar, wat ook iets meer is dan de 13,3 mln. m³/jaar die met de rekenregel van Kustgenese 2.0 aan *sediment*behoefte berekend is. De belangrijkste factor die het verschil van ca 2,2 mln. m³/jaar verklaart zijn andere getallen voor het transport bij de monding van de Westerschelde.

Deze vergelijking en de verklaring van het verschil geven vertrouwen dat op een robuuste wijze de sedimentbehoefte bij zichtwaarden van zeespiegelstijging is berekend.

De onzekerheden die in dit rapport expliciet in beeld zijn gebracht (en min of meer ingecalculeerd) maken duidelijk dat, gegeven de lange tijdshorizon en onzekerheid rondom de optredende zeespiegelstijging, er met relatief grote zekerheid uitspraken zijn te doen over de hoeveelheid zand die nodig is geweest indien een bepaalde zeespiegelstijging is bereikt. Dit betekent dat er op basis van dit rapport met relatief veel vertrouwen uitspraken gedaan kunnen worden over de houdbaarheid van de voorkeursstrategie voor de zandige kust. Deze conclusies zelf vallen echter buiten de scope van dit rapport omdat hierbij andere factoren betrokken moeten worden, waarvan de beschikbaarheid van winbaar zand een heel belangrijke is.

5 Conclusies en reflectie

5.1 Resultaten sedimentbehoefte onder zeespiegelstijging

Het in dit rapport geïntroduceerde concept van de 'actieve zone' blijkt een goed concept om sedimentbehoefte te beschrijven voor een systeem waar door suppleties de kustlijn (blijvend) wordt onderhouden (voortzetting van de voorkeursstrategie). Het is een beter conceptueel model voor de morfologische aanpassingen bij een (versneld) stijgende zeespiegel dan de wijze waarop tot nu het gehele kustfundament is beschouwd als mee te groeien entiteit.

Dit rapport maakt onderscheid tussen een actieve zone met kustlijn­zorg en een actieve zone waar dat nu niet gebeurt. Daarnaast is de suppletie­behoefte berekend voor zones die momenteel niet meedoen met de verspreiding van het suppletie­zand, maar dat in de toekomst mogelijk wel gaan doen. De sediment­behoefte van de actieve zone met kustlijn­zorg is het belangrijkste. Deze behoefte is in een scenario met beperkte stijging (0,5 meter in 2100) 1.4 miljard m³ sediment. Als dit lage scenario wordt doorgetrokken is de zeespiegel 1 meter hoger in 2200 en de sediment­behoefte toegenomen tot 3 miljard m³.

Bij scenario's met snellere zeespiegel­stijging zijn de sediment­behoef­ten groter. Het groeit echter niet evenredig. Het gaat om 1,9 miljard m³ bij 1 meter stijging in 2100 en loopt op naar respectievelijk 4,2 en 7,1 miljard m³ bij 2 en 5 meter stijging in 2200. De on­ze­ker­heid in deze getallen, voornamelijk samenhangend met beperkingen in kennis van de begrenzing van deze actieve zone, is beperkt (rond de 7 a 8% of maximaal 0,5 miljard m³ bij het meest extreme scenario).

De actieve zone zonder kustlijn­zorg kent een lage sediment­behoefte in het scenario met beperkte zeespiegel­stijging (0,1 miljard m³ in 2100), die oploopt tot 1,4 miljard m³ in het meest extreme scenario in 2200. Eventuele extra sediment­behoefte als in de toekomst meer gebieden gaan meedoen aan de verspreiding van suppletie­zand varieert van 0,35 miljard m³ (in 2100) tot 2,9 miljard m³ (meest extreme scenario, in 2200).

In de berekening hiervan zijn een aantal conservatieve aannamen gedaan, zoals de aanname dat alle buitendelta's bij de Waddenzee volledig mee moeten groeien (en door suppleties gevoed worden onder de voorkeurs­strategie) en de aanname dat het gehele transport naar de Waddenzee zand is.

Als de deelgebieden met elkaar vergeleken worden is duidelijk dat de grootste sediment­behoefte in alle scenario's ligt in het Waddengebied. Dat is bij de huidige zeespiegel­stijging (zie syntheserapport Kustgenese 2.0) ook het geval.

Toekomstige beleidskeuzes. Voorbeeld Groninger Wad

De keuze tussen wel of niet meenemen van sediment­behoefte voor een gebied waar nu geen kustlijn­zorg plaatsvindt, is vooral afhankelijk van hoe men tegen on­ze­ker­heden en risico's³² aankijkt. Dit is een discussie­punt voor de toekomst.

Vanuit het oogpunt van reserveren van zand­voorraden lijkt het meest verstandig rekening te houden met een eventuele sediment­behoefte hier. Vanuit het oogpunt van waarden en voorzetten van de voorkeurs­variant is het daarentegen niet logisch uit te gaan van zandig onderhoud ten oosten van Schiermonnikoog. Dat leidt tot een toekomst waarin de natuurlijke dynamiek van het Groninger Wad de natuurwaarden bepaalt en een erosief gedrag van de

³² Heeft Nederland er last van als ze niets doet? Zo ja: Waar krijg je als eerste last. Zo nee: waarom geen last.

buitendelta ervan wordt geaccepteerd. Dit is plausibel in een toekomst waar de middelen voor zandig kustonderhoud steeds meer primair gericht worden op de waterveiligheid. In zo'n toekomst kan zelfs de keuze voor kunnen gaan liggen of vlakbij de dijken van het vasteland (dus in de bekkens van de Waddenzee) sediment aangebracht moet worden, om de golfloop op die dijken te verminderen. Deze rapportage is echter niet bedoeld om op al de hierboven genoemde afwegingen vooruit te lopen.

5.2 Reflectie gegeven vragen over houdbaarheid van de voorkeurstrategie

Het past niet in de scope van dit rapport een oordeel te geven over de houdbaarheid van de voorkeurstrategie. Dat oordeel is van veel meer zaken afhankelijk dan alleen de benodigde hoeveelheid sediment, meer precies: zand voor suppleties. Wel geeft dit rapport argumenten die bijdragen aan die afweging.

Een belangrijke overweging die voortzetten en oprekken van de voorkeursstrategie mogelijk maakt is het flexibele en adaptieve karakter van het zandige beheer van de kust. De onzekerheid rond de stijging van de zeespiegel is op zichzelf al een reden om zo veel als mogelijk gebruik te maken van 'Nature-Based Solutions' en de adaptieve mogelijkheden ervan. Kijkend naar andere beleidsvelden betekent dit dat Nederland alle redenen heeft om zorgvuldig om te gaan met de zandvoorraden en de bereikbaarheid daarvan. Men kan stellen dat het zand het Nederlandse 'goud' voor adaptief kustbeheer is en dat ook voor komende generaties genoeg zand beschikbaar moet blijven tegen aanvaardbare kosten.

Blijven investeren in technieken en oplossingen om het toekomstige zandige beheer duurzamer te maken (zand op een nog natuur- en milieuvriendelijker wijze naar de actieve zone verplaatsen) en opschaalbaar te houden is dan ook een logische aanbeveling.

Het voorafgaande leert dat investeren in zand in de actieve zone altijd bijdraagt aan de handhaving van de kustlijn op korte en lange termijn. Het is een robuust element in veel, zo niet alle, oplossingsrichtingen voor een sneller stijgende zeespiegel. Dat betekent zeker niet dat het ook altijd logisch is zand dat in de toekomst nodig is nu al naar de kust te brengen. Hiervoor zijn goede argumenten nodig via de meerwaarde die zulke maatregelen hebben. Als die er niet zijn is later aanbrengen, als duidelijker is waar het zand nodig is en wanneer het suppleren wellicht milieuvriendelijker kan gebeuren, logischer.

Tenslotte is het aan te bevelen voor delen van de kustlijn die slechts deels zandig zijn en waar harde constructies nu zijn gebruikt voor het bieden van Waterveiligheid, ook (gedeeltelijke) sedimentoplossingen bij 'ontwerpen' te betrekken. De aanleg van de Hondsbossche Duinen is hiervan een voorbeeld.

5.3 Onzekerheden en vervolgonderzoek

Bij de prioritering van vervolgonderzoek zullen de resterende onzekerheden mede bepalend zijn, zie Bijlage A. De mate waarin het verkleinen van de onzekerheden bijdraagt aan betere besluitvorming en onderbouwing in ontwikkelen en uitvoeren van kustbeleid verhoogt de prioriteit. In dit rapport zijn een aantal onderdelen van de conceptuele modellen aangedragen die beter uitgezocht kunnen worden (steeds de laatste subsectie per deel van het kuststelsel in Hoofdstuk 3). Voor het project Zandige Kust wordt dit uitgewerkt in het Plan van Aanpak voor 2023 en 2024. Voor de kortere termijn (beleidsadvies Kustgenese 2.0 en vervolg) wegen onzekerheden in de transporten uit de actieve zone zwaarder door. Kennis van de transporten op de vooroever (zie Bijlage D) is hiervoor ook van belang.

Voor toekomstige debatten over de voorkeursstrategie voor een van de bekkens in de Zuidwestelijke Delta is beter inzicht in het grootschalig morfologisch gedrag van dit deel van

de Nederlandse kust belangrijk. Hierin investeren in de komende jaren tot decennia lijkt zonder meer 'no regret'. Hieronder valt meer aandacht voor de werking van de monding van de Westerschelde, met mogelijk een pilotsuppletie. Een tweede debat dat de komende decennia zal spelen is de houdbaarheid van de ecologische waarde van de Waddenzee op lange termijn en de bijdrage die sedimentbeheer daarin kan spelen, mede gegeven de bereikbaarheid van de eilanden. Meer inzicht in de ontwikkeling van de Waddenzeebekkens bij snellere zeespiegelstijging is hiermee een prioriteit. Deels zal deze kennisontwikkeling buiten het project Zandige Kust vallen, in het bijzonder waar het gaat om kennis van te stellen natuurdoelen, hoe deze reageren op een veranderende morfologie van de bekkens en hoe zich dat verhoudt tot andere effecten van klimaatverandering.

6 Referenties

Barneveld H., Nicolai, R.P., Boudewijn, T.J., de Jong, J.W., van Didderen, K., van de Haterd, R.J.W., Van de Moortel, I. Velez, C., 2018b. Evaluatierapport. T2015 Rapportage Schelde-estuarium. HKV lijn in water, Bureau Waardenburg en Antea. Juni 2018.

Barneveld H., R.P. Nicolai, M. van Veen, S. van Haaster, T.J. Boudewijn, J.W. de Jong, K. van Didderen, R.J.W. van de Haterd, P.P. Middenveld, S. Michielsen, I. Van de Moortel, C. Velez en E. de Wilde, 2018a. Analyserapport. T2015-Rapportage Schelde-estuarium. HKV lijn in water, Bureau Waardenburg en Antea. Juni 2018.

Bruun, P., 1962. Sea-level rise as a cause of shore erosion. American Society of Civil Engineers Journal of the Waterways and Harbours Division 88, 117-130.

Cleveringa, J., Dam, G., 2013. Grootschalige sedimentbalans van de Western Scheldt. Project LTV- Veiligheid en Toegankelijkheid. LTV V&T-Rapport K-17, Arcadis, Emmeloord, 82 pp.

De Groen, F., V. van Zelst, L. van der Valk en B. Arens (2019) Natuurlijk Veilig door Kust- en Zeereepbeheer. Deltares rapport 11203683-002

De Leeuw, C., 2020. Duurzame bescherming en ontwikkeling van dynamische Waddenzeenatuur – Brochure 1: Morfologische veranderingen.

Deltares, 2020a. Technisch Advies Sedimentbehoefte Kustfundament ten behoeve van het beleidsadvies Kustgenese 2.0. Deltares rapport 1220339-009-ZKS-0014.

Deltares, 2020b. Technisch Advies Mogelijkheid voor een Alternatieve Zeewaartse Grens van het kustfundament; ten behoeve van het beleidsadvies Kustgenese 2.0. Deltares rapport 1220339-009-ZKS-0013.

Deltares, 2020c. Technisch advies Rol en Mogelijkheden Buitendelta's voor het Kustbeheer. Deltares rapport 1220339-009-ZKS-0006.

Deltares, 2020d. Kustgenese 2.0 - integrale analyse. Deltares rapport 1220339-009-ZKS-0008.

Depreiter, D., Cleveringa, J., Laan van der, T., Maris, T., Ysebaert, T., Wijnhoven, S. 2014. T2009 rapportage Schelde estuarium. IMDC, ARCADIS, Universiteit Antwerpen, IMARES, NIOZ. 077698096:A – Definitief C03041.002718.0400. 7 mei 2014.

Elias, E. (in prep). Morfologische ontwikkeling van het Eierlandse Gat.

Elias, E., 2021. Morfologische analyse buitendelta Ameland en de rol van de pilotsuppletie. Deltares rapport 11206794-004-ZKS-0006.

Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., Pearson, S.G., Cleveringa, J., 2019. Understanding sediment bypassing processes through analysis of Ameland Inlet, the Netherlands. Marine Geology 415, 105956. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.06.001>

Elias, E.P.L., 2019. Een actuele sedimentbalans van de Waddenzee. Deltares rapport 11203683-002.

Elias, E., Pearson, S. & Van Weerdenburg, R. (2020). Evaluatie systeemsuppletie Bankje van Zoutelande. Deltares rapport: 11205236-003-ZKS-0002

Elias, E.P.L., 2022. Aanlandingsbanken Schiermonnikoog. Deltares rapport 11208035-004-ZKS-0001.

Elias, E.P.L., Colina Alonso, A. en van Maren, B, 2021. Morfologische veranderingen Eems-Dollard en Groninger Wad. Rapport 11203742-000, Deltares, Delft

Elias, E.P.L., Pearson, S.G., van der Spek, A.J.F., Pluis, S., 2022. Understanding meso-scale processes at a mixed-energy tidal inlet: Ameland Inlet, the Netherlands – Implications for coastal maintenance. *Ocean and Coastal Management* 222, 106125.

<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106125>

Elias, E.P.L., Taal, M., Cleveringa, J., van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B., in prep. Large-scale morphological changes and sediment budget of the Western-Scheldt estuary. 2023.

Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., 2015. Uitwerking sedimentbudget van de Westerscheldemonding. Rapport 1210304-012, Deltares (Delft).

Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., Lazar, M., 2017. The 'Voordelta', the contiguous ebb-tidal deltas in the SW Netherlands: large-scale morphological changes and sediment budget 1965–2013; impacts of large-scale engineering. *Netherlands Journal of Geosciences*, 96(3), 233-259. <https://doi.org/10.1017/njg.2016.37>

Grasmeijer, B., Huisman, B.J.A., Lujendijk, A.P., Schrijvershof, R., van der Werf, J., Zijl, F., de Looff, H., de Vries, W., 2022. Modelling of annual sand transports at the Dutch lower shoreface, *Ocean and Coastal Management* 217, 105984.

<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105984>

Haasnoot, M, F. Diermanse (ed.) (2022) Analyse van bouwstenen en adaptatiepaden voor aanpassen aan zeespiegelstijging in Nederland. Deltares 11208062-005-BGS-0001

Huisman, B.J.A., Walstra, D.J.R., Raderacher, M., de Schipper, M.A., Ruessink, B.G., 2019. Observations and modelling of shoreface nourishment behaviour. *Journal of Marine Science and Engineering* 7(3)

Huismans, Y., van der Spek, A., Lodder, Q., Zijlstra, R., Elias, E., Wang, Z.B., 2021. 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 and Coastal Management* 216, 105969. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105969>

Ijzendoorn, C.O. van, de Vries, S., Hallin, C., Hesp, P.A., 2021. Sea level rise outpaced by vertical dune toe translation on prograding coasts. *Scientific Reports* 11, 12792.

<https://doi.org/10.1038/s41598-021-92150-x>

Jiang, L., Gerkema, T., Idier, D., Slangen, A.B.A., Soetaert, K., 2020. Effects of sea-level rise on tides and sediment dynamics in a Dutch tidal bay. *Ocean Science* 16, 307-321.

<https://doi.org/10.5194/os-16-307-2020>

Lambregts, P., 2021. Sediment bypassing at Ameland inlet; And the role of an ebb-tidal delta nourishment. Afstudeerscriptie Technische Universiteit Delft.

<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A2e5dfc75-d7b8-44bd-a1f3-99f2b18f3533?collection=education>

Lodder, Q., 2016 en 2018. Memo Rekenregel suppletievolumes. RWS bedrijfsinformatie, 16-12-2016 en versie 1.1. d.d. 13-9-2018.

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, 2198. <https://doi.org/10.3390/w11102198>

Lodder, Q., de Loof, H., Brakenhoff, L., 2021. Memo Historische suppletievolumes voor handhaven kustlijn Delta, Holland en Waddengebied. RWS bedrijfsinformatie, 4-5-2021.

Lodder, Q., Slinger, J., 2022. The 'Research for Policy' cycle in Dutch coastal flood risk management: The Coastal Genesis 2 research programme. *Ocean and Coastal Management* 219, 106066. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106066>

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 and Coastal Management* 219, 106067. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106067>

Lodder Q.J., Slinger, J.H.; Wang, Z.B. van der Spek A.J.F., Hijma, M.P. ; M. Taal, van Gelder-Maas, C., de Looff, H., Litjens, J.; Schipper, C.A.; Löffler, M.; Nolte, A.J.; van Oeveren, C.; van der Werf, J.J.; Grasmeijer, B.T.; Elias, E.P.L.; Holzhauser, H.; Tonnon, P.K. 2023. The Coastal Genesis 2 research programme: Outputs, Outcomes and Impact. *Ocean and Coastal Management* 237, 106499.

Nichols, M.M., 1989. Sediment accumulation rates and relative sea-level rise in lagoons. *Marine Geology* 88, 201-219.

Oost, A.P., van der Spek, A., van Oeveren- Theeuwes, C., Tonnon, P.K., 2018. The Contribution of Mud to the Net Yearly Sedimentation Volume in the Dutch Wadden Sea, a Review Based on Literature. *Deltares rapport 1220339-006-ZKS-0009*.

Pearson, S.G., Elias, E.P., van Prooijen, B.C., van der Vegt, H., van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B., 2022. A novel approach to mapping ebb-tidal delta morphodynamics and stratigraphy. *Geomorphology* 405, 108185.

Plancke, Y.; Vos, G.; Meire, D.; Mostaert, F. (2021). Sedimentstrategie Schelde-estuarium: Deelrapport 4 – Sedimentbalans Zeeschelde, Rupel en Durme voor de periode 2011-2016. Versie 0.1. WL Rapporten, 19_076_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Rijkswaterstaat, 2020. *Kustgenese 2.0: kennis voor een veilige kust. Rapport ter onderbouwing van het beleidsadvies 'Kustgenese 2.0'*.

Röbke, B.R., Elmilady, H., van der Wegen, M., Taal, M., 2020. The long-term morphological response to sea level rise and different sediment strategies in the Western Scheldt estuary (The Netherlands). *Deltares rapport 1210301-009-ZKS-0009*.

S. IJff, B. Smits, V. van Zelst en B. Arens (2018). *Landschapsvormende Processen. Deltares rapport 11202190-001*

Scheldeverdrag, 2005a. *Verdrag tussen het Koninkrijk der Nederlanden en het Vlaams Gewest betreffende de uitvoering van de ontwikkelingschets 2010 Schelde-estuarium (met Bijlagen)*, Middelburg, 21 december 2005.

Scheldeverdrag, 2005b. Verdrag tussen het Koninkrijk der Nederlanden en het Vlaams Gewest inzake de samenwerking op het gebied van het beleid en het beheer in het Schelde-estuarium, Middelburg, 21 december 2005.

Schrijver, M., 2020, De Balans Opgemaakt - De ontwikkelingen in de Westerschelde tot 2019 gezien vanuit de sedimentbalans. Rijkswaterstaat Zee en Delta, Middelburg.

Spek, A.J.F. van der, Elias, E.P.L., 2021. Half a century of morphological change in the Haringvliet and Grevelingen ebb-tidal deltas (SW Netherlands) - Impacts of large-scale engineering 1964-2012. Marine Geology 432, 106404.
<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106404>

Stolte, W., Baart, F., Muis, S., Hijma, M., Taal, M, Le Bars, D., Drijfhout, S. 2023. Zeespiegelmonitor 2022. Deltares rapport 11209266-000-ZKS-0001

Taal, M., Wang, Z.B., Cleveringa, J., 2013. LTV Veiligheid en toegankelijkheid, G-13: Synthese en conceptueel model, Basisrapport grootschalige ontwikkeling. Deltares, I/RA/11387/12.294/GVH

Van der Spek, A en Q. Lodder, 2015. A new sediment budget for the Netherlands: the effect of 15 years of nourishing (1991-2005). Deltares rapport 1220040-007.

Van der Werf, J.; Meijer – Holzhauer, H.; Van der Spek, A .; Van Weerdenburg, R.; Craeymeersch, J.; Tulp, I.; Ysebaert, T.; 2020. Morfologie en ecologie van de Scheldemonding. Deltares rapport 11203725-000-ZKS-0018.

Van der Werf, J. 2022. Netto zandtransporten op de laterale grenzen van het Kustfundament. Deltares rapport 11207897-002-ZKS-0003.

Vandenbruwaene, W.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Slibbalans Zeeschelde: deelrapport 4. Historische evolutie SPM. versie 6.0. WL Rapporten, 00_029_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. 74 + 4 p. bijlagen pp.

Veenstra, J., Zijl, F., Verlaan, M., 2020. Effect van zeespiegelstijging op getij langs de Nederlandse kust. Studie met IPCC klimaatscenario's en het DCSM-FM 100m model. Deltares PowerPoint presentatie.

Vos, G.; Plancke, Y.; Meire, D; Mostaert, F. (2021). Sedimentstrategie Schelde-estuarium: Deelrapport 5 – Sedimentbalans Zeeschelde, Rupel en Durme voor de periode 2016-2019. Versie 0.1. WL Rapporten, 19_076_6. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Vos, R., 2021. Zeespiegelstijging na 2200 ten behoeve van zoetwaterbeheer en zandige kust. Memo Rijkswaterstaat WVL, 4 pp. (17 juni 2021).

Wang en Lodder, 2019, Sediment exchange between the Wadden Sea and North Sea Coast, Modelling based on ASMITA, Deltares rapport 1220339-008-ZKS-0006.

Wang, C.; Temmerman, S.; Vanlede, J.; Vandenbruwaene, W.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2015). Mud balance Sea Scheldt: subreport 6 - Historical evolution (1930-2011) of mud deposition/erosion in the intertidal areas of the Scheldt estuary. WL Rapporten, 00_029. Flanders Hydraulics Research: Antwerp

Wang, Z.B., Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F. & Lodder, Q.L., 2018. Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea - impact of accelerated sea-level rise

and subsidence until 2100. Netherlands Journal of Geosciences 97 (3): 183-214.

<https://doi.org/10.1017/njg.2018.8>

Weerdenburg, R. van, Pearson, S., van Prooijen, B., Laan, S., Elias, E., Tonnon, P.K., Wang, Z.B., 2021. Field measurements and numerical modelling of wind-driven exchange flows in a tidal inlet system in the Dutch Wadden Sea. Ocean and Coastal Management 215, 105941.

<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105941>

Wegen, M. van der, Taal, M. en Vanlede, J. 2023. Kennisoverzicht impact Zeespiegelstijging Schelde-estuarium. Deltares rapport 11206823-000-ZKS-0019.

Zijl, F., Veenstra, J., Groenenboom, J., 2018. The 3D Dutch Continental Shelf Model - Flexible Mesh (3D DCSM-FM). Setup and validation. Deltares rapport 1220339-000-ZKS-0042.

A Overzicht onzekerheden

In dit rapport geeft op meerdere plaatsen aandacht aan de aannamen die in de methodiek besloten zijn en de onzekerheden die daarmee samenhangen. Waar van toepassing zijn ze daar ook gekwantificeerd. Deze bijlage geeft een overzicht.

Aannamen:	<ul style="list-style-type: none"> - Voor lange termijn behoud van functies hoeft alleen de actieve zone mee te groeien. - De transporten vanuit de actieve zone naar de diepe vooroever en achterliggend duingebied zijn klein en verwaarloosbaar in vergelijking met de sedimentbehoefte om actieve zone te laten meegroeien met de zeespiegelstijging.³³ 																																				
Onzekerheden:	<ul style="list-style-type: none"> a. De grenzen van de actieve zone kunnen ook meer land- of zeewaarts liggen dan wat waarneembaar is met data van de laatste 30 jaar b. De grenzen verschuiven in de toekomst mogelijk land- of zeewaarts door zeespiegelstijging en/of (duin)beheer en/of doordat er wel kustdwars transport over de grenzen van de actieve zone plaatsvindt. c. De aanname dat er in een 'actieve zone' kan worden gedacht op de tijdschaal waarop sedimentbeheer en zeespiegelstijging elkaar beïnvloeden is mogelijk onjuist. 																																				
Kwantificering:	<p>Onzekerheden a. en b. zijn vergelijkbaar in die zin dat in een breder of smaller gebied suppleties worden verspreid. Voor dit rapport is alleen van belang een mogelijk hogere sedimentbehoefte mee te nemen. Die is afgeschat als een aanvullende breedte van de actieve zone. Bij een gemiddeld profiel langs de Hollandse kust is 250 meter (50 m landwaarts en 200m zeewaarts) een veilige bovengrens (zie de huidige bepaalde breedte, die ordegrrootte 1000 -1500 meter is). Deze onzekerheid is van toepassing op alle actieve zones behalve de kusten die deel zijn van buitendelta's (zijn al ruim begrensd en de zeewaartse grens ligt ook veel dieper, op ca. -18 meter). Het gaat om 250 kilometer kustlijn. Voor onzekerheid c. heeft collegiale toetsing plaatsgevonden met toonaangevende experts. Deze bevestigden het denkmodel. Hiervoor hoeft geen extra onzekerheid te worden gekwantificeerd.</p> <p><i>Tabel A-1: Lengte kustlijn actieve zones zonder buitendelta, waar een onzekerheid is bepaald omdat de actieve zone breder kan zijn en/of er wel enig kustdwars transport is de actieve zone uit.</i></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Lengte kustlijn</th> <th>Extra oppervlak</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="3">Waddeneilanden:</td> </tr> <tr> <td>Texel</td> <td>17</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Vlieland</td> <td>5</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Terschelling</td> <td>10</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>Ameland</td> <td>13</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>Schiermonnikoog</td> <td>8</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>totaal:</td> <td>55</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Hollandse Kust:</td> </tr> <tr> <td>Delfland + Rijnland</td> <td>62</td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>Noord-Holland</td> <td>45</td> <td>11</td> </tr> <tr> <td>totaal:</td> <td>107</td> <td>27</td> </tr> </tbody> </table>	Lengte kustlijn		Extra oppervlak	Waddeneilanden:			Texel	17	4	Vlieland	5	1	Terschelling	10	3	Ameland	13	3	Schiermonnikoog	8	2	totaal:	55	14	Hollandse Kust:			Delfland + Rijnland	62	16	Noord-Holland	45	11	totaal:	107	27
Lengte kustlijn		Extra oppervlak																																			
Waddeneilanden:																																					
Texel	17	4																																			
Vlieland	5	1																																			
Terschelling	10	3																																			
Ameland	13	3																																			
Schiermonnikoog	8	2																																			
totaal:	55	14																																			
Hollandse Kust:																																					
Delfland + Rijnland	62	16																																			
Noord-Holland	45	11																																			
totaal:	107	27																																			

³³ Ook te lezen als "Er is geen significant transport uit de 'actieve zone' behalve die benoemd zijn bij de zeegaten van het Waddengebied (inclusief Groninger Wad) en bij de monding van de Westerschelde

Zuidwestelijke Delta, excl ZW Walcheren:		
Maasvlakte	7	2
Voorne	9	2
Goeree	19	5
Schouwen	19	5
Noord-Beveland	4	1
NO Walcheren	15	4
Zeeuws-Vlaanderen	15	4
totaal:	88	22
Heel Nederland:	250	63

In Tabel A-1 zijn deze onzekerheden nog afgezet tegen de berekende oppervlakte van elke actieve zone waarin kustlijnzorg plaatsvindt.

Aanname:	De sedimentbehoefte betreft behoefte aan zand
Onzekerheden:	Een gedeelte van de vastgestelde bodemveranderingen is het gevolg van sedimentatie of erosie van slib, in het bijzonder waar het gaat om uitwisselingen met getijbekkens. De verhouding tussen zand- en slibvolumes is onbekend.
Kwantificering:	Voor de transporten door de zeegaten en naar de estuaria zou een lagere zandbehoefte nodig zijn dan de berekende sedimentbehoefte als een deel daarvan met slib wordt ingevuld. In Oost et al. 2018 is dit als 8-37% afgeschat ³⁴ . Voor een toets op de houdbaarheid van de voorkeursstrategie is voornamelijk een mogelijk <i>hogere</i> behoefte van belang. Het is dan ook veilig nu de bovengrens te nemen, maar deze kennisleemte dient in het vervolg van dit project te worden uitgezocht. Het kan om grote hoeveelheden gaan, want elke 10% van het transport door de zeegaten betreft, afhankelijk van de zichtwaarde en het scenario tussen de 130 en 200 mln. m ³ sediment tot 2200.

Aanname:	De berekeningen met ASMITA representeren de import naar de Waddenbekkens over een lange periode.
Onzekerheden:	De aannames waarop de berekeningen met ASMITA zijn gebaseerd mogen niet gebruikt worden voor transporten door zeegaten over lange termijn bij toegenomen zeespiegelstijging.
Kwantificering:	Er zijn geen aanwijzingen dat de resultaten van ASMITA de transporten systematisch juist meer onderschatten of overschatten. Wel staat vast dat het niet corrigeren voor een fractie slib in het berekende sedimenttransport een overschatting van de <i>zandbehoefte</i> in de kustzone betekent (zie vorig punt). Voor de toets op houdbaarheid van de voorkeursstrategie is met name een mogelijk hogere behoefte van belang. In combinatie met het vorige punt (aanname sediment = zand) wordt geacht al voldoende een bovengrens te zijn opgezocht.

Aanname:	Op lange termijn zijn suppletiebehoefte en sedimentbehoefte actieve zone aan elkaar gelijk bij de Hollandse kust .
Onzekerheden:	Langs de Hollandse kust wordt nu meer zand gesuppleerd dan volgens de rekenregel daarvoor nodig is. Daar is een verklaring voor: de kustlijn is lokaal niet in evenwicht en op de meer erosieve plaatsen (gegeven de ligging van de BKL) wordt zand aangebracht dat zich verplaatst naar de actieve zone van delen van de kust waar extra zand niet nodig is (ook

³⁴ Zij merken op dat de bovenwaarde wellicht een overschatting is, omdat monsters ter bepaling van de korrelgrootte meestal in het zomerseizoen worden genomen.

	gegeven de ligging van de BKL). De Hollandse kust bouwt zich daarom momenteel gemiddeld uit en dat treedt in de verre toekomst niet meer op.
Kwantificering:	In dit rapport is de 'veilige' aannahme gedaan dat de extra behoefte (die langs de Hollandse kust nu jaarlijks aanwezig is bovenop de berekende sedimentbehoefte) er ook in de toekomst zijn. Het wordt gestuurd door het netto kustlangs transport binnen een kustvak vanaf de suppletie locatie. De aandrijvende krachten achter dat transport zullen niet toenemen omdat de gemiddelde diepte in de actieve zone niet verandert. De extra behoefte aan zand in de toekomst hierdoor zal maximaal zo groot zijn als wat momenteel extra nodig is. Hiervoor is een waarde van 2,5 mln. m ³ zand per jaar gekozen, gebaseerd op de inzichten uit Kustgenese 2.0.

Aanname:	Het is mogelijk een ' actieve zone ' te bepalen bij getijsystemen
Onzekerheden:	Bij estuaria en (voormalige) zeegaten is het veel lastiger om op basis van morfologische analyse uitspraken te doen over de sedimentbehoefte om gebruiksfuncties te waarborgen. Een bijzondere onzekerheid is de nog onvoldoende kennis hoe de (zich nu aan de deltawerken aanpassende) buitendelta's van de Zuidwestelijke delta zich ontwikkelen onder zeespiegelstijging.
Kwantificering:	In dit rapport is een meest plausibele begrenzing van de actieve zone vastgesteld. Voor de zeegaten in het Waddengebied is de aannahme dat alle delen die gedurende de beschikbare meetreeksen 'in beweging' zijn geweest tot de actieve zone behoren. Dit is voor de buitendelta's van de Zuidwestelijke delta geen begaanbare weg. Daar is het opgelost door eerst te rekenen aan de actieve zone in de huidige situatie. Dit is echt het minimum. Daarnaast is er gerekend aan een maximum variant, waarin de gehele buitendelta van het afgesloten zeegat in de toekomst alsnog wordt geacht mee te doen met het verspreiden van suppleties.

Aanname:	Het Groninger Wad heeft geen suppletiebehoefte omdat er geen kustlijn zorg plaatsvindt
Onzekerheden:	Het kan zijn dat in de toekomst erosie van het wad ten oosten van Schiermonnikoog wel tot de beleidskeuze leidt dit met suppleties te gaan onderhouden.
Kwantificering:	De sedimentbehoefte van de actieve zone van het Groninger Wad is apart berekend en gepresenteerd. Het is gelijk aan de oppervlakte van de buitendelta (en eilanden) van het Groninger Wad maal de zeespiegelstijging en daarbij opgeteld de transporten naar de bekkens van het Groninger Wad. Er is geen transport vanuit de buitendelta's naar dieper water en/of het Eems-estuarium. De toename van sediment in het Eems-estuarium wordt gevoed vanuit een stuk kust dat niet tot de actieve zone behoort. Dit blijkt uit recent onderzoek.

Aanname:	De Vlakte van de Raan in de monding van de Westerschelde heeft geen sedimentbehoefte. Deze is momenteel beperkt morfologisch actief en er lijken geen aanleidingen om hier te suppleren ter ondersteuning van kustfuncties.
Onzekerheden:	Het gebied heeft in de toekomst wel een sedimentbehoefte omdat een of meer kustfuncties hierdoor anders in gedrang komen. Het gaat dan wel meedoen in het verspreiden van suppleties.
Kwantificering:	De Vlakte van de Raan (voor zover deze buiten de gebieden valt die bepaald zijn voor de actieve zone van Zuidwest Walcheren) is een extra mee te groeien oppervlakte.

Aanname:	Netto gemiddeld langjarig transport naar Westerschelde kan gebaseerd worden op analyses over de laatste 15 jaar.
----------	---

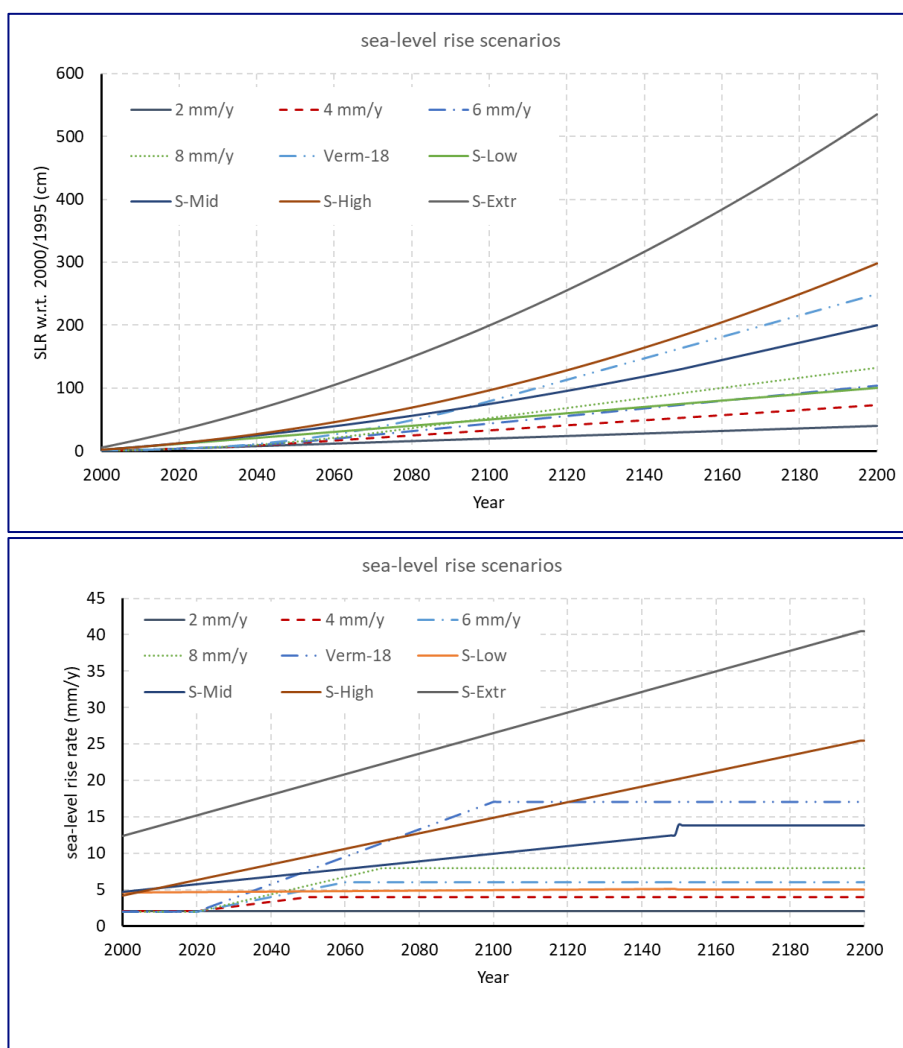
Onzekerheden:	De recente analyses geven een significante toename in de berekening van het netto transport t.o.v. de berekeningen in Kustgenese 2.0. De trend in netto toename van sedimentvolume in de Westerschelde leidt tot minimaal 2 en maximaal 4 mln. m ³ sediment per jaar dat over de lijn Vlissingen-Breskens naar binnen is getransporteerd. Het is nu niet duidelijk waar dit sediment van afkomstig is. Er zijn, naast de bijdrage van slib) drie bronnen: de actieve zones langs Zuidwest Walcheren en Zeeuws Vlaanderen en de Vlake van de Raan (incl. de geulen die ze begrenzen en niet in de actieve zone liggen).
Kwantificering:	Zie 3.7.5. De aanname is dat de helft van de meest plausibele trend (2 mln. m ³ /jaar) afkomstig is uit de actieve zones. Voor de langere termijn kan dit maximaal verdubbelen (50% van 4 mln. m ³ /jaar). Dit is de laatste regel van onzekerheden in Tabel 4-6 en Tabel 4-7.

B Transport naar bekken Waddenzee, toelichting berekeningen ASMITA

B.1 Uitgevoerde berekeningen

De vraag is hoeveel sediment er van het kustfundament naar de Waddenzee wordt getransporteerd als de zeespiegelstijging (ZSS) de waarden (zichtwaarden) van 0,5, 1, 2, 3 en 5 m bereikt. Allereerst een aantal specificaties:

- Voor de stijgsnelheden is het startjaar 1995.
- Om tot de totale hoeveelheid te komen die tot sedimentbehoefte in de actieve zone leidt is uit de berekeningen de hoeveelheid afgeleid die is geïmporteerd vanaf 2020.



Figuur B-1: Zeespiegelstijging Scenario's . S-Low (Laag), S-Mid (Medium), S-High (Hoog) en S-Extr (Extreem) zijn de vier scenario's die in deze studie zijn gebruikt, terwijl de andere scenario's zijn door Lodder et al. (2022) beschouwd. Het bovenste plaatje toont de ZSS ten opzichte van 1995 in de vier scenario's in deze studie en ten opzichte van 2000 in de door Lodder et al. (2022) gebruikte scenario's. Het onderste plaatje toont de snelheid van de zeespiegelstijging in de scenario's.

Voor een bepaalde ZSS-waarde, b.v. 1 m, is de vraag eigenlijk: Hoeveel sediment wordt er vanaf het kustfundament naar de Waddenzee getransporteerd in de periode tussen 2020 en

het jaar waarin de zeespiegel sinds 1995 met 1 m stijgt? De vraag wordt beantwoord op basis van ASMITA-modellering, waarvoor het tijdproces van ZSS nodig is. Daarom zijn er vier ZSS-scenario's gedefinieerd (Vos, 2022), zie Figuur B-1, waarin de vier scenario's zijn weergegeven samen met de scenario's die in het project Kustgenese 2.0 zijn beschouwd (zie Lodder et al., 2022).

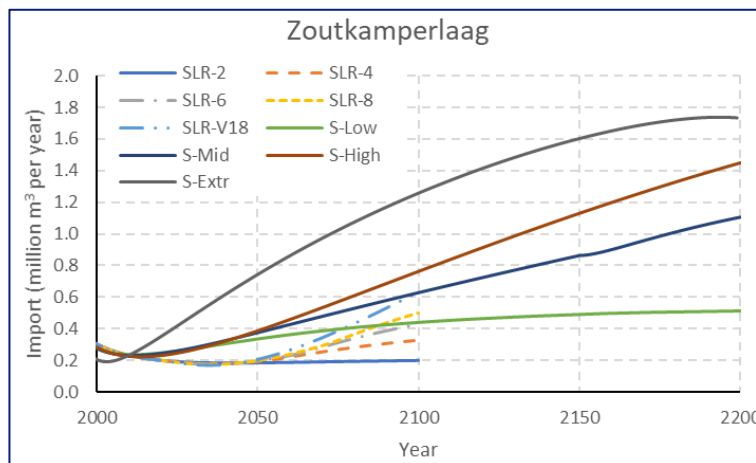
Tabel B-1 laat zien hoe de verschillende ZSS-waarden zich verhouden tot deze ZSS-scenario's. Voor 0,5 m wordt het Laag-scenario (Low) gebruikt en wordt waarde bereikt in 2100. Ook voor de ZSS-waarden 3 en 5 m wordt slechts één scenario beschouwd, het Hoog- (High) en het Extreem-scenario (Extr.). Voor de waarden 1 en 2 m worden echter twee scenario's beschouwd.

Tabel B-1: Relatie tussen SLR-waarden en SLR-scenario's

ZSS waarde	Gunstig scenario	Ongunstig scenario
0.5 m	Laag, rond 2100	
1 m	Laag, 2200	Hoog, 2100
2 m	Medium, 2200	Extreem, 2100
3 m	Hoog, 2200	
5 m	Extreem, rond 2190	

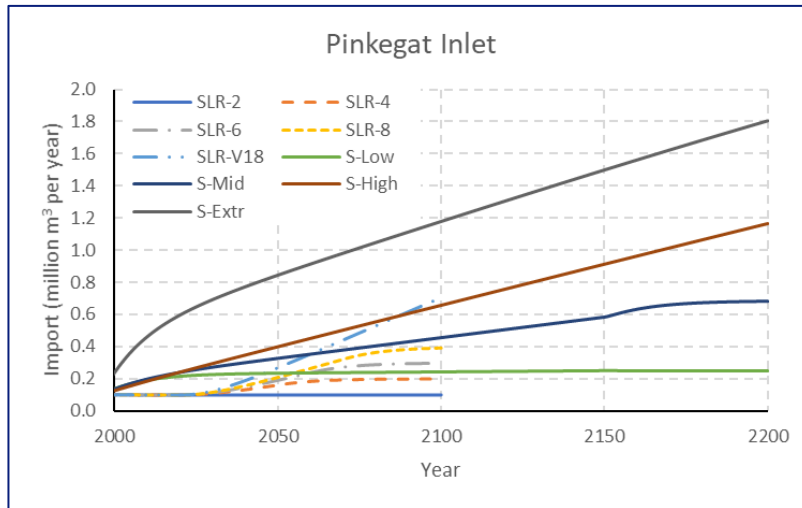
B.2 Modelresultaten

In Figuur B-2 t/m Figuur B-7 zijn de modelresultaten voor het sedimenttransport door de verschillende zeegaten weergegeven. Een positief transport is van buiten naar binnen, dus van het kustfundament naar de Waddenzee.



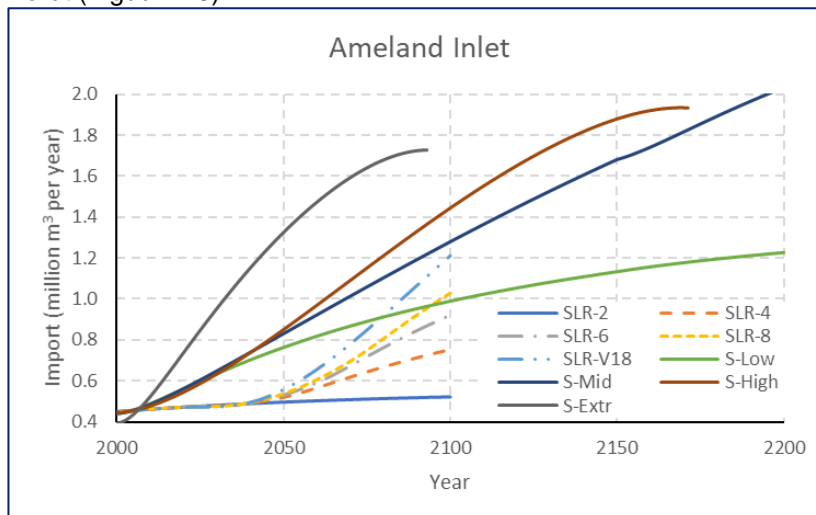
Figuur B-2: Resultaten voor sedimenttransport van kustfundament naar de Waddenzee via Zoutkamperlaag in verschillende scenario's

Voor Zoutkamperlaag is er verdrinking (plaatvolume wordt nul) opgetreden in het laatste jaar van de simulatieperiode, dus sinds 2199 (Zie Figuur B-2, simulatie is dan gestopt). Het lijkt erop dat vlak voordat de verdrinking plaatsvond een maximale import wordt bereikt..



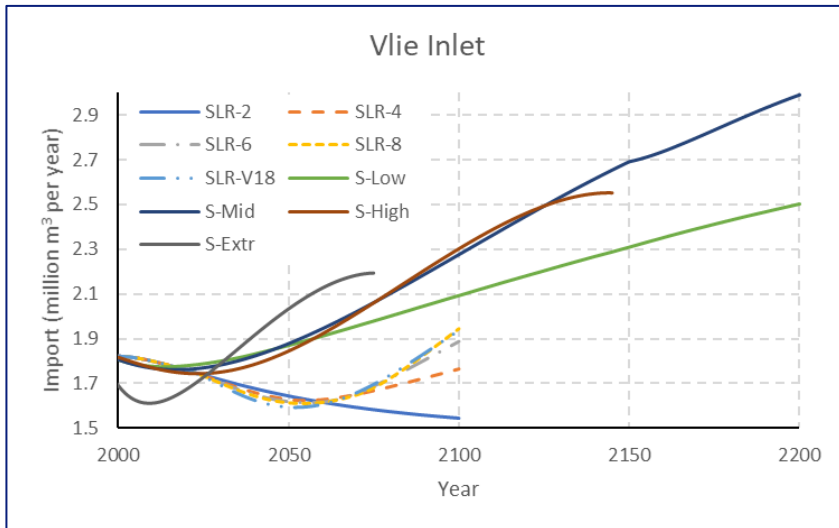
Figuur B-3: Resultaten voor sedimenttransport van kustfundament naar de Waddenzee via Pinkegat in verschillende scenario's

Voor het kleine zeegat Pinkegat veroorzaakte geen van de scenario's tot 2200 verdrinking. Voor de twee lagere scenario's, d.w.z. Laag en Medium, lijkt het dat aan het einde van de simulatie een dynamische evenwichtstoestand te zijn bereikt omdat de import constant in tijd wordt (Figuur B-3).



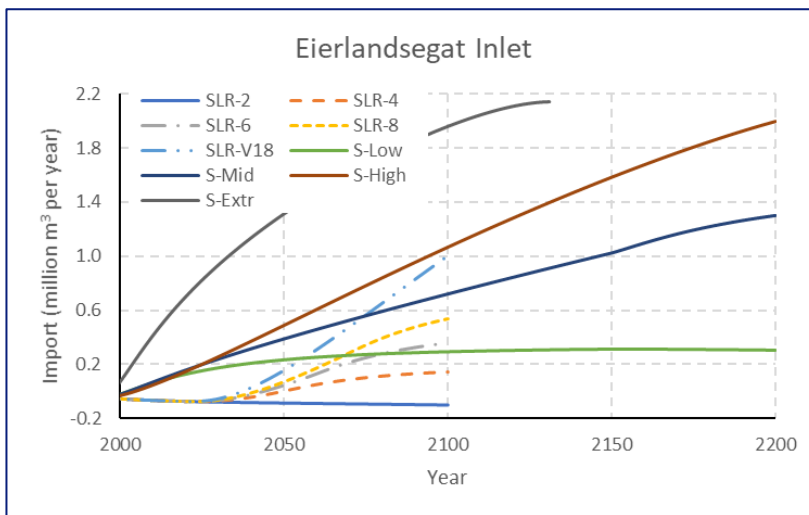
Figuur B-4: Resultaten voor sedimenttransport van kustfundament naar de Waddenzee via Amelanderveegat in verschillende scenario's

Verdrinking van Amelanderveegat treedt op bij zichtwaarden 3 en 5 m. en bij de zichtwaarde 2 m. als deze snel wordt bereikt (Figuur B-4). In beide gevallen ontwikkelt de sedimentimport zich tot een maximum, maar de twee maximumwaarden zijn niet gelijk. De maximale waarde vlak voor de verdrinking is blijkbaar niet representatief voor de transportcapaciteit van het systeem. Dit wordt ook bevestigd door het feit dat in het scenario Medium de sedimentimport stijgt boven de waarden bij verdrinking in de twee hogere scenario's.



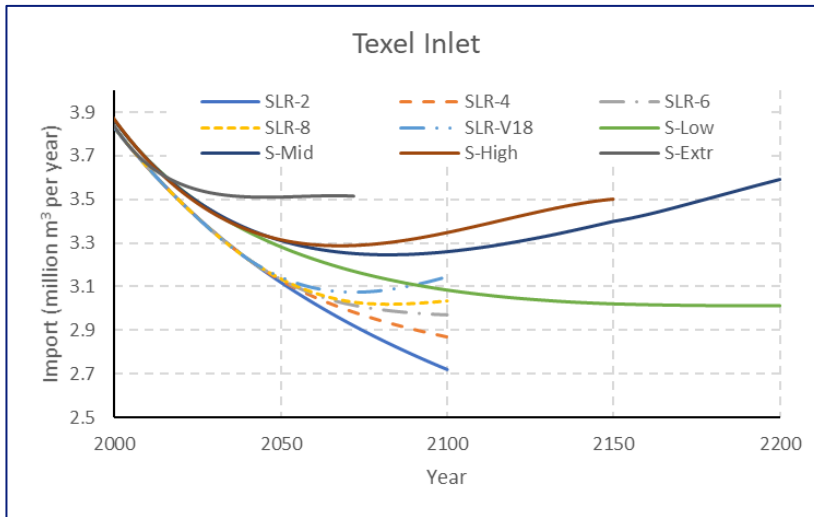
Figuur B-5: Resultaten voor sedimenttransport van kustfundament naar de Waddenzee via Vlie in verschillende scenario's

Bij het zeegat van het Vlie treedt verdrinking op in 2145 voor het scenario Hoog en in 2075 voor het scenario Extreem (Figuur B-5).



Figuur B-6: Resultaten voor sedimenttransport van kustfundament naar de Waddenzee via Eierlandsegat in verschillende scenario's

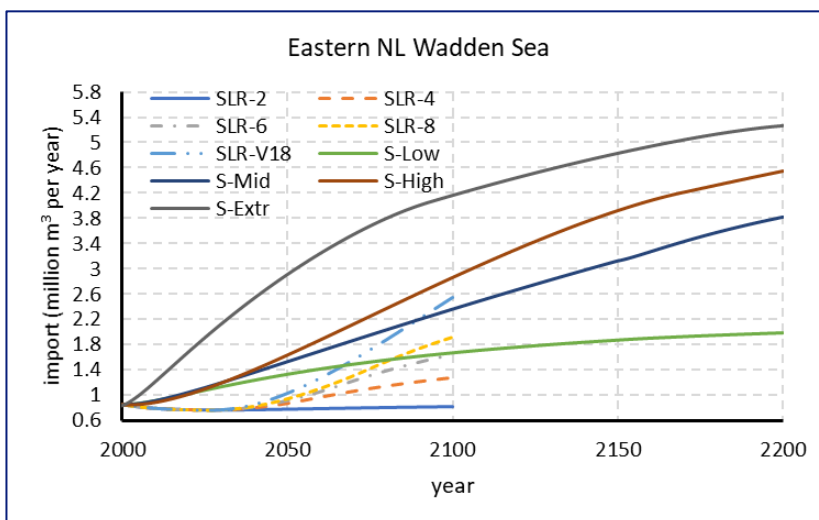
Voor het Eierlandse gat vindt verdrinking plaats in het scenario Extreme in 2131 (Figuur B-6). Alleen in het scenario Laag lijkt aan het einde van de simulatie een dynamische evenwichtstoestand te zijn bereikt.



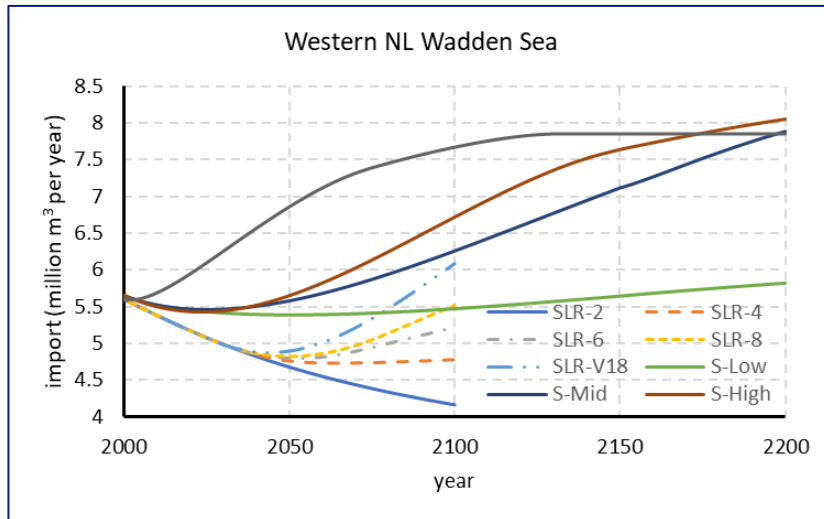
Figuur B-7: Resultaten voor sedimenttransport van kustfundament naar de Waddenzee via Marsdiep in verschillende scenario's

Verdrinking van Marsdiep treedt op in 2150 voor het scenario Hoog en in 2072 voor het scenario Extreem (Figuur B-7).

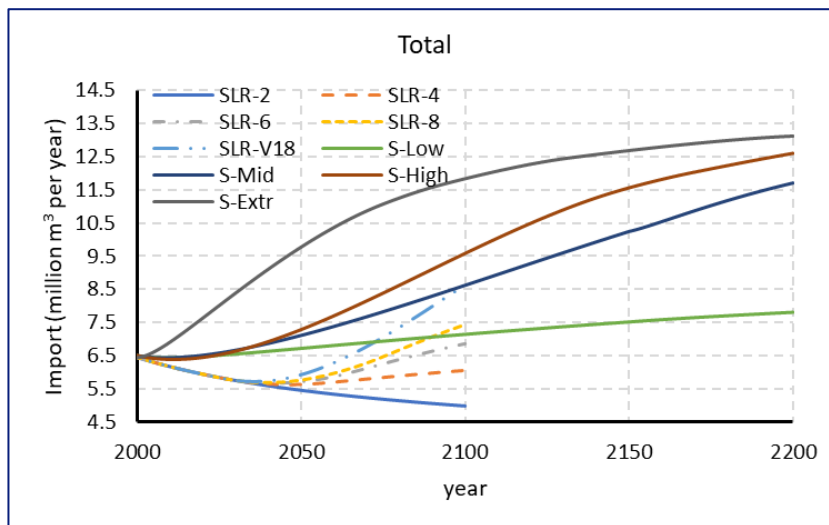
In Figuur B-8 is het berekende transport door de zeegaten in het oostelijke deel van de Nederlandse Waddenzee (Zoutkamperlaag + Pinkegat + Amelander zeegat) weergegeven. Hierbij is het transport door een zeegat na verdrinking (dus voor de periode waarin de simulatie is niet uitgevoerd) gelijk gehouden aan de waarde net vóór de verdrinking. Dezelfde resultaten voor de zeegaten in het westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee (Vlie + Eierlandse gat + Marsdiep) weergegeven in Figuur B-9, en voor alle zeegaten samen in Figuur B-10.



Figuur B-8: Resultaten voor alle zeegaten in oostelijke NL Waddenzee samen



Figuur B-9: Resultaten voor alle zeegaten in westelijke NL Waddenzee samen



Figuur B-10: Resultaten voor alle zeegaten in NL Waddenzee samen

B.3 Conclusies

Inzichten uit simulaties nieuwe scenario's:

- De conclusie dat de import minder gevoelig is voor het ZSS snelheid dan verwacht, blijft waar. Het hoogste ZSS snelheid in 2100 is nu tot 26 mm/jaar, d.w.z. factor 13 hoger dan het laagste scenario. De voorspelde import voor het hoogste scenario (S-Extr.) voor het oostelijk deel van de NL Waddenzee is ongeveer 500% van dat voor het laagste scenario (2 mm/jr), voor het westelijk deel van de NL Waddenzee ongeveer 185% en van de hele NL Waddenzee ongeveer 225%.
- De verwachte stijging van de import tot 2100 ten opzichte van de huidige situatie (2020) is voor het hoogste zeespiegelstijgingsscenario (S-Extr.) maximaal een factor 1,55 (155%), wat significant maar niet substantieel is. Merk op dat volgens dit hoogste ZSS scenario de import op dit moment (2020) al aanzienlijk is gestegen, wat deels het relatief kleine verschil tussen 2100 en 2020 verklaart. Zelfs vergeleken met de gesimuleerde import voor 2020 voor de scenario's in Lodder et al. (2022) zal de stijging slechts ongeveer 200% bedragen. Dit is nog steeds als significant te kwalificeren, maar niet substantieel, omdat voor de toename waarschijnlijk geen grote aanpassing van de suppletie strategie nodig is.

Nu terug naar de vraag: Hoeveel sediment wordt er vanaf het kustfundament naar de Waddenzee getransporteerd in de periode tussen 2020 en het jaar waarin de zeespiegel sinds 1995 0,5, 1, 2, 3 en 5 m stijgt? Het antwoord op deze vraag wordt gegeven in onderstaande Tabel B-2 voor de 6 zeegaten. Merk op dat voor de ZSS-waarden 1 en 2 m twee scenario's worden gegeven. Het hogere scenario (met snellere acceleratie) geeft een lagere sedimentimport dan het lagere scenario bij dezelfde SLR-waarde. In het hogere scenario is namelijk een kortere tijd nodig voor ZSS om dezelfde waarde te bereiken. De totale sedimentimport is dan minder vanwege de kortere tijdsperiode en omdat de sedimenttransportsnelheid minder is aangepast aan de bijbehorende zeespiegel en/of ZSS-snelheid.

Tabel B-2: Sedimentimport door de zeegaten van de Waddenzee bij verschillende scenario's van zeespiegelstijging

ZSS waarde (m)	ZSS scenario & jaar	Sedimentimport vanaf 2020 (mln. m ³)					
		Marsdiep	Eierl.	Vlie	Amel.	Pinkg.	Zoutk.
0.5	Low, 2100	257	19	152	64	19	28
1	Low, 2200	560	50	382	176	43	77
1	High, 2101	267	49	157	79	36	38
2	Mid, 2200	602	139	422	240	87	121
2	Extreme, 2100	278	113	162	111	72	67
3	High, 2200	611	205	406	258	127	149
5	Extreme, 2190	594	304	359	266	204	206

Dit maakt nogmaals duidelijk dat niet alleen de ZSS waarde telt, maar het volledige ZSS-scenario, dus het hele proces in de tijd van de ZSS-ontwikkeling.

Verder wordt opgemerkt dat de gebruikte ASMITA-modellen sediment als één enkele fractie beschouwen. Er wordt geen onderscheid gemaakt tussen zand en slib. Dit betekent dat de import van sediment zoals weergegeven in Tabel B-2 zand en slib samen betreft. Als er een onderscheid moet worden gemaakt tussen zand en slib, b.v. omdat voor de berekening van de kustsuppletiebehoefte alleen zand relevant is, kunnen de resultaten van eerder onderzoek naar de zand-slibsamenstelling van sediment in de Waddenzee worden gebruikt, zie de opmerking hierover in Bijlage A.

C Afleiden oppervlakte van de actieve zone

In deze bijlage wordt de methodiek en resultaten beschreven voor het afleiden oppervlaktes van de actieve zone ten behoeve van de berekening van de sedimentbehoefte bij zichtwaarden zeespiegelstijging.

C.1 Methodiek

In de conceptuele modellen voor sedimentbehoefte (H3) wordt er onderscheid gemaakt in verschillende deelgebieden voor de actieve zone op basis van systeemkennis; centrale eilandkust, buitendelta en eilandkop/staart (Waddenkust), smalle actieve zone (Hollandse kust) en eilandkust en buitendelta (Zeeuwse Deltakust). Om de oppervlakte van de actieve zone te kwantificeren wordt er, afhankelijk van het type deelgebied, gebruik gemaakt van JarKus-raaien³⁵ of Vaklodingen³⁶. Dit geeft twee methoden om de actieve zone te kwantificeren:

1 *Methodie actieve zone waarin nu suppleties worden verspreid*

Dit is toegepast bij kusten waar de actieve zone gekarakteriseerd is door een zeereep (eerste duinenrij), strand en ondiepe vooroever. Het gaat om de Hollandse Kust en de (centrale) eilandkusten van de Waddeneilanden en in de Zeeuwse Delta. Hiervoor worden de JarKus-raaien over de periode 1965-2022 gebruikt. In C.1.1 wordt de methodiek voor het bepalen van de landwaartse en zeewaartse begrenzing van de smalle actieve zone toegelicht.

2 *Aangepaste methode om actieve zone buitendelta's te bepalen*

De methode actieve zone buitendelta's wordt toegepast voor de buitendelta's van de zeegaten in de Wadden en Zeeuwse Delta. Het oppervlakte van de actieve zone van de buitendelta omvat ook de actieve zone van de eilandkop en -staart. Voor deze methode worden de Vaklodingen bodemkaarten over de periode 1990-2021 gebruikt. In C.1.2 wordt de methodiek voor het bepalen van de landwaartse, zeewaartse en oostelijke/westelijke begrenzing van de actieve zone van de buitendelta's toegelicht.

C.1.1 **Methodie afleiden smalle actieve zone**

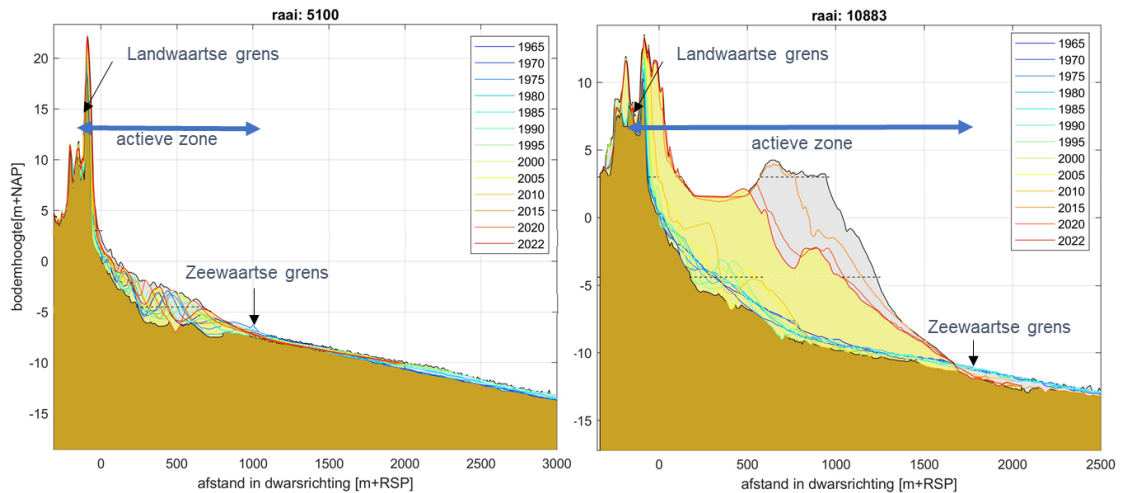
Voor de smalle actieve zone worden de JarKus-raaien over de periode 1965-2022 gebruikt. Er wordt een verschillende aanpak gebruikt voor de zeewaartse en landwaartse begrenzing van de actieve zone.

Zeewaartse begrenzing

De zeewaartse begrenzing is visueel afgeleid op basis van het buigpunt van de min of meer gelijkmatige diepe vooroever naar het steilere bankprofiel (Figuur C-1). Deze methode werkt goed voor de Hollandse Kust en centrale eilandkust in de Wadden. Bij locaties waar een sterke verandering in kustprofiel te zien is, bijvoorbeeld kustuitbouw door versterkingen als de Zandmotor (Figuur C-1), wordt het buigpunt in het profiel van de meest recente jaren aangehouden.

³⁵ JarKus metingen bevatten hoogtedata langs kustprofielen voor de periode 1965-2022. De profielmetingen worden jaarlijks opgenomen met een tussenafstand van 200-250 m en een lengte van 800-1200 m vanaf de RijksStrandPalen (RSP-lijn). De JarKus data wordt beheerd door Rijkswaterstaat.

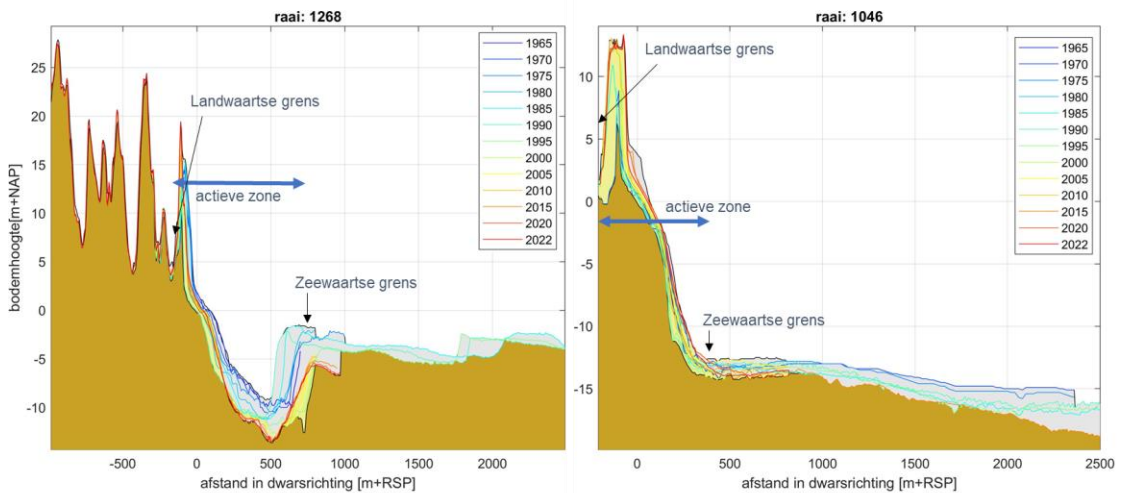
³⁶ Vaklodingen zijn bodemhoogtemetingen en worden in de Waddenbekkens elke 6 jaar gemeten, de buitendelta's in de Wadden en Deltakust worden elke 3 jaar gemeten. Deze bodemhoogte wordt dan vervolgens geïnterpoleerd op een 20 m x 20 m rooster.



Figuur C-1: Voorbeeld Jarkus-raaien waarin de afleiding van de smalle actieve zone wordt geïllustreerd. Links: raai 5100 bij Wijk aan Zee langs de Hollandse Kust, rechts: raai 10883 bij de Zandmotor.

De Zeeuwse Deltakust wordt meer gekarakteriseerd door getijgeulen welke dicht langs de kust liggen. Voor de actieve zone wordt hier in principe ook het buigpunt van de vooroever naar het steilere kustprofiel aangehouden (Figuur C-2, rechts). In het geval dat er een geul dicht langs de kust ligt, wordt de zeewaartse grens aan de zeezijde van de geul gekozen (Figuur C-2, links). Hierdoor zal de geul onderdeel zijn van het oppervlakte van de actieve zone, en resulteren in een (extra) sedimentbehoefte volgens het conceptueel model. De verwachting is dat door zeespiegelstijging er een toename in sedimentverliezen van de kustzone naar de getijgeul zal gaan plaatsvinden. Dit is een extra term in de sedimentbehoefte berekening, maar op dit moment is er geen kennis beschikbaar om deze verliezen te kwantificeren. De extra verlies term wordt ondervangen door de oppervlakte van de geul mee te nemen in de actieve zone.

Het visueel afleiden van de zeewaartse grens introduceert een onzekerheid in het aflezen. Daarnaast zit er een subjectieve component aan het aflezen, deze onzekerheid is gedeeltelijk ondervangen door twee personen onafhankelijk van elkaar de zeewaartse grens af te leiden. De totale onzekerheid voor de zeewaartse grens wordt geschat op 200 m.



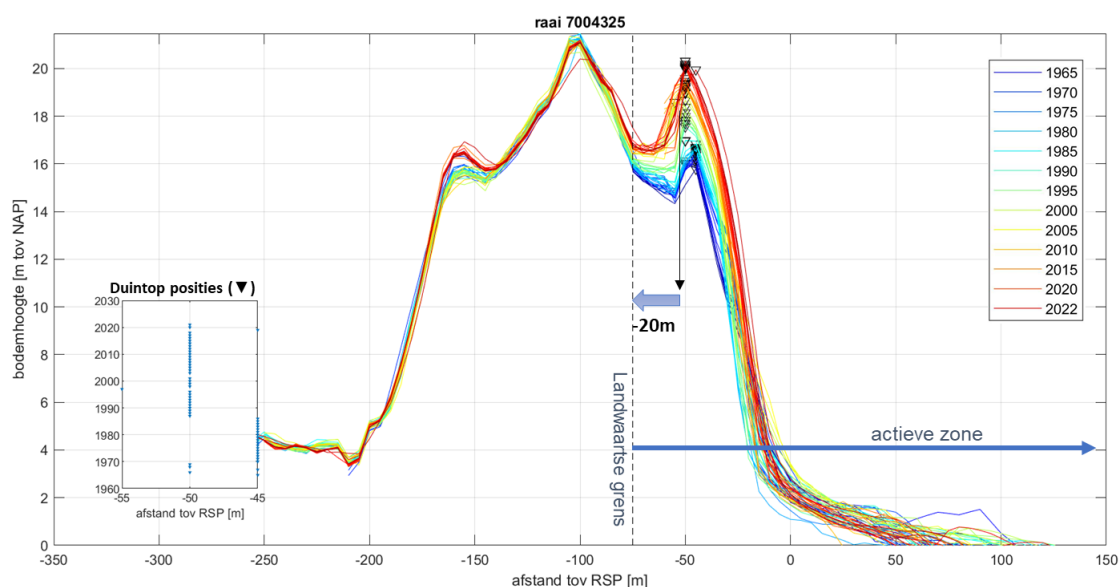
Figuur C-2: Illustratie Jarkus-raaien waarin de afleiding van de smalle actieve zone wordt geïllustreerd voor de Zeeuwse Deltakust. Links: raai 1268 bij de Kop van Schouwen met de voorliggende geul Krabbengat, rechts: raai 1046 bij Zeeuws-Vlaanderen.

Landwaartse begrenzing

Voor het merendeel van de Jarkus-raaien is er een structurele aangroei (zowel verticaal als horizontaal) van de eerste duinenrij te zien over de periode 1965-2022 (van IJzendoorn et al., 2021). De aangroei wordt veroorzaakt doordat een deel van het gesuppleerde zand in de kustzone verstuift naar de zeereep. Het is de verwachting dat de zeereep zal blijven meegroeien bij doorgaand suppleren, waardoor de zeereep onderdeel is van de actieve zone en de landwaartse begrenzing van de actieve zone bepaalt.

Voor de landwaartse begrenzing is gekozen om voor alle jaren de duintop van de eerste duinenrij te bepalen, en vervolgens het jaar met de meest landwaartse duintop als maatgevend te nemen (Figuur C-3). Het natuurlijk meegroeien van de eerste duinenrij stopt niet bij de duintop, maar ook het gebied net landwaarts van de duintop neemt in hoogte toe. Omdat een automatische afleiding van de landwaartse breedte van de zeereep lastig is wegens het onregelmatige en kustlangs variërende karakter van het duingebied, is een uniforme afstand van 20 m aangenomen. Deze 20 m is gekozen op basis van visuele analyse van de Jarkus-profielen, en geeft ook een onzekerheid in de afleiding van de landwaartse grens. De onzekerheid wordt geschat op 50 m.

De landwaartse begrenzing van de actieve zone is dus bepaald op basis van de meest landwaartse duintop sinds 1965, minus 20m landwaarts.



Figuur C-3: Illustratie van de duintop-methode om de landwaartse begrenzing van de actieve zone af te leiden. De omgekeerde driehoeken (▼) geven de duintoppen van de zeereep weer voor de Jarkus-profielen tussen 1965 en 2022. De meest landwaartse duintop minus 20m geeft de landwaartse grens van de actieve zone.

C.1.2 Methode afleiden actieve zone buitendelta's

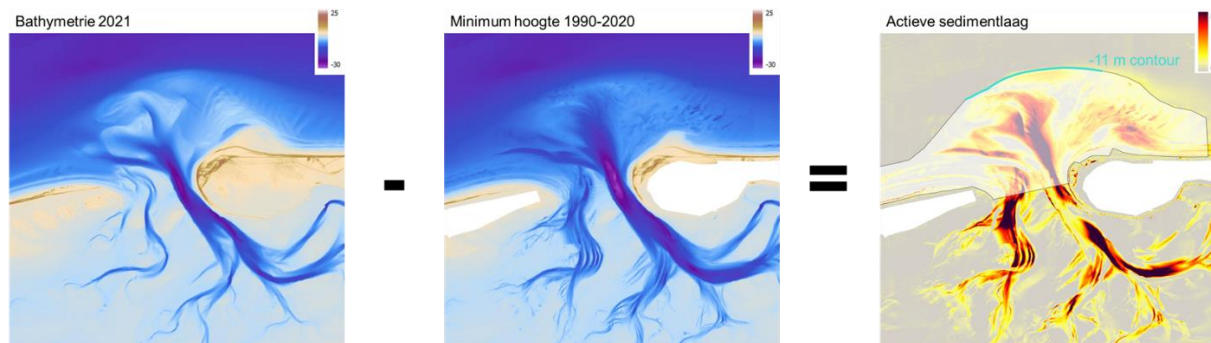
De brede actieve zone omvat de buitendelta's van de Wadden en Zeeuwse Delta. Er wordt een verschillende aanpak gebruikt voor de zeewaartse, landwaartse en oostelijke/westelijke begrenzing van de actieve zone. In Figuur C-6 en Figuur C-5 worden de verschillende begrenzings geïllustreerd voor respectievelijk de Haringvliet- en Grevelingen buitendelta's en de buitendelta van het Eierlandse Gat.

Zeewaartse begrenzing

De zeewaartse begrenzing van het actieve zone oppervlakte van de buitendelta's wordt verkregen door de 'actieve sedimentlaag' te bepalen op basis van de Vaklodingen bodemkaarten. Deze methodiek is gebaseerd op de actieve sedimentvolume benadering

door Pearson et al. (2022) en Elias (2022). De 'actieve sedimentlaag' wordt hierin uitgerekend door de sedimentdikte te berekenen als verschil tussen de gemeten bodem en de minimum bodem. De minimum bodem wordt hierbij gedefinieerd als de onderkant van de morfologische enveloppe over een representatieve tijdsperiode. Het sediment dat zich onder deze minimum bodem bevindt is over de beschouwde periode niet veranderd en heeft dus niet deelgenomen aan de morfologische veranderingen.

Voor de meest recente bodemkaart van de buitendelta (Figuur C-4, links) is het verschil met de minimum bodem over de periode 1990-2021 (Figuur C-4, midden) uitgerekend. Dit verschil is de dikte van de actieve sedimentlaag (Figuur C-4, rechts). De zeewaartse grens van de actieve zone op de buitendelta is gebaseerd op een representatieve bodemcontour voor de scheiding tussen vooroever en diepe vooroever. De zeewaartse grens van, bijvoorbeeld, de buitendelta tussen Terschelling en Ameland is vastgesteld op de -11 m contour, aangezien de dikte van de actieve sedimentlaag van de buitendelta dieper dan -11 m sterk afnam (Figuur C-4, rechts).



Figuur C-4: Bepalen zeewaartse begrenzing actieve zone van de buitendelta tussen Terschelling en Ameland. Het verschil tussen de meest recente bodemkaart (2021, linker plot) en de minimum bodem (over de periode 1990-2021, midden plot), geeft de dikte van de actieve sedimentlaag (rechter plot). De zeewaartse grens van de actieve zone is de representatieve bodemcontour waarvoor een sterke afname in de dikte van de sedimentlaag te zien is, voor Ameland is dit de -11 m contour (groene lijn in rechter plot).

Oostelijke en westelijke begrenzing met centrale eilandkust

De oostelijke en westelijke begrenzing voor de Wadden-buitendelta's is zodanig gekozen dat de buitendelta binnen de actieve zone ligt, maar de centrale eilandkust niet (oranje lijn in Figuur C-6). In de Zeeuwse Delta wordt de oostelijke en westelijk begrenzing bepaald door de Euro-Maas geul (noordelijke grens Maasvlakte), de Deltawerken (Oosterschelde-, Haringvliet- en Grevelingenmondning), Vlissingen-Breskens lijn (Westerscheldemonding) en de staatsgrens met België bij 't Zwin.

Landwaartse begrenzing

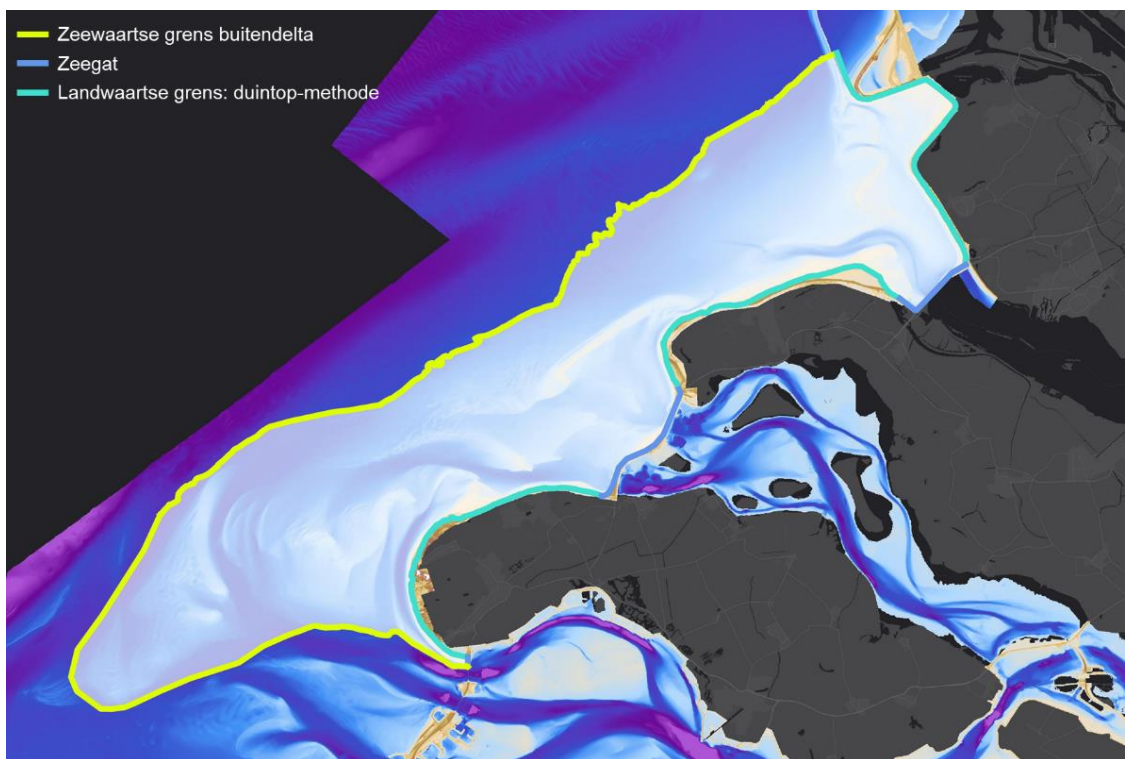
De landwaartse begrenzing ligt voor de actieve zone van de buitendelta op de eilandkop of -staart. De keuze van de begrenzing van de actieve zone wordt hier gemaakt op basis van de volgende criteria:

- Als er een primaire waterkering aanwezig is in de eilandkop of -staart, en dus de waterveiligheidsfunctie van belang is, wordt de landwaartse begrenzing bepaald middels de duintop van de zeereep conform de smalle actieve zone methode (Figuur C-3). Dit geldt bijvoorbeeld voor de hele Zeeuwse Deltakust (groene lijn in Figuur C-5) en de eilandkop van Texel (groene lijn in Figuur C-6).
- Wanneer de primaire functie natuur is, bijvoorbeeld voor de Vliehors en Boschplaat, is de aanname dat het gewenst is dat dit gebied meegroeit met zeespiegelstijging. De landwaartse grens wordt hier bepaald volgens;
 - Bij de aanwezigheid van een stuifdijk, wordt de stuifdijk als landwaartse grens gekozen. Een stuifdijk vormt een barrière voor het natuurlijk doorstuiven van (suppletie)zand naar

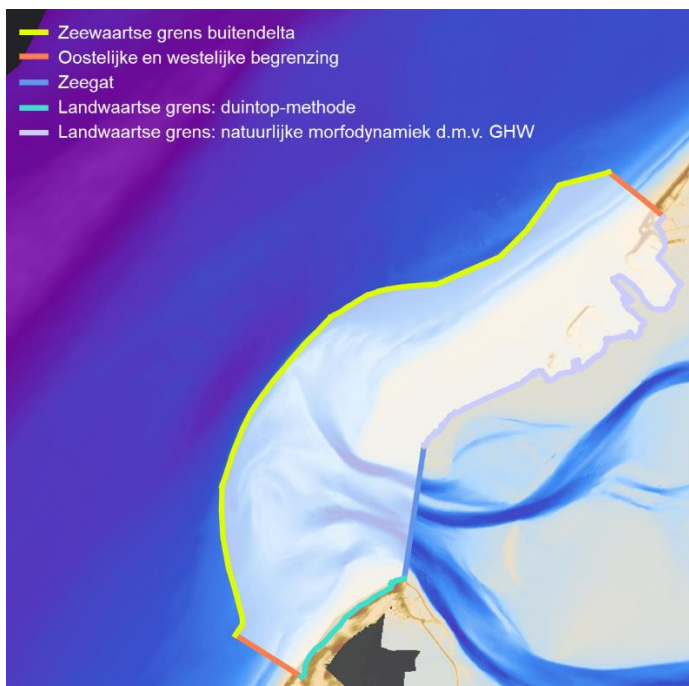
het achterliggend gebied, en heeft daarmee een vergelijkbare functie als de zeereep in de smalle actieve zone.

- Bij geen stuifdijk wordt gekozen voor de bodemcontour ter hoogte van Gemiddeld Hoog Water (GHW = +1m NAP, paarse lijn in Figuur C-6). Zonder stuifdijk zal er meer dynamiek (in de vorm van doorstuiving en washovers) zijn, en dus een groter gebied onderdeel zijn van de actieve zone. Hierbij wordt er van uitgegaan dat het gebied onder de GHW voornamelijk kwelder is dat voornamelijk wordt gekarakteriseerd door aanvoer van slib vanuit de Waddenzee, en dus niet onderdeel is van de actieve zone.

Tussen de landwaartse begrenzingen op de eilanden bevindt zich de keel van het zeegat, dit vormt ook onderdeel van de (landwaartse) begrenzing van de actieve zone (blauwe lijnen in Figuur C-5 en Figuur C-6). In de zeegaten van de Wadden is de begrenzing gekozen op de kortste afstand tussen de eilanden, zodanig dat er geen overlap is met de gebieden zoals gebruikt in de ASMITA berekeningen. In de Zeeuwse Delta ligt de begrenzing bij de Deltawerken in de Haringvlietmonding (Haringvlietdam) en Grevelingenmonding (Brouwersdam). De Oosterscheldemonding wordt niet in zijn geheel meegerekend in de actieve zone. Het zuidelijk deel van de buitendelta van de Oosterschelde ligt vrij diep en zal daarom geen sedimentbehoefte hebben.



Figuur C-5: Begrenzings van de actieve zone voor de buitendelta van Haringvliet en Grevelingen.



Figuur C-6: Begrenzings van de actieve zone voor de buitendelta van Eierlandse Gat.

C.2 Resultaten

De gekozen begrenzings van de actieve zone en resulterende oppervlaktes zijn gegeven voor de smalle actieve zones (Tabel C-1) en buitendelta's (Tabel C-2). Een visueel overzicht van de gebieden van de actieve zones zijn weergegeven in Figuur C-7, Figuur C-9 en Figuur C-9.

De methodiek voor het bepalen van de actieve zones bevat meerdere aannames en keuzes in het bepalen van de begrenzings. Dit geeft een onzekerheid in de resulterende oppervlaktes van de actieve zones. Om het effect van deze onzekerheid op de uiteindelijke sedimentbehoeftes te bepalen, is een schatting gemaakt van de onzekerheid per begrenzing. De onzekerheid voor de landwaartse begrenzing is 50 m en voor de zeewaartse begrenzing 200 m.

De onzekerheid wordt alleen bepaald als een toeslag op het oppervlakte, en dus niet als een reguliere foutmaat, bijvoorbeeld een gemiddelde waarde +/- een standaard deviatie. De smalle actieve zone wordt in deze studie gezien als het oppervlakte dat minimaal zal moeten meegroeien met zeespiegelstijging. Het is niet de verwachting dat de actieve zone in oppervlakte zal afnemen in de toekomst.

Tabel C-1 Smalle actieve zones, resulterende oppervlakte inclusief onzekerheidsmarge.

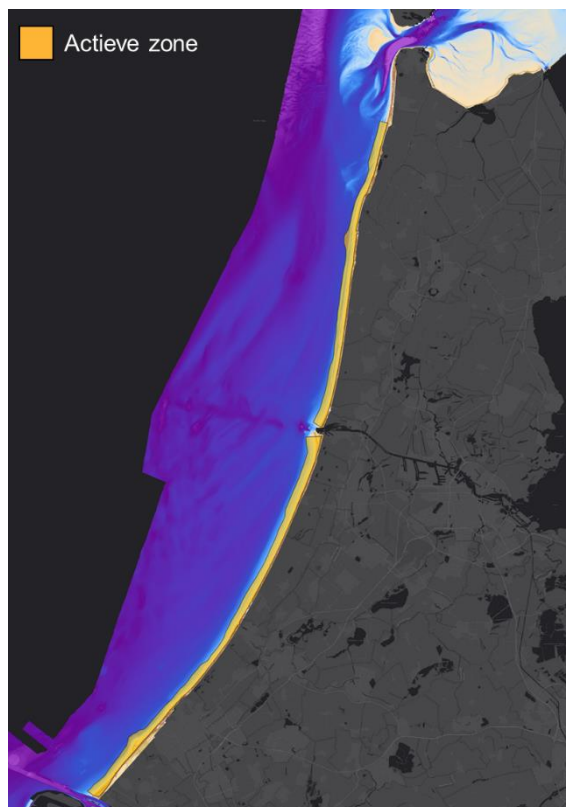
Gebied	Kustvak	Oppervlakte actieve zone [km ²]	Oppervlakte actieve zone, incl onzekerheid [km ²]	Onzekerheid [%]
Centrale eilandkust Wadden	Schiermonnikoog	18,2	20	12%
	Ameland	24,7	28	13%
	Terschelling	20,6	23	12%
	Vlieland	6,1	7	21%
	Texel	26,4	31	17%
	Totaal		96,0	109,7

Hollandse Kust	Noord: IJmuiden – Groote Keeten	53.3	64.6	21%
	Zuid: Hoek van Holland - IJmuiden	74.1	89.7	21%
	Totaal	127.4	154.2	21%
Deltakust eilandkust	Maasvlakte	7,0	8.8	26%
	Voorne	4,2	6.4	52%
	Goeree	12,1 (oost), 4,2 (west)	21.0	29%
	Schouwen	5,4 (noord), 7,7 (kop)	17.8	36%
	Walcheren	17,9 (N-Beveland), 87,1 (zuidwest)	110.4	5%
	Zeeuws-Vlaanderen	10,1	13.9	38%
	Totaal	155,7	178,4	15%

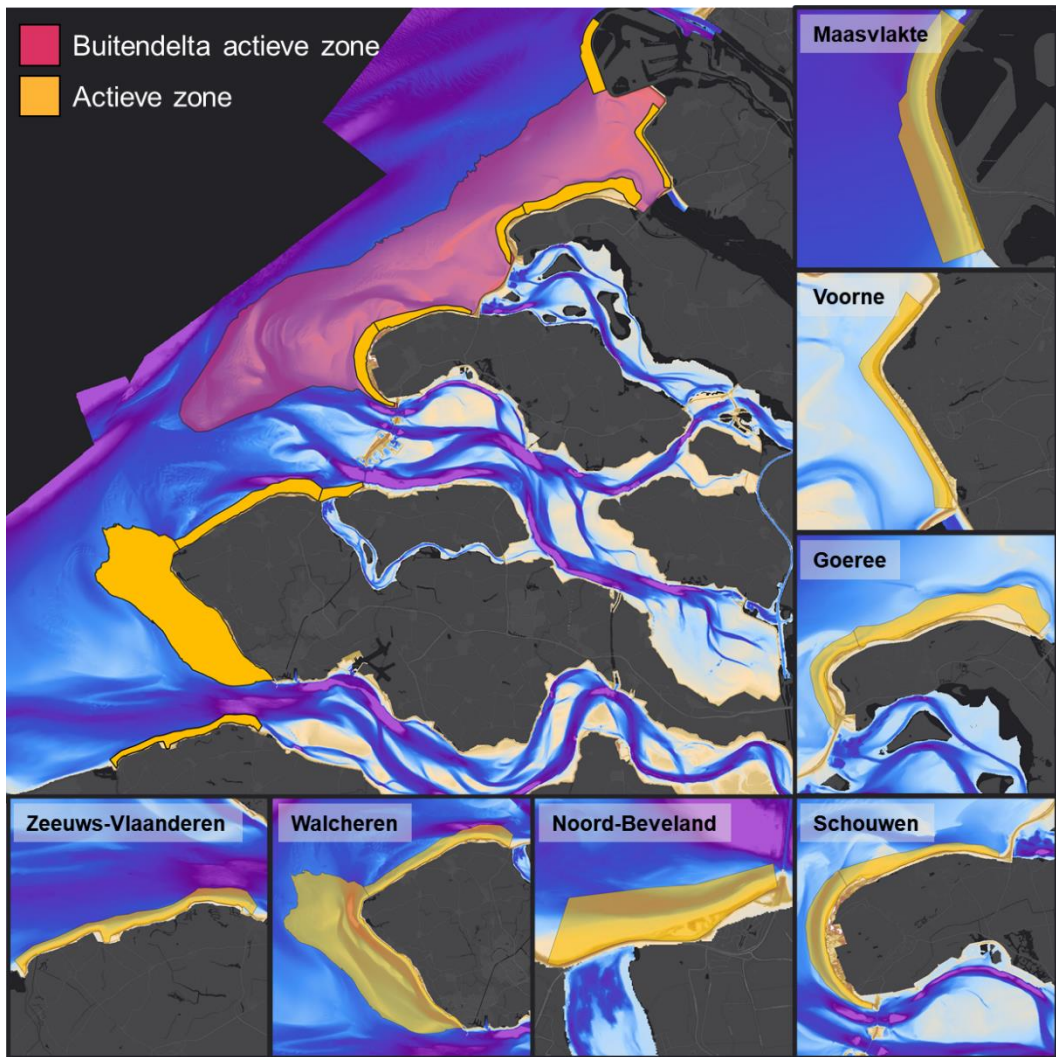
Tabel C-2 Wadden buitendelta's actieve zones, keuze in begrenzingen en resulterende oppervlakte.

Buitendelta	Zeewaartse grens actieve zone (bodemcontour +jaar bodem)	oostelijke en westelijke begrenzing met centrale eilandkust (Jarkus raainr.)	Landwaartse grens op de eiland kop/staart	Oppervlakte actieve zone [km ²]
WADDEN BUITENDELTA				
Zeegat van Texel	-13 m NAP, 2019	Noord-Holland: raai 1000 Texel: raai 1190	Kop Noord-Holland: duintop Texel (de Hors): duintop	144,1
Eierlandse gat	-10 m NAP, 2020	Texel: raai 2800 Vlieland: raai 4098	Kop Texel: duintop Vlieland (Vliehors): GHW, +1m NAP	43,5
Zeegat van het Vlie	-10 m NAP, 2019	Vlieland: raai 4591 Terschelling: raai 1100	Kop Vlieland: duintop Terschelling (Noordsvaarder): duinboog	133,6
Zeegat van Ameland	-11 m NAP, 2021	Terschelling: raai 2100 Ameland: raai 1100	Terschelling (Boschplaat): stuifdijk Kop Ameland: duintop	93,7
Pinkegat	-6 m NAP, 2018	Ameland: raai 2400 Oostelijke grens ligt door het Westgat	Ameland (Hon): GHW +1m NAP Engelsmanplaat: 0 m bodemcontour	28,5
Zoutkamperlaag	-8 m NAP, 2018	Schiermonnikoog: raai 700 Westelijke grens ligt door het Westgat	Schiermonnikoog: duintop	50,1
Groninger Wad	-10 m NAP, 2019	Schiermonnikoog: raai 1600 Oostelijke grens ligt door het Horsborngat	Schiermonnikoog (Balg): GHW +1m NAP	80,0 (zie 3.5)
Eems-Dollard (geen buitendelta)	-1 m contour, 2020 (bankengebied Hond en Paap + Dollard)	Eemshaven Landsgrens met Duitsland	-	108,0
DELTAKUST BUITENDELTA				
Haringvliet	-12 m NAP, 2021	Maasvlakte: raai 382 Haringvlietdam	Maasvlakte, Voorne, Goeree: duintop	406,8

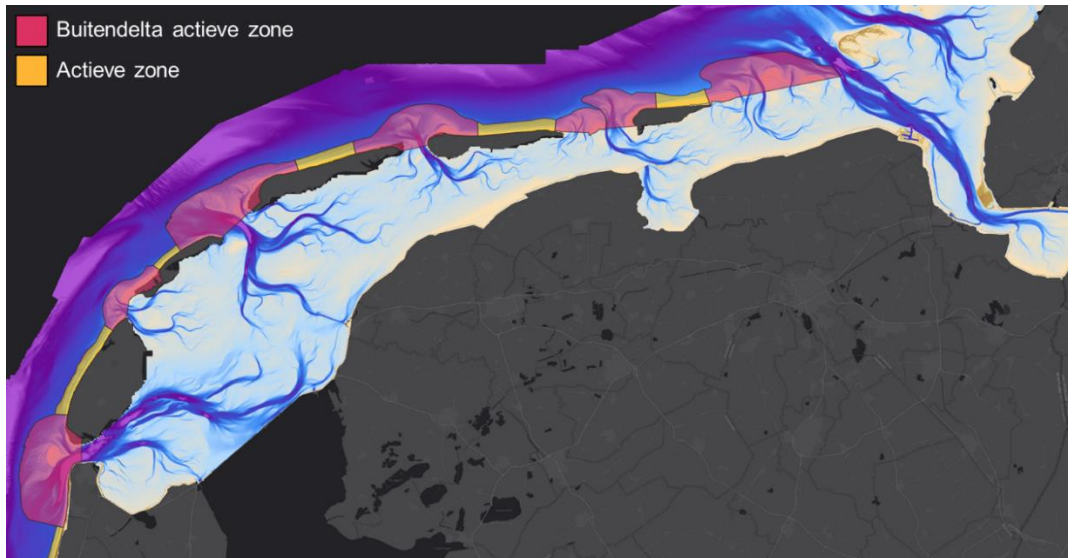
Grevelingen	-10 m NAP, 2019	Haringvlietdam Brouwersdam	Goeree, Schouwen: duintop	
Oosterschelde	-16 (noord)/-18 (zuid) m NAP, 2019	Brouwersdam Oosterscheldekering	Schouwen: duintop	
Westerschelde				0
Vlakte van de Raan	-10 m NAP, 2020	-	-	167,6



Figuur C-7 Overzichtskaat van de resultaten van de actieve zone van de Hollandse Kust (oranje).



Figuur C-8 Overzicht resultaten begrenzing actieve zones inclusief buitendelta's (rode vlakken) en smalle actieve zones (oranje vlakken) in de Zeeuwse Delta.



Figuur C-9 Overzichtskaart resultaten begrenzing actieve zones buitendelta's (rode vlakken), langs de rechte delen van een eilandkust (oranje vlakken) en Eems-Dollard (gele vlakken) bij het Waddengebied.

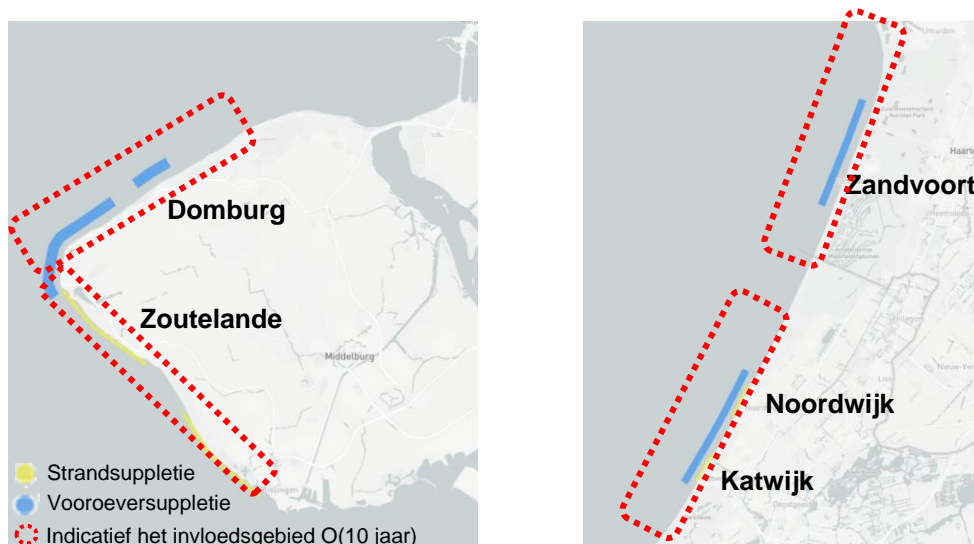
D Onderzoek zandtransporten vooroever

Onderdeel van het vervolg van het project Zandige Kust is het analyseren van de sedimentbalans van de Nederlandse kust. In 2.3.3 is hier al aandacht aan besteed. Om die balans beter te kunnen uitwerken is het nuttig om ook gebruik te maken van transportberekeningen in de Nederlandse kustzone.

D.1 Transporten in de actieve zone

De sedimentbehoefte van de actieve kustzone wordt niet alleen bepaald door de noodzaak om mee te groeien met de zeespiegelstijging, maar ook door interne herverdeling binnen de kustsecties die zorgt voor erosie bij verschillende kustplaatsen/bolwerken (o.a. Domburg). Hier vindt aanzienlijke erosie plaats als gevolg van kustlangse herverdeling door golfgedreven stromingen. Deze herverdeling vindt plaats op de tijdschaal van vele honderden tot duizenden jaren, en zal niet snel naar een evenwicht gaan. Daarom wordt bovenop de meegroeicapaciteit ter compensatie van zeespiegelstijging ook rekening gehouden met de interne herverdeling binnen de kustsecties waar de ligging van de BKL nog geen morfologisch impliceert ('bolwerken', zie 3.2.4).

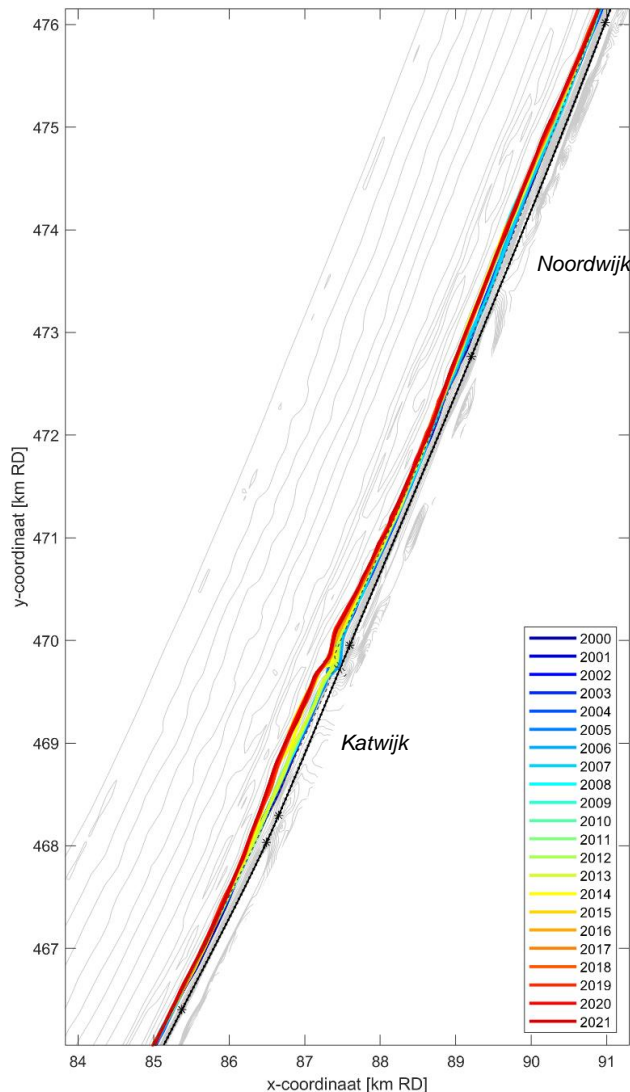
Opgemerkt moet worden dat een deel van het sediment dat bedoeld is voor het meegroeien van de kust met de zeespiegel gebruikt kan worden voor onderhoud van de eroderende bolwerken. Indirect zal een deel van het sediment ook bijdragen aan het meestijgen van het omliggende deel van de kustzone. Welk deel daadwerkelijk bruikbaar is vooral zowel de bolwerken als het meegroeien, is echter verschillend per kustsectie. Belangrijk is om daarbij mee te nemen dat 1) soms een groter volume bij de bolwerken in een kustvak dient te worden gesuppleerd dan de benodigde sedimentbehoefte voor meestijgen met de zeespiegel van het kustvak en 2) er ook andere gebieden zijn in de kustsectie die niet op indirecte wijze kunnen meegroeien als gevolg van de suppleties bij de bolwerken, of waarvoor dit te lang zou duren, en waarvoor dan additionele suppleties nodig zijn (bijv. op enige afstand van de bolwerken). In Figuur D-1 wordt de locatie aangegeven van een aantal bolwerken én indicatief het invloedsgebied van deze suppleties over ~10 jaar (op basis van een uitbreiding van enkele honderden meters per jaar). Deze door de bolwerksuppleties beïnvloede gebieden groeien sneller mee dan de rest van het kustvak.



Figuur D-1 Voorbeeld van locaties waar relatief veel gesuppleerd wordt langs de kust van Walcheren en Rijnland, met suppleties voor de periode 2013 tot 2018 en indicatief invloedsgebied over circa 10 jaar.

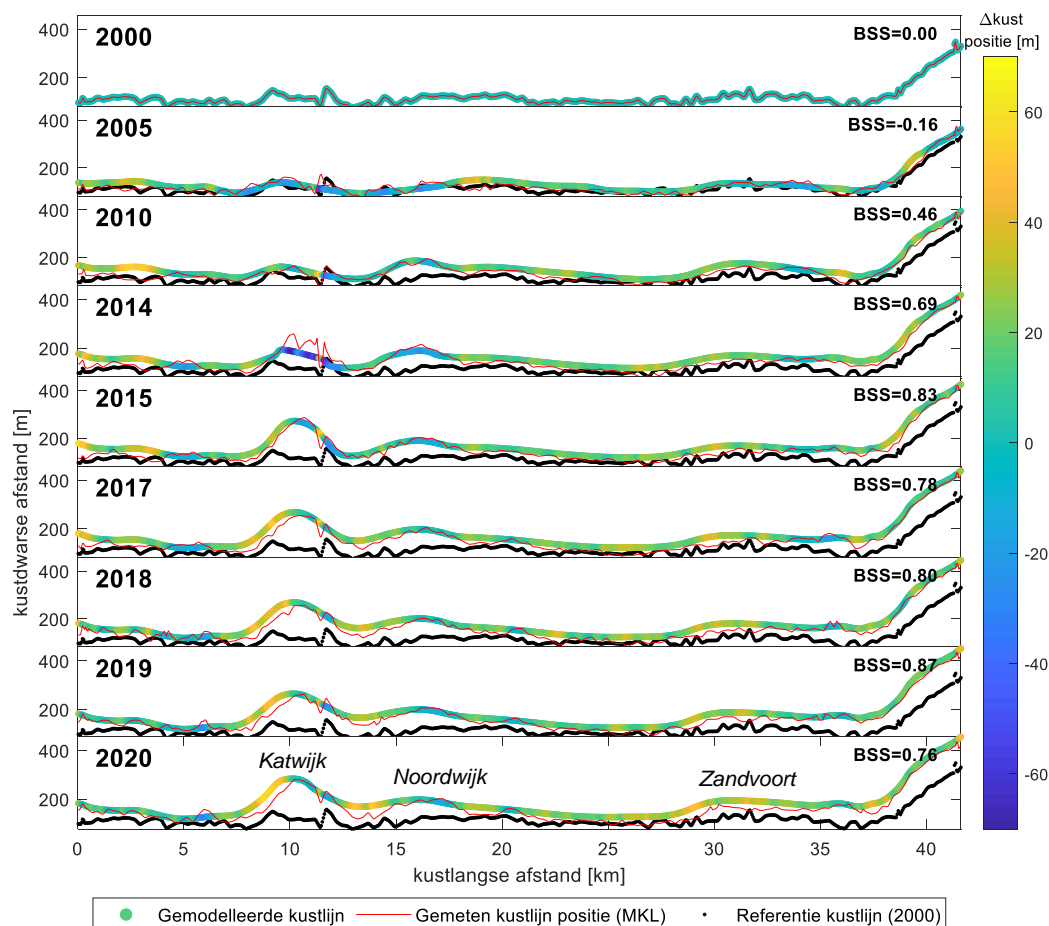
Op dit moment is er een toeslag gebruikt in de berekening van de sedimentbehoefte voor het aanvullende benodigde sediment bij de bolwerken, welke geschat is op basis van ervaring met suppleren en expert-beoordeling van de benodigde volumes voor een (beperkt aantal) kustplaatsen. Om een nauwkeuriger analyse te kunnen doen van de additionele sedimentbehoefte als gevolg van herverdeling van sediment zijn berekeningen van transporten in de kustzone essentieel. Hiermee kan worden ingeschat wat de minimaal benodigde suppletiebehoefte is voor het herverdelen binnen het kustvak, wat waarschijnlijk anders is dan de hoeveelheid die is gesuppleerd in de afgelopen jaren. Ook kan worden bepaald in welke mate het sedimentvolume bedoeld voor 'meegroeien met de zeespiegel' al afdoende is om de bolwerken te onderhouden.

Voor alle kustsecties van de Nederlandse kust is een analyse gedaan van de ontwikkeling van de kustzone tussen 2000 en 2020 (zie voorbeeld voor Rijnland in Figuur D-2). Deze gegevens worden gebruikt als referentie en validatie van modelberekeningen van kustverandering.



Figuur D-2 Voorbeeld verandering kustpositie van 2000 tot 2021 voor een deel van de Zuid-Hollandse kust

Het kustlangs transportmodel UNIBEST is toegepast om de kustlijnontwikkeling van kustvakken door te rekenen op basis van golf- en getijgedreven transport voor de periode 2000 tot 2020 (zie voorbeeld voor Rijnland in Figuur D-3). In deze simulaties worden de suppleties in meegenomen, aangezien deze de kustligging voor een groot deel bepalen.



Figuur D-3 Voorbeeld van de ontwikkeling van de Rijnlandse kust in het model en de data ten opzichte van een referentielijn die in de eerste duinenrij van Rijnland ligt.

Door deze analyses kunnen de transporten tussen deelgebieden van de sedimentbalans (bijv. tussen Noord-Holland en de Marsdiep buitendelta) worden geschat. Ook is het mogelijk om scenarioberoevingen te doen op basis van het model die informatie geven over het (minimaal) benodigde sedimentbehoefte als gevolg van interne herverdeling binnen het kustvak én de mate waarin de voor meegroeien al beschikbare sedimentvolumes hier al afdoende voor zijn.

D.2 Transporten op de diepe vooroever

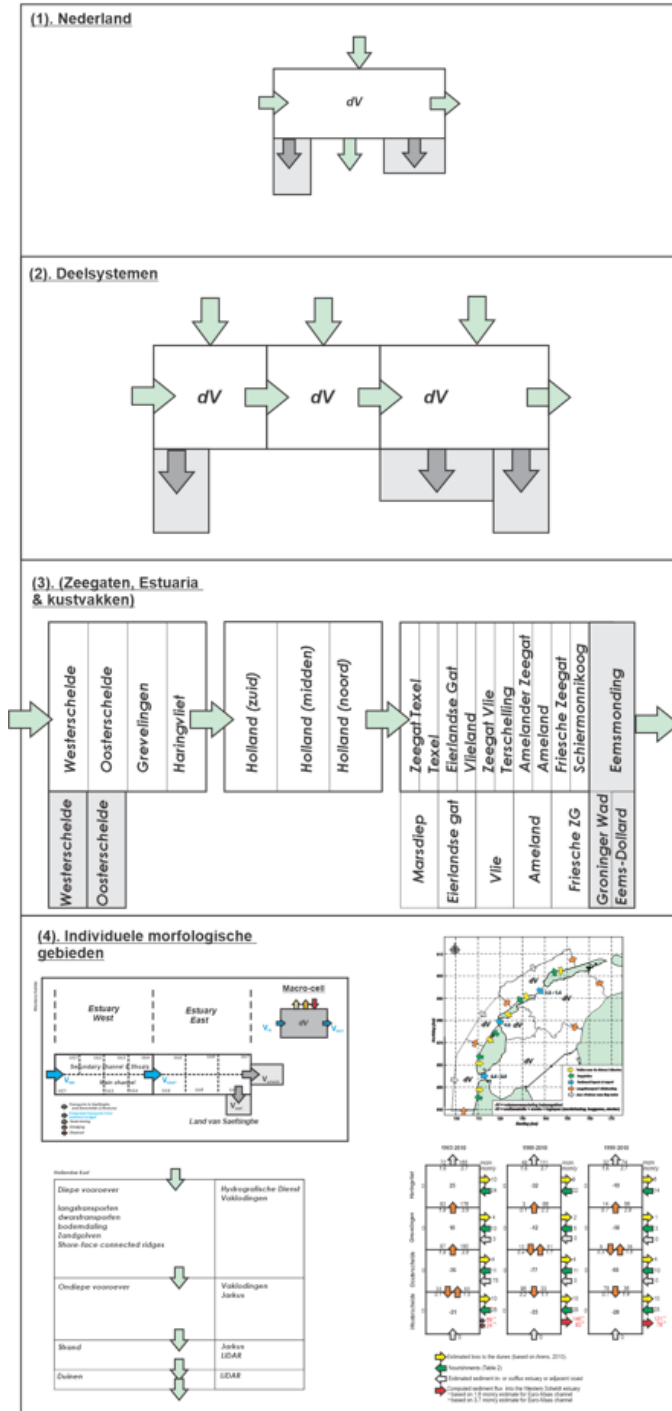
De transporten op de vooroever zijn door Grasmeijer et al. (2019) geanalyseerd. Hiervoor is gebruik gemaakt van lokale transportberekeningen die voor een groot aantal locaties op de vooroever zijn uitgevoerd. Het model maakt gebruik van tijdseries van golfcondities uit een transformatiematrix voor de Nederlandse kust (Huisman et al. 2019), en getijcondities uit het model voor de het Nederlandse continentale plat DCSM (Zijl et al., 2018).

Op basis van de analyses wordt een beeld verkregen van het kustdwars en kustlangs transport, en de bijdrage daarvan aan de uitwisseling tussen eenheden van de sedimentbalans. Opvallend is dat het kustlangse transport op diep water ongeveer 10x groter is dan het kustdwars transport. De analyses geven vooral een goed beeld van de relatieve verhoudingen van kustlangstransport tussen regio's. Dit is zeer nuttig voor de interpretatie van de veranderingen in sedimentvolumes die we zien op de vooroever deelgebieden van de sedimentbalans. Kustdwars transport is hoofdzakelijk landwaarts in de modellering, wat verondersteld dat er (volgens het model) maar beperkt rekening gehouden moet worden met

een offshore kustdwars verlies als gevolg van het in recente jaren steiler worden van het kustprofiel naar de actieve zone toe. Dit is echter nog voorwerp van discussie, omdat er aanwijzingen zijn dat kustdwars wordt overschat in dit model. Verondersteld wordt dat modelresultaten (kustlangse transporten) in combinatie met de gegevens van de sedimentbalans een redelijk goed beeld kunnen geven van de netto kustdwarse uitwisseling (verlies) vanuit de actieve zone naar dieper water.

E Methodiek sedimentbalans

Op basis van de schaalcascade die is geïllustreerd in Figuur 3-2 is een aanpak uitgewerkt op basis van zogenaamde sedimentboxen voor het opnieuw opstellen van de zandbalans van de Nederlandse kust. Figuur E-1 geeft hier een beeld van. De aanpak is ook gebruikt om het effect van onzekerheden in de data op sedimentbehoefte te toetsen.



Figuur E-1: methodiek sedimentboxen

De conceptuele modellen en sedimentbalansen op niveau 3 zijn leidend. Ze bouwen voort op eerder werk in projecten als KPP BenO Kust en KPP Schelde-estuarium. Er zijn verschillende typen kustvakken:

- Zeegaten en eilanden waddengebied, transporten naar bekkens (en wat tussen bekkens)
- Langs de rechte Hollandse kust
- Voormalige buitendelta's bekkens Zuidwestelijke Delta
- Monding Westerschelde, achterliggend estuarium, aanliggende kusten

Voor elk kustvak is een sedimentbalans nodig ter verbetering van het conceptueel model ervan en ter kwantificering van de transporten in en uit het vak. Aandachtspunten hierbij zijn:

- Een deel van de vragen en methoden zijn 'algemener' dan voor één kustvak
- Langs welke morfologische elementen worden de grenzen gelegd?
- Weten waar en hoeveel sediment is ingebracht (en onttrokken)
- Het in samenhang blijven duiden van de morfologische ontwikkelingen en de sedimentbalans. Hiervoor zal naar schaalniveau 4 moeten worden gekeken.

Op schaalniveau 4 onderscheiden we de morfologische elementen. Ontwikkeling van deze elementen stuurt de gebruiksfuncties. Sedimentbeheer heeft direct morfologische effecten op de korte termijn en op dit niveau. In de conceptuele modellen komen de volgende voor:

- Buitendeltageulen (verschillende accenten in de Wadden en Zuidwestelijke delta)
- Ondiepere delen in kustvakken bij/rondom een getijsysteem
- Banken en troggen
- De BKL-zone
- Duinen
- Geulen en intergetijdegebieden (platen, slikken, schorren/kwelders) in estuaria en Waddenzee



Kennisprogramma Zeespiegelstijging

Sedimentbehoefte Nederlands kustsysteem bij toegenomen zeespiegelstijging

In opdracht van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging Ministerie Infrastructuur en
Waterstaat / Deltacommissaris