

Zand en Zee in Balans

Technisch Eindrapport Zandige Kust (Synthese)



Zand en Zee in Balans

Technisch Eindrapport Zandige Kust (Synthese)

Auteur(s)

Marcel Taal

Edwin Elias

Bas Huisman

Ad van der Spek

Ellen Quataert

Nienke Vermeer

Zheng Wang

Met bijdragen van RWS-WVL

Laura Brakenhoff

Harry de Looff

Quirijn Lodder

Carola van Gelder-Maas

Met bijdrage van Arcadis NL

Jelmer Cleveringa

Zand en Zee in Balans

Technisch Eindrapport Zandige Kust (Synthese)

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Harry de Looff, Laura Brakenhoff
Referenties	
Trefwoorden	

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	28-02-2025
Projectnummer	11207897-002
Document ID	11207897-002-ZKS-0008
Pagina's	187
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

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

Samenvatting

Dit rapport is opgesteld in het kader van het RWS-onderzoeksprogramma “*Zandige Kust*”. Het presenteert kennis voor de uitwerking van de huidige strategie van het handhaven van de kustlijn voor de komende 15 jaar (‘aanscherpen van het beleidsadvies *Kustgenese 2.0*’). De huidige strategie richt zich zowel op veiligheid tegen overstromingen (op korte en lange termijn) als op het duurzaam handhaven van functies en waarden van kust- en duingebied. Drie cruciale elementen in de tactische en operationele uitwerking van die strategie zijn: (i) meewerken met de natuur (zacht waar het kan), (ii) handhaven van de kustlijn met als referentie de BasisKustLijn (BKL) en (iii) zorgdragen voor de sedimentbalans van de kust op lange termijn (voldoende grote gemiddelde jaarlijkse hoeveelheid aan suppleties). Dit rapport richt zich in het bijzonder op het bepalen van die gemiddelde jaarlijkse hoeveelheid, voor de Nederlandse kust als geheel en voor te onderscheiden delen ervan. Met deze kennis is het mogelijk verschillende beleidsvarianten te ontwikkelen voor de komende 15 jaar.

De theoretische gemiddelde jaarlijkse behoefte aan suppleties volgt het principe dat voor elk deel van de kust voldoende gesuppleerd moet worden om de stijging van de zeespiegel en het netto transport uit het gebied te compenseren. Deze ‘rekenregel’ is in dit rapport toegepast met de aannames conform *Kustgenese 2.0*, met een rekenkundig kustfundament, en met het concept van de actieve zone. Dit is de zone die zich morfologisch samenhangend gedraagt onder invloed van suppleties, op een tijdschaal tot in ieder geval 35 jaar, sinds 1990. Dat betekent ‘vanaf het jaar dat het huidige Nederlandse kustbeleid vorm kreeg’. De theoretische behoefte is vastgesteld voor zowel deelsystemen (Deltakust, Hollandse Kust en Waddenkust) als voor de verschillende ‘actieve zones’.

Naast de theoretische behoefte brengt dit rapport, voor dezelfde delen van de kust, ook de historische behoefte in beeld: hoeveel is er de afgelopen jaren tot decennia gemiddeld per jaar gesuppleerd.

Alle berekeningen zijn in een synthese bij elkaar gebracht om de jaarlijkse behoefte aan sediment te bepalen. Eerst is voor elk deel van de kust afzonderlijk bepaald of de theoretische behoefte of de hoeveelheid die historisch is gesuppleerd meest representatief is voor de komende 15 jaar. In de meeste gevallen zijn dat de historische suppletievolumes. Voor heel Nederland telt dit op tot ca. 11,5 miljoen m³/jr., verder te verdelen in iets meer dan 3 miljoen m³/jr. voor de Deltakust, 3,5 miljoen m³/jr. voor de Hollandse kust en bijna 5 miljoen m³/jr. voor de Waddenkust.

De analyses die voor dit rapport zijn gedaan laten zien dat de belangrijkste bijdrage aan de behoefte aan sediment momenteel de netto transporten zijn. Dat is te zien op het niveau van één of enkele kilometers kustlijn. Op die schaal is er vaak transport binnen de actieve zone of naar een aangrenzende actieve zone, maar het kan ook gaan om netto transport loodrecht op de kustlijn, naar een voorliggende geul. De nood aan suppleties wordt langs de Deltakust en Hollandse kust grotendeels gestuurd door de ligging van de BasisKustLijn. Hierdoor is er op een hoger schaalniveau soms netto uitbouw van de kust, terwijl lokaal suppleties nodig blijven. Langs de Waddenkust domineren ook de netto transporten, maar gaat het voornamelijk om het zand dat netto naar de Waddenzee gaat.

Inhoud

Samenvatting	4	
1	Achtergrond / doel	10
1.1	Doelstelling	10
1.2	Uitwerking vraagstelling	10
1.2.1	Het Nederlands kustbeleid met hiërarchie in doelen	10
1.2.2	Prioritaire kennisleemten	11
1.2.3	Belangrijkste bouwstenen (voorgaande rapportages)	12
1.2.4	Korte samenvatting voorgaande rapportages (bouwstenen)	13
1.3	Waar verwijzen veel gebruikte begrippen precies naar?	16
1.4	Opbouw	17
2	Denkmodellen / aanpak	18
2.1	Werken volgens de schaalcascade	18
2.2	Conceptueel model voor sedimentbehoefte lange termijn (Rekenregels)	21
2.3	Actieve zone	24
2.3.1	Beschrijving van het denkmodel en geldigheid voor de aaneengesloten kusten	24
2.3.2	Aanpassing op het denkmodel bij kustplaatsen.	26
2.3.3	Beschrijving van het denkmodel voor kusten met een geul in nabijheid	27
2.3.4	Actieve gebieden, definities	28
2.4	Berekenen sediment- en suppletiebehoefte	29
3	Kennis deelsysteem Deltakust	32
3.1	Hele Deltakust	32
3.2	Rondom monding Westerschelde	34
3.2.1	Overzicht	34
3.2.2	Kust van Zeeuws-Vlaanderen	35
3.2.2.1	Karakteristieken	35
3.2.2.2	Ontwikkelingen – Zwakke Schakels	37
3.2.2.3	Ontwikkelingen sedimentvolumes	38
3.2.3	Zuidwest Walcheren	39
3.2.3.1	Wel of niet beschouwen als actieve buitendelta?	39
3.2.3.2	Te onderhouden kuststrook langs Zuidwest Walcheren	39
3.2.3.3	Bankengebied voor de kust van Zuidwest Walcheren	39
3.2.3.4	Oostgat en Sardijngeul	40
3.2.3.5	Ontwikkelingen sedimentvolumes Zuidwest Walcheren	40
3.2.4	Het centrale deel: Wielingen en Vlake van de Raan	40
3.2.5	Uitwisseling met Westerschelde	41
3.2.6	Sediment- en suppletiebehoefte monding Westerschelde	41
3.3	Rondom monding Oosterschelde	43
3.3.1	Overzicht	43
3.3.2	De kusten ten zuiden van de monding	45
3.3.2.1	Gebieden tussen Westkapelle en Oranjezon	45
3.3.2.2	De kust bij Breezand en voor de Veerse Dam	46

3.3.2.3	Noord-Beveland	46
3.3.2.4	Ontwikkelingen sedimentvolumes Noordkust Walcheren en Noord-Beveland	46
3.3.3	Zuidwestkust Schouwen (incl. Kop van Schouwen)	47
3.3.3.1	Karakteristieken	47
3.3.3.2	Ontwikkelingen sedimentvolumes	47
3.3.4	Ontwikkelingen actieve buitendelta	47
3.3.5	Sediment- en suppletiebehoefte monding Oosterschelde	48
3.4	Rondom monding Grevelingen	49
3.4.1	Overzicht	49
3.4.2	Noordkust Schouwen	51
3.4.2.1	Verklikkerstrand	51
3.4.2.2	Noorderstrand (tot Brouwersdam)	51
3.4.2.3	Ontwikkelingen sedimentvolumes	51
3.4.3	Zuidwestkust Goeree	51
3.4.4	Ontwikkelingen actieve buitendelta	52
3.4.5	Sediment- en suppletiebehoefte monding Grevelingen	52
3.5	Rondom monding Haringvliet	54
3.5.1	Overzicht	54
3.5.2	Noordoostkust Goeree	55
3.5.3	Kust Voorne	55
3.5.4	Maasvlakte 2	56
3.5.5	Ontwikkelingen actieve buitendelta	56
3.5.6	Sediment- en suppletiebehoefte monding Haringvliet	56
3.6	Synthese sediment- en suppletiebehoefte hele Deltakust	58
4	Kennis deelsysteem Hollandse Kust	60
4.1	Hele Hollandse kust	60
4.1.1	Overzicht	60
4.2	Zuid-Holland	60
4.2.1	Delfland	61
4.2.1.1	Overzicht / karakteristieken	61
4.2.1.2	Ontwikkelingen sedimentvolume	62
4.2.2	Rijnland	62
4.2.2.1	Overzicht / karakteristieken	62
4.2.2.2	Ontwikkelingen sedimentvolume	64
4.2.3	Sediment- en suppletiebehoefte kust Zuid-Holland	64
4.3	Noord-Holland	66
4.3.1	Overzicht	66
4.3.2	Noord-Holland Zuid	67
4.3.2.1	Overzicht / karakteristieken	67
4.3.2.2	Ontwikkelingen sedimentvolume	67
4.3.3	Hondsbossche Duinen	68
4.3.3.1	Overzicht / karakteristieken	68
4.3.3.2	Ontwikkelingen sedimentvolume	68
4.3.4	Noord-Holland Noord	68
4.3.4.1	Overzicht / karakteristieken	68
4.3.4.2	Ontwikkelingen sedimentvolume	69
4.3.5	Sediment- en suppletiebehoefte kust Noord-Holland	69
4.4	Synthese sediment- en suppletiebehoefte hele Hollandse Kust	70

5	Kennis deelsysteem Waddenkust	72
5.1	Hele deelsysteem Waddenkust	72
5.1.1	Algemeen	72
5.1.2	Denkmodellen	73
5.1.3	Overzicht resultaten sedimentbalans	76
5.1.4	Methodiek bepalen sediment- en suppletiebehoefte Waddenkust	77
5.1.5	Bekkens van de Waddenzee en sedimentbehoefte	77
5.2	Zeegat van Texel	78
5.2.1	Overzicht en gedrag op schaal hele zeegat	78
5.2.2	Actieve Buitendelta: begrenzing, gedrag en sedimentbalans	80
5.2.3	Groote Keeten tot Den Helder	82
5.2.4	Texel-Zuid	82
5.2.5	Sediment- en suppletiebehoefte van het Zeegatsysteem excl. bekken	82
5.3	Centrale eilandkust Texel	84
5.3.1	Centrale eilandkust Texel: begrenzing, gedrag en sedimentbalans	84
5.3.2	Sediment- en suppletiebehoefte Centrale eilandkust Texel	85
5.4	Eierlandse gat	86
5.4.1	Overzicht en gedrag op schaal hele zeegat	86
5.4.2	Actieve Buitendelta: begrenzing, gedrag en sedimentbalans	87
5.4.3	Texel ten noorden van Eierlandse dam	88
5.4.4	Vlieland-staart/Vliehors	88
5.4.5	Sediment- en suppletiebehoefte van het Zeegatsysteem	88
5.5	Centrale eilandkust Vlieland	89
5.5.1	Centrale eilandkust Vlieland: begrenzing, gedrag en sedimentbalans	89
5.5.2	Sediment- en suppletiebehoefte Centrale eilandkust Vlieland	90
5.6	Zeegat van het Vlie	91
5.6.1	Overzicht en gedrag op schaal hele Zeegat van het Vlie	91
5.6.2	Actieve Buitendelta: begrenzing, gedrag en sedimentbalans	92
5.6.3	Vlieland kop/dorp	94
5.6.4	Noordsvaarder Terschelling	95
5.6.5	Sediment- en suppletiebehoefte van het Zeegatsysteem	95
5.7	Centrale eilandkust Terschelling	98
5.7.1	Centrale eilandkust Terschelling: begrenzing, gedrag en sedimentbalans	98
5.7.2	Sediment- en suppletiebehoefte Centrale eilandkust Terschelling	98
5.8	Zeegat van Ameland	100
5.8.1	Overzicht en gedrag op schaal hele Zeegat van Ameland	100
5.8.2	Actieve Buitendelta: begrenzing, gedrag en sedimentbalans	101
5.8.3	Boschplaat Terschelling	101
5.8.4	Ameland-kop	101
5.8.5	Sediment- en suppletiebehoefte van het Zeegatsysteem	102
5.9	Centrale eilandkust Ameland	104
5.9.1	Centrale eilandkust Ameland: begrenzing, gedrag en sedimentbalans	104
5.9.2	Sediment- en suppletiebehoefte Centrale eilandkust Ameland	105
5.10	Frische Zeegat	106
5.10.1	Overzicht en gedrag op schaal hele zeegat	106
5.10.2	Actieve Buitendelta: begrenzing, gedrag en sedimentbalans	107
5.10.3	Ameland-staart	107
5.10.4	Kop Schiermonnikoog	108
5.10.5	Sediment- en suppletiebehoefte van het Zeegatsysteem	108

5.11	Noordkust Schiermonnikoog, Groninger wad en Eems-Dollard	110
5.11.1	Noordkust Schiermonnikoog: begrenzing, gedrag en sedimentbalans	110
5.11.2	Sediment- en suppletiebehoefte Noordkust Schiermonnikoog	110
5.11.3	Groninger wad Buitendelta's: begrenzing, gedrag en sedimentbalans	111
5.11.4	Sediment- en suppletiebehoefte	113
5.12	Synthese sediment- en suppletiebehoefte hele Waddenkust	114
6	Sediment- / suppletiebehoefte komende 15 jaar	117
6.1	Inleiding op de gepresenteerde waarden	117
6.2	Sedimentbehoefte cf. rekenregel met rekenkundig kustfundament	118
6.3	Sedimentbehoefte cf. rekenregel met concept 'actieve zone'	118
6.4	Historische suppletievolumes	118
6.5	Advies voor de behoefte komende 15 jaar	119
7	Reflectie	120
7.1	Impact van de kennisontwikkeling	120
7.2	Toepasbaarheid van de kennis	120
7.3	Onderzoeksprioriteiten	124
8	Referenties	127
A	Sedimentbalans monding Westerschelde	131
A.1	Aanleiding tot het onderzoek	131
A.2	Beschikbare meetdata, bodemkaarten en ingrepen	131
A.2.1	Inleiding	131
A.2.2	Meetdata en Bodemkaarten	132
A.2.3	Ingrepen (baggeren, storten en suppleties) in het Nederlandse deel van de monding.	135
A.2.4	Ingrepen in het Belgische deel van de monding (een eerste inventarisatie)	137
A.3	Actualisatie sedimentbalans Westerschelde estuarium en monding	138
A.3.1	Inleiding	138
A.3.2	Bestaande studies	138
A.3.3	Heranalyse van de sedimentvolumeverandering van het Nederlandse deel van de monding	145
A.3.4	Een 2-box model van monding en estuarium (2-box model)	147
A.3.5	Een schatting van de sedimentuitwisseling binnen het Nederlandse deel van de monding	148
A.4	Een "actieve" volumebalans van de totale monding	155
A.4.1	Methode	155
A.4.2	Indeling in balansgebieden	156
A.4.3	Resultaten volumebalans	157
A.5	Conclusies en aanbevelingen	159
A.5.1	Conclusies	159
A.5.2	Aanbevelingen	159
A.6	Referenties Sedimentbalans monding Westerschelde	159
A.7	Meetdata Sedimentbalans monding Westerschelde	161

B	Resultaten onderzoek morfologisch gedrag Waddenzee onder zeespiegelstijging	163
B.1	Inleiding	163
B.2	Data-analyse	163
B.3	Modellering	167
B.3.1	Inzichten uit theoretische analyse	167
B.3.2	Toepassingen van bestaande ASMITA modellen	169
B.3.3	Verbetering modelparameters	173
B.3.4	Verbetering ASMITA	173
B.3.5	Ontwikkeling hybride model Delft3D-ASMITA	174
B.4	Synthese	175
B.4.1	Implicaties voor beheer	175
B.4.2	Aanbevelingen voor verder onderzoek	176
B.5	Referenties bij resultaten onderzoek morfologisch gedrag Waddenzee:	177
C	Bodemdaling bij Ameland, correctie op de sedimentbalans	179
C.1	Doelstellingen van deze bijlage	179
C.2	Inzichten uit bestaande literatuur.	179
C.3	Berekening van sedimentvolumes	183
C.4	Uitwerking in de sedimentbalans	185
C.5	Conclusies bodemdaling Ameland	185
C.6	Referenties bodemdaling Ameland	185

1 Achtergrond / doel

1.1 Doelstelling

Dit rapport is gemaakt in het kader van het RWS-onderzoeksprogramma “*Zandige Kust*”. Hierin wordt enerzijds onderzocht hoeveel zand (sediment) nodig is bij verschillende zichtwaarden van zeespiegelstijging (als onderdeel van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging, KP ZSS) en anderzijds kennis ontwikkeld voor de uitwerking van de huidige strategie van handhaven van de kustlijn voor de komende 15 jaar.

De vraag over de verschillende zichtwaarden van zeespiegelstijging is in 2023 voorlopig beantwoord met de rapportage ‘Sedimentbehoefte Nederlands kuststelsel bij toegenomen zeespiegelstijging’, verder aangeduid als Taal et al. (2023).

Voorliggend rapport is de eindrapportage van de ontwikkelde kennis ten behoeve van het ‘aanscherpen van het beleidsadvies Kustgenese 2.0’ (de uitwerking van de voorkeursstrategie in de komende 15 jaar). Dat brengt de focus op de morfologische ontwikkelingen t/m 2040.

1.2 Uitwerking vraagstelling

1.2.1 Het Nederlands kustbeleid met hiërarchie in doelen

In het Nederlandse kustbeleid en de uitvoering ervan wordt onderscheid gemaakt in strategische, tactische en operationele doelen.

De strategische doelen zijn al decennia onveranderd en zijn:

- Veiligheid tegen overstromingen, op korte en lange termijn;
- Duurzaam handhaven van functies en waarden van kust en duingebied.

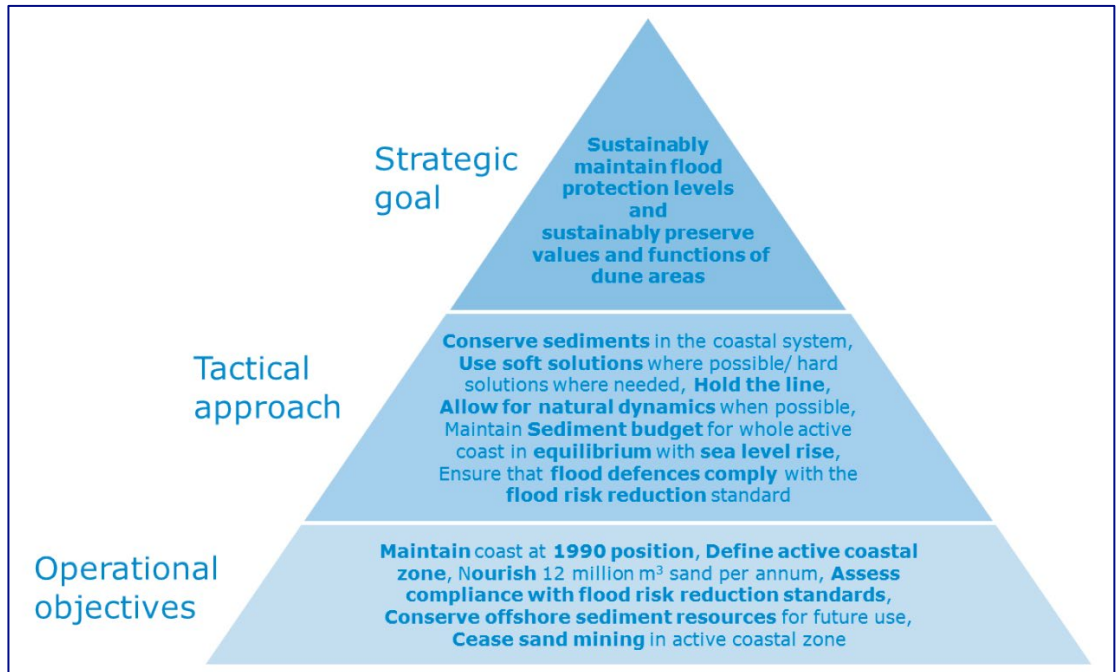
Deze strategische doelen zijn naar tactisch niveau vertaald als:

- Dynamisch handhaven van de kustlijn, met zandsuppleties waar mogelijk (zacht waar het kan, hard waar het moet);
- Zorgdragen voor de sedimentbalans van de kust op lange termijn.

Deze zijn vervolgens geoperationaliseerd (met meetbare criteria) middels:

- De Basiskustlijn (BKL) als referentie voor het handhaven van de kustlijn (opmeten, toetsen en besluiten over suppletieprogramma);
- Afspraken over het langjarig gemiddelde van het totale suppletievolume zodat de sedimentbalans op orde blijft;
- Vermijden van netto zandwinning in het kustfundament.

In Lodder (2024) is dit goed verbeeld en zijn nog enkele ermee verwante aspecten toegevoegd op tactisch en operationeel niveau (Figuur 1-1).



Figuur 1-1: Hiërarchie in strategische doelen, tactische ‘aanpak’ en operationele doelstellingen (overgenomen uit Lodder, 2024).

Deze rapportage ondersteunt de uitwerking van deze doelenhiërarchie. Meer precies is gevraagd om ‘...kennis ten behoeve van het ‘aanscherpen van het beleidsadvies aangaande de uitwerking van de voorkeursstrategie in de komende 15 jaar’. De vraagarticulatie maakte duidelijk dat dit aanscherpen niet de doelen op tactisch niveau betreft. Het gaat meer precies om kennis voor de uitwerking in suppletieprogramma’s en om de omvang van het langjarig gemiddelde van het totaal aan suppleties, kortom, de operationele doelen.

Simpel samengevat is kennis gevraagd voor het antwoord op ‘hoeveel, waar en wanneer suppleren’? Dit is kennis van het morfologische systeem ‘de kust’, op verschillende schalen van tijd en ruimte. Meer precies is inzicht nodig in hoe de ‘behoefte aan zand (sediment)’ zich ontwikkelt op zowel landelijk als lokaal niveau. Hiervoor moeten de morfologische ontwikkelingen begrepen worden en de omvang van transporten van zand gekend zijn.

1.2.2 Prioritaire kennisleemten

Na afronding van het vorige rapport in het project Zandige Kust (Taal et al., 2023) hebben Deltares en Rijkswaterstaat samen vastgesteld wat de belangrijke leemten zijn in de kennis van de Nederlandse kust¹. Deze staan hieronder, steeds aangevuld met de beoordeling of de kennisleemte prioriteit heeft en hoe eventueel onderzoek is meegenomen in dit rapport. In 2.2 wordt, in aansluiting op onderstaande, nog een uitwerking gegeven ten aanzien van het verminderen van onzekerheden bij het toepassen van de rekenregel voor sedimentbehoefte.

De grootste onzekerheden in grootschalig gedrag en sedimentbehoefte op lange termijn liggen ten oosten van Schiermonnikoog (incl. staatsgrens). Daarna volgen de (monding van) Westerschelde (incl. staatsgrens) en de buitendelta’s van de afgesloten bekkens van de Zuidwestelijke Delta.

- ➔ Deze onzekerheden spelen echter minder op de tijdschaal van 15 jaar. Er is wel een sedimentbehoefte, maar ze hebben op die termijn duidelijk geen suppletiebehoefte. Dit is terug te voeren op de doelen voor de kust ten oosten van Schiermonnikoog

¹ Vastgelegd in verslag van overleg 15 december 2022. Waarvan de conclusies zijn opgenomen in het Plan van Aanpak voor 2023.

(primair voor natuurlijke ontwikkeling) en het grootschalig gedrag van de voormalige buitendelta's van (soms deels) afgesloten bekkens bij de Voordelta.²

- Voor de monding van de Westerschelde is nieuwe kennis opgebouwd waarvan verslag wordt gedaan in Bijlage A. Deze kennis is gebruikt in dit rapport.

Voor de Waddenzee ontbreekt het aan toekomstbeelden onder zeespiegelstijging die gebaseerd zijn op de ontwikkeling per morfologische eenheid. Dit heeft grote invloed op de toekomstige netto transporten door de zeegaten. Daarnaast is er behoefte aan inzicht in de 'interne ontwikkeling' van de Waddenzee. Voor het plaatareaal (natuurwaarden) is antwoord op de vraag "blijven hypsometrische curves in stand of gaan die veranderen?" nodig. Dit antwoord zal voor een belangrijk deel door andere kennisprogramma's moeten worden geleverd, maar het project Zandige Kust kan wel bijdragen.

- Hiervoor is onderzoek gedaan dat is samengevat in Bijlage B.

Het aangepaste denkmodel (uiteengezet in Taal et al, 2023) over het gedrag van de ondiepe en diepe vooroever (voor uitleg van deze begrippen zie Figuur 2-6) moet verder worden gevalideerd, in het bijzonder vanwege de waargenomen verdieping van de diepe vooroever.

- Hiervoor is onderzoek verricht. Het technisch rapport over de Diepe Vooroever doet verslag (Van der Spek, 2025).

Uitwerken en aansluiten van conceptuele modellen is nodig, in het bijzonder omdat de adviesvragen over voorkeursstrategieën op lange termijn en korte termijn beantwoord worden met verschillende conceptuele modellen.

- Met de resultaten van Elias et al. (2024) zijn de conceptuele modellen van gedrag op een tijdschaal van 15 jaar verbeterd. De wijze waarop het concept van de actieve zone kan worden toegepast in kustlijn zorg volgt uit de opzet van dit rapport. De sedimentbehoefte volgens het concept actieve zone is vergeleken met de historische volumeontwikkeling. Vervolgens is per kustvak ook een vergelijking gemaakt met de berekening van de sedimentbehoefte cf. Rijkswaterstaat (2020), waarbij gebruik is gemaakt van een rekenkundig kustfundament. De in dit rapport gepresenteerde kennis helpt om op de schaal van een kustvak of kleiner te bepalen waar suppleties die niet direct noodzakelijk zijn voor het handhaven van de meerwaarde kunnen bieden in het beïnvloeden van de morfologische ontwikkelingen t.o.v. de meer reguliere suppleties (strand-, vooroever- en geulwandsuppleties).

Kennis van de kustlangse transporten onder de voorkeursstrategie is nodig voor de praktische invulling van de suppletiestrategie voor de komende 5 tot 10 jaar.

- Dit is beschreven in Huisman (2024). De resultaten zijn gebruikt in Elias et al. (2024) en in de rekenregels voor individuele actieve zones.

1.2.3 Belangrijkste bouwstenen (voorgaande rapportages)

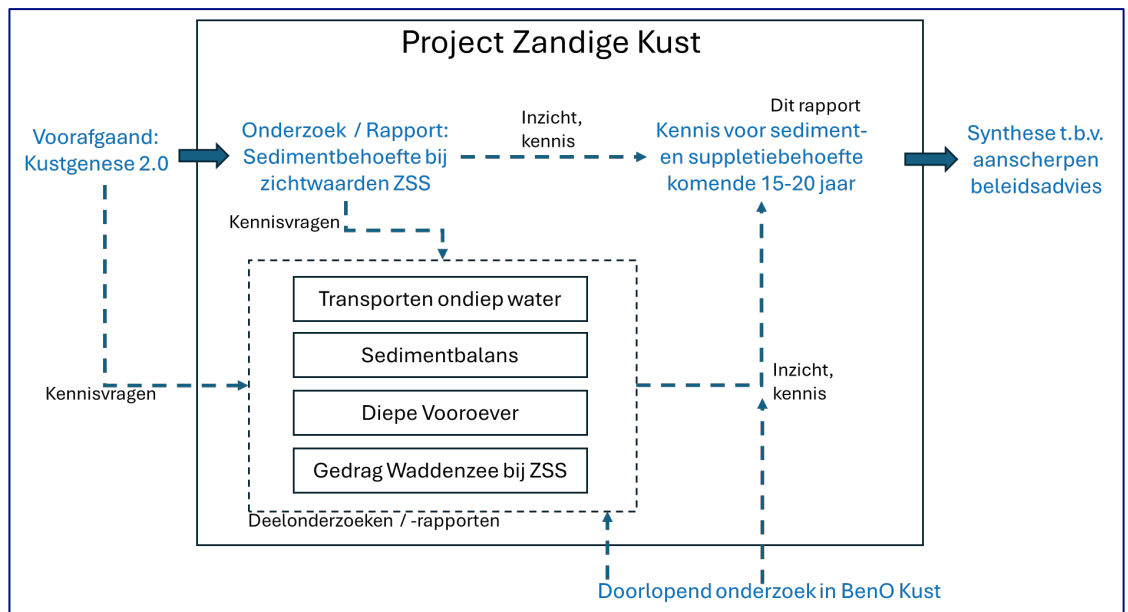
In aanloop naar voorliggend rapport zijn belangrijke bouwstenen opgeleverd (waarvan de samenhang is getoond in Figuur 1-2). Enkele werden hiervoor al aangehaald:

- (1) de rapportage over sedimentbehoefte onder zichtwaarden van zeespiegelstijging waarin ook het conceptuele model van de actieve zone is geïntroduceerd. Hiernaar wordt verder gerefereerd als Taal et al (2023);
- (2) rapportage sedimenttransporten in de ondiepe vooroever, wordt verder naar gerefereerd als Huisman (2024);
- (3) rapportage sedimentbalans gehele Nederlandse kust, wordt verder naar gerefereerd als Elias et al. (2024);
- (4) rapportage diepe vooroever, wordt verder naar gerefereerd als Van der Spek (2025).

² Een eventuele sedimentbehoefte (in de zin dat deze stukken kust een 'put' voor sediment zijn) wordt indirect ingevuld door suppleties elders

Naast deze producten van het project 'Zandige Kust' zijn belangrijke bouwstenen geweest:

- (5) de resultaten van Kustgenese 2.0, in het bijzonder het syntheserapport³, waar verder naar wordt gerefereerd als Rijkswaterstaat (2020);
- (6) de resultaten van jarenlang onderzoek in het programma Beheer en Onderhoud Kust en andere kort- en langlopende onderzoeken, veelal in samenwerking tussen Deltares en Rijkswaterstaat tot stand gekomen. Deze zijn samengevat in de 'Beheerbibliotheken'. Referenties worden gemaakt bij betreffend kustvak. Alle beheerbibliotheken staan op: <https://open.rijkswaterstaat.nl/open-overheid/onderzoeksrapporten/@261429/beheerbibliotheken-kust/>. Visualisaties van data van de Nederlandse kust (waaronder belangrijke gegevens voor dit rapport zoals de liggingen van raaien, van de Basiskustlijn en uitgevoerde suppleties) zijn beschikbaar via de Kustviewer: (<https://www.openearth.nl/coastviewer-static/>). Ook is een overzicht van erosieresistente lagen beschikbaar: [hier](#) en [hier](#).



Figuur 1-2: Samenhang rapportages / bouwstenen van voorliggend rapport.

1.2.4 Korte samenvatting voorgaande rapportages (bouwstenen)

1. Sedimentbehoefte onder zichtwaarden van zeespiegelstijging (Taal et al., 2023)

Het rapport over de sedimentbehoefte onder zichtwaarden geeft een nadere uitwerking van de behoefte bij 'duurzaam evenwicht met de zeespiegelstijging'. Deze behoefte wordt niet bepaald door de oppervlakte van het hele kustfundament of het rekenkundig deel ervan, maar door het deel dat daadwerkelijk moet meegroeien met versnelde zeespiegelstijging 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. Dit is in voorliggend rapport beschreven in 2.3.

De geografische afbakening van de actieve zone is afgeleid uit de morfologische ontwikkeling. Het grootste deel van Taal et al., 2023 wordt gewijd aan de beschrijving daarvan. Vervolgens 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.

³ Waar weer meerdere technische rapporten aan ten grondslag liggen

De sedimentbehoefte van de huidige actieve zones bij zichtwaarden van zeespiegelstijging variëren van 1,4 miljard m³ bij 0,5 meter stijging in 2100 tot 7,1 miljard m³ bij 5 meter stijging in 2200. De onzekerheid in deze getallen hangt voornamelijk samen met beperkingen in kennis van de begrenzing van de actieve zone en is beperkt (rond de 7 à 8%). Een grotere onzekerheid ligt in de vraag of de voormalige buitendelta's in de Zuidwestelijke Delta mee zullen gaan doen in de verspreiding van suppleties en de vraag of in de toekomst besloten wordt ook de buitendelta's van het Groninger te onderhouden met suppleties.

2. Sedimenttransporten in de ondiepe vooroever (Huisman, 2024)

Dat rapport bespreekt het modelinstrumentarium voor het berekenen van deze transporten en de resultaten van de gedetailleerde analyses van de sedimentstromen in de actieve zone. Het resultaat is te zien in Figuur 1-3.



Figuur 1-3: Overzicht lange-termijn gemiddelde kustlangse transporten over de periode 2000 - 2020 (gele pijlen en jaarlijkse volumes), het ingeschatte verlies naar de geulen (oranje pijlen en jaarlijkse volumes), de bypass van ebdelta's naar de kust (groene pijlen en jaarlijkse volumes) en twee grootschalige ingrepen die gedurende enkele decennia sterke invloed hebben op de kustlangse transporten (rood), uit Huisman (2024).

Het onderzoek laat verder zien dat de meeste kustvakken stabiel of aanzandend zijn. De stabiliserende werking van zandsuppleties speelt daarbij een grote rol. Bij kustplaatsen ligt de te handhaven kustlijn vaak zeewaarts in vergelijking met de gebieden ernaast. Dit zorgt voor ruimtelijke verschillen in langstransporten. De onderhoudsinspanning gebeurt daarom voornamelijk bij de kustplaatsen.

Her rapport toont aan dat getij- en windgedreven stromingen in de ondiepe kustzone een minder grote rol spelen dan golven. Uitzonderingen daarop zijn plaatsen waar een geul of plaat van een zeegat zeer dicht bij de kust ligt (b.v. eilandstaarten en koppen van Waddeneilanden). Daar kan lokaal sterke erosie of aanzanding optreden door kustdwarse interactie.

3. Sedimentbalans gehele Nederlandse kust (Elias et al., 2024)

De sedimentbalans van de Nederlandse kust is opgesteld over de periode 1960-2022. Per kustvak zijn volumeveranderingen en -trends bepaald, waarbij onderscheid is gemaakt tussen de actieve zone en de diepe vooroever. De analyse toont hoe groot de veranderingen zijn in het systeem, waar ze optreden en wat de implicaties zijn voor de ontwikkeling van delen van het kuststelsel en de transporten ertussen. Langs de hele Nederlandse kust is er afname van het sedimentvolume in de diepe vooroever. Dit gebied wordt ook nauwelijks door suppleties beïnvloed.

In de Zuidwestelijke Delta is vanuit de huidige actieve zone relatief beperkt netto transport naar aangrenzende 'actieve buitendelta's'. Bij de afgesloten bekkens kennen deze een terugtrekkende rand, die de overgang markeren naar (en begrenzing met) de diepe vooroever.

Voor de Hollandse Kust is de sedimentbalans vrijwel sluitend. Het volume gesuppleerd sediment komt grotendeels overeen met de volumetoename van de actieve zone.

Voor de zeegaten van de Waddenkust is via het gebruik van dieptecontouren onderscheid gemaakt tussen een actieve buitendelta en de diepe vooroever. De grens ligt op de contour die het buitendeltaplatform goed omsluit. Binnen de actieve buitendelta's treedt bovendien, in ieder geval bij de Oostelijke Waddenzee, terugtrekken van de 'rand' op. Over deze rand is beperkte uitwisseling met het ondiepere deel. Dit suggereert dat de grens van de actieve zone verder landwaarts ligt dan op de contour die het buitendeltaplatform goed omsluit. Voor de centrale eilandkusten is een benadering cf. de Hollandse Kust gebruikt.

Synthesefiguren uit dit rapport zijn overgenomen in voorliggend rapport (Figuur 3-1, Figuur 4-1, Figuur 5-6 en Figuur 5-7)

4. Ontwikkeling diepe vooroever (Van der Spek, 2025)

De rapportage over de diepe vooroever vat de stand van de kennis samen over het functioneren en de ontwikkeling van het deel van de kust tussen de actieve zone (vanaf ca. – 8 m NAP) en de doorgaande -20 meter NAP lijn, de zeewaartse grens van het kustfundament. Over dit deel van de Nederlandse kust is veel minder bekend dan over het ondiepere deel. Hierom alleen al is er behoefte aan een rapportage die het functioneren goed beschrijft en van daaruit conclusies trekt over de eventuele sedimentbehoefte ervan.

Voor een antwoord is het noodzakelijk te begrijpen wat het gedrag van de diepe vooroever op lange termijn is. Dit rapport brengt daarom allereerst in kaart of de diepe vooroever op die termijn een 'sink' voor sediment is. Bestudering van een halve eeuw aan data leidt tot de vaststelling dat suppleties zich in ieder geval niet naar de diepe vooroever verspreiden. Een tweede conclusie is, met gebruik van de volumebalans van Elias et al. (2024), dat de diepe vooroever in totaal 16 miljoen kubieke meter per jaar in volume afneemt. De grootste

volumeafnames vinden plaats bij de westelijke Waddenkust en de monding van het Eems estuarium. Op basis van de volumeveranderingen van de diepe vooroever wordt een totaal zeewaarts 'verlies' van 12 miljoen kubieke meter per jaar berekend. De grootste verliezen treden op bij de westelijke Waddenkust. Om dit te verklaren is een centrale hypothese geponeerd dat de zeewaartse transporten het gevolg zijn van "... een combinatie van sterke piek- en residuele stromingen en de verandering in oriëntatie van de kust ". Ook de diepe vooroever van Terschelling verdiept aanzienlijk op jaarbasis, maar hier is (nog) geen bevredigende verklaring voor gevonden. Een tweede oorzaak van de grote volumeafname op de diepe vooroever is de terugtrekking van de monding van het Eems-estuarium. Van der Spek (2025) gaat daar niet uitgebreid op in. Het is goed beschreven in Elias et al. (2021) en Elias et al. (2024).

1.3 Waar verwijzen veel gebruikte begrippen precies naar?

Sediment- en/of suppletiebehoefte

Suppletie- en sedimentbehoefte zijn niet hetzelfde. De *sediment*behoefte van een (deel van) het kuststelsel wordt berekend op basis van kennis van de kust (incl. aannames uiteraard), in het bijzonder over het gedrag op langere tijdschalen. Ter voorbereiding van de Derde Kustnota (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000) berekende Mulder (2000) als eerste de behoefte aan sediment om het kustfundament in stand te houden bij zeespiegelstijging⁴. Bij het vaststellen van een sedimentbehoefte is de belangrijkste keuze 'voor welk gebied de zandbalans in evenwicht moet zijn, op welke tijdschaal. Dit wordt besproken in 2.2., waar ook het 'denken in vraag en aanbod van sediment' en de rekenregel verder worden uitgelegd.

Bij het begrip suppletiebehoefte speelt in veel hogere mate de menselijke afweging. Waar structurele terugtrekking van de kust als gevolg van erosie niet wordt geaccepteerd, moet cf. bestaand beleid de kustlijn gehandhaafd worden, met als referentie de Basiskustlijn⁵. De hoeveelheid zand die (gemiddeld jaarlijks) nodig is hiervoor is de suppletiebehoefte. Het is relatief eenvoudig met de geschiedenis van het suppleren het gemiddelde historische suppletievolume te bepalen. Beleidsafwegingen uit het verleden zijn echter niet noodzakelijk dezelfde als die in de toekomst. Een vertaling van die waarde naar een toekomstige suppletiebehoefte is niet zomaar een extrapolatie en altijd met aannames omgeven.

In deze rapportage wordt zo veel als mogelijk in één adem gesproken over sediment- en suppletiebehoefte of kortweg over 'behoefte'. Er worden namelijk steeds naast elkaar berekeningen gepresenteerd op basis van een rekenregel (theoretische behoefte) als via de historische uitgevoerde suppleties.

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.

⁴ In stand houden betekende dat verliezen (accommodatieruimte door relatieve zeespiegelstijging en netto transporten uit het systeem) gecompenseerd worden door aanvoer via suppleties.

⁵ Er is daarna nog steeds erosie (want ook het gesuppleerde materiaal zal verplaatst worden), maar de terugtrekking is gecompenseerd.

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.

Conceptuele modellen

Deze rapportage gebruikt regelmatig 'conceptuele modellen' (ook wel: denkmodellen). Taal et al. (2023) en Elias et al. (2024) staan uitgebreider stil bij dit begrip. Het gaat erom kennis effectief beschikbaar te maken voor beleid en beheer. Een goed conceptueel model helpt ook de behoeften aan nieuwe kennis te prioriteren. Het geeft inzicht waar het verminderen van onzekerheden mogelijk en/of wenselijk is. Vermindert de nieuwe kennis onzekerheden en ondersteunt het zo toekomstige besluitvorming? Conceptuele modellen kunnen de vorm hebben van verhalen en illustraties om de werking van de kust op een bepaald niveau in de schaalcascade (zie 2.1) te verduidelijken. Ze kunnen ook de vorm van een berekening / formule aannemen (zoals de 'rekenregel voor sedimentbehoefte').

1.4 Opbouw

Hoofdstuk 2 gaat uitvoerig in op de aanpak van het berekenen van sediment- en suppletie-behoeften voor de komende 15 jaar. Het maakt duidelijk welke karakteristieken van de Nederlandse kust hiervoor bepalend zijn en hoe de landelijke behoefte aan suppleties / sediment als som van lokale ontwikkelingen begrepen kan worden. De morfologische schaalcascade is vervolgens leidend in de opbouw van de Hoofdstukken 3, 4 en 5. Hierbij wordt vanaf het zuidwesten (de Deltakust) gewerkt naar het noorden en oosten. In elk hoofdstuk (deelsysteem van de Nederlandse kust) wordt per kustvak besproken welke onderdelen het bevat en hoe hun ontwikkelingen bijdragen aan het bepalen van de suppletie-en/of sedimentbehoefte. Elk deel wordt afgesloten met een berekening van die behoefte via twee of drie methodieken. De methodiek die gebruikt is in Rijkswaterstaat (2020) is alleen toepasbaar voor het hele deelsysteem en komt dus alleen terug aan het eind van elk hoofdstuk.

Hoofdstuk 6 zet alle berekende sediment- en suppletiebehoeften naast elkaar en doet aanbevelingen over het gebruik van de getallen. Het afsluitende Hoofdstuk 7 geeft een reflectie, gericht op het gebruik van de in het rapport gepresenteerde kennis en geeft aanbevelingen voor vervolgonderzoek.

2 Denkmodellen / aanpak

2.1 Werken volgens de schaalcascade

Dit rapport presenteert het gedrag en de ontwikkeling van de sedimentvolumes op schalen van ruimte en tijd, die in een cascade (hiërarchie tussen de schalen) met elkaar samenhangen. Uitgangspunt in de schaalcascade 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. De te gebruiken conceptuele modellen en visualisaties verschillen per schaal, mede om aan te sluiten bij de vraagstukken die op die schaal spelen.



Figuur 2-1: Het Nederlandse kustsysteem. Enerzijds onderverdeeld in drie deelsystemen die samen het kustfundament vormen en anderzijds de Wadden en de Westerschelde. Bewerkt uit Rijkswaterstaat (2020).

Het gebruik van de schaalcascade is ook uitgelegd in Taal et al. (2023) en Elias et al. (2024). In voorliggend rapport geldt de volgende nummering⁶:

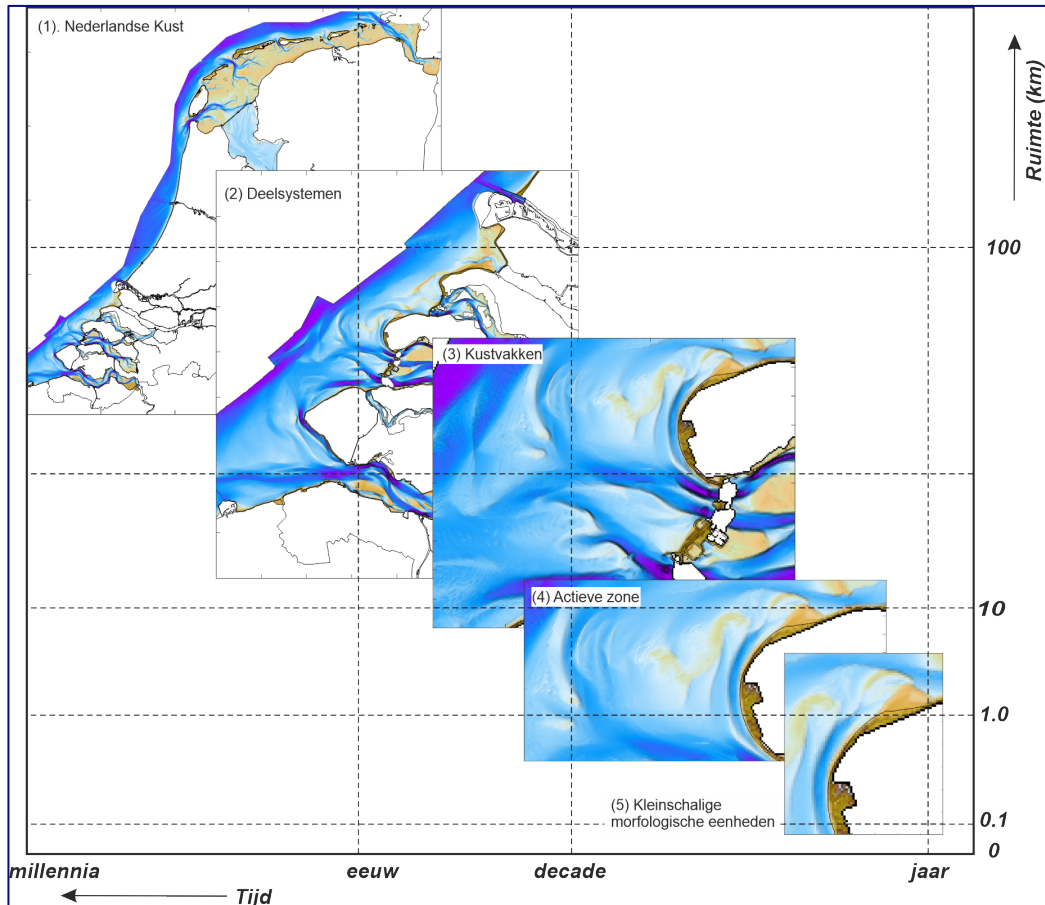
1. Gehele Nederlandse kust;
2. Drie deelsystemen: Deltakust, Hollandse Kust, Waddenkust, met de begrenzingen als in Figuur 2-1, een onderverdeling die aansluit bij verschillen in grootschalige kenmerken;
3. Kustvakken, waarbij een kustvak een samenhangend morfologisch systeem is op een tijdschaal van ca. 50 jaar, zoals de buitendelta van een zeegat in het Waddengebied of de monding van een estuarium of (afgesloten) bekken in de Delta;
4. Actieve zones binnen een kustvak. Dit kunnen delen van de kustlijn zijn, maar ook de actieve buitendelta's in een mondingsgebied;
5. Stukken van de kust (lees: deel van de actieve zone) met verschillend morfologisch gedrag, wat verklaart waarom er wel of geen suppletievolumes zijn aangebracht sinds 1990.

Toelichting en verder gebruik:

Op schaalniveau 1 (de hele Nederlandse kust) worden de hoofdlijnen van het beleid bepaald, zoals de gemiddelde jaarlijks te suppleren hoeveelheid zand, de grenzen van het kustfundament en welk gebruik daarin is toegestaan. Er is geen conceptueel model beschikbaar dat het gedrag van de hele Nederlandse kust beschrijft op een tijdschaal van 50 tot 200 jaar. Uiteraard zijn er wel gemeenschappelijke kenmerken. Hierdoor is het mogelijk gebleken een landelijke rekenregel voor sedimentbehoefte op te stellen (Rijkswaterstaat, 2020).

In dit rapport is de sediment- en/of suppletiebehoefte op schaalniveau 1 de optelsom van de drie systemen op schaalniveau 2.

⁶ Dit is grotendeels cf. Elias et al. (2024), maar daar is schaalniveau 4 in gebruikt voor onderscheid in kustdwarse richting binnen een actieve zone (ondiepe vooroever, strand, duinen) en is schaalniveau 5 niet gebruikt.



Figuur 2-2: Schaalcascade Nederlandse kust gevisualiseerd, met als voorbeeld een deel van Noordwest Schouwen op het kleinste schaalniveau.

Op schaalniveau 2 zijn de hoofdlijnen van het beleid nader uitgewerkt, in het bijzonder in Rijkswaterstaat (2020). Het blijkt lastig het gedrag op dit schaalniveau in een conceptueel model te vangen. Door de principes van de landelijke rekenregel voor de drie deelsystemen te specificeren en deze naast de historische suppletievolumes te leggen, bleek het mogelijk beleidsscenario's voor de komende 15 jaar op te stellen. Zo adviseert Rijkswaterstaat (2020), de basis van het beleidsadvies Kustgenese 2.0, uiteindelijk om iets meer in de Waddenkust te suppleren dan uit de historische suppletievolumes volgde.

In dit rapport worden de sediment- en/of suppletiebehoeften op schaalniveau 2 bepaald door de resultaten voor de onderdelen op schaalniveau 3 op te tellen.

Op schaalniveau 3 is het morfologisch gedrag zo samenhangend dat het op basis van de waarnemingen op een tijdschaal van decennia tot enkele eeuwen kan worden beschreven en voorspeld. Dit schaalniveau is de basis geweest voor de berekeningen in Elias et al. (2024) en Taal et al. (2023). In tegenstelling tot de hogere schaalniveaus wordt nu ook onderscheid gemaakt in kustdwarse componenten van het sedimenttransport, in het bijzonder enerzijds die op de actieve zone en anderzijds die op de diepe vooroever.

In dit rapport worden de sediment- en/of suppletiebehoeften voor de komende ca. 15 jaar op schaalniveau 3 bepaald door de resultaten voor de onderdelen op schaalniveau 4 op te tellen. Voor de langere termijn kan het zijn dat de oppervlakte van de actieve zone gaat veranderen. In die gevallen volstaat niet alleen de optelling, maar is een onzekerheid te geven op de schaal van het gehele kustvak.

Op schaalniveau 4 lijkt het mogelijk de suppletiebehoefte voor de komende 15 jaar af te schatten door te kijken naar het verleden (sinds 1990). Voor de interpretatie is het belangrijk

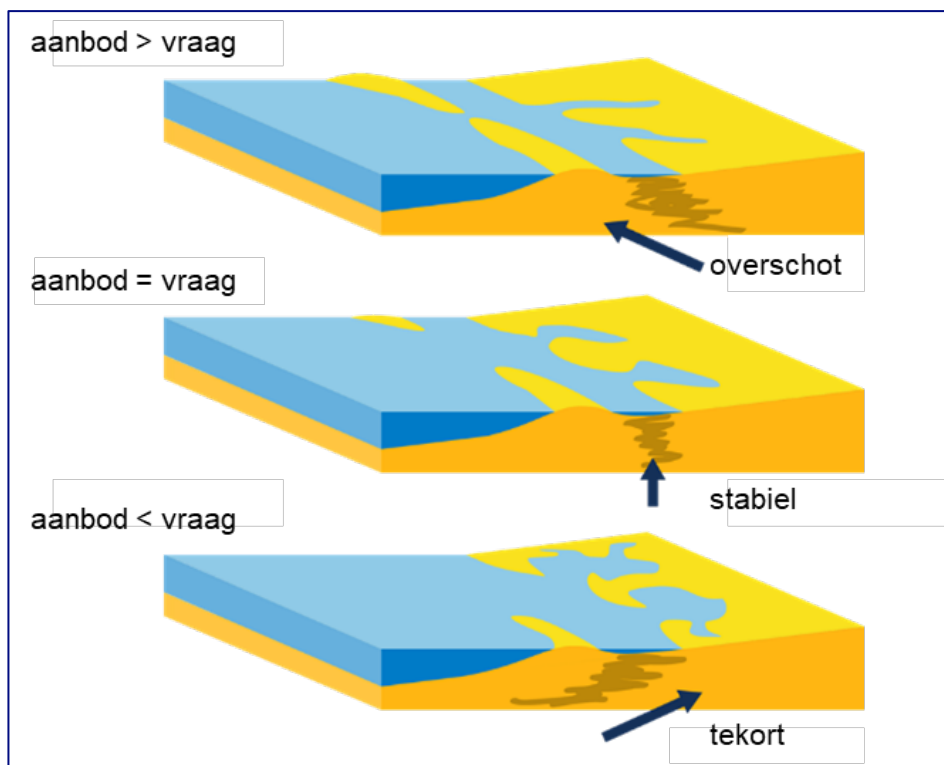
ook naar schaalniveau 5 te kijken, want op deze tijdschaal is het niet mogelijk om uit te gaan van een kust in langjarig morfologisch evenwicht. Lokaal moet een kustlijn vaak voornamelijk onderhouden worden omdat er een gradiënt in transport is in kustlangse richting. Vaak is dit het gevolg van een meer vooruitgeschoven deel in de ligging van de Basiskustlijn, omdat er bijvoorbeeld bebouwing is.

Het denken in de schaalcascade vormt de rode draad van het rapport. Op elke schaal geldt dat de verandering van de gemiddelde bodemligging het gevolg is van een verschil tussen het transport van sediment in en uit een gebied. Het afgesproken doel is het handhaven van de kustlijn, wat feitelijk neerkomt op een eis aan de bodemligging in relatie tot de gemiddelde stand van de zeespiegel.

Op het schaalniveau van de kustvakken (niveau 3) wordt de kennis gepresenteerd. De hoofdstukken 3, 4 en 5 volgen de drie deelsystemen van schaalniveau 2.

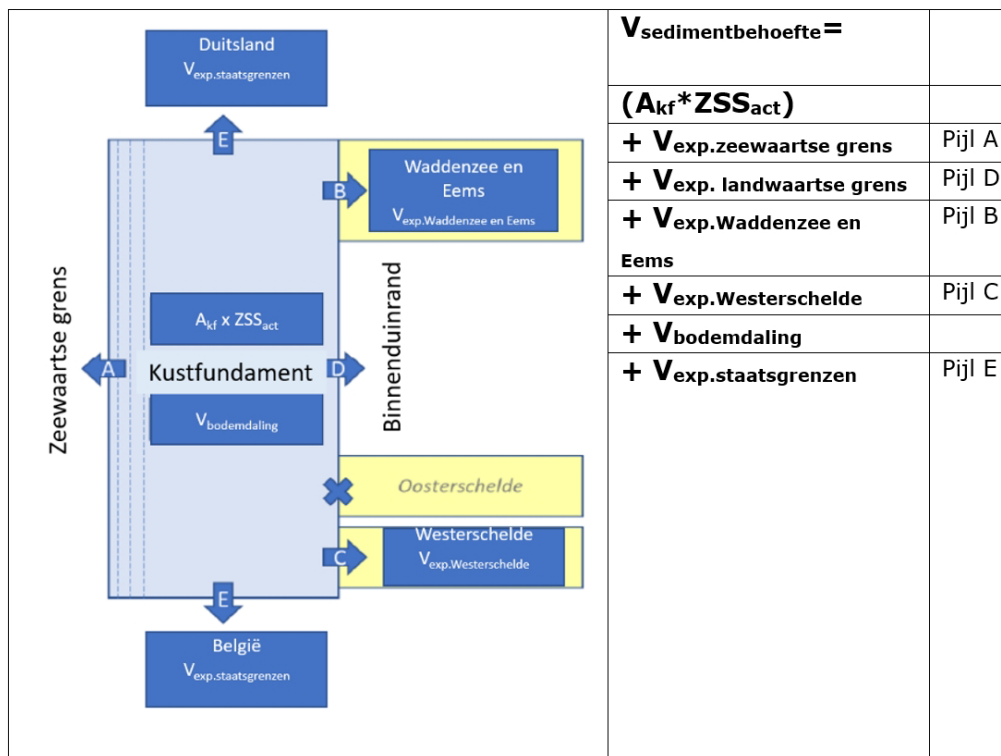
2.2 Conceptueel model voor sedimentbehoefte lange termijn (Rekenregels)

Het Nederlandse beleid is gebaseerd op de kennis over de ontwikkeling van kusten op lange tijdschalen. Die leert dat deze ontwikkeling bepaald wordt door vraag, aanbod en transport van sediment (Figuur 2-3).



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.

Een 'vraag' naar sediment in een kuststelsel ontstaat onder meer door zeespiegelstijging en door transporten het stelsel uit. Dit zijn 'negatieve posten in de sedimentbalans'. Voor een status quo moet er netto sediment bij, het 'aanbod', wat zowel natuurlijke aanvoer (transporten het stelsel in) als menselijk ingrijpen (in het bijzonder de suppleties) kan zijn.



Figuur 2-4: De rekenregel sedimentbehoefte zoals opgenomen in Rijkswaterstaat (2020).

De rekenregels voor sedimentbehoefte die in deze sectie worden besproken zijn allemaal gebaseerd op dit principe. De sedimentbehoefte in het Nederlandse kustbeleid is aldus geoperationaliseerd in de 'rekenregel sedimentbehoefte kustfundament' (Lodder, 2016 en 2018) en is gevisualiseerd in Figuur 2-4. Voor de term A_{kf} in deze figuur werd eerder aan zeewaartse zijde de doorgaande -20 meter NAP lijn gebruikt. Hiermee was de term A_{kf} gelijk aan de oppervlakte van het kustfundament.

In Rijkswaterstaat (2020) is ervoor gekozen de zeewaartse grens van de term A_{kf} minder diep te leggen. Dit gebeurde op een reeks van overwegingen over gemeten transporten op en morfologische ontwikkelingen van de diepe vooroever. Dit rekenkundig kustfundament werd zowel uniform als regionaal gedifferentieerd bepaald. De uniforme variant had een zeewaartse grens die op -15 tot -18 meter NAP lag, afhankelijk van de tijdschaal waarop de morfologische ontwikkelingen werden bekeken. Hierom werd ook een tussenvariant (zowel uniform als gedifferentieerd) bepaald. De landwaartse grens bleef bij de binnenduinrand liggen. De sedimentbehoefte van de Nederlandse kust is met die aangepaste grenzen opnieuw berekend in (Deltares 2020a, 2020b).

De regionaal gedifferentieerde tussenvariant van A_{kf} is ook in voorliggende rapportage gebruikt voor de berekeningen met de rekenregel van Rijkswaterstaat (2020).

In Taal et al. (2023) is op de term A_{kf} uit Rijkswaterstaat (2020) gereflecteerd en geconcludeerd dat deze eigenlijk moet verwijzen naar "... het deel van de kust dat daadwerkelijk moet meegroeien voor behoud van de gebruiksfuncties bij een bepaalde waarde van de zeespiegelstijging, gegeven het voortzetten van de huidige strategie". Dit leidde tot het conceptuele model van de 'actieve zone', oftewel de zone waarbinnen het suppletiezand verspreid op de tijdschaal van het kustbeleid sinds 1990.⁷ Het conceptueel model van de actieve zone wordt uitgelegd in 2.3. In Taal et al. (2023) is dit uitgewerkt tot

⁷ Andere, diepere, delen van de kust zijn uiteraard ook 'actief', maar niet actief in de zin dat ze significant meedoen in het verspreiden van het suppletiezand.

een aangepaste versie van de rekenregel. Deze is, net als de rekenregel die in Figuur 2-4 is getoond, gebaseerd op:

$$\text{Sedimentbehoefte} = \text{“oppervlakte gebieden die moeten meegroeien”} * \text{zeespiegelstijging}^8 + \text{netto transporten uit die gebieden}$$

In dit rapport wordt zowel de rekenregel cf. de aannames in Rijkswaterstaat (2020) toegepast als cf. het conceptueel model van de actieve zone.

Prioriteiten onderzoek t.b.v. beter toepassen rekenregel

Ten behoeve van het Plan van Aanpak voor het project Zandige Kust in 2023 is een overzicht gemaakt van de mogelijkheden om de onzekerheden in de rekenregel van Figuur 2-4 te verminderen. In onderstaande tabel is dit overzicht overgenomen en wordt aangegeven in welke mate hiervoor kennis is ontwikkeld en hoe deze gebruikt kan worden.

Term in rekenregel en onzekerheid	Ontwikkelde kennis
Import Waddenzee en transport naar het Eems-estuarium (pijl B): Nieuwe kennis sinds Rijkswaterstaat (2020) verder verbeteren en nieuwe kennis toepassen.	Vooraf voor het gebied ten oosten van Schiermonnikoog is er betere kennis. Ten tweede zijn er nu twee scenario's voor de bijdrage van slib gebruikt. In Elias et al. (2024) zijn echter nog de getallen van KG2.0 gebruikt. Een tweede belangrijke constatering is dat de netto transporten die het Eems-estuarium in gaan niet afkomstig zijn uit delen van de kust die actief uitwisselen met stukken kust die worden onderhouden met suppleties. Zie b.v. Figuur 5-6 in Elias et al. (2024).
De transporten over de staatsgrenzen (pijlen E): Nieuwe kennis sinds Rijkswaterstaat (2020) verder verbeteren en nieuwe kennis toepassen.	In Bijlage A over de sedimentbalans Westerscheldemonding staat aanvullende kennis, die in de rest van dit rapport wordt gebruikt. Met de transportberekeningen van Huisman (2024) is beter te scheiden wat via actieve zone binnenkomt. Het transport naar Duitsland vindt niet direct via de actieve zone plaats. Dit gaat via de monding van de Eems: zie vorig punt.
De import Westerschelde (pijl C): nieuwe kennis, nog verder te verbeteren.	Zie vorig punt: Bijlage A.
Bijdrage slib (niet expliciet opgenomen in de rekenregel, maar moet in principe meegenomen worden in elke term om sedimentbehoefte te vertalen in suppletiebehoefte, wat feitelijk 'zandbehoefte' betekent). Het speelt een rol bij exporten naar Westerschelde, Waddenzee en Eems: nieuwe kennis toevoegen.	Zie de opmerkingen hierboven bij de pijlen B, C en E.

⁸ Lees hier 'relatieve zeespiegelstijging', dus inclusief diepe bodemdaling die in de bodemdalingsmonitor is berekend en in de zeespiegelmonitor (Stolte et al., 2023) is gerapporteerd. Lokale bodemdaling door gaswinning zoals bij Ameland is hierin niet opgenomen.

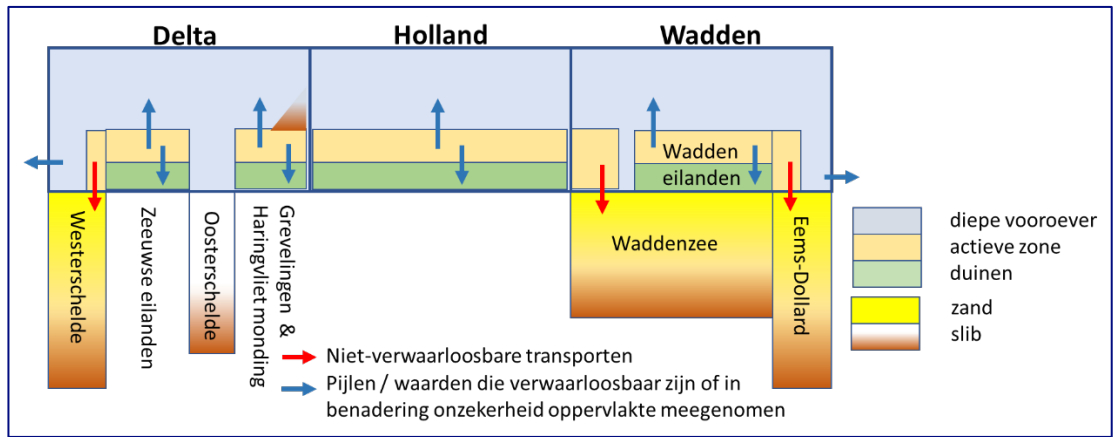
Begrenzing van het mee te groeien deel van het kustfundament (A_{kf}): kennis diepe vooroever verbeteren, vergelijken / verkennen actieve zone. Taal et al. (2023) liet zien dat de grootste onzekerheden in de begrenzing van de actieve zone in de Zuidwestelijke delta liggen.	Voor de periode t/m 2040 kan veilig gesteld worden dat de zone zeewaarts van de actieve zone geen sedimentbehoefte heeft vanuit oogpunt 'behoud van functies en waarden van het kustgebied'. Het onderzoek van Elias et al. (2024) en Van der Spek (2025) ondersteunt dit.
Export zeewaartse grens (pijl A): is nul c.q. onderdeel van de keuze van het begrenzen van de diepe vooroever (dan wel de actieve zone).	Elias et al. (2024) geeft aan dat als er voor A_{kf} de actieve zone wordt genomen, er wel degelijk rekening gehouden moet worden met netto zeewaarts transport in meerdere kustvakken. Bij gebruik van het rekenkundig kustfundament blijft pijl A wel '0'.
Export binnenduintrand (pijl D): was als nul aangenomen, geen onzekerheden. De vraag ligt wel voor wat te doen met de duinen achter de zeereep. Het kustfundament is momenteel begrensd bij de binnenduintrand, de actieve zone bij de zeereep. Er is nu nauwelijks (op enkele locaties na) transport van zand landwaarts vanaf de zeereep.	Nader onderzoek hiervoor had geen prioriteit, vanwege de relatief beperkte gevolgen van de onzekerheid in het bepalen van sedimentbehoeften.
Bodemdaling & zeespiegelstijging (ZSSact): nieuwe inzichten (uit andere projecten) implementeren	Cf. de aanbeveling van ENW gebruikt dit rapport de waarde die De zeespiegelmonitor 2022 vaststelde (2,9 mm/jr.) voor de huidige snelheid van relatieve zeespiegelstijging als voorspelling voor de komende 15 jaar. Voor de bodemdalingsschotel onder de actieve zone bij Ameland is er een apart memo geschreven (Bijlage C)
Rol Nieuwe Waterweg (niet als aparte pijl opgenomen in Figuur 2-4 vanwege de aanname dat de uitwisseling verwaarloosbaar is): expliciet maken in opstellen van de sedimentbalans.	Uitgevoerd met bestaande kennis. Het transport naar de Euro-Maasgeul uit de aansluitende actieve buitendelta's van de Deltakust is substantieel. Voor de periode t/m 2040 hebben deze buitendelta's echter geen sediment- of suppletiebehoefte. ⁹

2.3 Actieve zone

2.3.1 Beschrijving van het denkmodel en geldigheid voor de aaneengesloten kusten

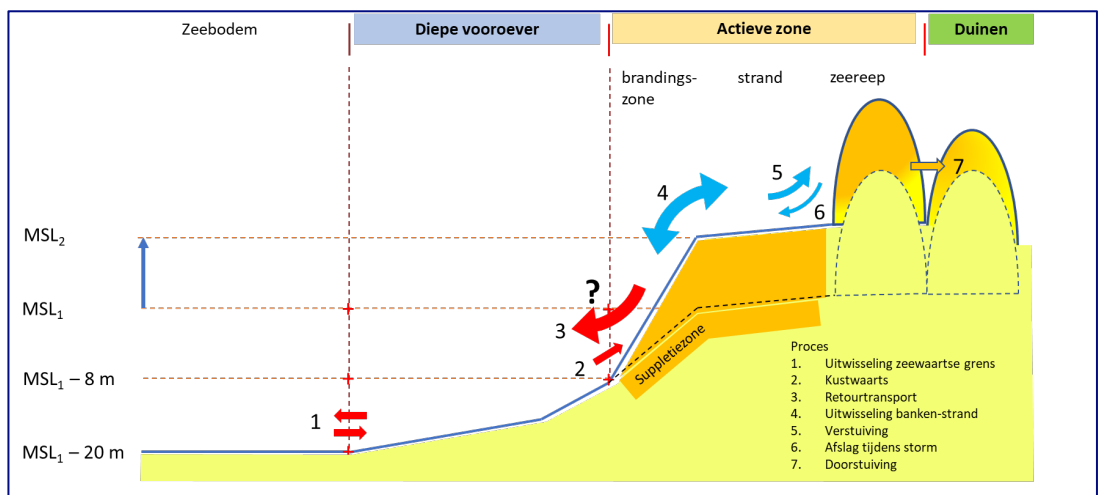
In Taal et al. (2023) is beredeneerd dat de sedimentbehoefte van de zogenaamde 'actieve zone' (grotendeels overeenkomend met de ondiepe kustgebieden) de belangrijkste factor is voor de hoeveelheid suppleties die nodig is voor het onderhoud van de kust bij snellere zeespiegelstijging. Op basis van bodemhoogtegegevens is het actieve deel van de Nederlandse kust ook in kaart gebracht (Figuur 2-5 geeft een kwalitatief beeld vanuit een bovenaanzicht van de Nederlandse kust en Figuur 2-6 vanuit een geïdealiseerd dwarsprofiel, goed toepasbaar voor ononderbroken kusten).

⁹ Voor de lange termijn, met snellere zeespiegelstijging ligt hier nog wel de onzekerheid, die in Taal et al. (2023) is ondervangen met een maximale variant van de actieve zone bij de Deltakust. Wanneer een groter deel van de Deltakust gaat meedoen met het verspreiden van suppletiezand kan het zijn dat het netto via de actieve buitendelta's verspreid wordt naar de Euro-Maasgeul. Hoe zich dat morfologisch zal ontwikkelen en hoe in die toekomst wordt omgegaan met de specie uit de Euro-Maasgeul is niet te zeggen c.q. onbekend.



Figuur 2-5: Schematische weergave van de kustdwarse en kustlangse elementen van de Nederlandse kust, uit Taal et al. (2023).

Het conceptuele model van de actieve zone is gebaseerd op het feit dat zand zich sneller verspreidt in zones waar meer energie voor die verspreiding is. Van zee naar land is dat allereerst de brandingszone (vanaf een diepte van ca. 8 meter NAP) waar de golven de bodem kunnen bereiken onder reguliere omstandigheden en zand goed kunnen transporteren. Op het strand tot en met de eerste duinenrij wordt sediment ook goed verplaatst, door de wind.



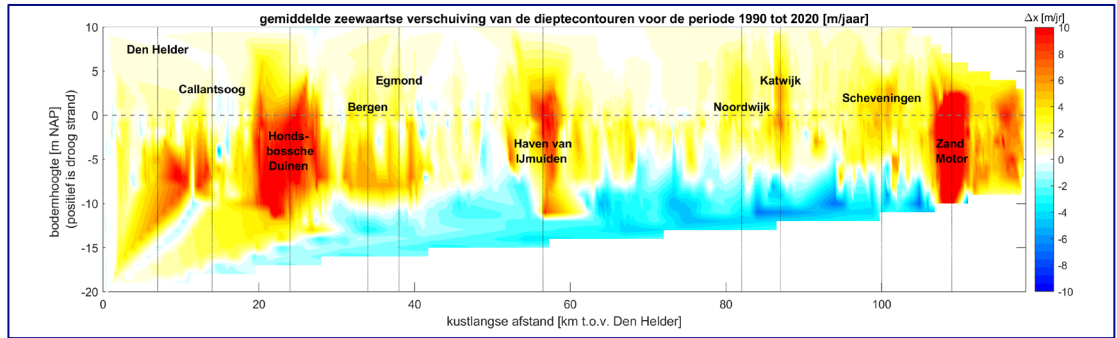
Figuur 2-6: Conceptueel model kustdwarse ontwikkeling en transporten onder zeespiegelstijging. Oranje vlakken zijn onderdelen die moeten meegroeien om de functies te behouden (bron: Taal et al., 2023).

Zo is een zone af te bakenen waar het suppletiezand (dat in de praktijk vrijwel altijd in dat dieptebereik wordt aangebracht¹⁰) zich veel sneller verspreidt dan in de aangrenzende delen van het dwarsprofiel mogelijk is. Zeewaarts van ca. 8 meter waterdiepte is golftransport sterk afgenomen (te diep) en landwaarts van de zeereep is het windtransport sterk afgenomen, omdat het zand in de zeereep wordt vastgehouden door de vegetatie.

Dit denkmodel is voor de Hollandse Kust, waarin niet of nauwelijks getijgeulen voorkomen, bevestigd door de waarnemingen over de afgelopen 30-55 jaar (zie Taal et al., 2023 en Elias et al., 2024). Elias et al. (2024) concludeert: “Voor de Hollandse Kust is er nu een vrijwel sluitende sedimentbalans. Het gesuppleerde sedimentvolume is zeer vergelijkbaar met de

¹⁰ Omdat dit het gebied is waarin de ligging van de kustlijn wordt bepaald en wat daarom, om op lange termijn erosie te bestrijden mee moet groeien met de zeespiegelstijging om de kustfuncties te behouden

volumetoename van de actieve zone. Er lijkt weinig transport op te treden richting diepe vooroever”.



Figuur 2-7: De Hollandse kust van Den Helder (links) tot Hoek van Holland. Op de y-as staat de bodemdiepte uitgezet. De kleur geeft de gemiddelde jaarlijkse verplaatsing van die dieptelijn. De stippellijn staat voor NAP (dus plm. de ligging van kustlijn). De gele kleur betekent een zeewaartse verplaatsing van een dieptelijn, de rode kleur een sterke zeewaartse verplaatsing. Bij de stippellijn is vrijwel overal een rode of gele kleur, dus een zeewaartse verplaatsing van 2 tot 10 meter per jaar.

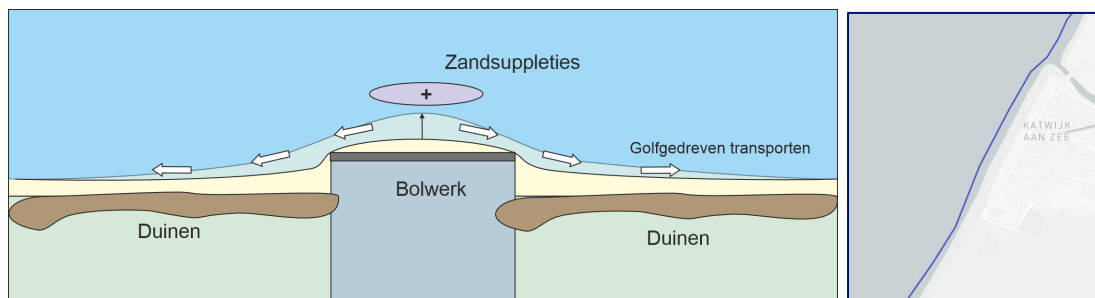
Figuur 2-7 vat de waarnemingen samen door te tonen hoe de Hollandse kust in de periode van het huidige kustbeleid (sinds 1990) zeewaarts is uitgebouwd. Behalve de zeewaartse uitbouw van het deel van de Hollandse kust boven ca. -8 m NAP is ook te zien dat, met uitzondering van noordelijkste deel van Noord-Holland (links in de figuur) het diepere deel zich juist landwaarts verplaatst (licht- tot donkerblauw). De aanduiding ‘versteiling’ kan dan een aantrekkelijke kwalificatie lijken, maar geeft een verkeerd beeld. Er is feitelijk geen overgang die de indruk wekt ‘steil’ te zijn. Het is belangrijk te beseffen dat ter plekke steeds een vrijwel ‘horizontale bodem’ ligt. Wat vooral te zien is, is de bevestiging van het denkmodel ‘actieve zone’: De suppleties verspreiden zich daar goed, omdat het reguliere golfklimaat veel kan bijdragen aan de zandtransporten. In het diepere gebied wordt pas veel zand getransporteerd tijdens stormen. Het netto transport is dan bovendien eerder in kustlengte richting dan dwars op de kust tussen de ondiepe en vooroever (zie b.v. Van der Spek, 2025).

Het grote verschil in morfologische dynamiek en sedimenttransport tussen actieve zone en diepe vooroever staft de hypothese dat de bodem van de diepe vooroever niet actief zal meegroeien met de zeespiegelstijging in de toekomst bij de huidige wijze van handhaving van de kustlijn, zie voor meer detail Van der Spek (2025). Over de geldigheid van deze hypothese voor de komende 15 jaar is weinig onzekerheid. Mocht deze hypothese in de verdere toekomst (deels) onjuist blijken (als de diepe vooroever toch een significante put van sediment blijkt in vergelijking met het suppletievolume) dan zal dit gaan blijken uit analyse van bodemdata en, omdat het compenseren van transport naar deze put feitelijk al opgenomen is in de strategie, ‘vanzelf’ passen in de uitvoering van kustlijninzorg.

Voor de lange termijn gebruikt Taal et al. (2023) deze hypothese / aanname ook: meegroeien van de diepe vooroever is niet nodig voor de strategische doelen (Duurzame veiligheid en duurzaam behoud van de functies en waarden van de kust, zie 1.2.1).

2.3.2 Aanpassing op het denkmodel bij kustplaatsen.

Wanneer de met de rekenregel berekende sedimentbehoefte vergeleken wordt met wat er daadwerkelijk moet worden gesuppleerd, blijkt dat de historische suppletievolumes voor de Hollandse kust veel groter zijn (Rijkswaterstaat, 2020 op basis van Lodder et al, 2021). In Figuur 2-8 is conceptueel verbeeld waarom dit plaatsvindt.



Figuur 2-8: Conceptueel model kustlangse ontwikkeling bij toepassing van suppleties zoals gebeurt langs de Hollandse kust.

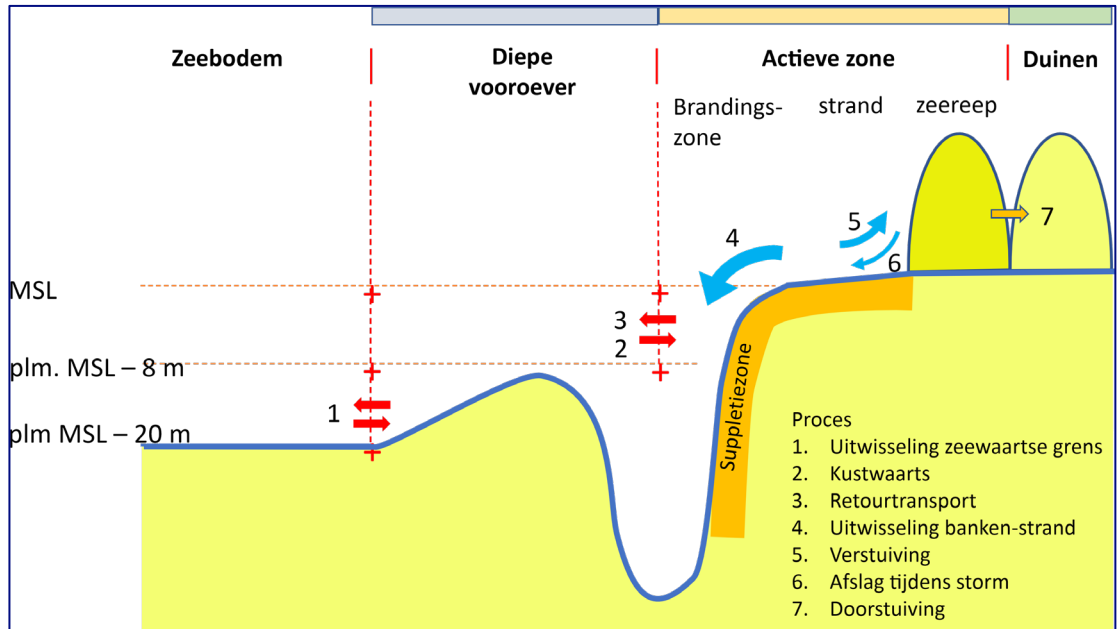
Het rechter paneel (detail van de ligging van de BKL bij Katwijk) toont hoe bij kustplaatsen de te handhaven kustlijn net iets zeewaarts ligt ten opzichte van de aanliggende delen van de kust. Hierdoor zijn kustplaatsen vaak te beschouwen als 'bolwerken'. Het linker paneel laat zien dat vanaf de locaties waar gesuppleerd wordt netto transport is naar de aanliggende kusten, ook als daar geen probleem is met het handhaven van de kustlijn. De kust zal daar in zeewaartse richting uitbouwen. Hierdoor bleek voor de Hollandse kust in de afgelopen 35 jaar een groter suppletievolume nodig dan uit de rekenregel sedimentbehoefte volgt. Dit effect is ook te zien op de schaal van een enkele actieve zone.

De omvang van de kustlangse transporten bij dergelijke configuraties kan bepaald worden met de resultaten van Huisman (2024). Voor dit rapport zal voor actieve zones met kustplaatsen bijna altijd, in dienst van het bepalen van de behoefte voor de komende 15 jaar, gekeken worden naar de historische suppletievolumes (methodiek uitgelegd in 2.4).

2.3.3 Beschrijving van het denkmodel voor kusten met een geul in nabijheid

Langs de Nederlandse kust komt het regelmatig voor dat het kustnabije profiel afwijkt van het ideale model van Figuur 2-6 omdat er een geul (relatief) nabij de kustlijn ligt, zoals bijvoorbeeld langs de Deltakust. In zo'n geval is er wel degelijk significant netto transport vanuit de brandingszone naar dieper water. Dit is geschetst in Figuur 2-9. Grootste verschil is dat pijl nr. 4 uitsluitend richting de geul wijst. Wanneer het sediment in de geul is beland wordt het verder getransporteerd via de geul (in het algemeen kustlangs) en niet langer in kustdwarse richting 'terug' naar de brandingszone. In Taal et al. (2023) is, in dienst van het kunnen afschatten van de oppervlakte die 'mee moet groeien met de zeespiegelstijging' de aanname gedaan dat minimaal de helft van de oppervlakte van de geul onderdeel is van de 'minimale variant van de actieve zone' bij de Deltakust.

Op kleinere tijd- en ruimteschalen lijkt dit geen bruikbare aanname. In dit rapport is daarom gekeken naar de lokale morfologische ontwikkeling en de resultaten van Elias et al. (2024) om tot een bruikbare schatting van het kustdwars transport uit de actieve zone te komen.



Figuur 2-9: Conceptueel model kustdwarse ontwikkeling en transporten onder zeespiegelstijging bij een deel van de kust met een geul in de nabijheid. Te zien is dat pijl 4 alleen 'van de kust af' is gericht. Hierdoor wordt vanuit de suppletiezone veel meer sediment netto verplaatst naar andere delen.

Bij de buitendelta's van de Waddenkust zijn de uitwisselingen van zand tussen de morfologische elementen veel grootschaliger. In 5.1.2 zijn de geulen geheel opgenomen in het actieve deel van de buitendelta. De buitendelta is een grote buffer van sediment. Voor behoud van kustfuncties op lange termijn lijkt het noodzakelijk te waarborgen dat grootschalige zandtransportprocessen blijven plaatsvinden, zoals bypassing (waardoor zandbanken blijven aanlanden op de Waddeneilanden). Daarnaast is het nodig de gevolgen van transport van sediment uit de buitendelta naar het bekken voor de eilandkusten te compenseren (zie Figuur 5-3 en Figuur 5-4 b.v.).

2.3.4 Actieve gebieden, definities

In dit rapport staan meerdere begrippen met 'actief' in de naamgeving. De (methode van de) actieve zone is hiervoor al uitgelegd:

- **Actief sediment en actieve volumebalans:**
Een methode die bepaalt welk sedimentvolume 'actief' is geweest binnen een bepaalde periode.¹¹
- **Actieve buitendelta :** Dat gedeelte van de buitendelta waarvan wordt aangenomen dat deze nu al (Waddenkust) of in de verdere toekomst (Voordelta) meedoet met het verspreiden van suppletiezand.
- **De rand van de (actieve) buitendelta:** Het komt op meerdere plekken voor dat, veelal als reactie op menselijke ingrepen, een buitendelta zich 'terugtrekt'. Zeewaarts daarvan ligt een deel dat over langere tijd in het verleden wel actief was, maar waarvan het aannemelijk is dat dit niet voor de toekomst geldt.
- Aan de landzijde van bovengenoemde rand ligt een **ondieper deel van de actieve buitendelta** dat nu duidelijk actief sediment uitwisselt met de Noordzeekusten van de eilanden en met het bekken.

¹¹ De methode zoekt de minimum bodemligging in een periode van analyse. Sediment daaronder is in die periode niet verplaatst en heeft dus niet deelgenomen aan de morfologische veranderingen. Het sediment boven de minimum bodemligging neemt deel aan de morfologische verandering en is actief / vormt de actieve bodemlaag).

2.4 Berekenen sediment- en suppletiebehoefte

Voor de komende 15 jaar met een rekenregel

In 2.2 is uitgelegd dat *sediment*behoeften bepaald worden met een ‘rekenregel’. Dit conceptuele model stelt dat de behoefte gelijk is aan de som van ‘een oppervlakte (die mee moet groeien)’ * ‘stijging van de zeespiegel’ en daarbij opgeteld ‘de transporten in en uit het mee te groeien gebied’. Toepassen van het denkmodel van de actieve zone betekent vervolgens dat langs die weg de mee te groeien oppervlakte wordt bepaald. Zolang als het beleid en beheer primair is gericht op het handhaven van de kustlijn lijkt dit een juiste benadering, aangezien dit de zone is waarin suppleties zich verspreiden.¹² Bij de berekening is 2,9 mm/jr. als snelheid van zeespiegelstijging gebruikt. Dit is de afgeronde waarde uit de Zeespiegelmonitor 2022 (Stolte et al., 2023).

Tabel 2-1: Wijze berekenen sedimentbehoefte van een kustvak via de rekenregel, met gebruik van de oppervlaktes van alle te onderscheiden actieve zones daarin als bouwsteen.

Naam	opp.	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoefte
	km ²	miljoen m ³ /jr.	miljoen m ³ /jr.	miljoen m ³ /jr.	miljoen m ³ /jr.
Actieve zone 1					
Etc....					
Evt. actieve buitendelta					
TOTAAL					(cf. rekenregel)

De oppervlakte van de actieve zone is ontleend aan Taal et al. (2023). In een aantal gevallen zijn aanpassingen uitgevoerd (b.v. aan noordzijde van Texel) om logischer grenzen te hebben. Meestal is de aanleiding het verkrijgen van een eenduidige zone voor de historische suppletievolumes.

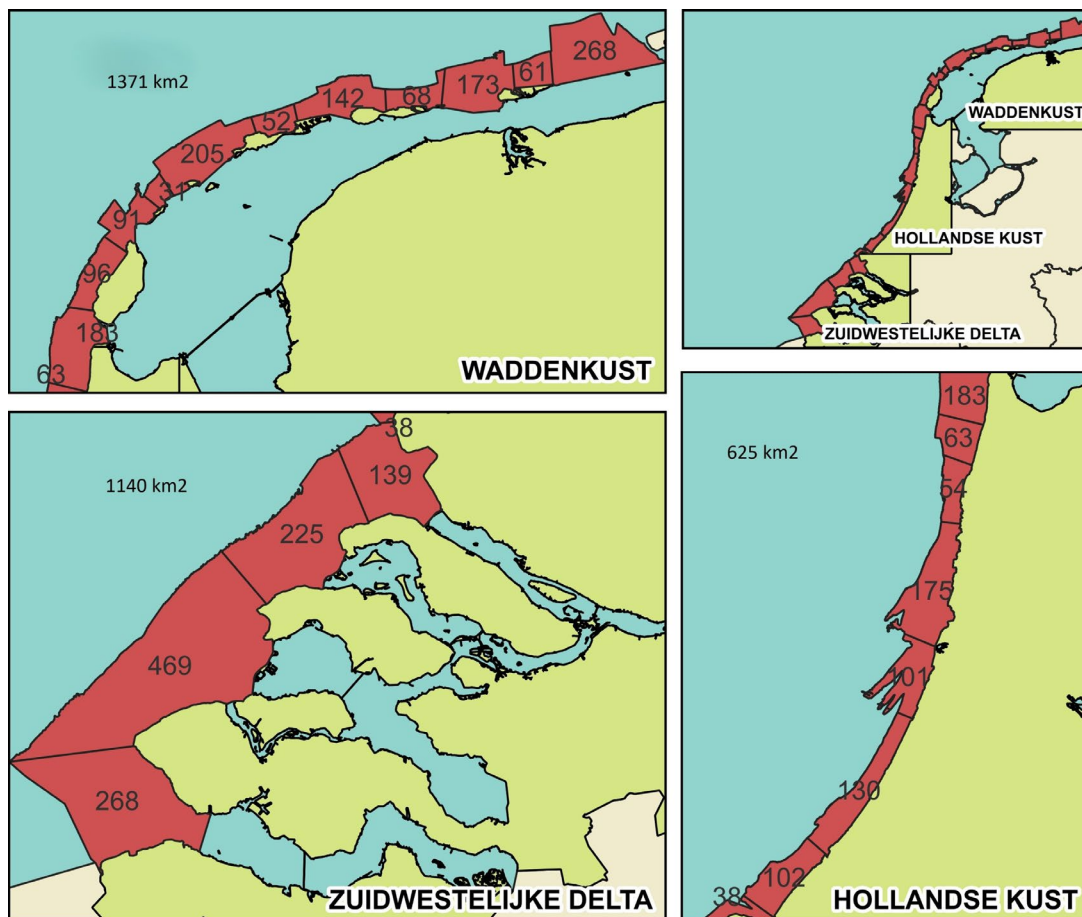
Voor een schaalniveau hoger (het kustvak) worden de getallen van het lagere niveau simpelweg opgeteld (zie Tabel 2-2). Op dit schaalniveau is het ook mogelijk de berekening te doen met toepassing van de rekenregel cf. Rijkswaterstaat (2020), met gebruikmaking van het ‘rekenkundig kustfundament’.

Tabel 2-2: Wijze berekenen sedimentbehoefte voor een deelsysteem via de rekenregel.

Naam	opp.	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoefte
	km ²	miljoen m ³ /jr.	miljoen m ³ /jr.	miljoen m ³ /jr.	miljoen m ³ /jr.
Kustvak 1					
Kustvak 2					
etc..					
TOTAAL					(cf. rekenregel)

De oppervlakten van het rekenkundig kustfundament per kustvak zijn bepaald met een GIS-analyse en voor de snelheid van zeespiegelstijging is de waarde uit de Zeespiegelmonitor 2022 (Stolte et al., 2023) gebruikt van 2,9 mm/jr. De uitkomsten van de GIS-analyse staan in Figuur 2-10. Opvallend is dat de oppervlakten van het rekenkundig kustfundament per kustvak samen steeds iets lager bleken dan de oppervlakte ervan voor het hele deelsysteem (Deltakust, Hollandse Kust, Waddenkust), zoals ze in Rijkswaterstaat (2020) staan. De onzekerheid die hieruit volgt wordt steeds besproken bij de synthese per deelsysteem.

¹² De belangrijkste uitzonderingen hierop zijn de delen van de kust met ‘bolwerken’, Figuur 2-8



Figuur 2-10: Oppervlakte rekenkundig kustfundament per deelsysteem en kustvak.

Voor de komende 15 jaar cf. historische suppletievolumes

De tweede wijze waarop een sediment- c.q. suppletiebehoefte te bepalen is, is door aan te nemen dat benodigde suppleties in een toekomstig tijdvak vergelijkbaar zijn met het recente verleden, in het bijzonder sinds de start van het huidige kustbeleid (1990). Deze aanpak is als eerste gedaan door Lodder et al. (2021), voor de periode 2012 – 2023, ter onderbouwing van Rijkswaterstaat (2020). Voor dit rapport is deze aanpak verder aangevuld, uitgewerkt en gedetailleerd. Voor elk deel van de actieve zone (schaalniveau 4 van de cascade uit 2.1) zijn in dit rapport de historische suppletievolumes bepaald en gepresenteerd in de vorm van Tabel 2-3. Ook hier is de waarde voor een kustvak verkregen door simpelweg op te tellen.

Tabel 2-3: Berekening van historische suppletievolumes.

Naam	Periode start	Periode eind	Historisch suppletievolume
Actieve zone 1			
etc.			
TOTAAL			

Om een zo representatief mogelijke waarde te krijgen zijn alle suppletievolumes vanaf het begin van het huidige beleid (dus vanaf 1990) meegenomen. Hierop waren zeker uitzonderingen nodig, zoals bij grote suppleties die niet voor onderhoud zijn bedoeld (Zwakke Schakel projecten) of waar door (relatief) grootschalige maatregelen het systeemgedrag is veranderd (variërend van de Maasvlakte 2 of Eierlandse Dam tot Zandmotor of Hondsbossche Duinen). Bij zulke kustvakken wordt per geval bepaald of de historische suppletievolumes een zinvolle bijdrage kunnen leveren aan het voorspellen van benodigde volumes voor de toekomst.

Synthese: 'beste aanname per actieve zone en kustvak'

Met gebruik van de hiervoor beschreven methodieken is steeds een sediment en/of suppletiebehoefte bepaald voor de kortere termijn (ca. 15 jaar, waarin er vrij zeker beperkte invloed zal zijn van een mogelijk versnellende stijging van de zeespiegel). Voor deze termijn is het lineair doortrekken van de historische suppleties (na 1990) de geadviseerde optie. Voor geen van de kustvakken zijn op voorhand belangrijke trendbreuken te voorzien in de ligging van de kustlijn. De theoretische behoefte, via de 'rekenregel' is, als er genoeg vertrouwen is in de historische volumes, in de eerste plaats te gebruiken als 'check'. De getallen zouden enigszins vergelijkbaar moeten zijn. Wanneer de theoretische behoefte duidelijk hoger is dan historische suppleties is het advies deze over te nemen, tenzij er gemotiveerd van afgeweken kan (en moet) worden.

Lange termijn met snellere zeespiegelstijging

Hiervoor is lineair doortrekken van de suppleties uit het verleden in alle gevallen geen goede aanpak. Een bepaling via een rekenregel is dan betrouwbaarder. Trendbreuken op een lager schaalniveau worden geacht te zijn 'uitgemiddeld / afgevlakt' op de grotere schaal van ruimte en tijd. De behoefte aan sediment voor 'meegroeien' zal een groter aandeel vormen bij een grotere snelheid van stijgen van de zeespiegel. Langstransporten blijven in dezelfde range. Voor de transporten vanaf de buitendelta's naar de bekkens van de Waddenzee geldt, gemiddeld over hele Waddengebied, maximaal een verdubbeling van het netto transport (zie Taal et al., 2023, Bijlage B, figuur B-10). Voor de netto transporten naar estuaria, nu grotendeels beïnvloed door het sedimentbeheer in het estuarium, zijn nu geen betere schattingen mogelijk dan 'constant blijven'.

Voor elk kustvak wordt, als input voor een eventuele update van de berekeningen in Taal et al. (2023), besproken of de sediment en/of suppletiebehoefte voor de lange termijn nu beter bepaald kunnen worden, met de kennis van (voornamelijk) Elias et al. (2024). In een aparte rapportage voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (Taal et al, 2025) is dit uitgewerkt.

Met het geheel van al de berekeningen is het mogelijk weer verschillende beleidsopties uit te werken, net als in Rijkswaterstaat (2020).

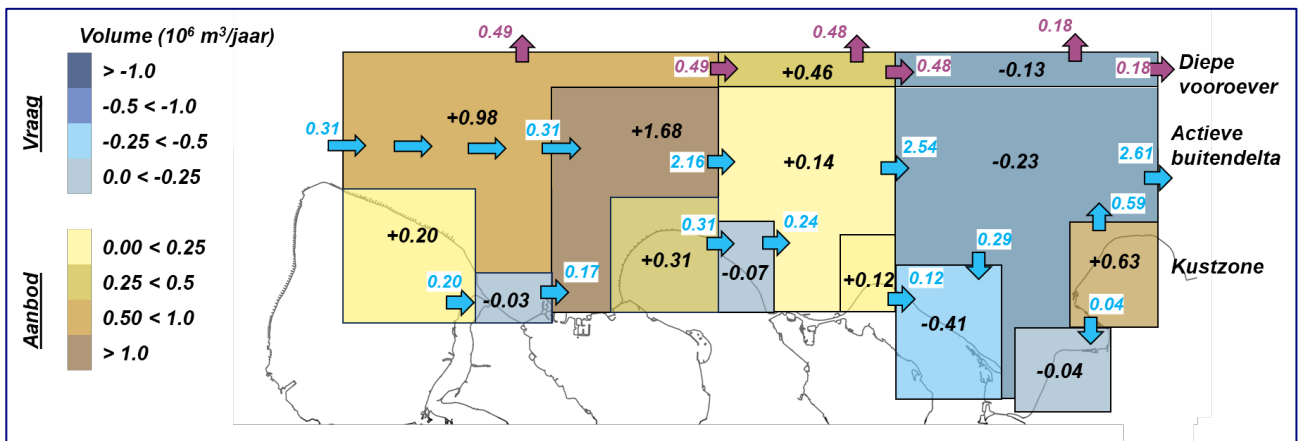
3 Kennis deelsysteem Deltakust

3.1 Hele Deltakust

De Deltakust is ingedeeld langs vier kustvakken die gerelateerd zijn aan drie bekkens (Haringvliet, Grevelingen, Oosterschelde) en een estuarium (Westerschelde, of feitelijk het Schelde-estuarium). De grens van het deelsysteem ligt aan de zuidzijde op de Belgisch-Nederlandse grens en aan de Noordzijde bij de Euro-Maasgeul (zie grenzen in Figuur 2-1). De ondiepere zee vanaf Walcheren naar het noorden wordt vaak aangeduid met 'Voordelta'. Ze omvat de (voormalige) buitendelta's van de drie (gedeeltelijk) afgesloten bekkens. In de meeste gevallen (zoals in de N2000-wetgeving) is de grens van de Voordelta aan de zuidzijde gelegd bij de monding van de Westerschelde. Het is een samenhangend morfologisch en ecologisch systeem van 835 km², zie b.v. het aanwijzingsbesluit N2000 (Programmadirectie Natura 2000, 2009).

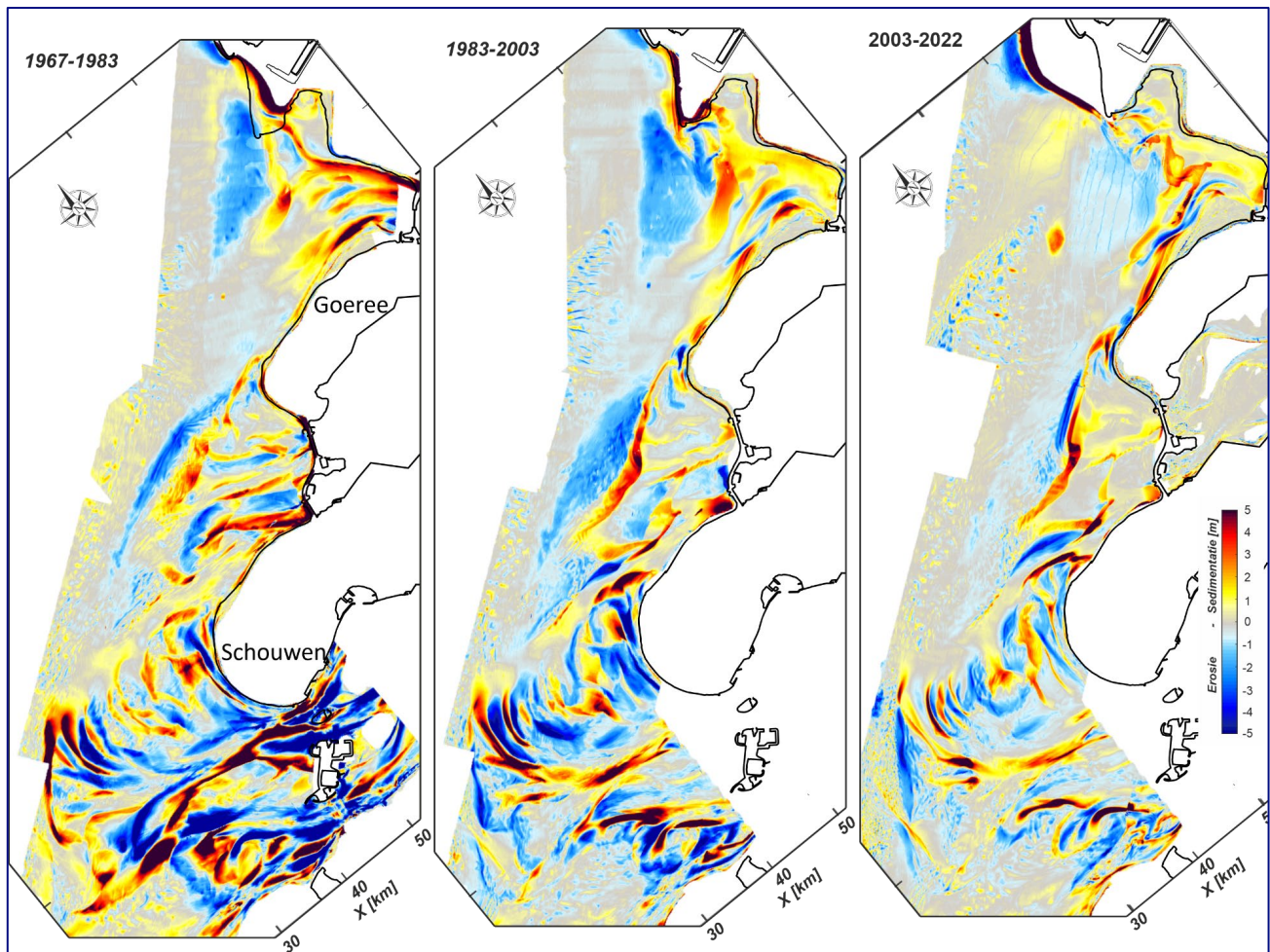
De morfologie van hele Deltakust (dus Voordelta plus monding van de Westerschelde) wordt grootschalig bepaald door de Deltawerken, maar ook door sedimentbeheer, waaronder vaargeulonderhoud en de kustlijnzorg. Vanwege de uiteenlopende tijdschalen waarop deze menselijke ingrepen plaatsvinden en in het bijzonder de nog lopende aanpassingen aan de afsluitingen, is de begrenzing van de actieve zone langs de Deltakust minder duidelijk vast te stellen dan voor de rest van de Nederlandse kust.

Voor het beschrijven van de sedimenthuishouding en het bepalen van de sediment- en suppletiebehoefte wordt veel gebruik gemaakt van Elias et al. (2024). De synthesefiguur voor de Deltakust van de sedimentbalans is daarom overgenomen in Figuur 3-1. Die figuur maakt ook duidelijk dat vanuit de zone waarin nu wordt gesuppleerd, dat is de minimum variant voor de actieve zone als bepaald in Taal et al. (2023), er soms netto transport is naar de aangrenzende actieve buitendelta. Dit transport verschilt per kustvak en is in totaal relatief beperkt, in de orde van 0,2 miljoen m³/jr. Uit Elias et al. (2024) volgt ook dat binnen de opeenvolgende actieve buitendelta's van Oosterschelde, Grevelingen en Haringvliet er een kustlangs sedimenttransport is van meer dan 2 miljoen m³/jr.



Figuur 3-1: Synthese van de sedimentbalans voor deelsysteem Delta (excl. monding Westerschelde) uit Elias et al. (2024). De pijlen geven de richting aan van het gemiddelde jaarlijkse transport. De getallen in een vak geven aan of van daar uit sediment is getransporteerd (het is dan een bron van sediment, met een positieve waarde) of dat er toename van volume was (het is dan een 'put' van sediment, met een negatieve waarde).

Door zeespiegelstijging veranderen de huidige karakteristieken van de sedimenthuishouding de komende 15 jaar niet direct. In dit hoofdstuk wordt duidelijk dat de meeste suppleties nodig zijn vanwege transportgradiënten en afvoer via geulen zoals geschetst in Figuur 2-9. Op langere termijn zal er eerst iets meer of iets frequenter gesuppleerd moeten worden. Een groot effect door zeespiegelstijging ontstaat als hierdoor de geulen gaan verplaatsen en/of het gedrag van de vooroever grootschalig verandert. Dit lijkt op basis van de huidige kennis niet zo. De kans is nu niet groot dat een significant deel van de huidige actieve buitendelta's mee gaan doen met de verspreiding van suppleties. Voorlopig is er nog sprake van verzanding nabij de kustlijn en een terugtrekkende buitenrand van de buitendelta (zie Figuur 3-2 en toelichting daarop).



Figuur 3-2: Illustratie van de morfologische veranderingen in de Voordelta. Merk op dat de afsluitingen van Haringvliet en Grevelingen (voltooid in 1970 en 1971) aan het begin van het tijdvak in de linker figuur vallen. De completering van de Oosterscheldekering (1986) valt aan het begin van het interval van de middelste figuur. De Maasvlakte2 is tussen 2003 en 2008 aangelegd (dus in de periode van het rechter figuur). Dit overzicht toont dat de omvang van de morfologische veranderingen langzaam afneemt (maar nog wel doorgaat) en dat er overwegend sediment naar de eilandkoppen is getransporteerd (gele en rode kleuren). Alleen bij de koppen van Goeree en Schouwen is te zien dat er nabij de kustlijn een geul significant landwaarts is opgeschoven (blauwe strook naast een geel/rood gebied zeewaarts).

In dit hoofdstuk zal blijken dat de suppleties nu vooral plaatsvinden langs een kustlijn waar een kustlangse gradiënt in sedimenttransport is (zie Figuur 2-8) en/of geulen de handhaving van de kustlijn bemoeilijken (zie Figuur 2-9) c.q. voor effectieve afvoer van sediment zorgen. De geulen van de zegaten richting de rand van de buitendelta's verspreiden het zand

overigens niet over de gehele actieve buitendelta, maar hebben veelal de neiging te verondiepen omdat ze deels of geheel hun functie verliezen. Ze hebben daardoor beperkt effect op de kustlijnpositie, in tegenstelling tot geulen die voor de koppen van de eilanden liggen en in stand gehouden worden door de noord-zuid stroming van het getij.

Zeker op een termijn van 15 tot 30 jaar is het niet aannemelijk dat de afname van het sedimentvolume in de actieve buitendelta's invloed heeft op de suppletiebehoefte van de kusten van Schouwen, Goeree en Voorne. Of en in welke mate dit in een toekomst met snellere zeespiegelstijging ook geldt is feitelijk net zo onzeker als in Taal et al. (2023) is geformuleerd.

3.2 Rondom monding Westerschelde

3.2.1 Overzicht

De monding van de Westerschelde¹³ wijkt af van andere kustvakken door de uitwisseling met het Schelde-estuarium en de aanwezigheid van de landsgrens met België. Om het systeemgedrag te beschrijven voor het bepalen van sedimentbehoeften zijn specifieke conceptuele modellen nodig. Bijlage A presenteert een sedimentboxmodel van het Nederlandse deel van de monding, in aansluiting op Elias et al. (2024)¹⁴. De actieve volumebalans van het hele mondingsgebied is daarin berekend op basis van onderstaande deelgebieden. Dat geeft ook de indeling van deze sectie.

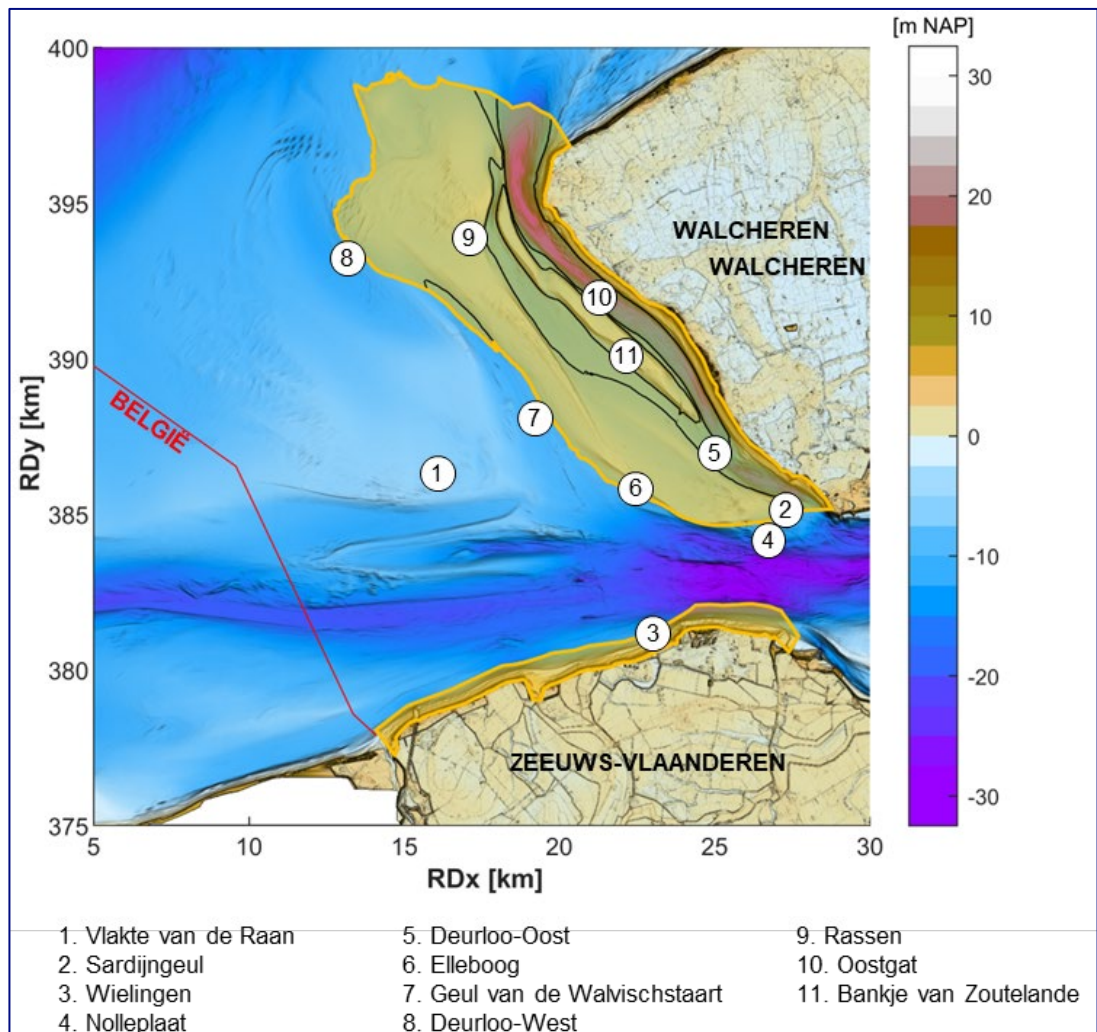
De deelgebieden in en rond de monding van de Westerschelde zijn:

1. de kust van Zeeuws-Vlaanderen. Dit strekt zich uit tot de Vlaams-Nederlandse grens, met het Zwin, in het westen. Dit gebied wordt besproken in 3.2.2.
2. de kustzone van Zuidwest Walcheren. Deze wordt besproken in 3.2.3, in het bijzonder 3.2.3.2
3. de monding van de Westerschelde, met als te onderscheiden morfologische elementen:
 - a. de 'banken' tussen de Vlakte van de Raan en het Oostgat (Nolleplaat, Elleboog, Rassen, Bankje van Zoutelande en tussenliggende geulen). Ze worden besproken in 3.2.3.3¹⁵
 - b. het Oostgat en aansluitend de Sardijngeul, zijnde de getijgeul tussen de banken en Zuidwest Walcheren, besproken in 3.2.3.4
 - c. de Wielingen, de brede en diepe geul die zuidelijk van de centraal in de monding gelegen Vlakte van de Raan ligt. Dit gebied wordt besproken in 3.2.4
 - d. de Vlakte van de Raan, die centraal in de monding ligt en waar de landgrens ook overheen loopt (waardoor de grens geen morfologische betekenis heeft). Ze strekt zich in het Belgische deel nog ver zeewaarts en zuidelijk uit en gaat dan min of meer vloeiend over in de Vlaamse Banken. Dit gebied wordt besproken in 3.2.4
4. de Westerschelde (westelijk van de lijn Vlissingen-Breskens), een estuarium met een meergeulenstelsel waarin veel sedimentbeheer plaatsvindt. Op dit deelgebied gaat dit rapport niet verder in dan wat in Taal et al., 2023 is besproken, uitgezonderd een verhandeling over de netto transporten richting de Westerschelde (3.2.5).

¹³ 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.

¹⁴ In dat rapport wordt verwezen naar een nog niet publiek gemaakt memo uit 2023, dat een update kreeg en nu via Bijlage A gepubliceerd wordt.

¹⁵ Merk op dat tussen de banken en de Vlakte van de Raan nog een geul ligt: de geul van de Walvischstaart, uitlopend in Deurloo-West. Deze hoefde niet apart onderscheiden te worden in Elias, 2023, gegeven de doelstellingen van dat onderzoek.



Figuur 3-3: Overzicht en in de tekst genoemde deelgebieden en morfologische elementen in de monding van de Westerschelde, gebaseerd op de meest recente Vaklodingen. De eilanden zijn opgevuld met het AHN4. Ook de actieve zones van Zeeuws-Vlaanderen en de ruime variant bij Zuidwest Walcheren zijn aangegeven (gele contouren).

In Taal et al. (2023) zijn de deelgebieden 1, 2, 3a en 3b als actieve zone aangeduid. Bijlage A en Huisman (2024) maken het mogelijk op een gedetailleerder niveau de ontwikkeling van de sedimentbalans en toekomstige sedimentbehoeften te bespreken.

Bijlage A laat zien dat op het niveau van de hele monding van de Westerschelde de inhoud van Oostgat en Wielingen toeneemt (ze worden dieper en/of breder). De ondiepere gebieden, voornamelijk de kustzones en het bankengebied, nemen in volume toe (en worden dus ondieper en/of smaller).

3.2.2 Kust van Zeeuws-Vlaanderen

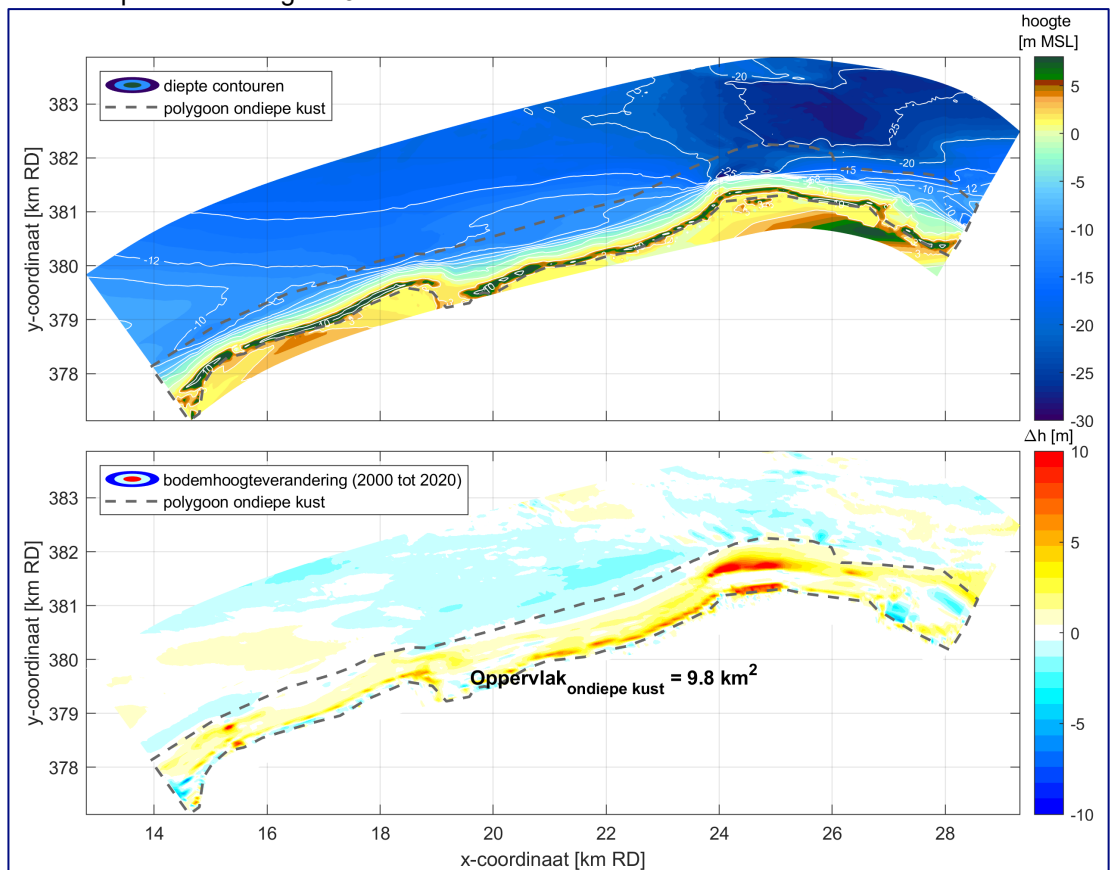
3.2.2.1 Karakteristieken

De kust van Zeeuws-Vlaanderen loopt vanaf het Zwin, waar de grens met België ligt, tot aan de havendammen van de veerhaven bij Breskens (waar feitelijk geen langstransport meer is). Hier begint in studies meestal de Westerschelde.¹⁶ De kust van Zeeuws-Vlaanderen is een,

¹⁶ Hoewel soms de grens iets oostelijker wordt genomen, om het daar aanwezige strand en de met zand afgedekte dijkversterking mee te nemen in analyses.

morfologisch gezien, relatief geïsoleerd gebied, langs de grote geul 'Wielingen'. De Vlaamse kust ten westen ervan, tot de havendammen van Zeebrugge (met toegangsgedul Pas van het Zand) heeft een karakteristiek vergelijkbaar met Zeeuws-Vlaanderen. De haven van Zeebrugge is in 1985 zeewaarts uitgebreid en heeft de morfologische ontwikkeling van dit stuk van de Vlaamse kust daarna sterk beïnvloed.

De kust van Zeeuws-Vlaanderen is geen doorlopende kust. Op basis van morfologische kenmerken kan het ingedeeld worden in vier deelgebieden (cf. Mastbergen & Quataert, 2020): (1) de zone van Cadzand-bad tot Zwarte Polder, (2) de Zwarte Polder¹⁷, (3) Kruishoofd¹⁸ - Nieuwesluis, waar de kustlijn concaaf (hol) is tussen deze twee harde "ophangpunten" en (4) Nieuwesluis - Breskens, iets meer zeewaarts liggend met erachter gelegen de Waterdunen¹⁹. In al deze deelgebieden zijn ook Zwakke Schakel versterkingen uitgevoerd (zie voor meer info 3.2.2.2). Van west naar oost ligt de kustlijn steeds dichter bij de geul, met lokaal een steile overgang naar een diepte van meer dan twintig meter, zie bovenste paneel van Figuur 3-4.



Figuur 3-4: Bodemhoogte van de kust van Zeeuws-Vlaanderen, bodemverandering over de periode 2000 tot 2020 en de polygoon van de ondiepe kustzone. (uit Huisman, 2024).

Het onderste paneel van Figuur 3-4 toont waar de kust morfologisch dynamisch is. Daarin is te zien dat veel zand in beweging is geweest na suppleties en kustversterking. Dat past bij het beeld (zie verderop) dat dit deel van de kust relatief veel dwarstransport naar dieper

¹⁷ Deze is gevormd door een dijkdoorbraak in 1802 waarbij de Zwarte Polder overstroomde. Het westelijk gedeelte is in 1829 opnieuw bedijkt, de zogeheten Herdijkte Zwarte Polder. De overgang met de Verdrongen Zwarte Polder, een sluftegebied, is abrupt middels een sprong in de kustlijn.

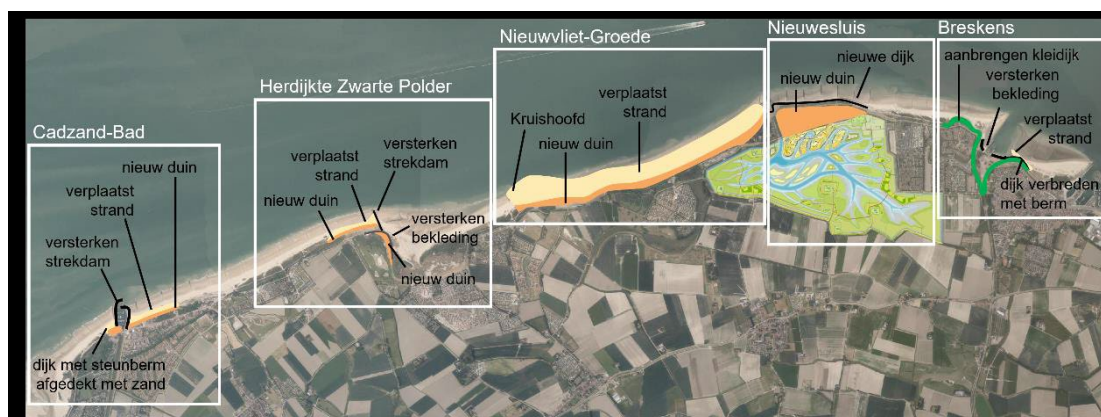
¹⁸ Een cultuurhistorisch monument, ook Westnol genoemd, waarschijnlijk een restant van een 17e-eeuwse zeedijk

¹⁹ Het meest westelijke (vanaf de verdedigde spuisluis en getijdenduiker richting Waterdunen die de grens vormt) is het opvallend zeewaarts stekende deel. Daar is een relatief smal strand waar strandhoofden, oeverwerken en suppleties de Wielingen op afstand moeten houden.

water heeft. Het verplaatste sediment komt vervolgens (de Wielingen is vloeddominant) in de Westerschelde. Daar draagt het bij aan de doorgaande sedimentatie van 'het vaarwater onder de Hoofdplaat', zie o.m. Consortium Deltares-IMDC-Svašek-Arcadis (2013a) en Taal et al. (2019), en zo ook aan de algehele sedimentimport in de Westerschelde.

3.2.2.2 Ontwikkelingen – Zwakke Schakels

De morfologische ontwikkeling van dit deel van de kust is sterk gedomineerd door menselijk ingrijpen en de laatste twee decennia in het bijzonder de Zwakke Schakel versterkingen (2009 - 2016). Figuur 3-5 toont deze, gevolgd door, van west naar oost, een korte bespreking.



Figuur 3-5: De Zwakke Schakel versterkingen in Zeeuws-Vlaanderen (uit Vermeer en Van der Werf, 2022).

De kust is bij Cadzand-Bad versterkt door zeewaarts een nieuw duin aan te leggen van enkele tientallen meters breed. Tegelijkertijd is extra zand aangebracht met als doel het strandoppervlak gelijk te houden. In de Zwakke Schakel versterking is een slijtlaag meegenomen.²⁰

De kustversterking bij de Herdijkte Zwarte Polder hield ook een verbreding in. Er is een nieuw duin aangelegd, waarbij zand uit de geul in de Verdrongen Zwarte Polder is gebruikt. Er is ook een nieuwe strekdam gebouwd die invloed heeft op de oostelijk gelegen kustlijn (zie volgende alinea).

Er is in 2009-2010 2,8 miljoen m³ zand aangebracht bij Nieuwvliet-Groede om nieuwe duinen aan te leggen tegen de bestaande dijk. Daarbij is de kustlijn ongeveer 50 meter richting zee opgeschoven. Tevens is een 'erosieberm' aangelegd in zee, ook bekend als een 'zandbrommer'. De morfologische ontwikkeling van de kust tussen Nieuwvliet-Bad en Groede is recentelijk beschreven in Vermeer en Van der Werf (2022). Zij richten zich op het zogeheten Kruishoofd, het meest westelijke deel van dit deelgebied. Het handhaven van de kustlijn blijkt daar niet goed mogelijk. Sinds de Zwakke Schakel versterking in 2009 erodeert de kust er, in de periode tussen twee strandsuppleties, gemiddeld met 9 tot 12 meter per jaar. Van belang is dat de BKL hier tweemaal (in 2003 en 2012) zeewaarts is verlegd (dus dichterbij de Wielingen is gekomen). Dit is één van de twee belangrijke oorzaken van het probleem met het lokaal handhaven van de kustlijn. Er is namelijk nu een erg smal strand en zeer steile vooroever. De tweede oorzaak is de gestage verdieping en verbreding van de Wielingen, die daardoor steeds dichterbij de kust komt te liggen. Zand dat door golven is geërodeerd gaat niet terug en wordt gemakkelijk via de Wielingen kustlangs weggevoerd. Daarnaast (feitelijk een derde oorzaak) zal er waarschijnlijk beperkte zandaanvoer vanuit het westen zijn, vanwege de bijna driehonderd meter lange strekdam.

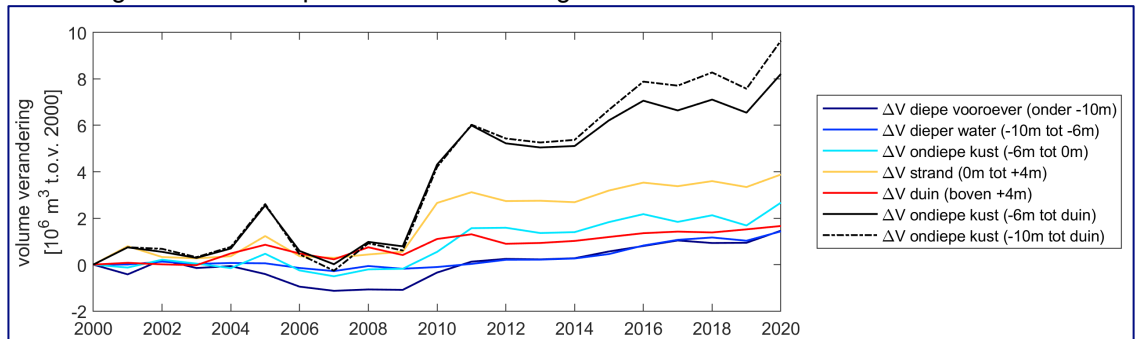
²⁰ De omvang ervan correspondeert met 16,500 m³/jr. (dat is over 12 jaar, cf. memo Lodder et al.)

De kustversterking Nieuwesluis was, door de aanwezigheid van de Wielingen, niet in zeewaartse richting mogelijk. Hier is de dijk landwaarts versterkt met een nieuw duin. Deze ontwikkeling is gecombineerd met de aanleg van Waterdunen, gericht op natuur en recreatie. Verder oostelijk, bij Breskens, is de kust versterkt op drie locaties, maar met nauwelijks een zandige component (zie b.v. Waterschap Scheldestromen, 2014).

3.2.2.3 Ontwikkelingen sedimentvolumes

De reguliere suppleties en Zwakke Schakel versterkingen brachten de afgelopen decennia veel zand aan. Het volume van de ondiepe kustzone c.q. de actieve zone is hierdoor toegenomen. Het blijkt dat veel van het aangebrachte zand is getransporteerd naar dieper water. Huisman (2024) komt in 2000 – 2020 op 8,8 miljoen m³ netto kustdwars transport (0,44 miljoen m³/jr.) naar de Wielingen (en waarschijnlijk van daar naar de Westerschelde). Dit is meer dan de helft van de 17,2 miljoen m³ aanvoer in die periode (waarvan 14,2 miljoen m³ suppleties, de rest, 3 miljoen m³ komt kustlangs uit Vlaanderen). Voor de gemiddelde volumetoename in 20 jaar komt Huisman (2024) op 8 tot 10 miljoen m³ (afhankelijk of NAP -6 m of -10 m als grens wordt aangehouden). Ongeveer 60% ervan bevond zich op het strand en in het duin. Hierin zitten de Zwakke Schakel versterkingen dus verwerkt.

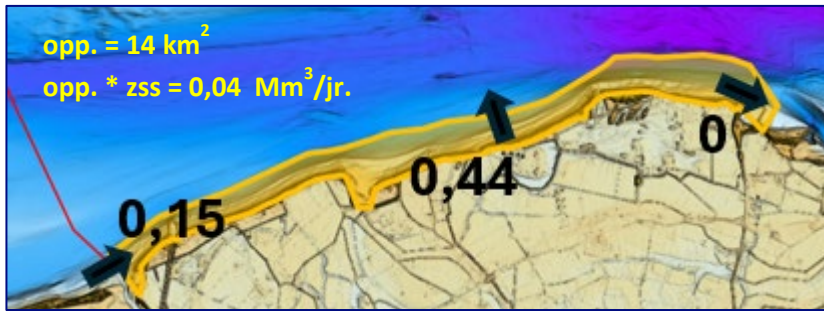
Bijlage A geeft voor 2005-2020 gemiddeld 0,83 miljoen m³/jr. aan suppleties in de kustzone van Zeeuws Vlaanderen, waarvan 0,77 miljoen m³ naar de Wielingen is gegaan (en van daar een nog groter volume naar de Westerschelde). Dat zijn grotere transporten uit de actieve zone dan Huisman (2024). De belangrijkste oorzaak daarvan is de andere begrenzing van het rekenvak²¹. Bijlage A geeft voor de netto sedimenttoevoer vanaf de Belgische kust bijna 2 miljoen m³/jr. Dit is echter deels op dieper water via de Wielingen. Op basis van Huisman (2024) is een kustlangse aanvoer in de actieve zone van ca. 0,15 miljoen m³/jr. de beste schatting (zie ook Figuur 1-1). Oostwaarts nemen die netto transporten eerst toe (tot 0,2 miljoen m³/jr.) en nemen uiteindelijk weer af tot 0 m³/jr. bij Breskens (havendam). Figuur 3-6, uit Huisman (2024), laat zien dat er in het deel dieper dan -10 meter NAP (binnen zijn analysegrenzen, zie stippellijn in Figuur 3-4) volumetoename is. Dit past bij hetgeen hiervoor uiteen is gezet over transporten naar de Wielingen.



Figuur 3-6: Volumeontwikkeling van kustdwarse secties van de ondiepe kustzone van Zeeuws-Vlaanderen (uit Huisman 2024).

Gezien voorafgaande lijken de berekeningen van Huisman (2024) van transporten in en uit de actieve zone van Zeeuws-Vlaanderen het meest representatief voor de komende 15 jaar. De waarden van Huisman (2024) die gebruikt worden in Tabel 3-1 zijn getoond in Figuur 3-7.

²¹ Huisman, 2024 heeft voor zijn studie een begrenzing nodig die de meest morfologische gebieden omsluit en komt daarom lokaal veel dieper uit, zie Figuur 3-4.



Figuur 3-7: Transporten in en uit de actieve zone bij Zeeuws-Vlaanderen, te gebruiken in Tabel 3-1. Voor het zeewaarts transport is de waarde van Huisman (2024) genomen.

3.2.3 Zuidwest Walcheren

3.2.3.1 Wel of niet beschouwen als actieve buitendelta?

Aan de noordoostzijde van de Vlakte van de Raan, langs de kust van Walcheren, ligt een deel van de monding met karakteristieken van een actieve buitendelta (interactie van geulen en banken) zoals bij zeegaten in het Waddengebied te zien is. In Taal et al. (2023) is aangenomen dat dit hele gebied als actieve zone kan worden beschouwd.

Een nadere analyse van de sedimentstromen geeft aanleiding tot een andere hypothese, die tot een veel beperktere actieve zone leidt, maar wel met flinke transporten uit die zone. Deze hypothese is dat alleen een smalle strook langs de kust kan (mee)groeien en dat het gesuppleerde zand langs zuidwest Walcheren voornamelijk via het Oostgat naar de Westerschelde gaat, terwijl het Oostgat zelf en het bankengebied nauwelijks meegroeien / in hoogte toenemen. Dit alternatieve denkmodel lijkt passender en is daarom toegepast voor de komende 15 jaar, mede kijkend naar de historische suppletievolumes (zie 3.2.6). Uitwerking en toetsing van beide denkmodellen op kortere (tot 20 jaar) en langere (eeuw) tijdschalen moet via verder onderzoek gebeuren.

Het gedrag bij de Westkapelse Zeedijk past bij de hypothese van een smallere actieve zone vanwaar uit grote transporten plaatsvinden. Rond de westzijde van de zeewering versnelt de stroming, is de geul verdiept en moet regelmatig zand worden aangevuld. Een deel daarvan draagt waarschijnlijk bij aan de sedimentatie van de Rassen (ten westen en noordwesten van het Oostgat).

3.2.3.2 Te onderhouden kuststrook langs Zuidwest Walcheren

De zuidwestkust van Walcheren vraagt veel zorg qua waterveiligheid vanwege de nabijheid van het Oostgat. Deze wordt langs grote delen langzaam dieper en vertoont landwaartse migratie.

Er zijn vier zeedijken aanwezig: de Westkapelse Zeedijk (de noordgrens van dit stuk kust), de dijk bij Zoutelande en de Nolledijk (beiden met een zandige kust ervoor, met BKL) en de versterkte boulevard van Vlissingen (de zuidgrens van het gebied). Dit stuk kust wordt verder beschermd met strandhoofden en suppleties. De strandhoofden liggen er al langer, vanaf 1856. Sinds 2005 worden de strandhoofden niet meer versterkt met nieuwe steenbestortingen, maar alleen via de geulwand- en strandsuppleties. Dit zand blijkt behoorlijk effectief te worden afgevoerd via het Oostgat, wat in hoge mate de suppletiebehoefte bepaalt.

3.2.3.3 Bankengebied voor de kust van Zuidwest Walcheren

Ten noorden van het drempelgebied, naast het Oostgat strekt het Bankje van Zoutelande zich uit tot ongeveer Westkapelle. Ten zuiden van het drempelgebied ligt het bankengebied van de Nolleplaat waar ook een klein langgerekte bankje Elleboog ligt. Tussen deze twee

banken ligt een ondiepe geul Deurloo Oost met een NW-ZO oriëntatie. Ook de Deurloo-Oost komt op het drempelgebied uit waardoor er op de drempel drie geulen samenkomen.

De grootste morfologische veranderingen doen zich voor langs de zuidwestkust van Walcheren, waar geulen en banken verplaatsen. Hoewel bankverplaatsing grote bruto verandering in morfologie veroorzaakt, resulteert dit in weinig netto verandering in sedimentvolume.

3.2.3.4 Oostgat en Sardijngeul

Ter plaatse van de overgang van het Oostgat naar de Sardijngeul ligt ter hoogte van Jarkus raaien 3110 – 3215 een drempelgebied. Hier wordt regelmatig gebaggerd ten behoeve van de scheepvaart. Sinds 2014 gebeurt dit proactief (jaarlijks). Iedere keer wordt ca. 200.000 m³ gebaggerd en verspreid in het kuststelsel, met name nabij de Westkapelse Zeedijk. Dit is terug te zien als kleine vooroeversuppleties (2014, 2015, 2016, 2018, 2019, 2021, 2023). In 2020 is eenmalig een strandsuppletie (210.000 m³) met dit gebaggerde zand uitgevoerd bij Dishoek om de waterveiligheid na stormafslag te waarborgen. In 2022 is eenmalig 188.646 m³ zand naar een project van de Provincie Zeeland / Zeeuws Landschap gegaan: de Hooge Platen in de Westerschelde.

Speciale aandacht vraagt de geulwandsuppletie uit 2009 van ruim 6 miljoen m³. Deze was onder meer nodig om ruimte te maken voor strandsuppleties en het versterken van de geulwand. Hoewel de suppletie relatief goed blijft liggen is het waarschijnlijk dat deze periodiek herhaald moet worden.

3.2.3.5 Ontwikkelingen sedimentvolumes Zuidwest Walcheren

Uit Bijlage A volgt dat de zuidwestkust van Walcheren sterk erodeert en dat van de suppleties slechts 0,24 miljoen m³/jr. achterblijft in de kustzone. Het Oostgat is tegelijkertijd in zandvolume afgenomen (dieper geworden, -0,28 miljoen m³/jr.) en de naastliggende Banken veranderen niet sterk (0,06 miljoen m³/jr. volumetoename). De conclusie is dat er fors netto transport was uit het gebied dat onderhouden wordt met suppleties. De belangrijkste eindbestemming hiervan lijkt uiteindelijk de Westerschelde (zie 3.2.5). Het netto transport in zuidelijke richting volgt ook uit Huisman (2024). Huisman berekent jaargemiddelde kustlangse transporten die variëren van 80.000 tot 170.000 m³/jr. in zuidelijke richting tussen Westkapelle en Vlissingen. Dit laatste is echter exclusief het transport via de geul, wat het verschil met Bijlage A verklaart.

3.2.4 Het centrale deel: Wielingen en Vlakte van de Raan

In het vigerende conceptuele model heeft de Wielingen geen sedimentbehoefte. De geul is belangrijk voor het transport van zand naar de Westerschelde. De geul is ook een put (sink) van sediment (er wordt ook gebaggerd, zie Bijlage A).

Voor de Vlakte van de Raan geldt dat deze momenteel niet direct uitwisselt met de zones waarin een kustlijn wordt onderhouden. In Taal et al. (2023) is de Vlakte van de Raan aangeduid als 'mogelijk actieve zone in de toekomst'. Dit kan gebeuren als er beleidsdoelstellingen komen voor het meegroeien van de Vlakte van de Raan met zeespiegelstijging. Deze kunnen gerelateerd zijn aan de natuurwaarden en/of het functioneren van de Westerschelde. Om dit beter te begrijpen loopt momenteel een onderzoeksprogramma gekoppeld aan een kustfundamentsuppletie op de overgang van de Vlakte van de Raan naar de Wielingen, uit te voeren in 2025 of 2026. Met de huidige kennis over het functioneren van de monding van de Westerschelde is veruit de beste aanname dat de Vlakte van de Raan niet mee zal doen in het verspreiden van suppletiezand²², in ieder geval niet op de termijn (15 jaar) waarop dit rapport zich richt.

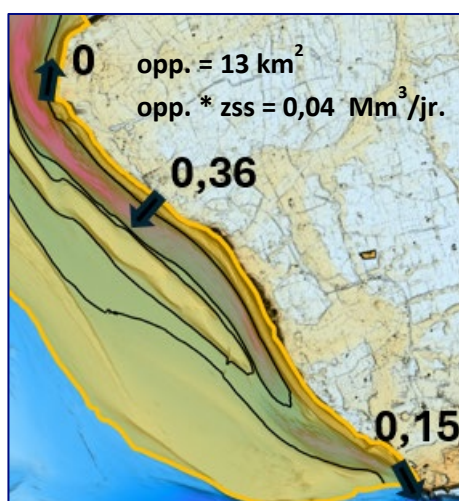
²² Uiteraard met uitzondering van suppleties die direct gericht zijn op de Vlakte van de Raan, zoals de kustfundamentsuppletie die in 2025 is voorzien.

3.2.5 Uitwisseling met Westerschelde

De uitwisseling van sediment met de Westerschelde is uitvoerig geanalyseerd door Elias et al. (2023). De beste schatting voor de lange termijn is cf. Bijlage A een import in de Westerschelde van 2 miljoen m³/jr. Dit getal is ook gebruikt in Taal et al. (2023). De importen naar de Westerschelde kunnen worden verdeeld in een deel dat afkomstig is van de kust van Zeeuws-Vlaanderen (0,44 miljoen m³/jr.)²³, een deel van dieper water in de monding en een deel dat via het Oostgat binnenkomt (waarvoor totale waarden tot ca. 1,2 miljoen m³/jr. worden geschat)²⁴. Hiervan wordt (zie Tabel 3-1) waarschijnlijk 0,51 miljoen m³/jr. geleverd door de zone langs Zuidwest Walcheren die met suppleties wordt onderhouden. Dit alles vraagt nadere analyse, aangezien deze sedimentbalans nu niet goed sluitend is.²⁵

3.2.6 Sediment- en suppletiebehoefte monding Westerschelde

Dit wordt, cf. de aanpak die in 2.4 uiteen is gezet, hieronder gepresenteerd. Om de ligging van de actieve zone aan te geven en de transporten in en uit die zone te tonen is, naast eerder Figuur 3-7, hieronder Figuur 3-8 toegevoegd.



Figuur 3-8: Transporten uit de zone waarin wordt gesuppleerd bij Zuidwest- Walcheren, als in Tabel 3-1.

Tabel 3-1: Behoefte monding Westerschelde in de komende 15 jaar volgens denkmodel rekenregel met actieve zone. De getallen zijn in km² of miljoen m³/jr. Oppervlakten en transporten zijn cf. voorafgaande sectie.

Naam	opp. actieve zone	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoefte
Zeeuws-Vlaanderen	14	0,04	0,15	0,44	0,33
Zuidwest Walcheren	13	0,04		0,51	0,55
Actieve buitendelta	74	0,21	?	0,31	0,52
TOTAAL	(27-101)	0,08-0,29	0,15	0,95 - 1,26	0,85 – 1,4

Opmerkingen / Toelichting bij bovenstaande tabel:

Voor het bepalen van de getallen waren de volgende keuzes / aannamen nodig:

- De oppervlakte van de actieve zone die voor de komende 15 jaar het meest aannemelijk is bij Zuidwest Walcheren is ca. 13 km² (voorlopige schatting op basis van de lengte en

²³ In Elias (2023) is dit hoger geschat: 0,88 miljoen m³/jr., op basis van de invulling van het Vaarwater onder de Hoofdplaat. Het is goed mogelijk dat een deel van buiten de actieve zone van Zeeuws-Vlaanderen afkomstig is.

²⁴ Er zijn uiteenlopende getallen. In Bijlage A is er ook een tijdvak gegeven waarin de Westerschelde exporteert. Hij geeft voor de huidige situatie ca 1,2. miljoen m³/jr. en Huisman (2024) komt tot bijna 0,8 miljoen m³/jr., vanuit de suppletiezone naar het Oostgat en het langstransport bij Vlissingen opgeteld.

²⁵ Voor de inschatting van de behoefte aan zand van de kustzones in de komende 15 jaar heeft dit geen consequenties. Deze worden gemaakt op basis van de historische suppletievolumes.

breedte). In Taal et al. (2023) is een oppervlakte inclusief actieve buitendelta van 87 km² berekend, dus resteert voor de actieve buitendelta 74 km².

- De transporten in / uit de actieve zone bij Zeeuws-Vlaanderen zijn bepaald met Huisman (2024), zoals uiteengezet in 3.2.2.3 en getoond in Figuur 3-7. De overige transporten zijn cf. Elias et al. (2024)
- Het 'Transport uit' bij Zuidwest Walcheren is de trend in de suppleties (0,75 miljoen m³/jr., zie ook in tabel hieronder) minus de toename in volume (0,24 miljoen m³/jr.) in de actieve zone die Elias et al. (2024) observeert. Alle transporten in / uit de suppletiezone bij Zuidwest Walcheren staan in Figuur 3-8. De 0,15 miljoen m³/jr. nabij Vlissingen is cf. Figuur 1-3.
- In 3.2.3.1 is uiteengezet dat de actieve zone van Zuidwest Walcheren op een tijdschaal van 15 jaar mogelijk een stuk kleiner is dan Taal et al. (2023) aanneemt. Hierom is de (theoretische) sedimentbehoefte van de actieve buitendelta apart berekend en worden twee getallen gepresenteerd, één met en één zonder de actieve buitendelta.

Historische suppletievolumes

Tabel 3-2: Historische suppletievolumes monding Westerschelde, als indicatie voor behoefte in de komende 15 jaar, in miljoen m³/jr.

Naam	Periode start	Periode eind	Historisch suppletievolume
Zeeuws-Vlaanderen	2010	2023	0,39
Zuidwest Walcheren	1990	2023	0,56 -0,75*
TOTAAL	2010	2023	1,14

* Deze bandbreedte is cf. de opmerking in 3.2.3.4 over de grote geulwandsuppletie uit 2009. Deze was feitelijk buiten de te onderhouden zone geplaatst, maar indirect wel nodig voor handhaving van de kustlijn. Hierom is de waarde van 0,75 miljoen m³/jr. het meest aangewezen om te gebruiken.

Advies behoefte per jaar tot ca. 2040

Bij de kust van Zeeuws-Vlaanderen waren de netto transporten uit het te handhaven gebied in de afgelopen jaren de dominante oorzaak van erosie van de kustlijn. Die erosie bepaalt de sedimentbehoefte (c.q. suppletiebehoefte). Dat blijkt zowel bij toepassing van de rekenregel met actieve zone als uit de historische suppletievolumes.

Voor de komende 15 jaar is de beste aanname dat er een nood aan suppleties is die vergelijkbaar is met de periode na de Zwakke Schakel versterkingen en verleggingen van de BKL. Deze suppleties zullen langs vrijwel de gehele kustlijn nodig zijn, kijkend naar de afgelopen decennia (zie b.v. Vermeer en Van der Werf, 2022).

Bij de zuidwestkust van Walcheren blijkt ook dat de afgelopen jaren de netto transporten uit het te handhaven gebied de behoefte domineren. Deze suppleties zullen vooral nodig zijn op de plaatsen waar de laatste 15 jaar ook is gesuppleerd, maar eigenlijk evenredig verspreid liggend langs de hele kustlijn (zie b.v. Vermeer et al., 2024). Het is verder onwaarschijnlijk dat (een deel van) de actieve buitendelta op een tijdschaal 15 jaar mee gaat doen met het verspreiden van suppletiezand. Die suppleties zullen namelijk tussen de te handhaven kustlijn en het Oostgat plaatsvinden. Op grond van deze overwegingen is het advies voor het hele kustvak **uit te gaan van de historische suppletievolumes. Dat is 1,14 miljoen m³/jr.**

Behoeftelange termijn, bij snellere zeespiegelstijging

Onder de voorkeursstrategie is het ook voor de verdere toekomst waarschijnlijk dat de sediment- en suppletiebehoefte voor de actieve zone bij Zeeuws-Vlaanderen vergelijkbaar is met wat voor de komende 15 jaar is geadviseerd. Dat geldt in ieder geval bij beperkt snellere zeespiegelstijging. In de berekening wordt namelijk nu slechts ca. 10% bepaald door de extra

accommodatieruimte door zeespiegelstijging.²⁶ Een andere aanvulling op Taal et al. (2023) is dat met de kennis uit dit rapport de transporten vanaf dit kustvak richting de Westerschelde beter in te schatten zijn.

Voor Zuidwest Walcheren zijn, voor wat betreft de lange termijn, bij snellere zeespiegelstijging, op hoofdlijnen twee scenario's mogelijk. Het eerste scenario is dat de actieve buitendelta niet meedoet met het verspreiden van suppletiezand, zoals nu. In dat geval zal, net als bij Zeeuws-Vlaanderen, de behoefte niet snel sterk toenemen. In de berekening wordt nu ca. 10 - 15% bepaald door de extra accommodatieruimte. Het tweede scenario is dat de actieve buitendelta (concreet: Oostgat en bankengebied) wel gaat meedoen met het verspreiden van suppletiezand. Dat is in Taal et al. (2023) aangenomen om consistent te zijn met de keuzes bij de zeegaten van het Waddengebied. Het is nu nog niet goed te beoordelen welk van de twee het meest waarschijnlijk is. Daarvoor is extra onderzoek nodig, maar de behoefte baseren op de historie is, zie hiervoor, voorlopig robuust.²⁷

3.3 Rondom monding Oosterschelde

3.3.1 Overzicht

De ontwikkeling van de Oosterscheldemonding (overzicht met deelgebieden in Figuur 3-9) is de laatste decennia in hoge mate gestuurd door de stormvloedkering (gecompleteerd in 1986). Deze halfopen kering zorgt ervoor dat er nog getij aanwezig is in de Oosterschelde (en dus dagelijks uitwisseling van water tussen bekken en mondingsgebied).

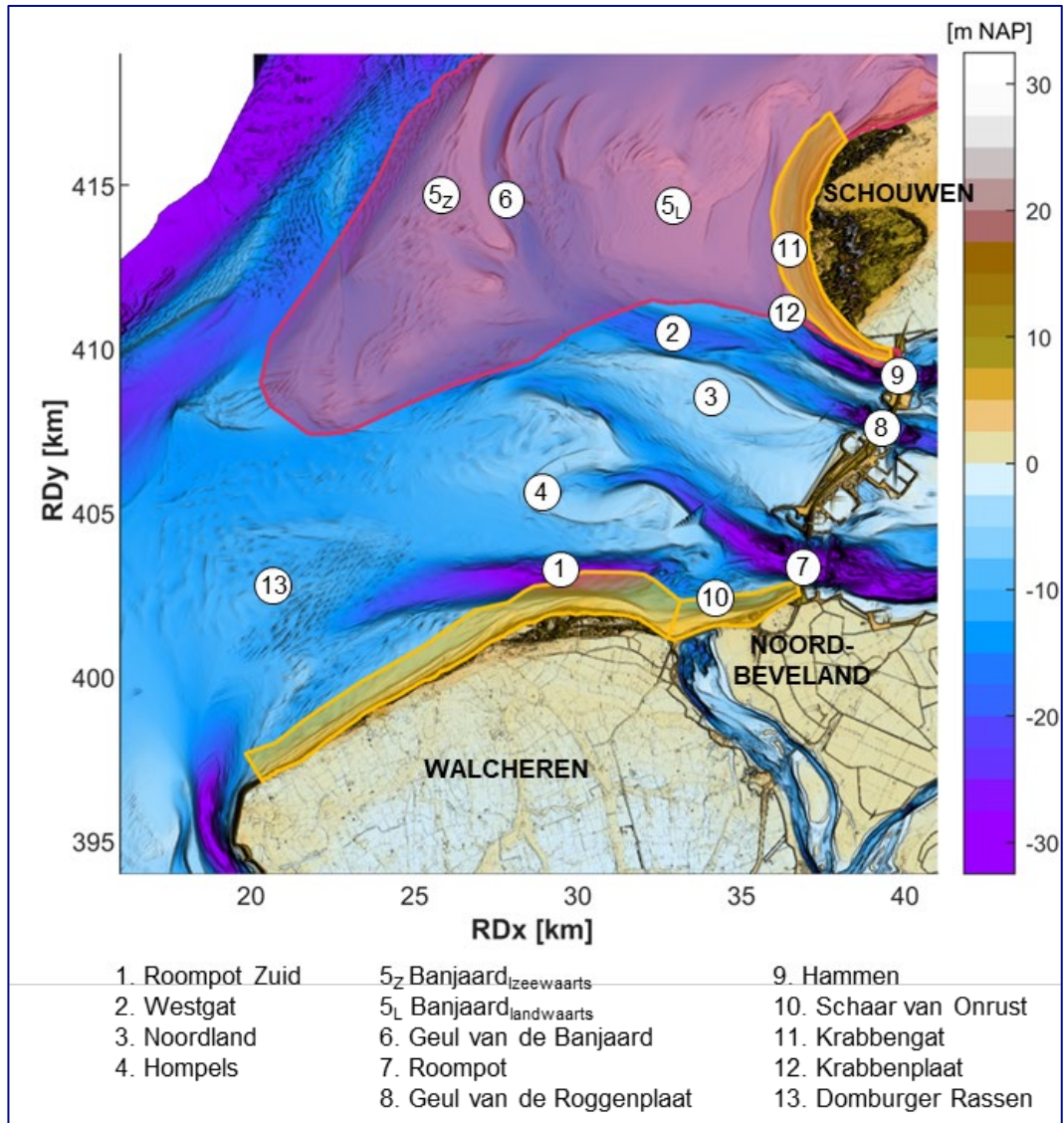
De aanleg van de Oosterscheldekering heeft geleid tot grote morfologische veranderingen in zowel bekken als monding / buitendelta. In vergelijking met de mondingsgebieden van de Grevelingen en Haringvliet zijn ze echter beperkt te noemen. Er is geen totale verzanding, de getijstromingen zijn verminderd, maar nog voldoende om de geulenstelsels in de monding op hoofdlijnen te behouden. Voor het bekken is van belang dat er nauwelijks uitwisseling van zand is met de monding. Mede daardoor blijft er 'zandhonger' in de Oosterschelde (leidend tot afname van intergetijdengebieden). Zie hiervoor b.v. de Vet et al. (2024).

In de monding domineren geulen de morfologische ontwikkeling. De (oude) Roompot gaat in het zuiden door de kering en heeft in westelijke richting een uitloper voor de noordwestkust van Walcheren: Roompot Zuid, naast een aftakking langs de kust van Noord-Beveland en het meest oostelijke deel van de kust van Walcheren: de Schaar van de Onrust.

Het zuidelijk deel van de buitendelta lijkt weinig interactie te hebben met de aangrenzende kustzones en het noordelijk deel. Het lijkt ook niet veel interactie te hebben met de monding van de Westerschelde. Het gebied 'de Domburger Rassen' dat als deel van de buitendelta van de Westerschelde gezien kan worden, ligt nu relatief diep. Hierdoor zal sediment dat vanuit het zuiden netto wordt aangevoerd door het Oostgat dáár worden afgezet. De Domburger Rassen liggen ook ver zeewaarts. Dat maakt het niet aannemelijk dat ze de komende decennia aanlandingen en/of grote zandgolven veroorzaken die zand op de kust van Walcheren brengen.

²⁶ Pas als (op zeer lange termijn?) er zeer snelle zeespiegelstijging optreedt verandert dit. De sedimentbehoefte onder zulke scenario's valt buiten de scope van dit rapport. Dit nog los van feit dat er dan veel grotere opgaven zullen zijn dan (zeg b.v.) tweemaal zo veel suppleren als nu nodig is.

²⁷ Bij de huidige zeespiegelstijging (2,9 mm/jr.) zou het voor de helft meenemen van het oppervlak van de actieve buitendelta als in Taal et al. (2023) met de rekenregel leiden tot een behoefte die plm. gelijk is aan de historische volumes.



Figuur 3-9: Overzicht en in de tekst genoemde deelgebieden en morfologische elementen van de monding van de Oosterschelde, gebaseerd op de meest recente Vaklodingen. De eilanden zijn opgevuld met het AHN4. In geel is aangegeven de minimale variant van de actieve zone. Het rode vlak is de maximale variant.

In het noorden heten de geulen die door de kering gaan Hammen en Geul van de Roggenplaat. Verder zeewaarts worden ze achtereenvolgens Westgat en Geul van de Banjaard. Het Westgat begrenst ook aan de zuidzijde het deel van de buitendelta dat als 'actief' wordt beschouwd in Taal et al. (2023) en Elias et al. (2024), zie Figuur 3-9. Dit deel van de monding kan in een toekomst met veel hogere zeespiegel mogelijk wèl gaan meedoen met de verspreiding van suppletiezand (die op de kust van Schouwen worden aangebracht). Dit deel van de monding wisselt ook zand uit met de buitendelta van de Grevelingen.

De deelgebieden rond de monding van de Oosterschelde zijn:

1. de Oosterschelde zelf. De bespreking daarvan is niet nodig voor de scope van dit rapport, in het bijzonder vanwege de afwezigheid van transport van zand door de kering.
2. de kusten ten zuiden van de monding: de Noordkust van Walcheren en de kust van Noord-Beveland. Deze liggen vanaf de westpunt van Walcheren (Westkapelse Zeedijk), volgen de Veerse Gatdam, tot aan de Oosterscheldekering: zie 3.3.2.3

3. de Zuidwestkust van Schouwen, inclusief de Kop van Schouwen, liggend tussen de Oosterscheldekering en het Verklikkerstrand. Dit gebied wordt besproken in 3.3.3.
4. de 'actieve buitendelta', grotendeels overeenkomend met de maximale variant van de actieve zone als aangeduid in Figuur 3-9. Dit wordt besproken in 3.3.4

Hierbij is gebruik gemaakt van de kennisoverzichten die de beheerbibliotheken van Walcheren (Vermeer et al., 2024) en Schouwen (Vermeer et al., 2022) bieden.

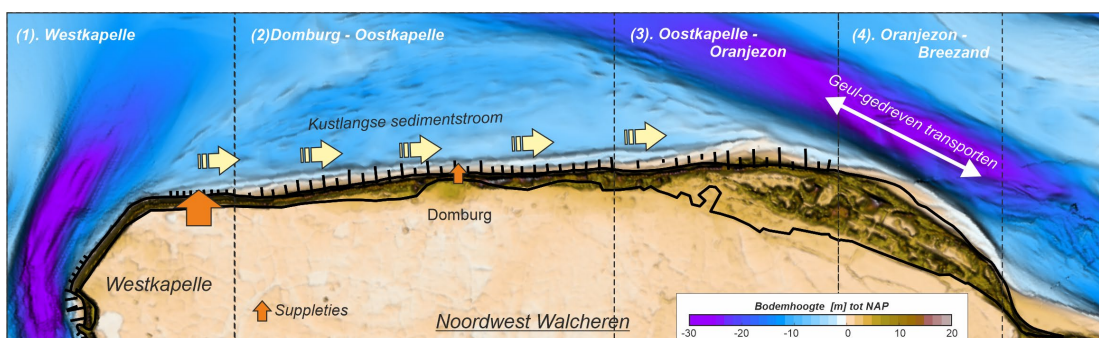
3.3.2 De kusten ten zuiden van de monding

Deze kust is op basis van de morfologische karakteristieken en uitgevoerde suppleties in een aantal deelgebieden opgesplitst.

3.3.2.1 Gebieden tussen Westkapelle en Oranjezon

Tussen Westkapelle en Domburg wordt frequent gesuppleerd. Net noordwestelijk van Westkapelle (km 15 tot 18) is bij een Zwakke Schakel versterking in 2008-2009 de kustlijn tussen raaien 1755 en 1883 tot 100 meter zeewaarts verplaatst en uitgebreid naar het zuiden. Nu geldt voor de raaien 1814 t/m 1927 dat er naast de Westkapelse Zeedijk ook een Basiskustlijn is. Dijk en sediment vormen samen de waterkering.

De laatste jaren lijkt het erop dat de grote suppleties bij Westkapelle ervoor zorgen dat er minder gesuppleerd hoeft te worden langs dit deel van de kust (Vermeer et al., 2024). Figuur 3-10 toont dat een doorgaande sedimentstroom ontstaat vanaf Westkapelle richting Oranjezon. Op basis van de sedimentbalans is de omvang van deze sedimentstroom 0,25 – 0,3 miljoen m³/jr., wat overeenkomt met Huisman (2024), die op ca. 0,27 miljoen m³/jr. uitkomt. De suppleties die tussen Westkapelle-Domburg plaatsvinden zijn ruimschoots voldoende om deze sedimentstroom te voeden en zo erosie te bestrijden.



Figuur 3-10: Noordwestkust van Walcheren (ca. 40 graden rechtsom gedraaid afgebeeld). Aan weerszijden liggen geulen die zich zeewaarts uitstrekken en in de vooroever naar elkaar toe gericht zijn. Zij omsluiten een relatief ondiep platform dat relatief weinig verandering toont op de grote schaal.

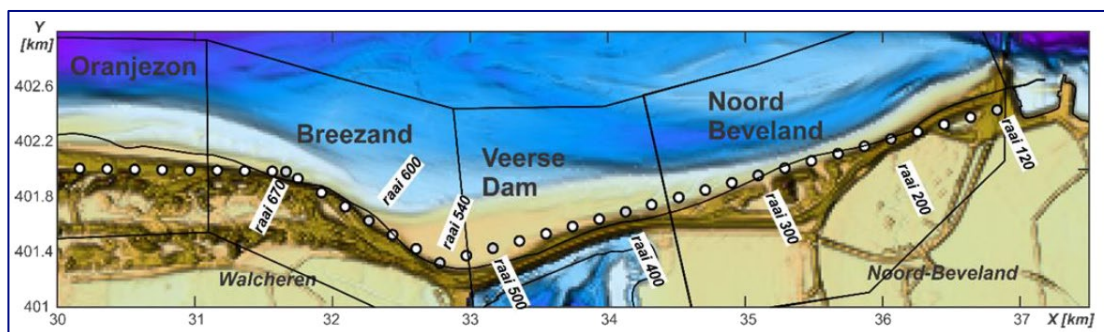
Er zijn geen directe aanwijzingen dat de in Figuur 3-10 geschetste configuratie van de vooroever in de toekomst gaat veranderen. De processen die nu de kustlijnontwikkeling bepalen zullen ook in de nabije toekomst optreden.

Tussen Domburg en Oostkapelle is de kustlijn vrijwel recht (Figuur 3-10). Daar zijn tot nu toe weinig suppleties nodig geweest. Gemiddeld genomen is de kustlijn hier uitgebouwd. De morfologische ontwikkeling van dit deel van de kustlijn is nauwelijks gerelateerd aan de Roompot-Zuid. Deze ligt hier nog relatief ver weg.

De kust in vak 3 in Figuur 3-10 heeft een sterke uitbouw van de duinzone. Dit hangt samen met een platform op de ondiepe vooroever (rond de -5 m NAP). Dit is een buffer tussen strandzone en de Roompot-Zuid en geeft accommodatieruimte (waarop aanzanding kan plaatsvinden). Qua ligging heeft de Roompot-Zuid in potentie invloed op de morfologische ontwikkeling, zeker in vak 4, maar er is nu geen zuidwaartse geulverplaatsing of opdringen van de geul te zien.

3.3.2.2 De kust bij Breezand en voor de Veerse Dam

Dit deel van de kust ligt oostelijk van het punt waar de kust 'buigt', ter hoogte van raai 670, (Figuur 3-11). Lokaal wordt de Basiskustlijn overschreden en wordt gesuppleerd (dat is ongeveer het deel tussen raai 670 en raai 600, te zien in Figuur 3-11).



Figuur 3-11: : Overzicht van de kust van Noord-Beveland (raai 120 – 520) en Walcheren (vanaf raai 540 – 670). Aangepast naar Elias en Quataert (2021).²⁸.

Het deel oostelijk van raai 600 zit ruim in het zand, mede door een tweede knikpunt in de kustlijn. Elias en Quataert (2021) geven een gedetailleerde analyse van de morfologische ontwikkeling nabij Breezand en langs de kust van Noord-Beveland.

Het strand voor de Veerse Dam is sinds de aanleg zeewaarts uitgebouwd. De voorliggende banken verplaatsen zich landwaarts en er is zandtoevoer vanuit het westen (vanaf het stuk waar gesuppleerd wordt).

3.3.2.3 Noord-Beveland

Langs de kust van Noord-Beveland en specifiek het smalle Banjaardstrand zijn doorlopend suppleties nodig. Dat komt door de Schaar van Onrust die zuidelijk verplaatst en er snelheden optreden die effectief sediment afvoeren. De suppleties worden aangebracht op een (smal) strand (naast de enkele die in 2013 is gedaan op de geulwand²⁹). De Schaar van Onrust verdiept geleidelijk³⁰. In de berekeningen voor sedimentbehoefte ligt de Schaar van Onrust in de minimumvariant van de actieve zone. De verwachting is dat onderhoud van het Banjaardstrand noodzakelijk blijft, gemiddeld eens per vier jaar³¹. Lazar & Elias (2023) en Quataert et al. (2024) hebben mogelijke effecten van alternatieve ingrepen bestudeerd. Hieruit volgde o.m. dat (gedeeltelijk) opvullen van de Schaar van Onrust een maatregel lijkt om de kustlijn efficiënter te handhaven.

Het meest oostelijke deel van de kust van Noord-Beveland is de damaanzet van de Stormvloedkering, waar aanzanding plaatsvindt. De gehele actieve zone van Noord-Beveland kent een trendmatige volumetoename die iets groter is dan de uitgevoerde suppleties (5,7 versus 4,8 miljoen m³/jr.), zie Elias et al. (2024).

3.3.2.4 Ontwikkelingen sedimentvolumes Noordkust Walcheren en Noord-Beveland

In het voorafgaande kwamen duidelijk verschillen naar voren tussen de secties van dit deel van de kust. Deze wisselende noodzaak tot onderhoud met suppleties past bij de transportberekeningen van Huisman (2024). Tussen Westkapelle en Oostkapelle neemt het transport toe van ca. 200.000 tot 340.000 m³/jr. (wat op erosie van dit traject duidt) om daarna weer af

²⁸ De grens tussen Oranjezon en Breezand ligt iets anders dan in Figuur 3-10, maar dat is hier niet bezwaarlijk.

²⁹ Deze lijkt, net als de geulwandsuppletie bij het Oostgat, lang te blijven liggen. Er is al tien jaar weinig verandering bij RSP 2.2

³⁰ De genoemde geulwandsuppletie heeft bijgedragen aan de verondieping van de geul. Dit komt omdat sediment hier al bij aanleg in een dieper deel van het profiel is aangebracht.

³¹ De frequentie is hoog omdat op het smalle strand slechts een relatief klein sedimentvolume kan worden geplaatst.

te nemen (sedimentatie). Hij ziet ook dat de erosie die langs de kust van Noord-Beveland is te zien, in lijn is met een toename in transport, van ca 40.000 m³/jr. tot 90.000 m³/jr.

De recente sedimentbalans (Elias et al., 2024) geeft als meest representatieve trend voor de actieve zones, van de noordkust van Walcheren en Noord-Beveland samen, een volumetoename van 0,3 miljoen m³/jr. bij een gemiddeld jaarlijks suppletievolume van 0,47 miljoen m³/jr. Hieruit volgt de conclusie dat er een netto gemiddeld transport uit de actieve zone is, naar de (buitendelta van de) Oosterscheldemonding, van 0,17 miljoen m³/jr.

Er is geen sedimenttransport naar de zuidwestzijde van Walcheren. Wel is een deel van de suppleties bij de Westkapelse Zeedijk van de berekening voor sediment- en suppletie-behoefte aan dat kustvak toebedeeld.

3.3.3 Zuidwestkust Schouwen (incl. Kop van Schouwen)

3.3.3.1 Karakteristieken

Dit deel van Schouwen ligt tussen de Oosterscheldekering en de raaien 982/979 (Figuur 3-9). Het omvat daarmee niet het Verklikkerstrand, dat bij de monding van de Grevelingen wordt gerekend. De morfologische ontwikkeling van deze kust wordt bepaald door het Krabbengat, de geul die hier direct voor de kust ligt. De netto kustwaartse golfgedreven stromingen op de Banjaard zorgden ervoor dat de zeewaartse oever landwaarts uitbouwde, wat afname van de doorsnede van die geul betekent, waardoor stroomsnelheden moeten toenemen. Dit leidt weer tot erosie van bodem en/of tegenoverliggende oever, oftewel de geul wordt in de richting van de kust gedwongen. In 1987, 1992 en 1996 zijn hierom ook geulwandverleggingen uitgevoerd (zie b.v. Vermeer & Elias, 2023).

Dichter bij de Oosterscheldekering ligt het Krabbengat minder dicht bij de kust en gaat ze over in 'de Hammen'. Daar is de afgelopen decennia sprake van een stabiele en lokaal ook zeewaarts uitbouwende geulwand (Vermeer et al., 2022). Toch zijn ook daar suppleties nodig geweest om lokaal erosie te bestrijden.

Het kustonderhoud gebeurt bijna altijd via strandsuppleties, met een volume van enkele honderdduizenden m³ per keer, want er is weinig ruimte voor het aanbrengen van grote volumes zand. Onderwatersuppleties zijn niet mogelijk omdat de kustprofielen steil zijn (en feitelijk geulwanden).

3.3.3.2 Ontwikkelingen sedimentvolumes

De zuidwestkust van Schouwen heeft een kleine negatieve trend in sedimentvolume (-0,08 miljoen m³/jr.)³². Dit is ondanks de suppleties die de afgelopen 30 jaar een gemiddelde van 0,23 miljoen m³/jr. bedroegen. Langs dit deel van de kust is er in de actieve zone dan ook een netto transport naar het deel van Schouwen dat deel uitmaakt van de monding van de Grevelingen (0,31 miljoen m³/jr.).

Dit volgt ook uit de analyses van Huisman (2024). De transporten zijn netto nihil op de meest westelijke punt, waarna ze toenemen tot een noordoostwaarts transport van ca. 140.000 m³/jr. bij Nieuw-Haamstede, waar de grens van dit deel van de kust ligt.

3.3.4 Ontwikkelingen actieve buitendelta

Elias et al. (2024) rapporteert een afname van het sedimentvolume van de actieve buitendelta over de laatste dertig jaar met een trend van 1,7 miljoen m³/jr. Die afnemende trend is een voortzetting van een ontwikkeling die begon na de bouw van de stormvloedkering (1976 – 1986). Door afnemende getijdenstroming en het ontbreken van sedimentaanvoer uit het estuarium konden golven de buitendelta netto gaan eroderen. Het lijkt erop dat het sediment dat uit de actieve buitendelta is verdwenen noordwaarts is gegaan

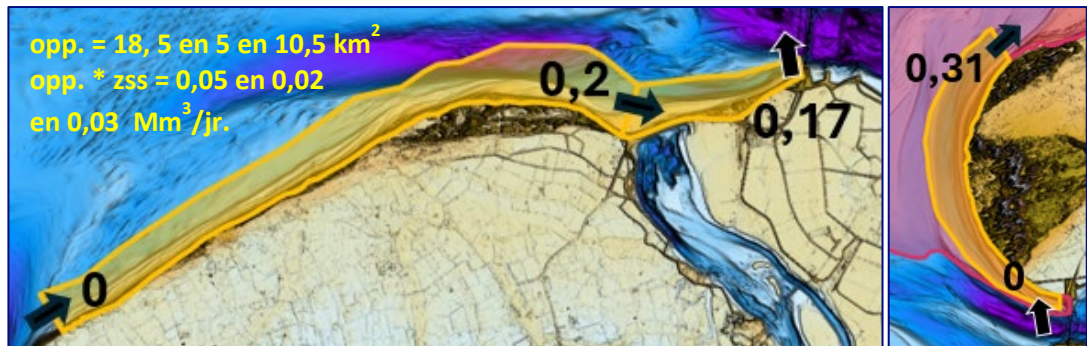
³² Die afnemende trend in sedimentvolume was in het verleden sterker (1960 – 1992: -0,2 miljoen m³/jr.).

(naar de monding van de Grevelingen en van daar naar de monding van het Haringvliet en uiteindelijk naar de Euro-Maasgeul). In het zuidelijk deel van de monding zorgde de zeevaartse verruiming van de Oude Roompot ervoor dat sediment (bijna 50 miljoen m³) naar de Hompels en verder zeewaarts is verplaatst. Sinds 2010 is een afname van de erosie van de Banjaard te zien.

Het is lastig de juiste conclusies te verbinden aan de afnemende volumetrend voor de actieve buitendelta van de Oosterschelde die Elias et al. (2024) berekent. Dat is niet alleen omdat de erosie sinds 2010 afneemt. Voor de berekening zijn de grenzen tussen de drie actieve buitendelta's van Oosterschelde, Grevelingen en Haringvliet getrokken op basis van kaartbladgrenzen, niet op basis van morfologische karakteristieken.³³ Bij het gezamenlijk beschouwen van de drie actieve buitendelta's van de Voordelta is de afnemende volumetrend ca. 1,6 miljoen m³/jr. Met een gezamenlijke oppervlakte van 373 km² (ze komen overeen met de maximumvariant van de actieve zone in Taal et al, 2023) betekent dit een verlaging van de bodem met iets meer dan 4 mm/jr.³⁴

3.3.5 Sediment- en suppletiebehoefte monding Oosterschelde

De behoefte wordt, cf. de aanpak die in 2.4 uiteen is gezet, hieronder gepresenteerd. Figuur 3-12 geeft het overzicht incl. de ligging van de actieve zone.



Figuur 3-12: Transporten in en uit de actieve zone bij Noordwestkust Walcheren en Noord-Beveland (links) en bij de Kop van Schouwen (rechts), als gebruikt in Tabel 3-3.

Behoefte komende 15 jaar volgens rekenregel met actieve zone

Tabel 3-3: Behoefte monding Oosterschelde komende 15 jaar volgens denkmodel rekenregel met actieve zone. De getallen zijn in km² of miljoen m³/jr. Oppervlakten zijn cf. Taal et al. (2023), inclusief de erin genomen onzekerheidsmarge. De transporten zijn cf. Elias et al. (2024).

Naam	opp. actieve zone	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoefte
Noord-Walcheren	18	0,05	0	0,2	0,25
Noord-Beveland	(5)	(0,02)	(0,2)	(0,17)	0
Zuidwest/kop Schouwen	10,5	0,03	0	0,31	0,34
Actieve buitendelta					p.m. / geen
TOTAAL (ex N-Beveland)	28,5	0,09	0	0,51	0,59

Opmerkingen / Toelichting bij bovenstaande tabel:

Voor het bepalen van de getallen waren de volgende keuzes / aannamen nodig:

- De actieve buitendelta wordt niet meegenomen om de behoefte voor de komende 15 jaar te bepalen. In Taal et al. (2023) is het onderdeel van de maximum variant, die mogelijk op

³³ Dat zijn de zuidgrens bij de Oosterscheldemonding, de zeevaartse grens en de grens naar de Euro-Maasgeul wel.

³⁴ Het is het wel aannemelijk dat de afnemende trend ook echt sterker is in de monding van de Oosterschelde.

- langere termijn en bij snellere zeespiegelstijging actief kan worden. Daarvoor gebruiken zij steeds de gehele oppervlakte van de mondingen van de afgesloten zeegaten samen. De grenzen tussen die mondingen liggen nu niet op morfologische gronden (zie 3.1).
- De behoefte aan sediment kan per onderdeel van de monding niet kleiner dan 0 worden (van toepassing bij Noord-Beveland³⁵). Voor het bepalen van het totaal worden oppervlakte van de actieve zone en transporten bij Noord-Beveland niet meegenomen. Anders zou de indruk worden gewekt dat een positieve sedimentbalans (à 0,02 miljoen m³/jr.) in dit kustvak de behoefte in een ander kustvak van de monding kan compenseren. Resultaat is daarom 0,59 miljoen m³/jr.
 - Door afrondingen op twee decimalen achter komma kunnen totalen afwijken.

Historische suppletievolumes

Tabel 3-4: Historische suppletievolumes monding Oosterschelde, als indicatie voor behoefte in de komende 15 jaar, in miljoen m³/jr.

Naam	Periode start	Periode eind	Historisch suppletievolume
Noord-Walcheren	1990	2023	0,54
Noord-Beveland	1990	2023	0,15
Zuidwest/kop Schouwen	1994	2023	0,23
TOTAAL			0,92

Advies behoefte per jaar tot ca. 2040

Bij de kusten langs de monding van de Oosterschelde bepalen de netto transporten in en uit het te handhaven gebied de afgelopen decennia de erosie van de kustlijn en daarmee de sedimentbehoefte (c.q. suppletiebehoefte). Daarnaast is het onwaarschijnlijk dat (een deel van) de actieve buitendelta op een tijdschaal 15 mee gaat doen met het verspreiden van suppletiezand. Voor de komende 15 jaar is daarom het best te redeneren vanuit wat gemiddeld sinds 1990 (1994) is aangebracht. Bij Schouwen zijn de historische suppleties met 0,23 miljoen m³/jr. echter lager dan de theoretische behoefte van de actieve zone (0,34 miljoen m³/jr.). Cf. de algemene werkwijze dat, als de theoretische behoefte groter is dan de historische suppleties, gekozen wordt voor de theoretische behoefte is het advies voor het hele kustvak **uit te gaan van 1,03 miljoen m³/jr.**

Behoefte lange termijn, bij snellere zeespiegelstijging

De resultaten uit Taal et al. (2023) gelden qua oppervlakte nog steeds voor dit kustvak. Er zijn nog geen betere schattingen voor de oppervlakte van de actieve zone beschikbaar, noch de minimale, noch de maximale variant (die bovendien over de hele Voordelta gaat).

Er zijn nu wel betere schattingen mogelijk van transporten uit de actieve zone gegeven de huidige bodemligging³⁶. Anderzijds is het zo dat in Taal et al. (2023) de oppervlakten van de minimale variant van de actieve zone zo zijn getrokken dat een deel van de geul die ervoor ligt al is meegenomen.

3.4 Rondom monding Grevelingen

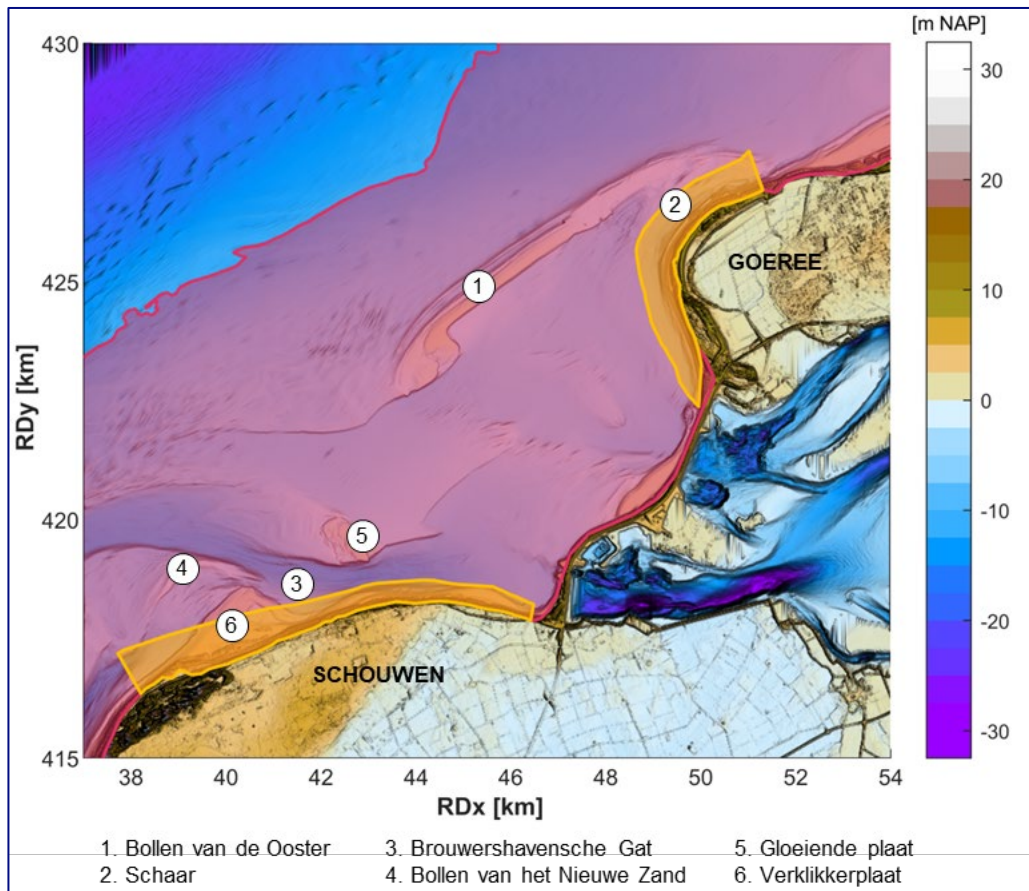
3.4.1 Overzicht

De monding van de Grevelingen ligt zeewaarts van de Brouwersdam, voltooid in 1971. Aan de zeezijde van deze dam is door natuurlijke aanzanding (en een suppletie in 2016) een

³⁵ Bij Noord-Beveland wordt wel degelijk gesuppleerd vanwege de lokale morfologie, zie 3.3.2.3 en Tabel 3-4

³⁶ Het is een realistische hypothese dat de omvang van deze transporten vergelijkbaar is bij een opgetreden veel hogere zeespiegel. De bodem van de actieve zone is dan immers 'meegegroeid' en de hydrodynamische processen zijn dan vergelijkbaar. Uiteraard met de kanttekening dat door verdieping of verondieping van een geul er wel significante veranderingen in het transport zouden kunnen optreden.

zandstrand ontstaan. Vermaas (2014) liet al zien dat op een termijn van 50 jaar de morfologische veranderingen in deze monding voornamelijk plaatsvinden boven -10 m NAP. Onder deze diepte zijn de veranderingen van de diepere contourlijnen relatief klein.



Figuur 3-13: Overzicht en in de tekst genoemde deelgebieden en morfologische elementen van de monding van de Grevelingen, gebaseerd op de meest recente Vaklodingen. De eilanden zijn opgevuld met het AHN4. In geel is aangegeven de minimale variant van de actieve zone. Het rode vlak is de maximale variant.

De monding van de Grevelingen is een relatief ondiep gedeelte van de Voordelta. Het grootste deel heeft een diepte tussen de NAP -5 m en -2,5 m. Er ligt een relatief steile helling op de overgang van de buitendelta naar de zeebodem. In het zuiden ligt nog een relatief grote getijdegeul: het Brouwershavensche Gat. Ten noorden daarvan zijn ondieptes aanwezig (o.m. Gloeiende Plaat). Die reiken deels tot boven laagwater. Ten noorden daarvan liggen grotendeels opgevulde restanten van voormalige getijdegeulen en nog meer ondieptes. Voor het kustonderhoud gaat momenteel de meeste aandacht uit naar de ontwikkeling van de Bollen van de Ooster en de geul die deze ondiepte scheidt van de kust van Goeree (Schaar), zie 3.4.3.

De deelgebieden rond de monding van de Grevelingen zijn:

1. de Noordkust van Schouwen, voor de bespreking gesplitst in het deel dat wordt gedomineerd door het Verklikkerstrand (3.4.2.1) en het Noorderstrand tot aan de Brouwersdam (3.4.2.2)
2. de Zuidwestkust van Goeree, besproken in 3.4.3.
3. de 'actieve buitendelta', grotendeels overeenkomend met de maximale variant van de actieve zone als aangeduid in Figuur 3-13, besproken in 3.4.4

Hierbij is gebruik gemaakt van de kennisoverzichten die de beheerbibliotheken van Schouwen (Vermeer et al., 2022) en Voorne & Goeree (Vermeer et al., 2025) bieden.

3.4.2 Noordkust Schouwen

3.4.2.1 Verklikkerstrand

Het meest westelijke deel van de Noordoostkust van Schouwen is het Verklikkerstrand met de Verklikkerplaat. De ontwikkeling van dit gebied is gedomineerd door de Bollen van het Nieuwe Zand: een gebied met ondieptes en platen dat gevoed wordt door noordwaarts zandtransport in het Krabbengat. Het strand is zo breed dat het een strandvlakte kan worden genoemd. Behalve de Bollen van het Nieuwe Zand levert ook het golfgedreven transport langs de kust zand, vanuit het zuidwesten. Rond raai 590 gaat de strandvlakte over in het Noorderstrand, wat naast het Brouwershavensche Gat ligt.

3.4.2.2 Noorderstrand (tot Brouwersdam)

Het Noorderstrand heeft op verschillende plekken een uitbouw van de duinvoet. Deze uitbouw lijkt in enige mate langs de kust te verplaatsen in de vorm van een 'zandgolf', van west naar oost. Het strand heeft hier regelmatig aanvulling met zand nodig, omdat sediment in het Brouwershavensche Gat verdwijnt en niet (meer) bijdraagt aan de ligging van de kustlijn.

Het Brouwershavensche Gat heeft intussen wél een duidelijke trend van verondieping. Het zwaartepunt daarvan ligt nu aan de oostzijde. In het westelijk deel van de geul is de bodem sinds 1998 rond 10 m diepte blijven steken. De geul neemt wel in omvang af omdat de 'Gloeïende Plaat' landwaarts uitbouwt. Ook bouwen de Bollen van het Nieuwe Zand naar het noorden uit, wat de geul een 'kronkel' gaf (die er vroeger niet was).

In het oostelijk deel heeft het Brouwershavensche Gat nu een vrijwel vlakke geulbodem, waarvan het ondiepste deel rond de NAP -6 m ligt. De geul verondiept tegenwoordig op met een tiental cm per jaar. Tenslotte hoopt veel van het getransporteerde zand zich uiteindelijk op in de hoek waar de Brouwersdam aansluit.

In de winter 2013-2014 is een versterking van de duinen aan de landzijde gebeurd langs de 'Zouten en Zoeten Haard'. Deze ingreep komt niet terug in de analyse van de sedimentvolumes, omdat er alleen ingrepen aan de zeezijde worden meegenomen.

3.4.2.3 Ontwikkelingen sedimentvolumes

De noordkust van Schouwen kent al lang een toename in volume. Deze toename (ca. 0,17 miljoen m³/jr. in de recente periode) is groter dan het gemiddelde suppletievolume (ca. 0,1 miljoen m³/jr.). Door Elias et al. (2024) is berekend dat ca. 0,31 miljoen m³/jr. via kustlangs transport vanaf de Kop van Schouwen komt en dat ca. 0,24 miljoen m³/jr. naar de actieve buitendelta moet zijn gegaan.³⁷

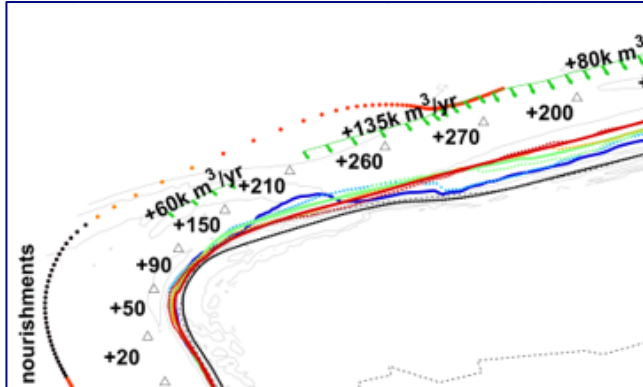
3.4.3 Zuidwestkust Goeree

Het kwetsbaarste deel van de kust van Goeree is steeds het Flaauwe Werk geweest. In 2009 is deze dijk in het kader van de Zwakke Schakels versterkt (nieuw asfalt met extra zand eronder en ook zand als afdeklaag erbovenop). Na 2009 is de belangrijkste ontwikkeling voor het onderhoud van de kustlijn het opringen van een langgerekte, ondiepe bank: de Bollen van de Ooster (b.v. Elias et al., 2021). Deze bank is ontstaan als gevolg van de erosie van de zeewaartse rand van de buitendelta en landwaartse verplaatsing van het zand, nam geleidelijk in hoogte toe en groeide in kustlangse richting (zie Van der Spek & Elias, 2021). Sinds 1999 is dit een vrijwel rechte, ononderbroken bank. Na 1999 nam deze in hoogte toe terwijl de breedte afnam. De ondiepe kortsluitgeul (genaamd Schaar) die de Bollen van de

³⁷ Huisman (2024) concludeert nog dat er een relatief grote bijdrage van kustdwarse aanvoer van sediment moet zijn bij de Verklikkerplaat, van dezelfde orde grootte als de suppleties langs de Noordkant van Schouwen. Door het gebruik van andere analysegrenzen kan dit niet in de sedimentbalans van Elias et al. (2024) worden gezien. Voor de beschouwing in dit rapport is dit geen probleem.

Ooster scheidt van de kust zorgt lokaal voor erosie, juist ter hoogte van het Flauwe werk. Het is lastig te voorspellen of en wanneer deze bank volledig gaat verhehlen met de kust.

Ook op de kop, dus ten westen van het Flauwe Werk, is er een erosieve kustlijn, waar ook gesuppleerd wordt. Deze behoefte aan suppleties past bij de berekeningen van Huisman (2024): het langstransport neemt voortdurend toe langs de kustlijn tot de punt waar de overgang naar de monding van het Haringvliet ligt (bij raai 1075 gekozen in de berekeningen voor de suppletiebehoefte).



Figuur 3-14: Fragment uit Huisman (2024) dat de toenemende transporten in de actieve zone van west naar oost tot voorbij het Werk toont, waar de overgang naar de monding van het Haringvliet ligt.

Ontwikkelingen sedimentvolumes

Het sedimentvolume langs de westkust van Goeree blijft min of meer constant. Het suppletievolume (0,14 miljoen m³/jr.) is momenteel vooral nodig bij de kust die door de Schaar erosie ondervindt. Van daaruit verplaatst het zich netto oostwaarts. Dat geeft een kleine extra bijdrage aan de grote aanzandingen bij onder meer de Kwade Hoek. Dit gebied bestond altijd al, gevoed door golfgedreven zandtransport langs de noordkust van Goeree. De Grevelingen buitendelta was de bron van het zand. De afsluiting van de Grevelingen leidde tot erosie van de buitendelta waarmee een grote hoeveelheid extra zand beschikbaar kwam. Dat was de belangrijkste oorzaak van het snelle uitbouwen van de Kwade Hoek (Van der Spek & Elias 2021).

3.4.4 Ontwikkelingen actieve buitendelta

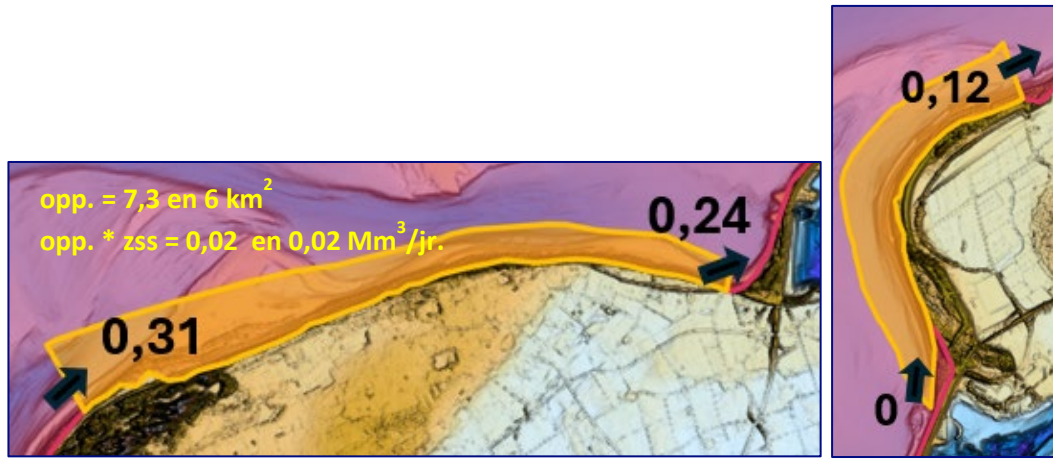
Deze 'actieve buitendelta' heeft de laatste decennia een relatief constant sedimentvolume³⁸. Tussen 1980 en 2000 was er wel een sterke volumeafname, die samenhang met de afsluiting van de Grevelingen in 1971. Daarna zijn andere mechanismen dominant geworden, gezien de grotendeels constante trend na 2000.

Op basis van de huidige inzichten over het functioneren van de actieve buitendelta (zie uitleg in 3.1) lijkt het onwaarschijnlijk dat de komende 15 tot 30 jaar in deze monding morfologische veranderingen op gaan treden waardoor verspreiding van suppletiezand in een groter gebied gebeurt. Gesuppleerde volumes op de westkust van Goeree verplaatsen zich netto naar de oostkust van Goeree (binnen het areaal dat als minimaal voor de actieve zone is bepaald).

3.4.5 Sediment- en suppletiebehoefte monding Grevelingen

De behoefte wordt, cf. de aanpak die in 2.4 uiteen is gezet, hieronder gepresenteerd. Figuur 3-15 geeft het overzicht incl. de ligging van de actieve zone.

³⁸ In de analyses is weliswaar een licht sedimenterende trend sinds 2000 waar te nemen. Deze is echter, gegeven de wijze waarop de grenzen tussen de buitendelta's voor de analyse zijn getrokken, niet significant.



Figuur 3-15: Transporten in en uit de actieve zone bij noordkust van Schouwen (links) en de zuidwestkust van Goeree (rechts), zoals gebruikt in Tabel 3-5.

Behoefte in de komende 15 jaar volgens rekenregel met actieve zone

Tabel 3-5: Behoefte monding Grevelingen komende 15 jaar volgens het denkmodel rekenregel met actieve zone. De getallen zijn in km² of miljoen m³/jr. Oppervlakten zijn cf. Taal et al. (2023), inclusief de erin genomen onzekerheidsmarge. De transporten zijn cf. Elias et al. (2024).

Naam	opp. actieve zone	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoefte
Noordkust Schouwen	(7,3)	(0,02)	(0,31)	(0,24)	0
Zuidwestkust Goeree	6	0,02	0	0,12	0,14
Actieve buitendelta					p.m. / geen
TOTAAL (ex noordkust Schouwen)	6	0,02	0	0,12	0,14

Opmerkingen / Toelichting bij bovenstaande tabel:

Voor het bepalen van de getallen waren de volgende keuzes / aannamen nodig:

- De actieve buitendelta is niet meegenomen voor komende 15 jaar, zie hiervoor 3.1.
- Voor de Noordkust van Schouwen volgt via de rekenregel een negatief getal. Er is opgelegd dat deze niet kleiner dan 0 kan worden. Bovendien wordt er wel gesuppleerd langs deze kust, zie hieronder.
- De behoefte aan sediment kan per onderdeel van de monding niet kleiner dan 0 worden (van toepassing bij de noordkust van Schouwen³⁹). Voor het bepalen van het totaal worden oppervlakte van de actieve zone en transporten bij de noordkust van Schouwen niet meegenomen. Anders zou de indruk worden gewekt dat een positieve sedimentbalans (à 0,05 miljoen m³/jr.) in dit kustvak de behoefte in een ander kustvak van de monding kan compenseren. Resultaat is daarom 0,14 miljoen m³/jr.

Historische suppletievolumes

Tabel 3-6: Historische suppletievolumes monding Grevelingen, als indicatie voor behoefte in de komende 15 jaar, in miljoen m³/jr.

Naam	Periode start	Periode eind	Historisch suppletievolume
Noordkust Schouwen	1990	2023	0,12
Zuidwestkust Goeree	1990	2023	0,14
TOTAAL			0,26

³⁹ Merk op dat bij de noordkust van Schouwen wel gesuppleerd wordt, zie Tabel 3-6.

Advies behoefte per jaar tot ca. 2040

Bij de kusten langs de monding van de Grevelingen bepaalde het verschil tussen de netto transporten in en uit het te handhaven gebied de afgelopen decennia de grootte van de erosie van de kustlijn en daarmee de sedimentbehoefte (c.q. suppletiebehoefte). Daarnaast is het onwaarschijnlijk dat (een deel van) de actieve buitendelta op een tijdschaal van 15 jaar mee gaat doen met het verspreiden van suppletiezand. Voor de komende 15 jaar is het advies uit te gaan van de historische suppletievolumes. Dat is 0,26 miljoen m³/jr.

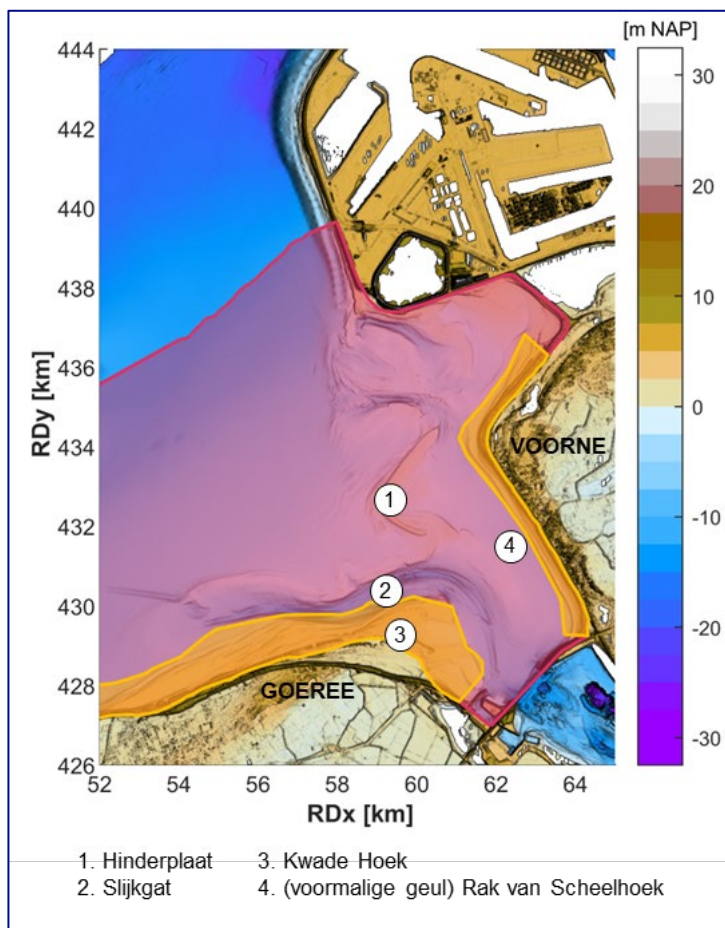
Behoeftelange termijn, bij snellere zeespiegelstijging

Hiervoor geldt hetzelfde als in 3.3.5 voor de monding van de Oosterschelde is opgeschreven.

3.5 Rondom monding Haringvliet

3.5.1 Overzicht

Na de afsluiting van het Haringvliet (1970) kan gesproken worden van een voormalige buitendelta / monding. Het Slijkgat aan de zuidzijde is de enige getijgeul die nog een (kleine) verbinding heeft met het Haringvliet (via sluisen uiteraard)⁴⁰. Ze verbindt de uitwaterings-sluisen van het Haringvliet met de Noordzee. Ten zuiden ervan het Kwade Hoek, dat bestaat uit (droogvallende) platen, een sterk aangroeiend strand en duinen.



Figuur 3-16: Overzicht van in de tekst genoemde deelgebieden en morfologische elementen van de monding van het Haringvliet, gebaseerd op de meest recente Vaklodingen. De eilanden zijn opgevuld met het AHN4. In geel is aangegeven de minimale variant van de actieve zone. Het rode vlak is de maximale variant.

⁴⁰ Het Slijkgat is ook vaarweg en wordt op diepte gehouden. Sinds 2009 hebben de baggerhoeveelheden een stijgende trend. Het diepere vaarwegprofiel dat vanaf dan wordt onderhouden draagt daar zeker aan bij.

Voor de kust van Voorne liggen nog de overblijfselen van de oude hoofdgeul Rak van Scheelhoek, inmiddels grotendeels opgevuld met (meest fijn) sediment. Het grote, gedeeltelijk droogvallende plaatoppervlak dat zich vanaf de zuidwestzijde van de Maasvlakte zuidwaarts uitstrekt zijn verschillende platen die recentelijk aaneen zijn gegroeid. In dit rapport wordt het hele complex aangeduid als Hinderplaat.

De deelgebieden rond de monding van het Haringvliet zijn:

1. de Noordoostkust van Goeree, (3.5.2)
2. de kust van Voorne, onderverdeeld in een zuidelijk deel, de kop en het noordelijk deel 3.5.3.
3. de kust van de Maasvlakte 2 (3.5.4)
4. de 'actieve buitendelta', grotendeels overeenkomend met de maximale variant van de actieve zone als aangeduid in Figuur 3-16, besproken in 3.5.5

Hierbij is gebruik gemaakt van de kennisoverzichten die de beheerbibliotheek van Voorne & Goeree (Vermeer et al., 2025) geeft.

3.5.2 Noordoostkust Goeree

Dit deel van de kust begint bij raai 1075 en kent aanzanding door een grote sedimentaanvoer uit het zuidwesten. Dit zand is zowel afkomstig van erosie van de buitendelta als van het kustlangse transport van de zandsuppleties op de kust van Goeree. Dit resulteerde in aangroei en in het bijzonder de uitbouw van de Kwade Hoek.

3.5.3 Kust Voorne

De kust van Voorne is altijd zandig geweest. Ze kan qua ligging en ontwikkeling in drie deelgebieden opgesplitst worden.

Deelgebied I: Zuidwestkust Voorne

Tussen de raaien 1600 (Damaanzet Haringvlietsluizen) en 1040 is de kust gericht op het zuidwesten. Ooit lag daar het Rak van Scheelhoek voor, maar deze is sterk verondiept. Langs dit deel van de kust vinden suppleties plaats. Enerzijds is het de verwachting dat deze nodig blijven tussen de raaien 1100 en 1280, maar anderzijds lijkt ook duidelijk dat, met de veranderde morfologie van de lokale vooroever (opvulling Rak van Scheelhoek) en de morfologische veranderingen in de monding het zandtransport serieus is afgenomen. Hierdoor zal de noodzaak tot suppleren minder worden. Het deel ten zuiden daarvan, tussen 1280 en 1600, is stabiel.

Deelgebied II: Kop van Voorne

Tussen de raaien 1100 en 880 is de kustlijn gekromd. Al lang (zeker vanaf 1915) vindt daar erosie plaats. Door de grote veranderingen in de omgeving (afdamming Brielse Gat, aanleg Maasvlakte, Slufter en Maasvlakte 2) is de vooroever steeds ondieper geworden, wat invloed heeft op de snelheid van erosie. Huisman (2024) toont aan dat de transporten op de kust van Voorne relatief beperkt zijn. De divergentie van het netto transport op de kop geeft een erosie van orde 4.000 m³/jr. In 2009/2010 leidde dit tot suppleties als onderdeel van de Zwakke Schakel projecten. Deze suppleties vormen een 'slijtlaag', die langzaam erodeert. De verwachting is dat na geruime tijd (denk aan 2035-2040) er opnieuw een strand- of duinversterking nodig is. Als dit klopt, betekent dit dat er, gezien de laatste versterking van in totaal 2,4 miljoen m³, een jaarlijkse behoefte aan zand voor de kust is van ca. 0,1 miljoen m³. Dat is een lager getal dan in Elias et al. (2024), die tot een gemiddelde hoeveelheid suppleties van 0,17 miljoen m³/jr. kwam door een trend te bepalen over de laatste 22 jaar.

Deelgebied III: Het noordelijk deel van Voorne

Tussen de raaien 880 en 620 (Brielse Gatdam) is de kust gericht is op het noordwesten. Hier ligt een zeer ondiepe vooroever, die hoogstwaarschijnlijk nog verder zal verondiepen, bij de

dam voornamelijk door fijnkorrelige sedimentatie. Er is sprake van een zeewaarts verplaatsende kustlijn. Suppleties zijn hier de komende decennia niet te verwachten.

3.5.4 **Maasvlakte 2**

Langs de Maasvlakte 2 is een zandige kust aangelegd. Het kustprofiel is echter ver van een evenwichtssituatie. De doelstelling voor de lange termijn van dit stuk kust is niet gebaseerd op meegroeien van een profiel met de zeespiegelstijging, maar feitelijk alleen het 'compenseren van de sedimenttransporten uit de ondiepe kustzone, zodat het aangelegde stuk zandige kust in stand blijft'. Hiervoor is sinds de aanleg van de Maasvlakte 2 ongeveer 0,6 miljoen m³/jr. nodig geweest (Elias et al., 2024). Dit is ook de beste schatting voor de behoefte aan sediment c.q. suppleties in de komende 15 jaar.

Van het gesuppleerde materiaal is weinig (orde 10%) nog in de actieve zone terug te vinden. Het is zelfs goed mogelijk dat dit vooral de 'rest' van het laatste onderhoud is (op moment van de meting van de bodem) en er nauwelijks tot geen sprake is van structurele volumetoename. Voorlopig is de aanname dat de 0,6 miljoen m³/jr. geheel getransporteerd wordt uit dit deel van de kust.

Het is niet waarschijnlijk dat zonder deze suppleties bij de Maasvlakte 2 de transporten naar de Euro-Maasgeul kleiner zouden zijn geweest, ook al komt de omvang ervan ongeveer overeen met 20 à 25% van het netto transport van de Voordelta naar de Euro-Maasgeul. Het is wel zinvol de verhoudingen aan te geven. 'Waar het suppletiezand heen is gegaan' is niet onderzocht. Een flink deel kan landinwaarts zijn gegaan. Bij andere strandsuppleties is tot 40% in de duinen terug te vinden. Het windtransport zal bij de Maasvlakte niet minder zijn. Het overige 'weggetransporteerde' suppletiezand zal voor een belangrijk deel de waaivormige banken ten zuidoosten van de Maasvlakte hebben gevoed.

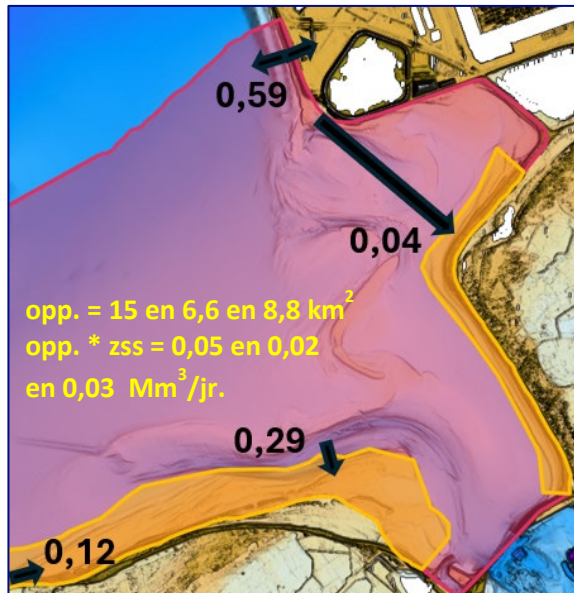
3.5.5 **Ontwikkelingen actieve buitendelta**

De 'actieve buitendelta' van het Haringvliet is begrensd cf. Taal et al. (2023), met de rand van de buitendelta op basis van de meest recente bodem. Het sedimentvolume in de actieve buitendelta is gegroeid, sinds 2000 in een lager tempo (ca. 0,2 miljoen m³/jr.) dan daarvoor. Vooral tussen 1967 en 1984 nam het volume snel toe, meer dan waarschijnlijk door de afsluiting van het Haringvliet in 1970. Als illustratie gelden de afbeeldingen in Figuur 3-2.

Bij een nadere beschouwing van het transport vanuit de actieve buitendelta naar de Euro-Maasgeul moet in acht worden genomen dat de grens tussen de drie actieve buitendelta's (van de mondingen van Oosterschelde, Grevelingen en Haringvliet) niet op morfologische karakteristieken, maar op basis van grenzen in de kaartbladen zijn getrokken in Elias et al. (2024). Het meest plausibele denkmodel is dat over de Voordelta, over de actieve buitendelta's heen, een relatief constant netto transport is van orde 2,5 miljoen m³/jr. Dit sluit aan bij de waarneming van erosie ten zuiden en westen van Schouwen in de monding van de Oosterschelde en een redelijke balans tussen sedimentatie en erosie op dieper water ten noorden daarvan.

3.5.6 **Sediment- en suppletiebehoefte monding Haringvliet**

De behoefte wordt, cf. de aanpak die in 2.4 uiteen is gezet, hieronder gepresenteerd. Figuur 3-17 geeft het overzicht incl. de ligging van de actieve zone.



Figuur 3-17: Transporten in en uit de actieve zone bij noordkust van Goeree, Voorne en de Maasvlakte 2, als gebruikt in Tabel 3-7. De getallen zijn cf. Figuur 3-1. De lange pijl van Maasvlakte 2 naar Voorne is feitelijk een transport dat via de actieve buitendelta verloopt en is ontleend aan Elias et al. (2024).

Merk op: in tegenstelling tot wat Figuur 3-1 suggereert heeft het netto verlies vanuit de suppletiezone bij Maasvlakte 2 (in totaal 0,59 miljoen m³/jr.) ook een component landinwaarts (zie opmerking aan eind 3.5.4).

Behoefte in de komende 15 jaar volgens rekenregel met actieve zone

Tabel 3-7: Behoefte monding Haringvliet komende 15 jaar volgens denkmodel rekenregel met actieve zone. De getallen zijn in km² of miljoen m³/jr. Oppervlakten zijn cf. Taal et al. (2023), inclusief de erin genomen onzekerheidsmarge. De transporten zijn cf. Elias et al. (2024).

Naam	opp. actieve zone	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoefte
Noordkust Goeree	(15)	(0,05)	(0,12)	(-0,29)	0
Voorne	(6,4)	(0,02)	(0,04)	0	0
Maasvlakte2	8,8	0,03	-0,04	0,59	0,66
Actieve buitendelta					p.m. / geen
TOTAAL (ex noordkust Goeree en Voorne)	8,8	0,03	-0,04	0,59	0,66

Voor het bepalen van de getallen waren de volgende keuzes / aannamen nodig:

- De actieve buitendelta is niet meegenomen voor komende 15 jaar, zie hiervoor 3.1.
- Het netto transport van Maasvlakte2 naar de actieve zone van Voorne is apart zichtbaar gehouden in de tabel door het als 'negatief transport in' te kwalificeren.
- Voor de noordkust van Goeree en de kust van Voorne volgt via de rekenregel een negatief getal. Er is opgelegd dat deze niet kleiner dan 0 kan worden. Voor het bepalen van het totaal worden de oppervlakte van de actieve zone en transporten bij zowel de noordkust van Goeree als bij Voorne niet meegenomen⁴¹. Anders zou de indruk worden gewekt dat een positieve sedimentbalans (à 0,37 + 0,02 miljoen m³/jr.) in die kustvakken de behoefte bij Maasvlakte2 kan compenseren. Resultaat is daarom 0,66 miljoen m³/jr.

⁴¹ Merk op dat bij Voorne wel gesuppleerd wordt, zie Tabel 3-8.

Historische suppletievolumes

Tabel 3-8: Historische suppletievolumes monding Haringvliet, als indicatie voor behoefte in de komende 15 jaar, in miljoen m³/jr.

Naam	Periode start	Periode eind	Historisch suppletievolume
Noordkust Goeree	2000	2023	0
Voorne	1990	2023	0,12
Maasvlakte	2012	2023	0,59
TOTAAL			0,71

Advies behoefte per jaar tot ca. 2040

Bij de kusten langs de monding van het Haringvliet bepalen de netto transporten in en uit het te handhaven gebied de afgelopen decennia de erosie van de kustlijn en daarmee de sedimentbehoefte (c.q. suppletiebehoefte). Daarnaast is het onwaarschijnlijk dat (een deel van) de actieve buitendelta op een tijdschaal van 15 jaar mee gaat doen met het verspreiden van suppletiezand. Voor de komende 15 jaar is daarom het best te redeneren vanuit wat gemiddeld sinds 1990 is aangebracht.

Behoefte lange termijn, bij snellere zeespiegelstijging

Hiervoor geldt hetzelfde als in 3.3.5 voor de monding van de Oosterschelde is opgeschreven.

3.6 Synthese sediment- en suppletiebehoefte hele Deltakust

Behoefte in de komende 15 jaar volgens rekenregel met actieve zone

Tabel 3-9: Behoefte hele Deltakust komende 15 jaar volgens denkmodel rekenregel met actieve zone. De getallen zijn in km² of miljoen m³/jr. Voor onderbouwing zie de desbetreffende secties.

Naam	opp. actieve zone	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoefte
Monding Westerschelde	27-101	0,08-0,29	0,15	0,95 - 1,26	0,85 – 1,4
Monding Oosterschelde	28,5	0,09	0	0,51	0,59*
Monding Grevelingen	6	0,02	0	0,12	0,14*
Monding Haringvliet	8,8	0,03	-0,04	0,59	0,66*
TOTAAL	(70-144)	0,22-0,44	0,11	2,17-2,48	2,25-2,8

* Merk op dat voor de mondingen van de Oosterschelde, Grevelingen en Haringvliet de getallen zijn zonder het resultaat voor respectievelijk Noord-Beveland, noordkust van Schouwen, noordkust van Goeree en Voorne van de rekenregel actieve zone (omdat deze een negatieve waarde gaf).

Behoeftte in de komende 15 jaar volgens rekenregel met rekenkundig kustfundament

Tabel 3-10: Behoeftte hele Deltakust komende 15 jaar volgens denkmodel rekenregel met de grenzen van het rekenkundig kustfundament als in Kustgenese 2.0. De getallen zijn in km² of miljoen m³/jr.

Naam	opp. ⁴²	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoeftte
Monding Westerschelde	268	0,8		2	
Monding Oosterschelde	469	1,4			
Monding Grevelingen	225	0,7			
Monding Haringvliet (incl. Rijn-Maasmonding)	178 ⁴³	0,5			
TOTAAL (cf. Rijkswaterstaat, 2020, maar met zss = 2,9 mm/jr.)	1171⁴⁴	3,4		2	5,4

Historische suppletievolumes

Tabel 3-11: Historische suppletievolumes Deltakust, als indicatie voor behoeftte in de komende 15 jaar, in miljoen m³/jr.

Naam	Historisch suppletievolume
Monding Westerschelde	1,14
Monding Oosterschelde	0,92
Monding Grevelingen	0,26
Monding Haringvliet	0,71
TOTAAL	3,03

Advies voor de behoeftte per jaar tot ca. 2040

In de voorgaande secties is per kustvak een synthese gemaakt voor de behoeftte in de komende 15 jaar is. Meestal is de beste aanname verkregen door te redeneren vanuit wat gemiddeld historisch is aangebracht. Hieronder is dit samengevat.

Tabel 3-12: Advies behoeftte per jaar tot ca. 2040, in miljoen m³/jr.

Naam	Behoeftte
Monding Westerschelde	1,14
Monding Oosterschelde	1,03
Monding Grevelingen	0,26
Monding Haringvliet	0,71
TOTAAL	3,14

* De behoeftte voor de monding van de Oosterschelde van 1,03 miljoen m³/jr. is gebaseerd op de theoretische behoeftte van de actieve zone (0,34 miljoen m³/jr.) bij de Zuidwestkop van Schouwen. Bij uitzondering geeft dit een hogere waarde dan de historische suppletievolumes (0,23 miljoen m³/jr.).

* Merk op dat in Rijkswaterstaat (2020) uiteindelijk de behoeftte bij de Maasvlakte2 bij de Hollandse kust is gevoegd.

⁴² De oppervlakte van het rekenkundig kustfundament bij de Deltakust is groter dan de 'maximale variant' van Taal et al. (2023). Die maximale variant is opgebouwd uit oppervlaktes per kustvak van 101 km² (Westerschelde) + 329 km² (Oosterschelde) + 181 km² (Grevelingen) + 145 km² (Haringvliet) = 756 km²

⁴³ Zonder de Rijn-Maasmonding zou het 139 km² zijn. De Rijn-Maasmonding wordt aangenomen in het rekenkundig kustfundament te vallen.

⁴⁴ Dit is geen optelling van de getallen erboven. Dit totaal is regelrecht overgenomen uit Rijkswaterstaat (2020). De getallen per zeegat zijn cf. de polygonen in Figuur 2-10. Som daarvan is 1101 km² of 1140 km² (met Rijnmaasmonding). Met zss = 2,9 mm betekent 1140 km² een behoeftte veroorzaakt door zeespiegelstijging van 3,3 miljoen m³/jr.

4 Kennis deelsysteem Hollandse Kust

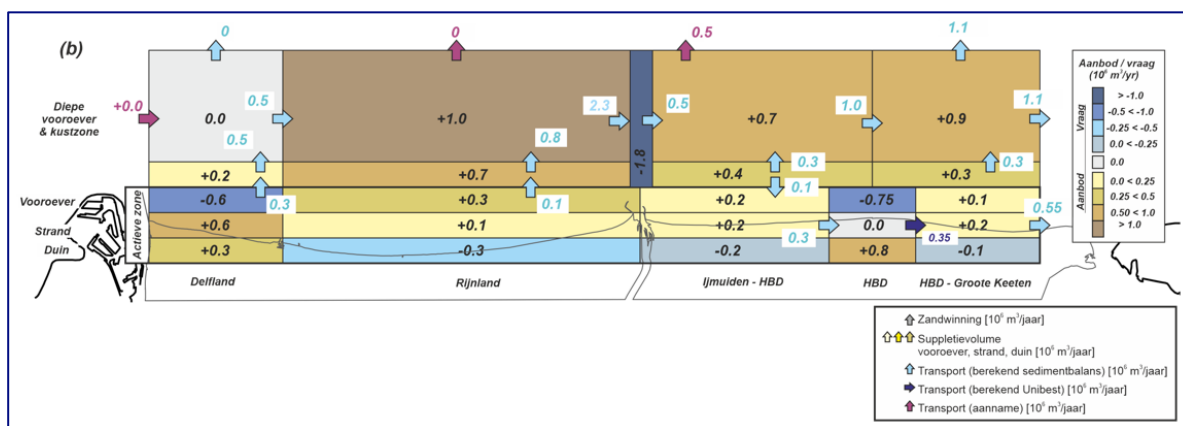
4.1 Hele Hollandse kust

4.1.1 Overzicht

De Hollandse kust is ingedeeld in twee kustvakken (Zuid- en Noord-Holland) die gescheiden zijn door de haven bij IJmuiden met de toegang via de IJgeul. De zuidgrens wordt gevormd door de havendammen bij Hoek van Holland en de noordgrens ligt ter hoogte van Grote Keeten. Daar begint de buitendelta van het Zeegat van Texel. Behalve bij IJmuiden is het langstransport ook gehinderd bij de Haven van Scheveningen.

Voor de hele Hollandse kust geldt dat de transporten nabij de kustlijn golfgedomineerd zijn en dat het concept van de actieve zone, zie 2.3.1, hier duidelijk toepasbaar is op de schaal van de kustvakken. Op een kleinere ruimteschaal is hier het effect van Figuur 2-8 dominant. Het onderhoud vindt veelal plaats bij kustplaatsen omdat daar de BKL vaak net iets zeewaarts ligt ten opzichte van de naastliggende duingebieden (en daarmee fungeren als 'bolwerken').

Voor het beschrijven van de sedimenthuishouding en het bepalen van de sediment- en suppletiebehoefte wordt veel gebruikt van Elias et al. (2024). De synthesefiguur voor de Hollandse kust van de sedimentbalans is daarom overgenomen in Figuur 4-1.



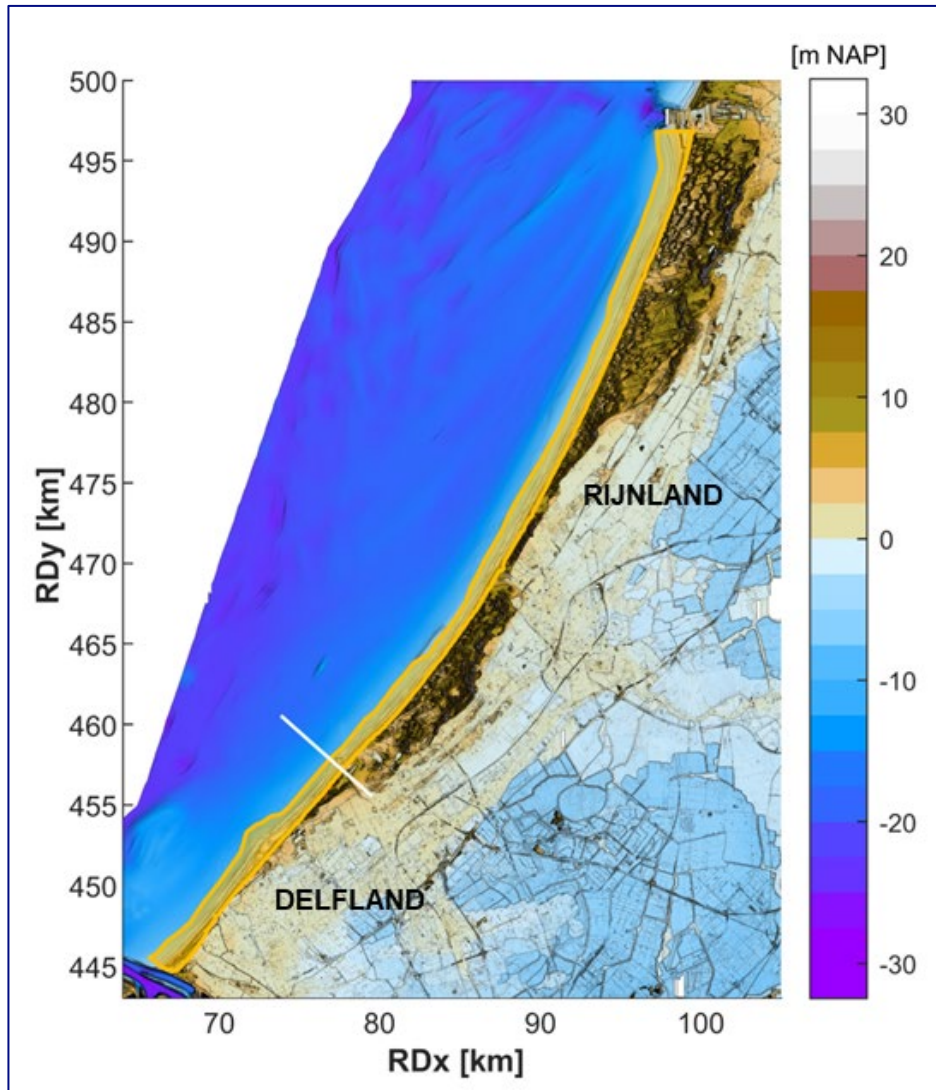
Figuur 4-1: Synthese van de sedimentbalans voor deelsysteem Hollandse Kust uit Elias et al. (2024). De pijlen geven de richting aan van het gemiddelde jaarlijkse transport. De getallen in een vak geven aan of daaruit sediment is afgevoerd (het is dan een bron van sediment, met een positieve waarde) of dat er toename van volume was (het is dan een 'put' van sediment, met een negatieve waarde).

4.2 Zuid-Holland

Het kustvak Zuid-Holland⁴⁵ omvat Delfland (van de Noorderdam, raai 1185, bij de monding van de Nieuwe Waterweg tot de zuidelijke havendam bij Scheveningen, ca. raai 1020⁴⁶) en Rijnland (van de noordelijke havendam bij Scheveningen, ca. raai 1014, tot de zuidelijke havendam nabij IJmuiden, ca. raai 570). Samen zijn ze ca. 60 km lang.

⁴⁵ De naam Zuid-Holland dekt niet helemaal de lading. De provinciegrens tussen Noord- en Zuid-Holland ligt nl. niet bij IJmuiden maar een stuk zuidelijker.

⁴⁶ Sedimentbalansen worden opgemaakt met als grens havendammen. In Quataert et al. (2021) loopt Delfland verder noordelijk vanwege de grens tussen de hoogheemraadschappen.



Figuur 4-2: Overzicht van het kustvak Zuid-Holland, gebaseerd op de meest recente Vaklodingen en opgevuld met AHN4. Het gele vlak is de actieve zone. De witte lijn is de grens tussen Delfland en Rijnland.

4.2.1 Delfland

4.2.1.1 Overzicht / karakteristieken

De Delflandse kust, tussen de havendammen bij de Nieuwe Waterweg en de haven van Scheveningen, is geheel zandig⁴⁷. De beheerbibliotheek Delfland (Quataert et al., 2021) bespreekt de belangrijkste morfologische kenmerken en gedrag in detail.

Ook voor 1990 is intensief gesuppleerd voor de Delflandse kust. Er is een flinke toename in sedimentvolume tussen 1970 en 1977 door de aanleg van de Van Dixhoordriehoek, voornamelijk met zand afkomstig van de havens van de Maasvlakte. Deze aanleg is feitelijk een kustuitbreiding geweest.

Na 1990 zijn er nog twee grote ingrepen geweest buiten de reguliere kustlijn zorg. De eerste (2008 tot 2010) was een combinatie van de versterking van de 'Zwakke Schakels' en een compensatiemaatregel voor de aanleg van de Maasvlakte 2, namelijk Spanjaardsduin bij Vluchtenburg. De Zwakke Schakel is versterkt door het strand en de duinen te verbreden. Om die versterking en de duincompensatie te handhaven is de BKL zeewaarts verlegd.

⁴⁷ Er zijn wel strandhoofden aanwezig, maar die spelen voor de schaal van analyse in dit rapport geen rol.

De tweede grote ingreep is de aanleg van de Zandmotor tussen Ter Heijde en Kijkduin (2011). Deze is feitelijk een tijdelijke slijtlaag, zij het van grote omvang, die in de loop van de jaren zal verdwijnen.

4.2.1.2 Ontwikkelingen sedimentvolume

Over de periode 1990-2022 kent Delfland een gemiddelde toename van de actieve zone van 1,5 miljoen m³/jr. Dit is iets minder dan het gemiddelde suppletievolume (1,8 miljoen m³/jr.). Het verschil, 0,3 miljoen m³/jr., is iets meer dan in de andere vakken langs de Hollandse kust. De uitzonderlijke situatie na de aanleg van de Zandmotor, waarop de kustlijn zich moet aanpassen, speelt hierbij ongetwijfeld een rol. Deze 0,3 miljoen m³/jr. is voor een deel (waarschijnlijk ongeveer de helft) het gevolg van netto transport in kustlangse richting via het onderhoud van de vaargeul van de haven van Scheveningen. De stortplaats van deze specie ligt binnen het kustfundament, maar buiten de actieve zone.

De verwachte ontwikkeling van de Zandmotor bepaalt in de komende 15 jaar mede de benodigde suppletievolumes. Uit Quataert et al. (2021) is het volgende samengevat: Op de langere termijn zal het zand van de Zandmotor zich langs de kust verspreiden (Luijendijk et al., 2019). Dit maakt de Zandmotor kleiner en de stranden bij Ter Heijde en Kijkduin breder. Ondanks deze langzame herverdeling van zand zal de Zandmotor nog enkele tientallen jaren herkenbaar zijn als zeewaartse uitbouw. Verwacht wordt dat in 2040 er nog een strand van ongeveer 400 meter breed is. De invloed van de Zandmotor zal zich naar het noorden over zo'n drie kilometer blijven uitstrekken.

Behalve voor kustuitbreiding en -onderhoud is ook sediment gestort op dieper water bij de Delflandse kust. Het gaat om baggerspecie uit de Euro-Maasgeul en de haven van Rotterdam. De verspreiding daarvan gebeurde over drie stortlocaties: Loswal Noord, Loswal Noordwest en de Verdiepte Loswal. Alleen Loswal Noord⁴⁸ valt, voor het grootste deel, binnen de -20m contour. Sinds 1996 geldt het besluit om de Loswal Noordwest en de Verdiepte Loswal te gebruiken, die beiden buiten de -20m contour liggen.⁴⁹

4.2.2 Rijnland

4.2.2.1 Overzicht / karakteristieken

Dit kustvak loopt van de noordelijke havendam bij Scheveningen tot de zuidelijke havendam nabij IJmuiden. De kust is geheel zandig op de uitwateringsluis bij Katwijk na en heeft zich vrijwel overal uitgebouwd onder invloed van suppleties, inclusief de ingrepen in het kader van de Zwakke Schakels. Daarvoor zijn op een drietal plaatsen dijk-in-duinconstructies aangebracht (Scheveningen, Katwijk, Noordwijk). Ze worden besproken bij de betreffende deelgebieden. In 2017 is, net als bij herziening in 2012, de BKL aangepast om de veiligheid bij de versterkte Zwakke Schakels in stand te houden.

Ook op twee andere plaatsen is de zeewering niet geheel zandig (Zandvoort en IJmuiden). Zie de beheerbibliotheken Rijnland (Quataert en Mastbergen, 2019) en Delfland (Quataert et al., 2021) voor nadere uitleg.

De transporten langs de Rijnlandse kust variëren beperkt. Tussen Scheveningen en Katwijk loopt het transport op van 250.000 m³/jr. naar 300.000 m³/jr. Waarna er een afname is naar 250.000 m³/jr. bij Noordwijk en tot aan iets minder dan 200.000 m³/jr. bij Zandvoort.

⁴⁸ Hier is tussen 1963 en 1996 bijna 85 miljoen m³ sediment gestort.

⁴⁹ Dit betekent dat sinds 1996 via transport vanuit de Voordelta naar de Euro-Maasgeul (geschat op ca. 2,6 miljoen m³/jr.) er relatief veel sediment vanuit het kustfundament (en meer precies de maximumvariant van de actieve zone) naar dieper water wordt gebracht. Dit is een aandachtspunt als het kustbeleid geïnterpreteerd moet worden als 'behoud van sediment' in de zones die moeten meegroeien met de zeespiegel.

Afgezien van deelgebied I en III zijn in alle delen vooroeversuppleties uitgevoerd en lijken ze in de toekomst nodig te blijven. De vooroeversuppleties hebben het bankgedrag beïnvloed qua periodiciteit, vorm en migratierichting. De nummering van onderstaande deelgebieden is conform de beheerbibliotheek, met toegevoegd deelgebied VII.

Deelgebied VII: Scheveningen vanaf Havendammen (raai 9725-10140)

In 2011 is de kust bij Scheveningen versterkt, door de aanleg van een dijk-in-boulevard en verbreding van het strand. Om de zandige uitbouw te handhaven, is de BKL zeewaarts verlegd, voor de raaien 9875-10140, met 35-90 meter.

In dit deelgebied is gemiddeld over 1990-2024 220.000 m³/jr. gesuppleerd (inclusief de uitbouw / verplaatste BKL). Dit is vrij veel voor een gebied van ca. 4 km lengte, maar dit komt door de iets meer zeewaartse ligging van de BKL ten opzichte van het noordelijk ervan gelegen duingebied. Ook zal het verband houden met de blokkade van langstransport door de havendammen. Het is niet zeker of de netto bypass die plaatsvindt (ook middels onderhoud van de vaargeul) tot extra zand in de actieve zone leidt.

Deelgebied VI: Wassenaar (raai 9225-9725)

In deelgebied VI zijn er weinig bijzonderheden. Er is de afgelopen 30 jaar wel gesuppleerd, waaronder een vrij grote vooroeversuppletie (3 miljoen m³) in 2021. Er is een significante uitbouw van de kustlijn te zien, hoewel de trends in MKL-positie wisselend zijn voor de raaien. Dit gedrag lijkt te worden veroorzaakt door de ontwikkeling van nieuwe banken bij de kustlijn.

Deelgebied V: Katwijk (raai 8525-9200)

De belangrijkste ontwikkeling in dit gebied is de zeewaartse verplaatsing van de kustlijn ter hoogte van de boulevard van Katwijk (raaien 8000-8850) en de aanleg van een dijk-in-duin in het kader van de Zwakke Schakels (voltooiing in 2015). De zeewaartse verplaatsing van de kustlijn heeft lokaal de transportgradiënt veranderd. Het handhaven van de kustlijn (op de eveneens zeewaarts verlegde BKL) vraagt extra zand (zie uitleg in Figuur 2-8).

Deelgebied IV: Noordwijk (raai 7725-8500)

De aanleg van een dijk-in-duinconstructie in 2008 bij Noordwijk omvatte een duinverbreding en een zeewaartse uitbouw van het duingebied (ca. 42 meter). Er is een nieuwe dijk parallel aan de boulevard aangelegd en afgedekt door duinen. De dijk is dus niet zichtbaar. Net als bij Katwijk heeft de verlegging van de BKL lokaal de transportgradiënt veranderd, waardoor extra zand nodig is in de actieve zone, maar er zijn geen suppleties geweest sinds eind 2014⁵⁰.

Deelgebied III: Zandvoort zuid - Langevelderslag (raai 6825-7700)

In dit deelgebied zijn na 2002 (op een kleine vooroeversuppletie aan de noordrand in 2008) geen suppleties meer uitgevoerd. De vooroever kent een langzaam zeewaarts migrerend bankenpatroon. De kust is overwegend stabiel.

Deelgebied II: Bloemendaal - Zandvoort (raai 6025-6800)

Vanaf 2004 zijn er in dit gebied enkel vooroeversuppleties uitgevoerd. Deze verstoren dan telkens het regelmatige patroon van parallelle brekerbanken en het zand lijkt zich te verdelen in het gebied landwaarts van de suppletie. Na 8 tot 10 jaar zijn deze suppleties niet meer herkenbaar in de bodem. Aan de noordzijde van dit gebied, bij Bloemendaal aan Zee, is een uitbouwende kust te zien onder invloed van de suppleties. In het meer zuidelijke deel is de kust redelijk stabiel.

⁵⁰ Dat is een opvallend verschil met de kustlijn bij Katwijk. Het gedrag van vooroeversuppleties verschilt bij beide kustplaatsen. Bij Katwijk verspreiden ze zich snel, maar bij Noordwijk blijft de suppletie veel meer 'liggen'.

Deelgebied I: Velsen (raai 5625-6000):

Dit deelgebied kent een uitbouwende kustlijn sinds 1970. Dit is een reactie op de verlenging van de havenhoofden bij IJmuiden⁵¹ met 1,5 km aan de zuidkant. Hierdoor wordt veel langtransport ingevangen (het transport daalt naar nul. Vanaf 2012 lijkt er langzaam een nieuw evenwicht te ontstaan en is de aanwas minder sterk. De aanwas gebeurt overigens ook aan de noordzijde, waar het havenhoofd met 1 km is verlengd, maar is daar duidelijk minder omvangrijk.

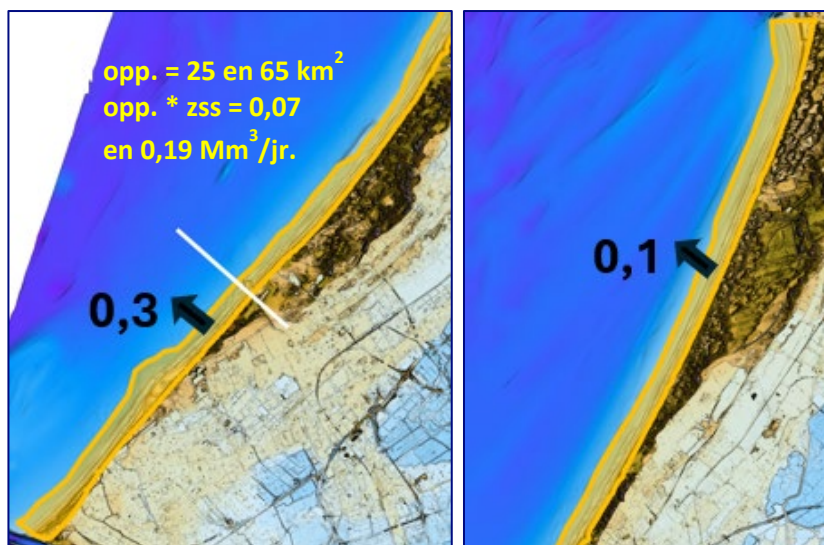
4.2.2.2 Ontwikkelingen sedimentvolume

Elias et al. (2024) berekent dat het kustvak Rijnland een toename in volume van de actieve zone vertoont van +1,3 miljoen m³/jr. Deze groei treedt in alle zones (ondiepe vooroever, strand, zeereep) op. De grootste toename vindt plaats in de vooroever (+0,6 miljoen m³/jr.), maar in die zone is ook het meeste gesuppleerd (0,9 miljoen m³/jr.). De strandzone (0,3 miljoen m³/jr. toename) en de zeereep (0,4 miljoen m³/jr.) groeien iets meer dan de 0,5 miljoen m³/jr. die daar is gesuppleerd. Berekend is ook een klein zeewaarts verlies van 0,1 miljoen m³/jr. (het verschil tussen de suppleties en de toename in de actieve zone).

De diepe kustzone (tussen actieve zone en diepe vooroever) vertoont een relatief grote volumeafname (0,7 miljoen m³/jr.). Dit betekent dat 0,8 miljoen m³/jr. richting de diepe vooroever moet zijn getransporteerd. De diepe vooroever vertoont daarbovenop een negatieve trend in volume van 1,0 miljoen m³/jr. Elias et al. (2024) komt uiteindelijk op 2,3 miljoen m³/jr. die uit dat vak moet zijn gegaan, waarschijnlijk grotendeels in de vaargeul naar IJmuiden. Zie hiervoor verder 4.3.2.

4.2.3 Sediment- en suppletiebehoefte kust Zuid-Holland

De behoefte wordt, cf. de aanpak die in 2.4 uiteen is gezet, hieronder gepresenteerd. Figuur 4-3 geeft het overzicht incl. de ligging van de actieve zone.



Figuur 4-3: Transporten uit de actieve zone bij Delfland en Rijnland, zoals gebruikt in Tabel 4-1. De getallen zijn cf. Figuur 4-1. Bij de havendammen van IJmuiden is er geen transport meer. Het transport van sediment uit de actieve zone door het onderhoud van de haven van Scheveningen is deel van de 0,3 miljoen m³/jr. zeewaarts.

⁵¹ Tussen 1867-1876 is de oorspronkelijke haven van IJmuiden en bijbehorende havenhoofden aangelegd.

Behoeftte in de komende 15 jaar volgens rekenregel met actieve zone

Tabel 4-1: Behoeftte kust Zuid-Holland komende 15 jaar volgens denkmodel rekenregel met actieve zone. De getallen zijn in km² of miljoen m³/jr. Oppervlakten zijn cf. Taal et al. (2023), inclusief de erin genomen onzekerheidsmarge. De transporten zijn cf. Elias et al. (2024).

Naam	opp. actieve zone	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoeftte
Delfland	25	0,07	0	0,3	0,37
Rijnland	65	0,19	0	0,1	0,29
TOTAAL	90	0,26		0,4	0,66

Opmerkingen / Toelichting bij bovenstaande tabel:

De waarde voor het kustdwarse transport 'uit' de actieve zone van Delfland lijkt relatief hoog. Dat komt door de speciale situatie bij de Zandmotor, waardoor Elias et al. (2024) zeewaarts transport uit de actieve zone berekent. Dat kan een overschatting van het transport uit de actieve zone zijn voor de toekomst.

- Anderzijds lijkt er een onderschatting van het transport uit de actieve zone in Elias et al. (2024) te zijn, omdat zij niet corrigeerden voor langstransport richting Rijnland, voorbij de havendammen bij Scheveningen. Dit lijkt binnen de actieve zone echter wel op te treden, deels door het baggeren voor de haven van Scheveningen en het verspreiden van de specie (wat binnen kustfundament, maar buiten actieve zone gebeurt).

Historische suppletievolumes

Tabel 4-2: Historische suppletievolumes kust Zuid-Holland, als indicatie voor behoeftte in de komende 15 jaar, in miljoen m³/jr.

Naam	Periode start	Periode eind	Historisch suppletievolumme
Delfland	2012	2023	0,14 (maximaal 0,75?)
Rijnland	1990	2023	1,19
TOTAAL			1,33 (maximaal 1,94?)

Opmerkingen / Toelichting bij bovenstaande tabel:

De waarde van 0,14 voor Delfland volgt uit het gebruik van de suppletiehistorie sinds 2012, dus na de aanleg van de Zandmotor. De maximale waarde van 0,75 miljoen m³/jr. is de trend voorafgaand aan de aanleg van de Zwakke Schakels (maar wel pas vanaf 1990, dus zonder de Van Dixhoorndriehoek).

Advies behoeftte per jaar tot ca. 2040

Voor de middellange termijn zal het gebruik van historische suppletievolumes (vanaf 2012) voor Delfland niet de juiste aanname zijn. Het is voor de komende 15 jaar aannemelijk dat er nog steeds veel effect is van de in 2011 aangelegde Zandmotor. Zonder meer de trend van na 2012 overnemen zal waarschijnlijk een onderschatting zijn vanwege het overschot aan zand dat de Zandmotor inbracht.

Ook de trend van vóór de aanleg van de Zwakke Schakels lijkt geen juiste aanname. Het kustprofiel is immers aangepast. Een alternatieve wijze om tot een representatief historisch suppletievolumme te komen is de trend voorafgaand aan de aanleg van de Zandmotor (maar wel pas vanaf 1990, dus zonder de Van Dixhoorndriehoek). Die is 0,75 miljoen m³/jr. Dat lijkt voor de periode tot ca. 2040 echter te veel.

Een redelijk alternatief is te kijken naar het getal in Tabel 4-1. Hierin komt naar voren dat de behoeftte aan suppleties voornamelijk door de langtransporten wordt bepaald, wat ook aannemelijk is. Het advies is daarom de 'lokale rekenregel' (0,37 miljoen m³/jr.) te gebruiken. Hierin is besloten "het doorzetten van de door de Zandmotor beïnvloede trend van transport uit de actieve zone" (wat waarschijnlijk wel een overschatting is).

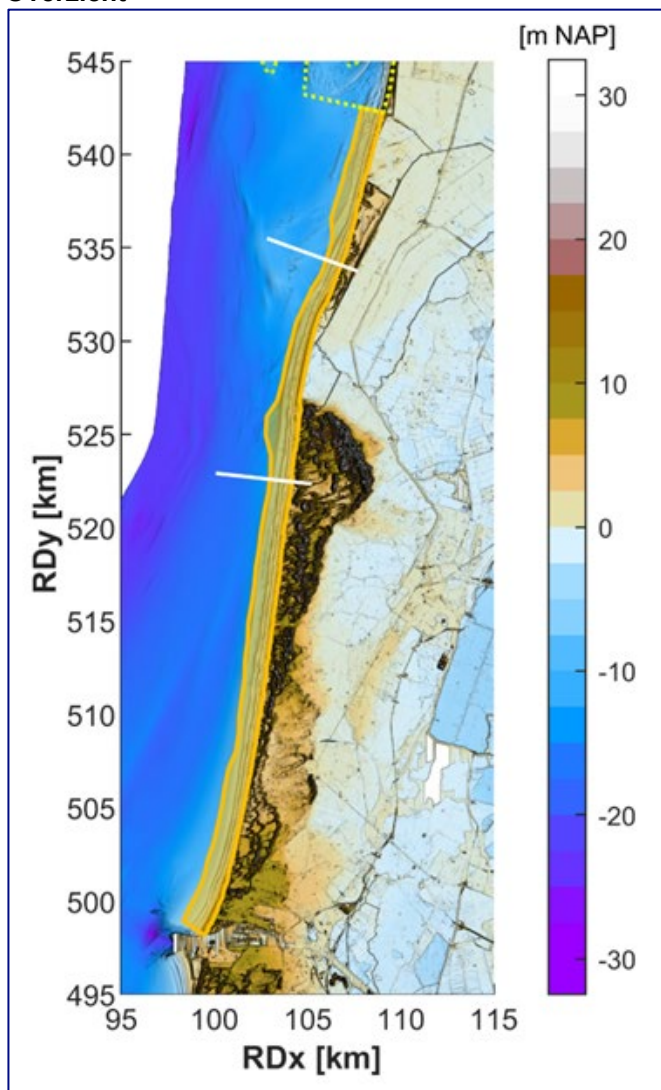
Het advies voor Zuid-Holland is daarom 0,37 miljoen m³/jr. (Delfland) plus 1,19 miljoen m³/jr. (Rijnland), samen **1,56 miljoen m³/jr.**

Behoeftelange termijn, bij snellere zeespiegelstijging

Er kunnen geen betere schattingen van de oppervlakte van de actieve zone en/of de transporten uit de actieve zone gegeven worden dan in Taal et al. (2023).

4.3 Noord-Holland

4.3.1 Overzicht



Figuur 4-4: Overzicht van het kustvak Noord-Holland, gebaseerd op de meest recente Vaklodingen en opgevuld met AHN4. Het gele vlak is de actieve zone. De witte lijnen zijn de grenzen tussen de besproken delen.

Dit kustvak wordt in drie delen besproken. Met die indeling zijn de ontwikkelingen bij de Hondsbossche Duinen apart te beschouwen:

1. Noord-Holland Zuid, van de noordelijke havendam van IJmuiden tot iets ten noorden van Bergen aan Zee, besproken in 4.3.2,
2. de Hondsbossche Duinen, in dit rapport vanaf Bergen aan Zee tot ter hoogte van Sint Maartenszee, besproken in 4.3.3,
3. Noord-Holland Noord, eindigend bij Groote Keeten, waar de buitendelta van het Zeegat van Texel begint, besproken in 4.3.4.

4.3.2 Noord-Holland Zuid

4.3.2.1 Overzicht / karakteristieken

Het deel van de Noord-Hollandse kust ten zuiden van raai 3025 (twee km ten noorden van Bergen aan Zee, waar kustvak Hondsbossche Duinen begint) loopt tot de havendam van IJmuiden en kan verder onderverdeeld worden in drie gebieden. Voor alle delen geldt dat het kustprofiel relatief ongestoord is en dat daarin meerdere brekerbanken te vinden zijn.

Huisman (2024) heeft berekend dat de transporten in dit kustvak netto zuidwaarts zijn met een lokaal maximum bij Egmond aan Zee, orde 160.000 m³/jr. Ten noorden daarvan neemt het af en vanaf Bergen aan Zee tot aan Den Helder is er een netto noordwaarts transport.

Deelgebied I: Invloedsgebied IJmuiden (raai 5500 - 5100)

Dit gebied wordt sterk beïnvloed door de havendammen van IJmuiden. De kust bouwt uit met een toename in sedimentvolume sinds 1990 van ca. 0,2–0,3 miljoen m³/jr.

Zeewaarts van dit deelgebied, op de diepe vooroever, ligt de Loswal IJmuiden. Hier wordt sediment gestort dat is gebaggerd uit de haven van IJmuiden en uit de IJgeul. Voor 2004 werd niet al het gebaggerde materiaal gestort, maar werd ook zand onttrokken aan het systeem. Op basis van stortgegevens van Rijkswaterstaat berekent Röbbke (2021) dat er tussen 2003 en 2021 gemiddeld 2,6 miljoen m³/jr. aan sediment uit de haven van IJmuiden wordt gestort, voornamelijk slib. Daarnaast is er tussen 2014 en 2021 gemiddeld 0,1 miljoen m³/jr. aan baggerspecie uit de IJgeul gestort⁵². In de sedimentbalans van Elias et al. (2024) ligt de Loswal in de diepe vooroever en is het baggeren en storten van de IJgeul neutraal voor de totale balans.

Deelgebied II: Relatief ongestoorde kust (raai 5100 - 3925)

In dit deelgebied domineert de natuurlijke cyclische dynamiek van het bankensysteem. Het zuidelijkste deel, vanaf raai 5100, is licht erosief. Daar zijn beperkt suppleties nodig. Noordwaarts ervan is de kustlijn vrijwel stabiel en is weinig onderhoud nodig.

Deelgebied III: Egmond aan Zee en Bergen aan Zee (raai 3925 – 3025)

In dit deel van de kust is er structureel erosie, wat frequent suppleren op de vooroever en het strand nodig maakte. Bovendien ligt de Basiskustlijn bij deze kustplaatsen ca. 30 meter zeewaarts ten opzichte van de naastgelegen kustvakken. Als gevolg van het frequente suppleren is de oorspronkelijke cyclische migratie van de brekerbanken in dit gebied verstoord. De vooroeversuppleties worden binnen enkele jaren geabsorbeerd in het natuurlijk systeem.

Helemaal aan de noordzijde van dit gebied (rond raai 3050) ligt De Kerf. Dit is een verlaagd deel in de zeereep van de Schoorlse Duinen waarvan het de bedoeling is dat zeewater bij hoogtij de duinen in kan stromen. Als de BKL daar wordt overschreden wordt er niet gesuppleerd, om te voorkomen dat er extra verzanding in de Kerf plaatsvindt en om de gewenste dynamiek een kans te geven.

4.3.2.2 Ontwikkelingen sedimentvolume

Elias et al. (2024) berekent voor dit kustvak dat de volumetoename van 1991 tot 2022 gemiddeld 0,7 miljoen m³/jr. bedraagt. Deze toename is vrijwel gelijk aan de suppleties en vindt plaats in alle zones (ondiepe vooroever, strand en zeereep). Zij berekenen ook een klein netto landwaarts transport van 0,1 miljoen m³/jr., geleverd door de diepe kustzone. Deze erodeert echter meer, namelijk 0,4 miljoen m³/jr. Het verschil zal zeewaarts, naar de diepe vooroever, zijn gegaan.

⁵² Een samenhangende verklaring voor al deze getallen en de evolutie is nog niet opgeschreven. Duidelijk is wel dat daarin moet worden meegenomen dat het systeem behoorlijk veranderde met de aanleg van de havenhoofden, het ontstaan van ontgrondingskuilen en een verdieping van de IJgeul (afgerond in 2006).

4.3.3 Hondsbossche Duinen

4.3.3.1 Overzicht / karakteristieken

Dit kustvak ligt tussen de raaien 3000 (juist ten noorden van 'de Kerf') en 1808 (ter hoogte van Sint Maartenszee) en wordt gedomineerd door de in 2015 aangelegde Hondsbossche Duinen (HBD). Deze versterking, met 35 miljoen m³ zand voor en op de Hondsbossche en Pettemer Zeewering, leidde tot een compleet nieuw, 250 meter breed duingebied met een dubbele duinenrij, zeewaarts van de oude zeewering, met daarvoor een strand. Er is daar geen Basiskustlijn bepaald. Van het aangebrachte zand was ongeveer 15 miljoen m³ voor het duingebied dat vanaf dat moment de waterkerende functie moet vervullen en de rest (zo'n 20 miljoen m³) is in de actieve zone tussen de NAP -6 m en +4 m geplaatst. Nadien heeft zich een grote doorgaande brekerbank gevormd die de vakken ten noorden en ten zuiden van de HBD verbindt. Het kunstmatige strandprofiel had al snel de kenmerken van aangrenzende stranden en binnen twee winters had de surfzone een gelijkwaardige helling. De aanvankelijk brede stranden (d.w.z. tot 225 m) werden ongeveer 100 m breed. Het duinvolume nam toe en de duinvoet migreerde zeewaarts, ongeacht of het onderwaterprofiel sediment won of verloor.

Het onderhoud van de versterking met suppleties is voor twintig jaar, tot eind 2035, bij de aannemerscombinatie belegd als onderdeel van de opdracht tot aanleg. Inmiddels is duidelijk dat de onderhoudsbehoefte in de komende tien jaar groter is dan bij aanleg is berekend. Huisman et al. (2025) geven 500.000 m³/jr. (waarbij erosie van de HBD met ongeveer dezelfde snelheid door zal gaan) tot 700.000 m³/jr. (voor het vasthouden van de huidige kustlijn) als beste inschattingen voor de suppletiebehoefte tot 2025.

4.3.3.2 Ontwikkelingen sedimentvolume

De analyse van Elias et al. (2024) laat zien dat er zowel voor als na aanleg van de HBD netto zand uit het vak gaat. Tussen 1991 en 2003 bijvoorbeeld, nam het volume toe met 6,7 miljoen m³, maar was er 10,4 miljoen m³ gesuppleerd. Na aanleg van de HBD blijft dit vergelijkbaar. De actieve zone bij de HBD vertoont nu een trend van +1,4 miljoen m³/jr. toename, wat vrijwel gelijk is aan de uitgevoerde suppleties (1,45 miljoen m³/jr.). Het verschil draagt bij aan de toename in langstransport van 0,3 miljoen m³/jr. aan de zuidzijde tot 0,35 miljoen m³/jr. ten noorden van de HBD. Merk op dat de afbakening van het vak zo is gekozen dat het de aangroeiende gebieden naast de HBD omsluit, wat de totale verliezen van het vak beperkt.

4.3.4 Noord-Holland Noord

4.3.4.1 Overzicht / karakteristieken

In dit relatief korte kustvak (raai 1808 – 1137) tussen de HBD en Groote Keeten (begin van de buitendelta van het Zeegat van Texel) valt een driehoekvormige ondiepte op: de Pettemer Polder. Hier komt de Pleistocene ondergrond aan het oppervlak. De vooroever is daarom relatief ondiep. Daarnaast wordt dit kustvak beschermd door strandhoofden die om de 250 m op het strand liggen. Hier is geen bankencyclus. Er ligt een enkele bank, evenwijdig langs de kust en stabiel in positie.

Dit stuk kust was één van de 'Zwakke Schakels' langs de Nederlandse kust. De ingreep die hier was gekozen om het afslagprofiel te verminderen was een uitbouw via extra suppleties op het strand en de onderwateroever. In 2017 is de ligging van de BKL opnieuw vastgesteld om het extra aangebrachte zandvolume te behouden.

Als pilot is in 2017 bij Callantsoog éénmalig een suppletie van 1 miljoen m³ aangebracht buiten de actieve zone, op de diepe vooroever. De morfologische veranderingen bij die

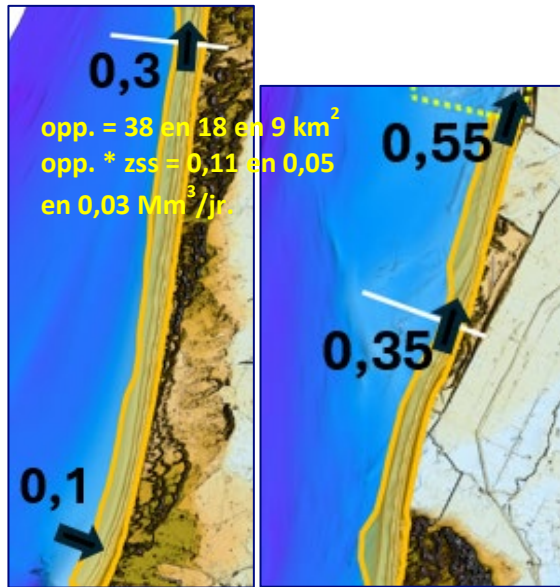
suppletie zijn veel kleiner dan bij vergelijkbare suppleties in de actieve zone. De hoogte van de suppletie neemt iets af, maar de breedte toe. Daardoor blijft het totale volume van de suppletie vrijwel gelijk (Elias et al. 2021).

4.3.4.2 Ontwikkelingen sedimentvolume

De analyse van Elias et al. (2024) toont aan dat de sedimentvolumes tussen 1991 en 2022 zijn toegenomen met 0,3 miljoen m³/jr., wat gelijk is aan de hoeveelheid gesuppleerd zand (0,3 miljoen m³/jr.). Ongeveer twee derde van de volumetoename bevindt zich in de ondiepe vooroever en een derde in de zeereep. Voor de langstransporten richting het Zeegat van Texel komen zij op 0,55 miljoen m³/jr. Deze schatting komt vrijwel overeen met de door het model van Huisman (2024) berekende langstransporten van 0,50 miljoen m³/jr.

4.3.5 Sediment- en suppletiebehoefte kust Noord-Holland

De behoefte wordt, cf. de aanpak die in 2.4 uiteen is gezet, hieronder gepresenteerd. Figuur 4-5 geeft het overzicht incl. de ligging van de actieve zone.



Figuur 4-5: Transporten bij de actieve zone(s) langs de kust van Noord-Holland, te gebruiken in Tabel 4-3. De transporten bij de met witte lijn aangegeven grenzen zijn toevoeging op Figuur 4-1.

Behoefte in de komende 15 jaar volgens rekenregel met actieve zone

Tabel 4-3: Behoefte kust Noord-Holland komende 15 jaar volgens denkmodel rekenregel met actieve zone. De getallen zijn in km² of miljoen m³/jr. Oppervlakten zijn cf. Taal et al. (2023), inclusief de erin genomen onzekerheidsmarge. De transporten zijn cf. Elias et al. (2024).

Naam	opp. actieve zone	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoefte
Noord-Holland Zuid	38	0,11	0,1	(0,3)	0,31
Hondsbossche Duinen	18	0,05	(0,3)	(0,35)	0,10
Noord-Holland Noord	9	0,03	(0,35)	0,55	0,23
TOTAAL	65	0,19	0,1	0,55	0,64

Opmerkingen / Toelichting bij bovenstaande tabel:

- Transporten over de grens binnen een grotere aaneengesloten actieve zone zijn tussen haakjes geplaatst en niet in totaal opgenomen

Historische suppletievolumes

Tabel 4-4: Historische suppletievolumes kust Noord-Holland, als indicatie voor behoefte in de komende 15 jaar, in miljoen m³/jr.

Naam	Periode start	Periode eind	Historisch suppletievolume
Noord-Holland Zuid	1990	2023	0,88
Hondsbossche Duinen	2015	2023	0,7
Noord-Holland Noord	1990	2023	0,39
TOTAAL			1,97

Opmerkingen / Toelichting bij bovenstaande tabel:

De historische suppletievolumes zijn niet representatief voor de komende 15 jaar. Op basis van Huisman et al. (2025) is 0,7 miljoen m³/jr. opgenomen (zie 4.3.3.1).

Advies behoefte per jaar tot ca. 2040

Voor dit kustvak zijn de historische suppletievolumes representatiever voor de behoefte aan suppleties dan de rekenregel.

Behoeftelange termijn, bij snellere zeespiegelstijging

Er kunnen geen betere schattingen van de oppervlakte van de actieve zone en/of de transporten uit de actieve zone gegeven worden dan in Taal et al. (2023).

4.4 Synthese sediment- en suppletiebehoefte hele Hollandse Kust

Behoeftelange termijn, bij snellere zeespiegelstijging

Tabel 4-5: Behoeftelange termijn, bij snellere zeespiegelstijging. De getallen zijn in km² of miljoen m³/jr. Voor onderbouwing zie de desbetreffende secties.

Naam	opp. actieve zone	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoeftelange termijn, bij snellere zeespiegelstijging
Zuid-Holland	90	0,26		0,4	0,66
Noord-Holland	65	0,19	0,1	0,55	0,64
TOTAAL	155	0,45	0,1	0,95	1,30

Behoeftelange termijn, bij snellere zeespiegelstijging

Tabel 4-6: Behoeftelange termijn, bij snellere zeespiegelstijging. De getallen zijn in km² of miljoen m³/jr.

Naam	opp.	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoeftelange termijn, bij snellere zeespiegelstijging
Zuid-Holland	334	1,0			
Noord-Holland	292	0,8			
TOTAAL (cf. Rijkswaterstaat, 2020), maar met zss = 2,9 mm/jr.	702⁵³	2,0	-	-	2,0

⁵³ Dit is geen optelling van de getallen erboven. Dit totaal is regelrecht overgenomen uit Rijkswaterstaat (2020). De getallen per deelsysteem zijn cf. de polygonen in Figuur 2-10. Som daarvan is 625 km². Met zss = 2,9 mm betekent dit een behoefte veroorzaakt door zeespiegelstijging van 1,8 miljoen m³/jr.

Historische suppletievolumes

Tabel 4-7: Historische suppletievolumes Hollandse kust, als indicatie voor behoefte in de komende 15 jaar, in miljoen m³/jr.

Naam	Historisch suppletievolume
Zuid-Holland	1,33
Noord-Holland	1,97
TOTAAL	3,30

Advies behoefte per jaar tot ca. 2040

In de voorgaande secties is per kustvak uiteengezet wat het advies voor de behoefte in de komende 15 jaar is. Hieronder is dit samengevat.

Tabel 4-8: Advies behoefte hele Hollandse kust per jaar tot ca. 2040, in miljoen m³/jr.

Naam	Behoefte
Zuid-Holland	1,56
Noord-Holland	1,97
TOTAAL	3,53

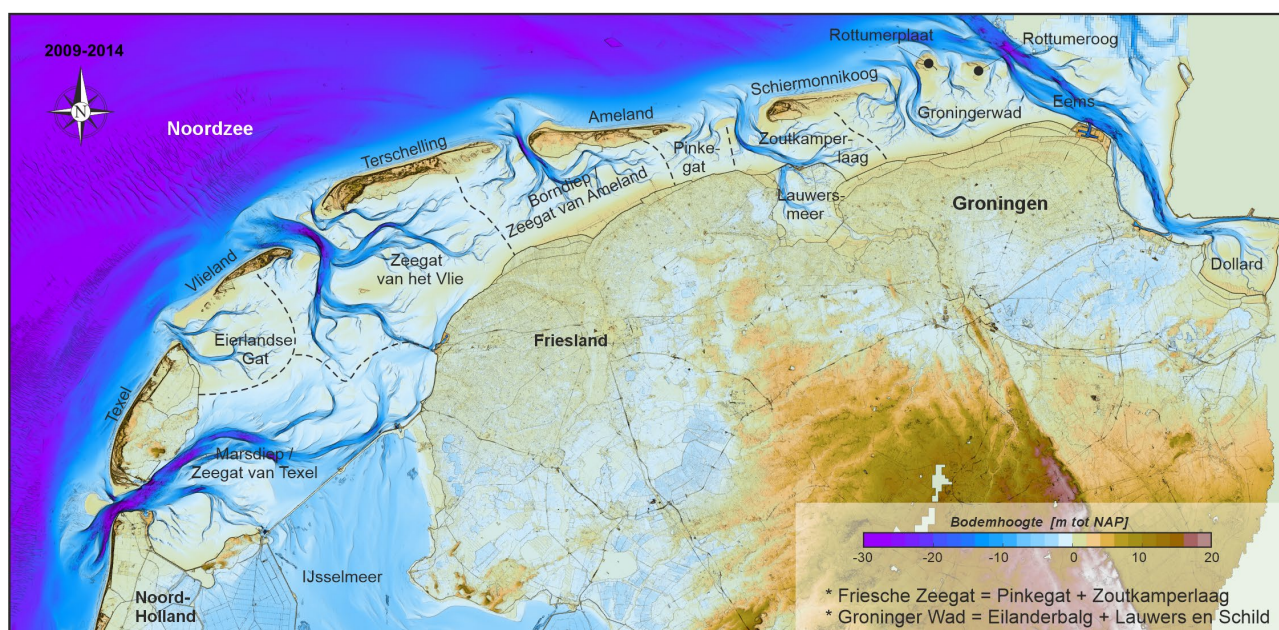
5 Kennis deelsysteem Waddenkust

5.1 Hele deelsysteem Waddenkust

5.1.1 Algemeen

De Waddenkust bestaat uit vijf opeenvolgende zeegatsystemen tussen bewoonde eilanden en oostwaarts van Schiermonnikoog nog een aantal kleinere systemen (Figuur 5-1). Dat betekent dat er in langsrichting afwisselend kustvakken zijn die bij een zeegatsysteem horen en kustvakken die uit een centrale eilandkust bestaan. De bespreking in dit hoofdstuk volgt die afwisseling, vanaf Noord-Holland tot de Eemsmonding.

Het vervolg van dit rapport gebruikt namen die meer ingeburgerd zijn (zoals Zeegat van Texel) in plaats van de feitelijk juistere naam (zoals Zeegatsysteem van Texel). Soms wordt de geul tussen twee eilanden in aangeduid als 'zeegat', maar dit rapport gebruikt, om verwarring te voorkomen, hiervoor de aanduiding 'de keel (van een zeegat)'.



Figuur 5-1: Overzicht deelsysteem Waddenkust.

Voor elk kustvak is onderscheid te maken tussen diepe vooroever en actieve zone. Voor de centrale eilandkusten geldt dat de transporten nabij de kustlijn voornamelijk golfgedomineerd zijn. Het concept van de actieve zone zoals dat in 2.3.1 is uitgelegd en de wijze waarop het langs de hele Hollandse kust is uitgewerkt is voor een centrale eilandkust ook toepasbaar.

Die toepasbaarheid geldt niet voor de kustvakken die bij een zeegatsysteem horen. Hiervoor zijn specifieke denkmodellen nodig (besproken in 5.1.2) om sedimenthuishouding en morfologische ontwikkeling van zeegaten en eilanden te begrijpen. Daarna volgen secties met de synthese van Elias et al. (2024) m.b.t. de sedimentbalans (5.1.3) en de aanpak voor het bepalen van sediment- en suppletiebehoefte (5.1.4). Daarna wordt in 5.1.5 uiteengezet hoe met de sedimentbehoefte van de bekkens (dus in de Waddenzee) wordt omgegaan. Voor de scope van dit rapport is er alleen behoefte aan betere kennis over de netto transporten vanaf de Waddenkust naar de bekkens. Hierom is in het project onderzoek gedaan naar de lange termijn ontwikkeling van die transporten. De resultaten van dat onderzoek worden besproken in Bijlage B.

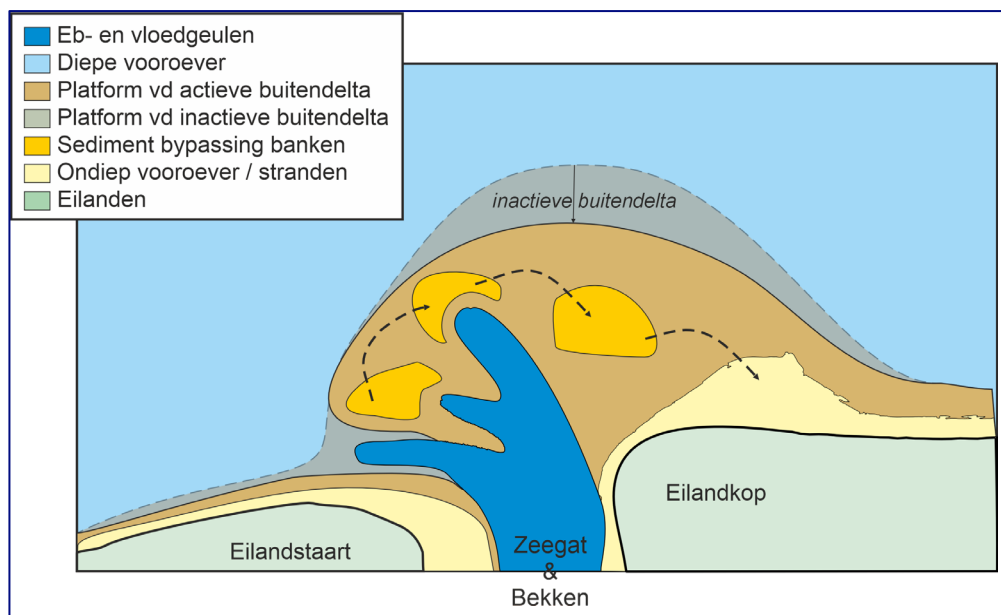
De drie zeegatsystemen van de Westelijke Waddenzee vertonen een sterke samenhang, meer precies de bekkens ervan. De twee zeegatsystemen van de Oostelijke Waddenzee hebben een heel andere karakteristiek, met veel meer intergetijdengebied en zijn veel minder sterk met elkaar verbonden. Ten oosten van Schiermonnikoog ligt het Groninger wad met bijbehorende buitendelta's. Hier is nu geen kustonderhoud en staan natuurlijke processen voorop. Oostwaarts van het Groninger wad ligt het Eems-estuarium. Hier wordt wel sedimentbeheer uitgevoerd (baggeren en storten), maar dit is niet gericht op handhaving van de kustlijn. Bij het Eems-estuarium ligt geen actieve zone en daar is nu (en in komende 15 jaar) ook geen sediment- en/of suppletiebehoefte. Daarom is de bespreking ervan summier.

5.1.2 Denkmodellen

De algemene conceptuele modellen van het gedrag en de opbouw van de zeegatsystemen en eilanden zijn in Taal et al. (2023) gepresenteerd. Deze sectie vat dit samen, in het bijzonder via de figuren die voor deze rapportage werden verbeterd. Daarnaast is er een aanvulling mogelijk vanwege nieuwe kennis over terugtrekkende randen van buitendelta's.

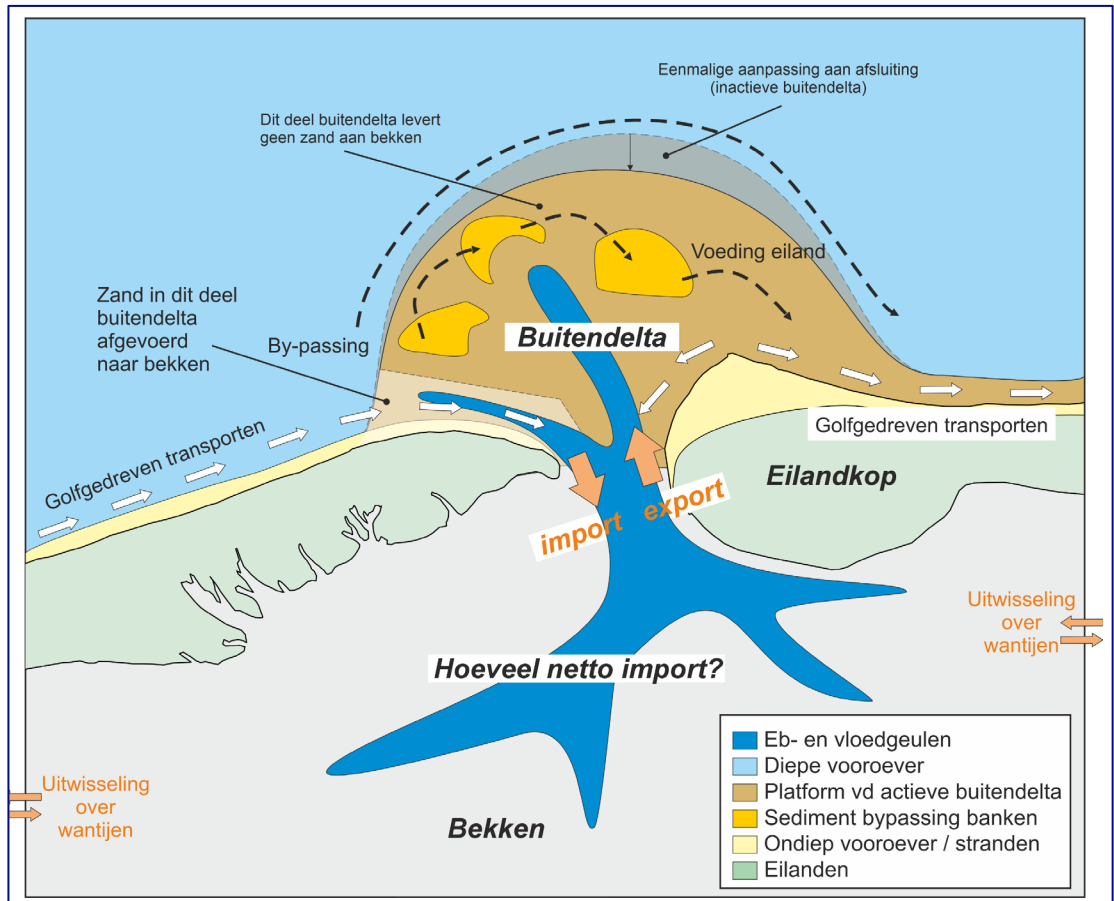
Buitendelta's: onderdelen en dominante processen

Een zeegatsysteem bestaat uit een zeewaarts deel (buitendelta) en een bekken. Figuur 5-2 geeft een overzicht van de morfologische elementen. De buitendelta is in Taal et al. (2023) beschouwd als de 'actieve zone'. Anders dan bij Deltakust is in een buitendelta van de Waddenkust ook op een tijdschaal van ca. 15 jaar veel sedimentuitwisseling tussen de kusten (van de eilandkoppen en -staarten) en de rest van de buitendelta.



Figuur 5-2: Conceptueel model elementen van een buitendelta, waarin ook al is aangegeven dat een deel van de buitendelta als 'inactief' kan worden beschouwd.

Elias et al. (2024) bepaalden de grens tussen diepe vooroever en buitendelta preciezer dan eerder gebeurde. Zij brachten de ontwikkelingen tussen dieptecontouren in beeld en bepaalden daarmee de grens met de diepe vooroever op de contour die het buitendelta-platform goed omsluit. Dit verschilt enigszins per zeegat. De buitendelta omsluit in alle gevallen alle banken en geulen van het zeegat. Zij motiveren ook waarom de aanname gerechtvaardigd is dat de diepe vooroever niet direct (lees: significant) zand uitwisselt met de actieve zone bij een zeegatsysteem.



Figuur 5-3: Dominante processen in een buitendelta onder reguliere condities⁵⁴ en de sedimenthuishouding.

Figuur 5-3 toont de dominante processen in een enkele buitendelta. Alleen de bij de eilandstaart gelegen vloedgeul brengt zand naar het bekken. De rest van de buitendelta levert zand aan het benedenstroomse eiland.

Niet de hele buitendelta is 'actief', er is een terugtrekkende 'rand'

Elias et al. (2024) geven een belangrijke aanvulling op het algemene conceptuele model van het zeegatsysteem. Zij tonen aan dat er een dieper deel is, zeewaarts van een zich terugtrekkende 'rand' van de buitendelta. Het zeewaartse deel wisselt relatief beperkt zand uit met het ondiepere deel. De dieptegrens ligt op ca. -8 meter, maar dit is niet voor ieder zeegat hetzelfde. Het ondiepere deel heeft wel veel uitwisseling met het bekken en de eilandkusten. Elias et al. (2024) stellen dat hier de werkelijke grens van de actieve zone ligt. Deze grens is ook van toepassing op de langere tijdschaal, mede omdat het voor het behoud van de kustlijn via de buitendelta niet logisch is om tegen het natuurlijke proces van het terugtrekken van de buitendelta in te werken'. De terugtrekking is ook geschetst in Figuur 5-2 en Figuur 5-3.

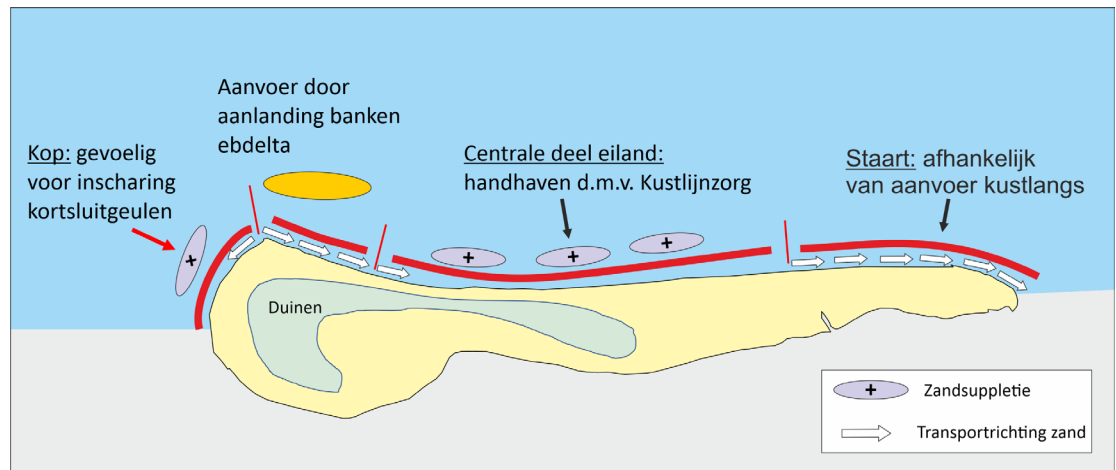
Het terugtrekken van de buitendelta is het duidelijkst in zeegatsystemen waar door menselijk ingrijpen de omvang van het bekken is veranderd. De terugtrekking lijkt gestuurd door de verstoring van het grootschalig evenwicht (zoals afsluitingen, bij Zuiderzee en Lauwerszee), maar kan ook door voortgaande afname van de komberging komen. Voor de Oostelijke Waddenkust heeft Elias et al. (2024) een grens vastgesteld tussen een dieper deel (de rand van de buitendelta, maar nog niet tot de diepe vooroever gerekend) en een ondiep deel, dat

⁵⁴ Bij stormcondities veranderen de dominante processen. Dan zijn golven hoger en langer. Er wordt meer zand opgewoeld en de golfgedreven transporten nemen toe. 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. Wanneer dit optreedt is slecht voorspelbaar.

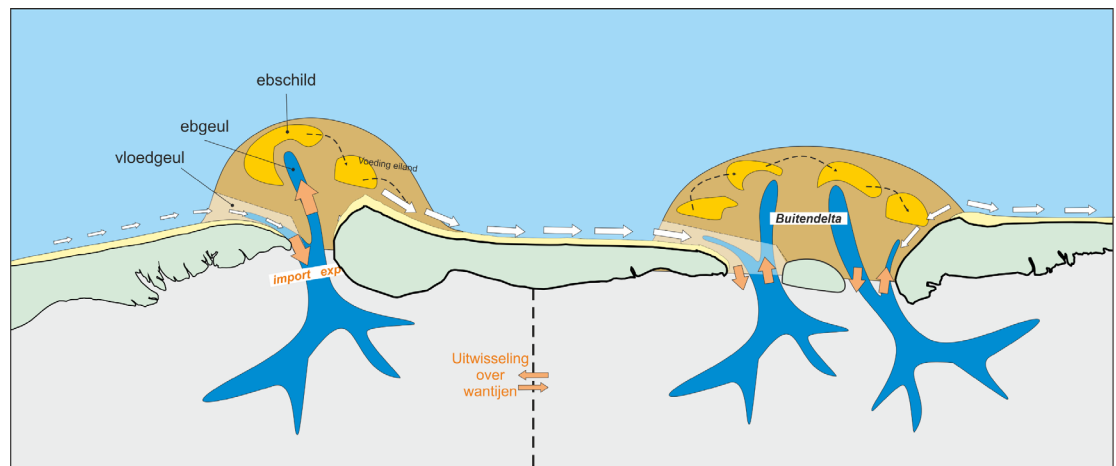
daadwerkelijk de actieve buitendelta vormt. Een contour tussen NAP -8 en -6 m is de begrenzing. Voor de Westelijke Waddenzee bepaalden zij die contour nog niet. Op basis van De Beer et al. (2024) geeft voorliggend rapport voor het Zeegat van het Vlie ook een verbeterde (meer landwaarts liggende) begrenzing van de actieve zone (zie 5.6).

Eilandkust algemeen

Figuur 5-4 toont de principeschets / het overkoepelende model van de sedimenttransporten bij een Waddeneiland. De centrale delen van de eilandkusten zijn in kustdwarse opbouw vooral het resultaat van golfgedreven transport en het model zoals getoond in Figuur 2-6 is daarvoor ook toepasbaar. Waar de eilandkusten verschillen met veel delen van de Hollandse kust is dat de kustlangse gradiënt in het transport kustlangs groot kan zijn (zoals b.v. bij Ameland), wat leidt tot netto erosie en daarmee sedimentbehoefte. Figuur 5-4 toont dat de bovenstroomse (westelijke⁵⁵) zijde van het eiland aanvoer van sediment heeft vanaf de buitendelta. Dit gebeurt in de vorm van periodiek aanlandende banken. 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. Het sediment gaat netto naar de benedenstroomse (veelal oostelijke) zijde. Deze voedt het volgende zeegatsysteem. In de samenvattende Figuur 5-5 is de hele transportstroom van de ene buitendelta naar de volgende te zien, inclusief de rol van de eilanden.



Figuur 5-4: Conceptueel model elementen eilandkust en bijbehorende sedimenthuishouding.⁵⁶



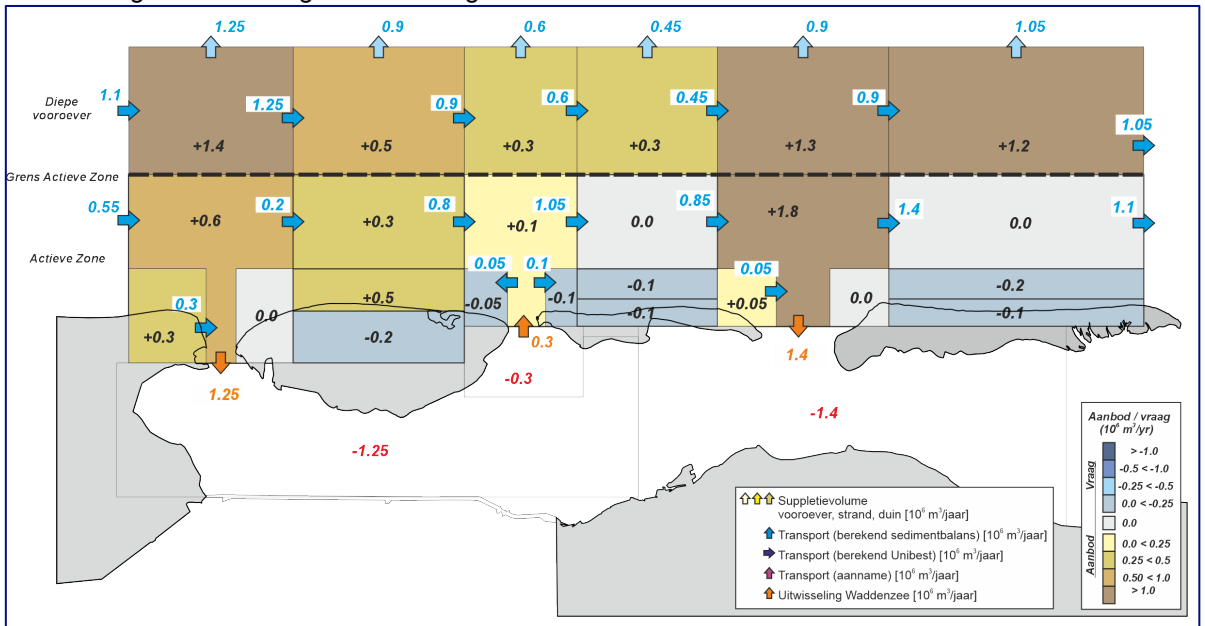
Figuur 5-5: Conceptueel model sedimentstromen bij opeenvolging van buitendelta's en eilanden.

⁵⁵ Vanwege de andere oriëntatie zijn Texel en Vlieland een uitzondering

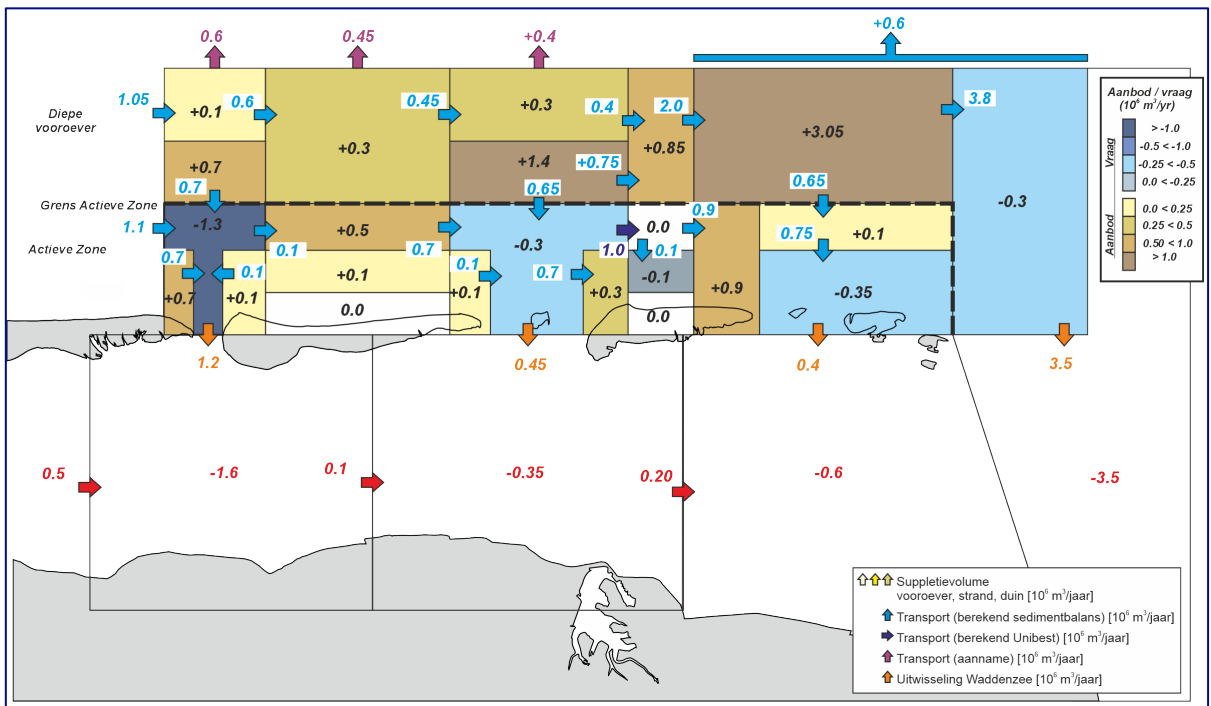
⁵⁶ De figuur laat niet zien dat de ontwikkeling van de eilandstaart ook wordt beïnvloed door de ontwikkelingen van de buitendelta. Dat is in Figuur 5-5 wel te zien

5.1.3 Overzicht resultaten sedimentbalans

Voor het beschrijven van de sedimenthuishouding en het bepalen van de sediment- en suppletiebehoefte wordt veel gebruikt van Elias et al. (2024). De synthesefiguren voor zowel de kustzone bij de Westelijke Waddenzee als die van de Oostelijke Waddenzee zijn daarom overgenomen in Figuur 5-6 en Figuur 5-7.



Figuur 5-6: Synthese van de sedimentbalans voor deelsysteem Westelijke Waddenzee uit Elias et al. (2024). De pijlen geven de richting aan van het gemiddelde jaarlijkse netto transport. De getallen in een vak geven aan of van daar uit sediment is getransporteerd (het is dan een bron van sediment, met een positieve waarde) of dat er toename van volume was (het is dan een 'put' van sediment, met een negatieve waarde).



Figuur 5-7: Synthese van de sedimentbalans voor deelsysteem Oostelijke Waddenzee uit Elias et al. (2024). De pijlen geven de richting aan van het gemiddelde jaarlijkse netto transport. De getallen in een vak geven aan of van daar uit sediment is getransporteerd (het is dan een bron van sediment, met een positieve waarde) of dat er toename van volume was (het is dan een 'put' van sediment, met een negatieve waarde).

5.1.4 Methodiek bepalen sediment- en suppletiebehoefte Waddenkust

In 2.4 is de algemene methode voor het bepalen van sediment- en suppletiebehoefte beschreven. Voor de kustvakken bij een zeegatsysteem zijn er, in vergelijking met andere kustvakken, behalve de kustlangse transporten en eventuele uitwisseling met de diepe vooroever ook netto transporten naar het bekken (zie ook Figuur 5-3 en Figuur 5-5). Dit transport naar het bekken is 'autonoom'. Het is gestuurd door de omvang van de 'put', lees de mogelijkheden voor sediment om netto te accumuleren, in het bekken. Het aanbod van de 'buitenzijde' is nauwelijks sturend. Voor de berekeningen in dit hoofdstuk is de omvang van het netto transport naar de bekkens cf. de schattingen uit Kustgenese 2.0 (Elias en Wang, 2020). De basis van hun berekening zijn de geobserveerde volumeveranderingen per bekken, waarop gecorrigeerd is voor onttrekkingen (bijv. zand- en schelpwinning), bodemdaling en verliezen naar de kwelders.

Voor het **percentage slib** in de volumes gebruikten Elias en Wang (2020) 8%, de ondergrens die Oost (1995) berekende. De bovengrens van Oost (1995) was 37%, maar werd destijds als onrealistisch hoog beoordeeld. Een belangrijk argument hierbij was dat monsters ter bepaling van de korrelgrootte meestal in het zomerseizoen zijn genomen. Het werk van Colina Alonso et al. (2021) geeft aanleiding ook met de bovengrens van 37% slib⁵⁷ te rekenen, gegeven de plausibiliteit ervan en de impact op de berekende totalen. In een sedimentbalans betekent te beperkt corrigeren voor de fractie slib in het berekende sedimenttransport uiteindelijk een overschatting van de *zand*behoefte in de kustzone. Dit kan flink oplopen⁵⁸. Er worden in hoofdstuk 6 daarom twee scenario's besproken, maar dit hoofdstuk 5 gebruikt alleen de waarden met de ondergrens (om aantal varianten en tabellen te beperken).

De onzekerheid ten aanzien van **bodemdaling** is op landelijke schaal klein.⁵⁹ Bovendien worden in dit rapport sedimentbehoefte berekend onder relatieve zeespiegelstijging en natuurlijke bodemdaling is daarin verdisconteerd. Alleen voor de situatie bij de oostpunt van Ameland is het gewenst rekening te houden met het effect van bodemdaling door gaswinning voor zowel het meegroeien van de actieve zone als de invloed op de netto transporten naar het Friesche Zeegat. Merk verder op dat gaswinning onder de Waddenzee de bekkens betreft en dat die extra accommodatieruimte voor sediment onderdeel is van de exporten naar de bekkens.

5.1.5 Bekkens van de Waddenzee en sedimentbehoefte

De morfologische ontwikkelingen van de Waddenzee op de lange termijn beïnvloeden de import van sediment vanuit de kustzone naar de Waddenzee en zo de toekomstige sediment- en suppletiebehoefte van de Waddenkust. Extra aandacht wordt gevraagd voor de invloed van relatieve zeespiegelstijging. Een tweede reden om onderzoek te doen naar de morfologische ontwikkelingen van de Waddenzee op de lange termijn ligt in de belangrijke ecologische waarden ervan, vooral door de aanwezigheid van uitgebreide wadplaten. Beide redenen motiveerden het doen van onderzoek in de afgelopen jaren, in het project Zandige Kust, maar ook in andere kaders. De resultaten zijn uitgebreid besproken in Bijlage B en hieronder puntsgewijs kort samengevat.

⁵⁷ Colina Alonso et al. (2021) suggereert dat wellicht praktisch geen zand netto is geïmporteerd naar het Westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee sinds eind vorige eeuw. Een dergelijk scenario is niet opgenomen in dit rapport, zie verder Bijlage B voor discussie en verklaringen.

⁵⁸ Taal et al. (2023) geeft b.v. aan dat elke 10% slib in het transport door de zeegaten, afhankelijk van de zichtwaarde en het scenario, tussen de 130 en 200 mln. m³ sediment tot 2200 uitmaakt. In een sedimentbalansstudie als Elias et al. (2024) betekent een hoger % slib in de export naar het bekken, en daarmee dus een kleiner zandvolume, uiteindelijk meer verlies naar de diepe vooroever.

⁵⁹ En bij snellere zeespiegelstijging nog veel kleiner omdat de relatieve bijdrage ervan minder wordt.

- De sedimentatiesnelheid in de Waddenzee is afgenomen in de afgelopen decennia. Dit geldt voor alle bekkens, behalve dat van het Zeegat van Ameland. Vooral in de bekkens van de Zeegaten van Texel en Vlie is de verandering groot.
- De importsnelheid van sediment is wel gevoelig voor de zeespiegelstijgingsnelheid, maar volgt deze niet. Een factor 20 snellere stijging geeft bijvoorbeeld een 1,5 tot maximaal 5 keer zo grote omvang van de import, afhankelijk van het bekken. Tot 2100 is deze maximaal een factor 2.
- Vanwege de vertraagde respons op zeespiegelstijging is de huidige sedimentimport een goede indicatie van de sedimentimport voor de komende jaren tot decennia, ondanks de onzekerheid in toekomstige ontwikkeling van de zeespiegelstijging. Op korte termijn (tot 20 jaar) zal de veranderende zeespiegelstijgingsnelheid geen merkbare invloed hebben op de zandsuppletiebehoefte.
- In Wang et al. (2018) is gekeken naar de risico's van verdrinking van de bekkens in de Waddenzee (tot welke snelheid van zeespiegelstijging meegroeien van de bekkens in de Waddenzee aannemelijk is). Er zijn duidelijk verschillen in de balans van vraag naar en aanbod van sediment tussen de oostelijke en westelijke bekkens. De bijdrage van slib was hierin nog niet uitgewerkt.
- Modelsimulaties met sterke zeespiegelstijging geven aan hoe verdrinking kan optreden. Het jaar van volledige verdrinking ligt ver in de toekomst (minimaal 100 jaar), maar het proces start uiteraard eerder. Door toename van de getijslag verloopt verdrinking langzamer dan eerder gedacht werd.

Bij de hiernavolgende secties per zeegatsysteem zal niet opnieuw ingegaan worden op de ontwikkeling van de bekkens. De verwachte ontwikkeling in de komende 15 jaar is (zie hierboven) namelijk dat de huidige sedimentimport een goede indicatie is voor de komende jaren tot decennia. De waarden uit Figuur 5-6 en Figuur 5-7 zijn overgenomen. In 6.3 en 6.5 zijn de marges in netto zandtransport het bekken in, op basis van onzekerheid in het percentage slib (zie 5.1.4) berekend.

Kombergingsrapporten (kennisoverzichten van de bekkens)

Voor alle bekkens van het waddengebied zijn kennisoverzichten beschikbaar (kombergingsrapporten): Vroom et al. (2023), Meijers et al. (2025), Cleveringa en Elias (2022), Cleveringa en Oost (2017), Oost et al (2020) en Elias en Cleveringa (2021). Ze zijn allen te vinden op <https://www.waddenzee.nl/overheid/waddenzeebeheer/kennisprogramma-morfologie/>

5.2 Zeegat van Texel

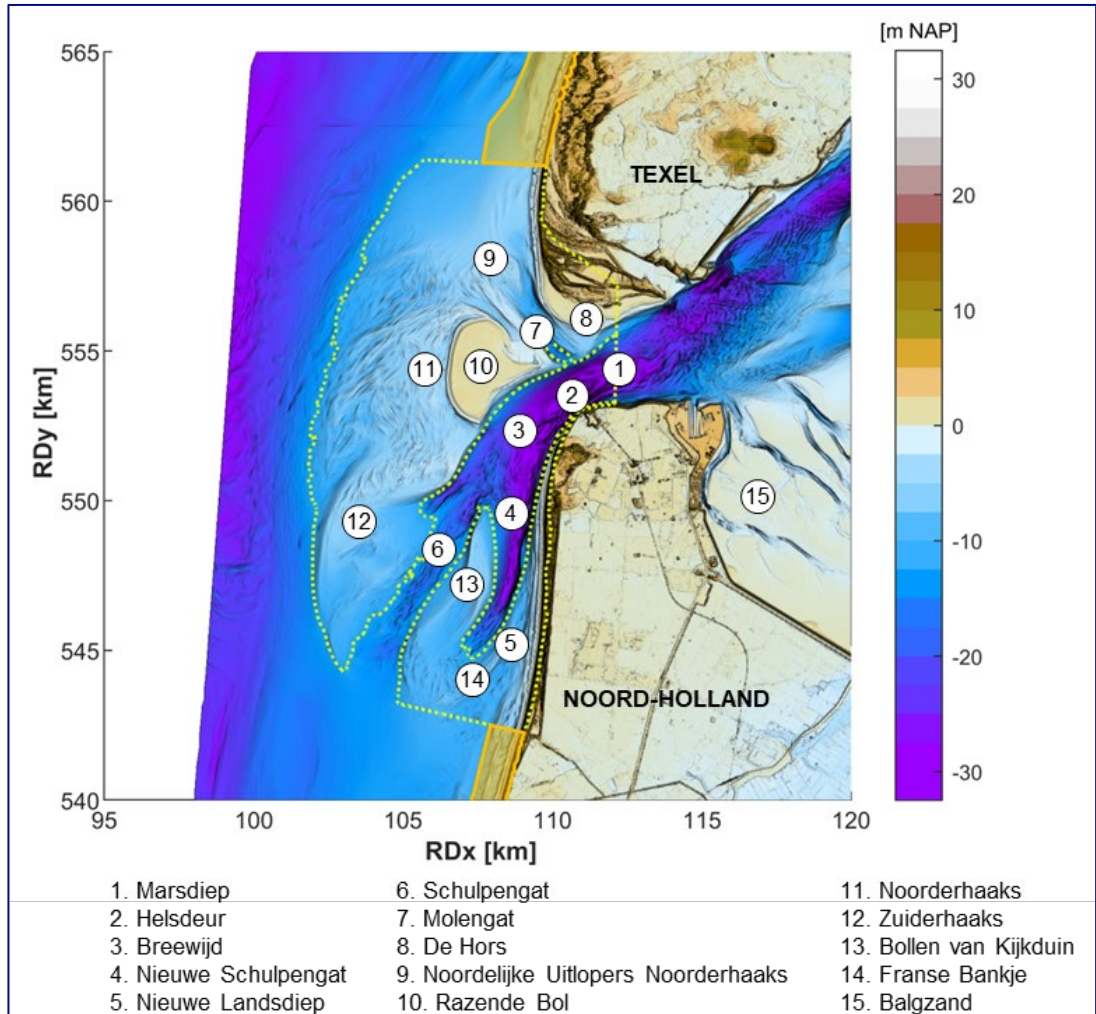
5.2.1 Overzicht en gedrag op schaal hele zeegat

Ten noorden van Groote Keeten, rond raai 1100, begint de buitendelta van het Zeegat van Texel. Dit zeegatsysteem strekt zich ca. 10 km zeewaarts en 25 km kustlangs uit. Er wordt veel gesuppleerd om de kustlijn in stand te houden.

De morfologie van het zeegatsysteem is sterk bepaald door de afsluiting van de Zuiderzee (1925 - 1932). Vóór die afsluiting was de Westelijke Waddenzee veel groter en omvatte ook de gehele Zuiderzee, met een totale oppervlakte van rond de 4000 km² en een lengte van 130 km. Na afsluiting reduceerde dit tot ongeveer 712 km² en een lengte van 30 km. Dit leidde tot grote veranderingen in de getijkarakteristieken en tot grote sedimentatie in het bekken. Een tweede menselijke ingreep, langer geleden, die de configuratie van het Zeegat van Texel sterk bepaalde is de vastlegging van de zuidelijke oever van de keel met de Helderse Zeewering.

Figuur 5-8 laat de huidige bodemligging van de buitendelta zien. De Noorderhaaks is het middelpunt. De oostzijde ervan bevindt zich tijdens normale omstandigheden boven water en

wordt Razende Bol genoemd. Aan de noordkant bevindt zich een langgerekte zandrug: de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN).



Figuur 5-8: Overzicht en genoemde morfologische elementen van het Zeegat van Texel, gebaseerd op de meest recente Vaklodgingen en AHN4. De gele vlakken zijn de actieve zones van de centrale eilandkusten. De gele stippellijn omsluit de actieve zone van het zeegat (actieve buitendelta plus eilandkoppen).

De keel van het zeegat, met het Marsdiep, heeft een minimale breedte van 2,5 km. De Helderse Zeewering en de bijbehorende steenbestortingen stabiliseren de zuidelijke oever. Daar zijn grote stroomsnelheden en zijn lokaal dieptes tot ~50 m uitgeschuurd (de Helsdeur genoemd). Het Marsdiep loopt zeewaarts via het Breewijd naar de hoofdgeulen op de buitendelta: Schulpengat en Nieuwe Schulpengat. Sinds de afsluiting van de Zuiderzee hebben deze geulen een zuidwaartse draaiing ondergaan en gelijktijdig daarmee is de Noorderhaaks langzaam naar de kust toe bewogen en noordwaarts verlengd. In dit deel van het zeegat, langs de kust van Noord-Holland, overheerst een transport richting het bekken.

Aan de noordzijde, tussen de Noorderhaaks en de kust van Texel bevindt zich een derde geul: het Molengat. Deze geul speelt een grote rol in de erosie van het zuidelijk deel van Texel. Ze voert in kustlangse richting sediment efficiënt af, inclusief hetgeen dat vanaf de Noorderhaaks komt. Dit gaat richting de NUN of Marsdiep, maar niet naar de kust. De Hors, de zuidelijke punt van Texel, was samen met het Molengat en Noorderhaaks lange tijd een stabiel systeem, maar dit evenwicht is sinds ca. 2006 verstoord, zie 5.2.4 en 5.2.2.

De deelgebieden in het Zeegat van Texel zijn:

1. de 'actieve buitendelta', besproken in 5.2.2;
2. de kop van Noord-Holland, van Groote Keeten tot Den Helder, besproken in 5.2.3;
3. Texel-Zuid, besproken in 5.2.4;
4. het bekken, niet apart besproken.

5.2.2 Actieve Buitendelta: begrenzing, gedrag en sedimentbalans

Begrenzing

De grens tussen diepe vooroever en actieve buitendelta wordt op basis van de analyses van Elias et al. (2024) gelegd op de contour van -12 meter NAP. Deze geeft een goede afbakening van de bankengebieden ten noorden (Noorderhaaks en Zuiderhaaks) en ten zuiden (Fransche Bankje en Bollen van Kijkduin) van de geulen. De bankengebieden en geulen vormen samen de actieve buitendelta. Om de actieve zone te begrenzen worden de kusten van Noord-Holland en Texel-Zuid erbij genomen. De NAP -6 m contour is bruikbaar als zeewaartse grens van de actieve zone omdat dit de diepst gelegen contour is waarvoor in alle jaren een scheiding tussen de Noorderhaaks en de kust van Texel te maken is.

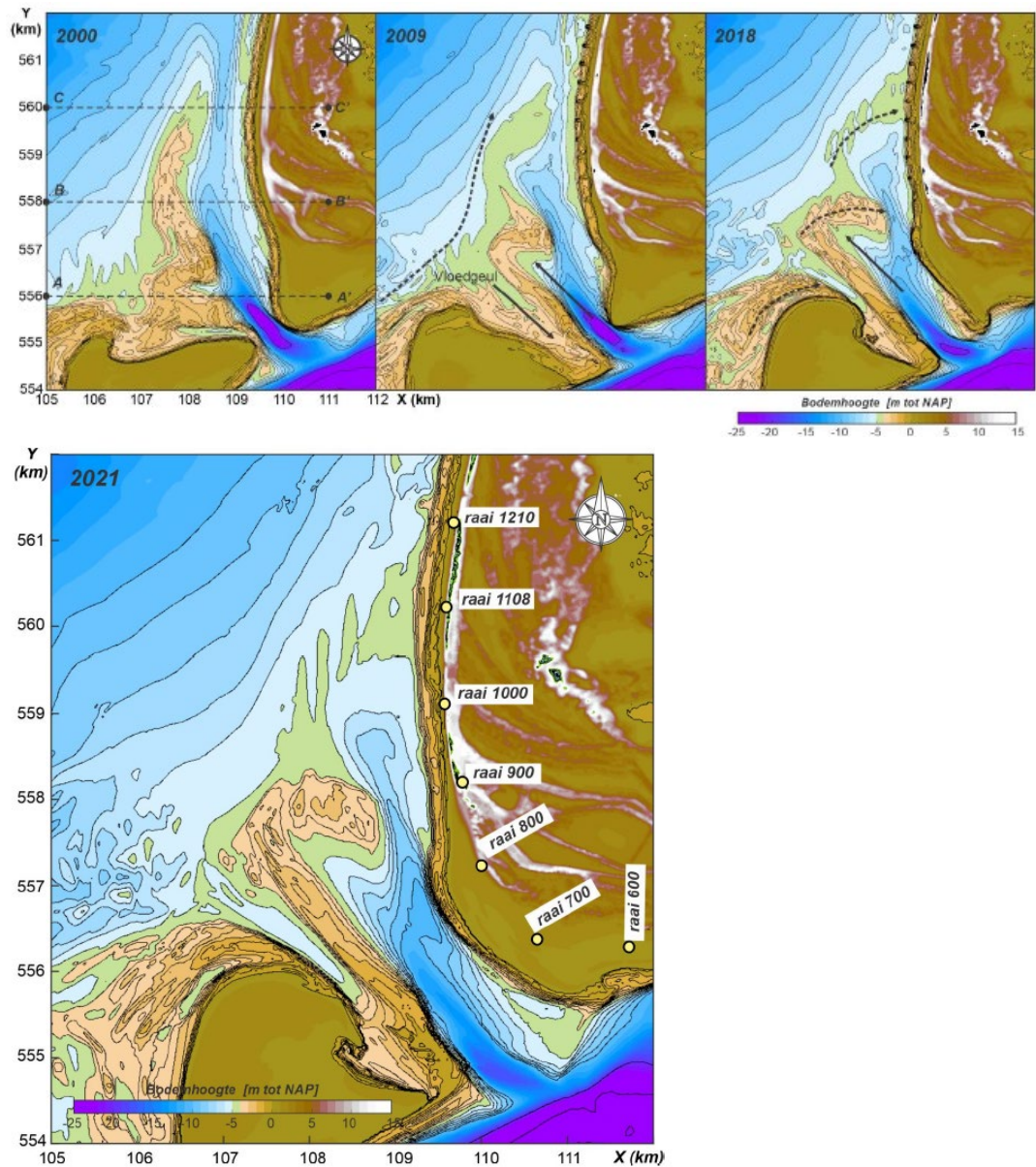
De diepe vooroever, zeewaarts van de actieve buitendelta, verliest langs heel Nederland, maar vooral langs dit deel van de kust, structureel volume (Van der Spek, 2025). De beste hypothese waarom dit plaatsvindt is de combinatie van sterke piek- en residuele stromingen langs het westelijk deel van de Waddenkusten en de verandering in oriëntatie van de kust (Van der Spek, 2025).

Morfologische ontwikkeling

De zuidzijde van de buitendelta, met de geulen Schulpengat en Nieuwe Schulpengat en de banken die erdoor doorsneden worden (Fransche Bankje en Zuiderhaaks), vertoont relatief weinig verandering.

Het centrale en noordelijk deel van de buitendelta vertoont meer veranderingen, met effecten op Texel-Zuid als in 5.2.4 worden omschreven. De westzijde van de Noorderhaaks erodeert en vervormt. Met de landwaartse verplaatsing van die westzijde bouwden de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN) zich uit. Deze uitlopers zijn rond 2018 verheeld met de kustlijn van Texel (Elias, 2021), tussen raai 1000 en 1210, zie Figuur 5-9. Deze verheeling vond niet plaats als een grote bankaanlanding (zoals bijvoorbeeld de Bornrif Strandhaak bij Ameland), maar juist onderwater, op een diepte van NAP -5 m. Sediment vanaf de NUN zorgt dus voor verondieping van de vooroever, maar is nu niet toereikend om de erosie van het ondiepe kustprofiel (boven de NAP -5 m) te compenseren. In de nabije toekomst zou dit wel kunnen gebeuren, maar dit is onzeker. Tot dan blijven de suppleties, vooral vanaf raai 900, merendeels⁶⁰ op het strand uitgevoerd, noodzakelijk. Voor het volgende kustvak, de centrale eilandkust (zie 5.3), heeft zo'n aanlanding waarschijnlijk weinig effect, omdat de gradiënten in langstransport door golven daar niet worden beïnvloed. Daar blijven suppleties sowieso noodzakelijk. Dat kan via de huidige suppletiestrategie met strandsuppleties. Elias (2021) geeft het uitvoeren van een systeemsuppletie in de vorm van een zandmotor ook als mogelijkheid.

⁶⁰ Er zijn ook twee vooroeversuppleties uitgevoerd op de geulwand van het Molengat. Elias (2021) concludeert dat deze suppleties zich niet ontwikkelen tot banken. Er waren van nature geen brekerbanken en te zien is dat die suppleties zijn opgenomen in het platform (liggend rond de -5 m) dat ontstond na de aanlanding van de NUN



Figuur 5-9: Visualisatie van de aanlanding van de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (uit: Elias, 2021).

Sedimentbalans

De actieve buitendelta (dus inclusief de daarin liggende geulen) neemt in sedimentvolume af. De trend die Elias et al. (2024) berekent voor de periode na 2003 is 0,6 miljoen m³/jr. dat is overigens een stuk minder negatief dan ervoor. Zijn analyses tonen dat enerzijds de hogere delen (boven -6 meter, Razende Bol) van Noorderhaaks en Zuiderhaaks in volume toenemen en dat de diepere zone tussen de NAP -6 en -8 m tegelijk ongeveer evenveel in volume afneemt. Het lijkt daarmee waarschijnlijk dat deze zones actief sediment uitwisselen.

De diepe vooroever (tussen de NAP -20 tot -12) verliest 1,4 miljoen m³/jr., wat overeenkomt met een significante verdieping die varieert van 22 mm/jr. (in de zone -20 tot -14) tot 31 mm/jr. (in de zone van -14 tot -12 meter diepte). De geulen zijn gemiddeld in dezelfde ordegrrootte, 22 mm/jr., dieper geworden.

Zowel de kustzones (boven -6 meter) van Noord-Holland als die van Texel vertonen (mede onder invloed van suppleties uiteraard) een toename in volume.

5.2.3 Groote Keeten tot Den Helder

De ontwikkelingen van dit deel van de kust zijn zeer uitgebreid geanalyseerd in Elias en Quataert (2024). Zij maken onderscheid tussen een noordelijk en zuidelijk deel. Van raai 20 tot raai 628 ligt een diepe geul direct in de vooroever. Tot raai 308 is dit de geul Breewijd en tussen raai 308 en 628 gaat het om het Nieuwe Schulpengat. Ten zuiden van raai 628 buigt het Nieuwe Schulpengat zeewaarts en is het Fransche Bankje aanwezig. Het gebied tussen het Fransche Bankje en de kust wordt aangeduid met Nieuwe Landsdiep. De overgang naar het deelsysteem Hollandse kust ligt ca. bij raai 1100.

Tot 2007 kent dit kustvak (ondanks suppleties) nog een volumeafname (-0,15 miljoen m³/jr.), geheel in het diepere deel. Hierbij speelt het opdringen van de geul Nieuwe Schulpengat een belangrijke rol. Hierdoor wordt de kustzone, het kleine platform dat zich tussen de geul en de kust bevindt, steeds smaller. Elias et al. (2024) berekenen op basis van de Vaklodingen een trend met toenemend volume (0,4 miljoen m³/jr.) bij netto erosie (omdat er 0,8 miljoen m³/jr. gemiddeld aan suppleties was).

5.2.4 Texel-Zuid

Dit gedeelte van Texel omvat De Hors (een grote zandplaat op de zuidelijke punt) en de aansluitende kust tot ca. raai 1200. Iets ten noorden daarvan ligt het zogenaamde divergentiepunt. Ten noorden van strandpaal 14 is er namelijk brandingstransport naar het noorden en ten zuiden van strandpaal 13 is er brandingstransport naar het zuiden.⁶¹

Voor dit deel van Texel zijn de ontwikkelingen tussen het Molengat en de Noorderhaaks, als in 5.2.2 beschreven, zeer sturend. Na de vorming van een nieuwe vloedgeul (Figuur 5-9, situatie 2009) verdiepte het Molengat duidelijk met een verflauwing van de geulwand ter plaatse van De Hors⁶². Hierdoor is vooral de zuidwestzijde van De Hors aan erosie onderhevig, terwijl de noordwestzijde aangroeit. Daarnaast is voor de afname van de strandvlakte de uitbreiding van de duinen een belangrijke factor.

De toekomst van De Hors hangt samen met het evenwicht dat zich uiteindelijk tussen Molengat en Noorderhaaks zal instellen. Een nieuwe evenwichtssituatie waarin het mechanisme van sediment-bypassing hersteld is, met plaataanlandingen, lijkt zich op korte termijn zeker niet te vormen. Het is waarschijnlijk dat de huidige ontwikkelingen van De Hors zich gaan doorzetten. De suppleties ten noorden verspreiden zich door de getijstroming ook richting De Hors, wat sedimentaanbod betekent en een bijdrage aan stabilisatie.

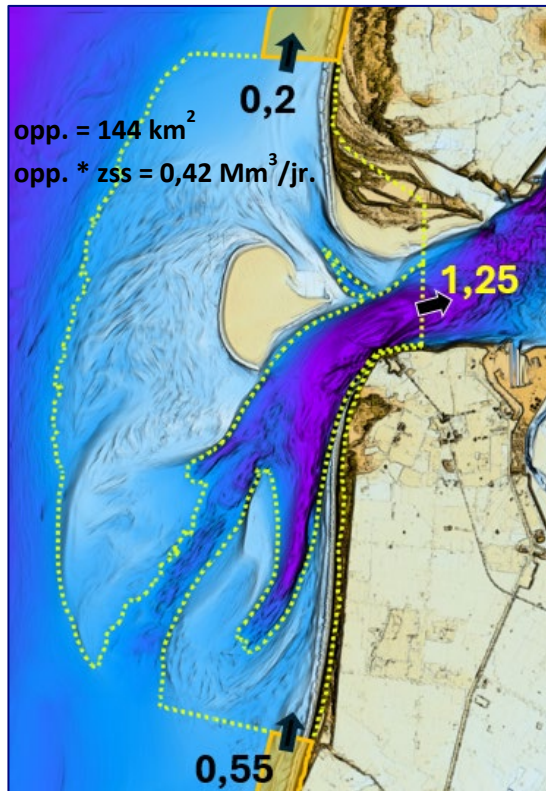
Texel-Zuid vertoont een toename in sedimentvolume die vrijwel gelijk is aan de daar uitgevoerde suppleties (0,3 miljoen m³/jr.).

5.2.5 Sediment- en suppletiebehoefte van het Zeegatsysteem excl. bekken

De behoefte wordt, cf. de aanpak die in 2.4 uiteen is gezet, hieronder gepresenteerd. Figuur 5-10 geeft het overzicht incl. de ligging van de actieve zone.

⁶¹ De keuze om de grens bij km 12 te leggen en niet iets noordelijker is ingegeven door het kunnen toewijzen van suppleties aan zeegat of de centrale eilandkust. Het divergentiepunt ligt bij de maximale kromming van de kustlijn, waar maximale erosie optreedt en dus veel suppleties nodig zijn. Deze worden bij de centrale eilandkust gedacht.

⁶² Dit is een trendbreuk met de eerdere ontwikkeling waarbij het Molengat juist dieper en smaller werd door landwaartse verplaatsing van de NUN.



Figuur 5-10: Transporten in en uit de actieve zones bij het Zeegat van Texel, als gebruikt in Tabel 5-1. De getallen zijn cf. Elias et al. (2024) en Figuur 5-6.

Behoefte in de komende 15 jaar volgens rekenregel met actieve zone

Tabel 5-1: Behoefte Zeegat van Texel komende 15 jaar volgens denkmodel rekenregel met actieve zone. De getallen zijn in km² of miljoen m³/jr. Oppervlakte is cf. Taal et al. (2023). Transporten zijn cf. Elias et al. (2024).

Naam	opp. actieve zone	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoefte
Kop Noord-Holland	144	0,42	0,55	1,45	1,32
Texel-Zuid					
Rest actieve buitendelta					
TOTAAL	144	0,42	0,55	1,45	1,32

Opmerkingen / Toelichting bij bovenstaande tabel:

De actieve zone bestaat zowel uit de kusten (aanliggende eilandkop en -staart) als de actieve buitendelta. In Taal et al. (2023) is daarvoor één gezamenlijke waarde vastgesteld. Hiervoor zijn nog geen betere waarden beschikbaar.

Historische suppletievolumes

Tabel 5-2: Historische suppletievolumes Zeegat van Texel, als indicatie voor behoefte in de komende 15 jaar, in miljoen m³/jr.

Naam	Periode start	Periode eind	Historisch suppletievolume
Kop Noord-Holland	1990	2023	0,71
Texel-Zuid	1990	2024	0,25
TOTAAL			0,96

Advies behoefte per jaar tot ca. 2040

Het is niet goed mogelijk te bepalen welke van de getallen het best bij de daadwerkelijke behoefte aan suppleties voor dit deel van de kust zal horen, zeker op langere termijn. Uitgaand van een actieve buitendelta van deze omvang (gerechtvaardigd op basis van de

vigerende inzichten) en dat alle onderdelen ervan het sediment volledig delen, is het advies uit te gaan van 1,32 miljoen m³/jr.⁶³

Behoeftelange termijn, bij snellere zeespiegelstijging

In Tabel 5-1 is voor de oppervlakte van de actieve zone dezelfde waarde gebruikt als in Taal et al. (2023). Aanpassen / verbeteren van die inschatting blijkt nu nog niet mogelijk. Hetzelfde geldt ten aanzien van de onzekerheid over de transporten van de actieve zone naar het bekken, hoewel uit Bijlage B blijkt dat er vooruitgang is gemaakt in het begrijpen van de ontwikkeling daarvan op lange termijn. In de secties 6.3 en 6.5 staan wel berekeningen voor de behoefte aan zand voor suppleties in de komende 15 jaar als de netto transporten naar de bekkens voor een hoger percentage (37%) uit slib bestaan. Voor de langere termijn, bij zichtwaarden van zeespiegelstijging, is dat nog niet gedaan.

5.3 Centrale eilandkust Texel

5.3.1 Centrale eilandkust Texel: begrenzing, gedrag en sedimentbalans

Begrenzing

Ten noorden van de buitendelta (hier vanaf ca. raai 1200 gerekend) bevindt zich de centrale eilandkust van Texel. In 5.2.4 is uitgelegd dat er een divergentiepunt is en dat de grens tussen het kustvak van het zeegat en de centrale eilandkust juist ten zuiden daarvan ligt. In dit rapport wordt de Eierlandse dam (aangelegd om de erosie van Eierland tegen te gaan, zie ook 5.4.2) als noordgrens aangehouden.⁶⁴

De centrale eilandkust wordt gedomineerd door een enkele brekerbank en kent structurele erosie. Om de erosie tegen te gaan zijn tussen 1959 en 1987 strandhoofden aangelegd aan de zuidwestkust en wordt al sinds 1979 regelmatig gesuppleerd.

Morfologische ontwikkeling

Het gebied tussen De Slufter en het aanzandingsgebied van de Eierlandse Dam (raai 2600 - 2900) wordt gekarakteriseerd door de aanwezigheid van over het algemeen twee banken. Het gebied tussen de raaien 2900 en 3041 wordt in toenemende mate gedomineerd door het invangen van zand door de Eierlandse Dam.

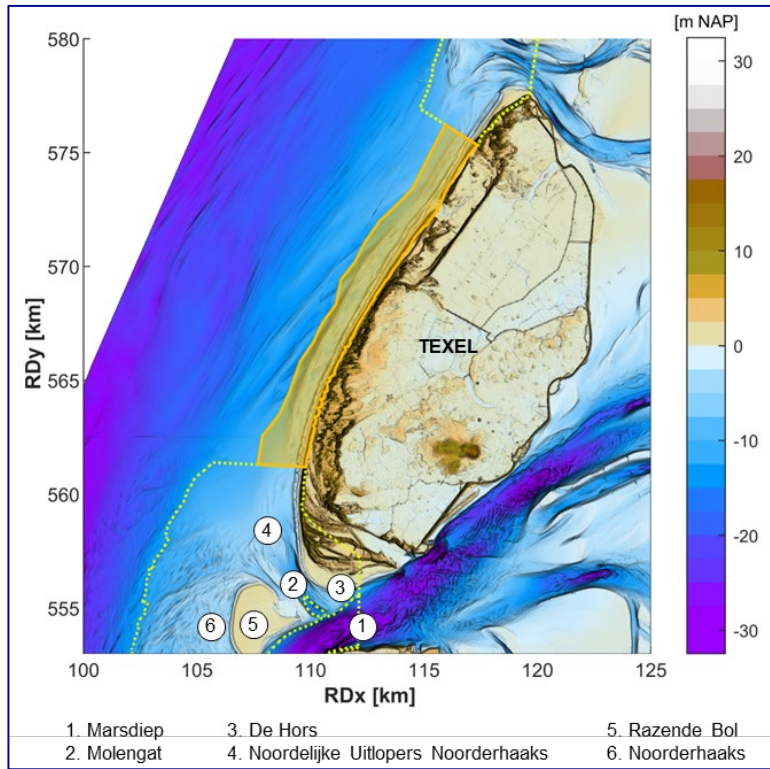
Sedimentbalans

Over een langere periode, bekeken vanaf 1986, is er een overheersende eroderende trend, vooral op de diepe vooroever. Als naar de recente en meest representatieve trends wordt gekeken is het beeld anders. Het sedimentvolume van het kustvak is bijna stabiel, met een duidelijke tweedeling. De diepe vooroever kent nog altijd een afname (-0,5 miljoen m³/jr.), terwijl de actieve zone met 0,55 miljoen m³/jr. in volume toeneemt. Uiteraard met de opmerking dat er ook veel is gesuppleerd (1,3 miljoen m³/jr.).⁶⁵

⁶³ Hier moet bij aangetekend worden dat de beschikbaarheid van geschikte locaties voor suppleties (in het bijzonder deze die niet direct volgen uit overschrijdingen van de BKL) mede zal bepalen of dit ingevuld kan gaan worden.

⁶⁴ Vaak wordt (b.v. Elias et al, 2024) de grens rond raai 2760 (juist noord van de Slufter) gekozen. Dat is een belangrijke onderbreking in de kustlijn waar ook niet wordt gesuppleerd. Voor de vertaling van historische suppletievolumes naar de nabije toekomst is de Eierlandse dam echter logischer.

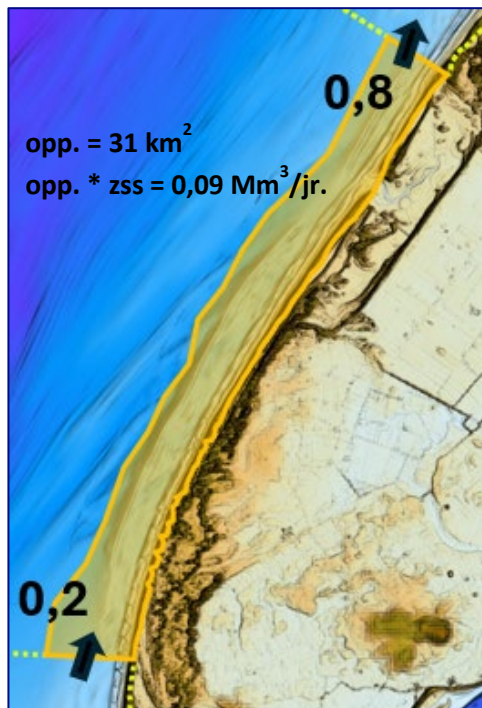
⁶⁵ Dit is het gemiddelde historische suppletievolume, sinds 1990, zoals gebruikt in dit rapport. Elias et al. (2024) komt door het kiezen van een ander tijdvak op 1,1 miljoen m³/jr.



Figuur 5-11: Overzicht, genoemde morfologische elementen bij de centrale eilandkust van Texel, gebaseerd op de meest recente Vaklodingen en AHN4. Het gele vlak is de actieve zone van de centrale eilandkust. De gele stippellijnen omsluiten de actieve zones van de zeegaten.

5.3.2 Sediment- en suppletiebehoefte Centrale eilandkust Texel

De behoefte wordt, cf. de aanpak die in 2.4 uiteen is gezet, hieronder gepresenteerd. Figuur 5-12 geeft het overzicht incl. de ligging van de actieve zone.



Figuur 5-12: Transporten in en uit de actieve zones bij de centrale eilandkust van Texel, als gebruikt in Tabel 5-3. De getallen zijn cf. Elias et al. (2024) en Figuur 5-6.

Behoeftte in de komende 15 jaar volgens rekenregel met actieve zone

Tabel 5-3: Behoeftte centrale eilandkust Texel komende 15 jaar volgens denkmodel rekenregel met actieve zone. Getallen zijn in km² of miljoen m³/jr. Oppervlakten zijn cf. Taal et al. (2023), inclusief de erin genomen onzekerheidsmarge. De transporten zijn cf. Elias et al. (2024).

Naam	opp. actieve zone	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoeftte
Centrale kust Texel	31	0,09	0,2	0,8	0,69

Historische suppletievolumes

Tabel 5-4: Historische suppletievolumes centrale eilandkust Texel, als indicatie voor behoeftte in de komende 15 jaar, in miljoen m³/jr.

Naam	Periode start	Periode eind	Historisch suppletievolume
Centrale kust Texel	1990	2024	1,26

De historische suppletievolumes van de 'centrale eilandkust Texel' zijn in Tabel 5-4 gegeven voor de kust tussen raaien 1190 tot 3061 (Eierlandse Dam)⁶⁶.

Advies behoeftte per jaar tot ca. 2040

Het is niet goed mogelijk te bepalen welk van de getallen het best bij de daadwerkelijke behoeftte aan suppleties voor dit deel van de kust zal horen. De ontwikkeling als gevolg van de aanlanding van de NUN zal er zeker invloed op hebben. In lijn met wat bij andere 'rechte' delen van de kust is gedaan, met lokaal extra behoeftte aan suppleties als gevolg van de keuze voor de ligging van de Basiskustlijn, **lijkt het verstandig uit te gaan van de historische suppletievolumes, dus 1,26 miljoen m³/jr.** Merk op dat dit voor de hele kust is, tot aan de Eierlandse Dam.

Behoeftte lange termijn, bij snellere zeespiegelstijging

De resultaten uit Taal et al. (2023) gelden nog steeds. Er kunnen geen betere schattingen van de oppervlakte actieve zone en/of de transporten uit de actieve zone gegeven worden.

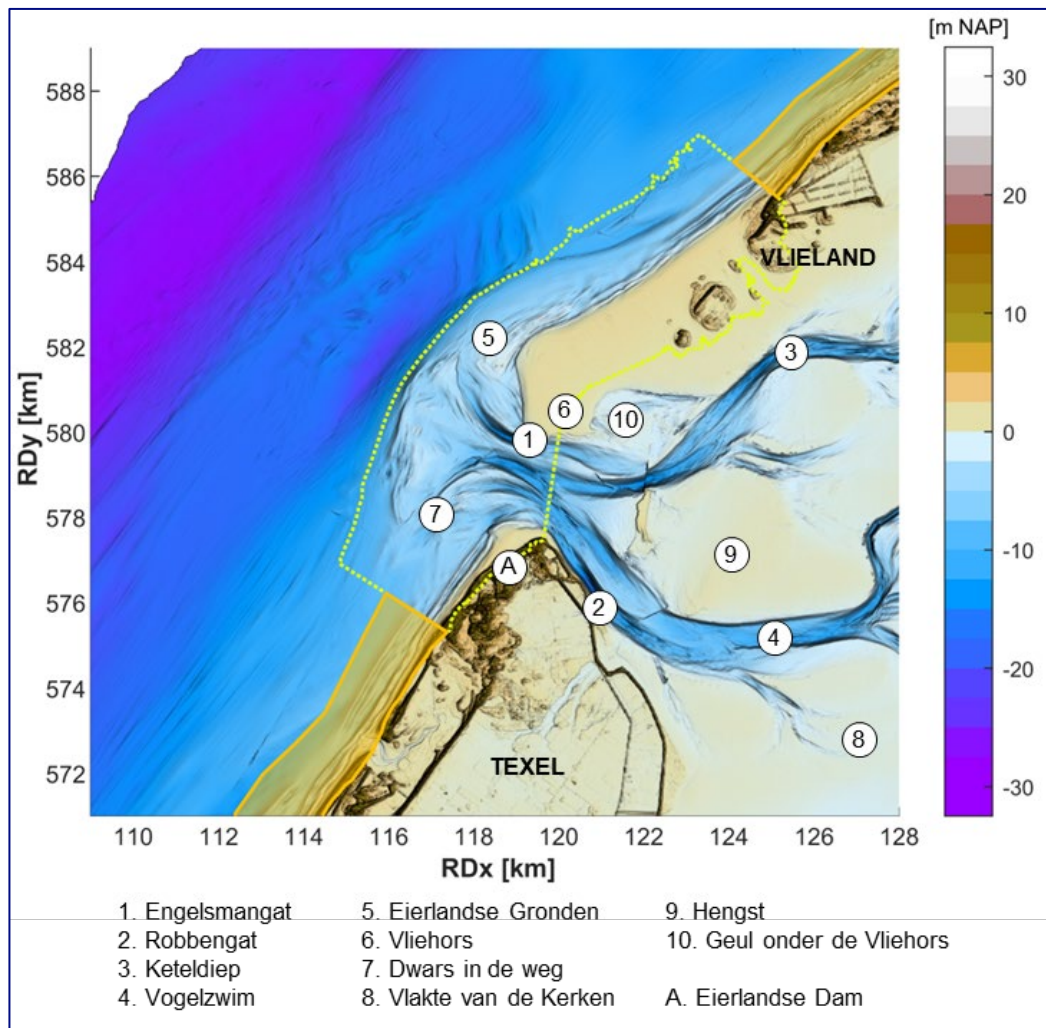
5.4 Eierlandse gat

5.4.1 Overzicht en gedrag op schaal hele zeegat

De buitendelta van het Eierlandse Gat heeft een omvang van ongeveer 4,5 km in zeewaartse richting en 9 km in langsrichting. Het bekken heeft twee hoofdgeulen die via de keel van het zeegat verbinding maken met de buitendelta.

De noordelijke geul op de buitendelta, het Engelsmangot, ligt langs de zuidzijde van de Vliehors. Deze geul en de bijbehorende banken kennen een periodieke ontwikkeling. De geul roteert van een westelijke naar een noordwestelijke uitstroomrichting en er wordt een grote aanlandingsbank gevormd die verheelt met de Vliehors (Elias, 2023). De zuidelijke geul is het Robbengat en ligt dicht langs de noordoostkust van Texel. Daar ligt de Eierlandse Dam, 800 m lang, aangelegd in 1995. De Eierlandse dam zorgde voor de vorming van een breed strand aan de noordwestpunt van Texel. De dam verstoorde ook tijdelijk het aanlandingsproces. Gedurende 20 jaar vormde zich geen nieuwe aanlandingsbank meer. Zo'n aanlandingsbank is in de meest recente laatste bodemligging terug te zien, wat aantoont dat de natuurlijke dynamiek zich heeft hersteld.

⁶⁶ Dit voorkomt discussie over aan welk kustvak suppleties toe te wijzen en welk tijdvak te gebruiken (situaties voor en na de aanleg van de Eierlandse Dam zijn anders, het transport kustlangs bij de dam wordt gehinderd). Als alle suppleties over 34 jaar gemiddeld worden (1990 - 2024) is hiervan 0,96 miljoen m³/jr. ten zuiden en 0,30 miljoen m³/jr. ten noorden van De Sluffer.



Figuur 5-13: Overzicht en genoemde morfologische elementen van het Eierlandse Gat, gebaseerd op de meest recente Vaklodgingen en AHN4. De gele vlakken zijn de actieve zones van de centrale eilandkusten. De gele stippellijn omsluit de actieve zone van het zeegat (actieve buitendelta plus eilandkop- en staart).

Elias (2023) concludeert, op basis van het morfologische gedrag van de buitendelta en de configuratie van de geulen in het bekken, dat de morfologische processen op deze buitendelta niet sterk beïnvloed worden door afsluiting van de Zuiderzee (in 1932).

De deelgebieden in het Eierlandse Gat zijn:

1. de 'actieve buitendelta', besproken in 5.4.2
2. Het deel van Texel ten noorden van de Eierlandse dam, besproken in 5.4.3
3. Vlielandstaart / Vliehors, besproken in 5.4.4.
4. het bekken, niet apart besproken.

5.4.2 Actieve Buitendelta: begrenzing, gedrag en sedimentbalans

De zeewaartse grens van de actieve buitendelta wordt door Elias et al. (2024) op NAP -10 m gelegd, waarmee het geheel de sedimentatiegebieden omsluit. Hiermee komt hij tot een oppervlakte van 38 km².⁶⁷ Deze buitendelta wijkt af van de andere langs de Waddenkust

⁶⁷ Op basis van de morfologische ontwikkeling is dit vrij diep. Het deel dat zou meedoen als er gesuppleerd wordt zou eerder door de -6 meter contour zijn omsloten. Dit is verder niet als variant uitgewerkt, aangezien het verschil in oppervlakte niet groot is en het niet aannemelijk is dat het de komende 15 jaar nodig is bij het Eierlandse Gat te suppleren. Het is voor de lange termijn een alternatieve keuze (maar effect valt dan nog binnen de onzekerheden).

omdat deze sediment ontvangt vanuit het bekken (0,3 miljoen m³/jr., Elias en Wang, 2020). De representatieve, recente, bodemtrend is netto afnemend (0,1 miljoen m³/jr.), terwijl de aanliggende eilandkop en staart elk met 0,1 miljoen m³/jr. aan volume toenemen. Dat betekent een sedimenttoename in de actieve zone van ook weer 0,1 miljoen m³/jr.

5.4.3 Texel ten noorden van Eierlandse dam

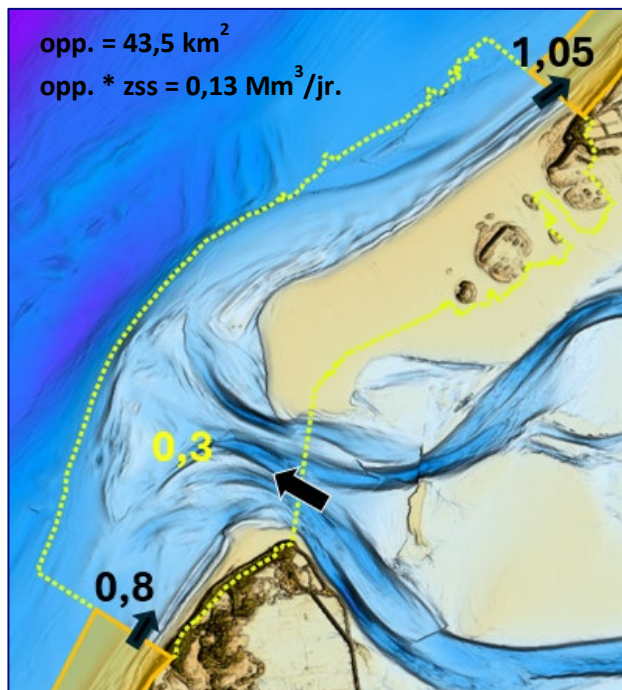
In het zuidelijke deel van de buitendelta van het Eierlandse Gat is de kust stabiel. Dit is dankzij de aanleg van de Eierlandse Dam (1995), maar ook door de eerder uitgevoerde bolwerken Eierland (1948) en Robbengat (1956), evenals door de strekdammen bij die bolwerken. Bij die bolwerken heeft de geul een maximale diepte van ongeveer 15 m. Het gebied ten noorden van de Eierlandse Dam (tussen raai 3061-3200) reageert in grote lijn hetzelfde als het gebied ten zuiden van de dam. Sinds aanleg is er een aanzandingsgebied en blijven de kustlijnen stabiel. Er is geen duidelijk grootschalig effect van de aanleg van de Eierlandse Dam te zien op de geul (Quataert et al., 2020).⁶⁸

5.4.4 Vlieland-staart/Vliehors

Kusterosie speelt geen rol aan de west-/zuidzijde van Vlieland. Op de strandvlakte (Vliehors) landen regelmatig banken aan. Omdat dit periodiek gebeurt zijn er grote fluctuaties in sedimentvolume. Elias et al. (2024) komt tot een toenemende trend van 0,1 tot 0,2 miljoen m³/jr. Een deel van het aangelande sediment wordt langs het eiland in noordelijke richting afgevoerd en draagt daar bij aan de instandhouding van de kust van Vlieland en de ontwikkeling van het Zeegat van het Vlie (Elias, 2023). Er is hier niet gesuppleerd.

5.4.5 Sediment- en suppletiebehoefte van het Zeegatsysteem

De behoefte wordt, cf. de aanpak die in 2.4 uiteen is gezet, hieronder gepresenteerd. Figuur 5-14 geeft het overzicht incl. de ligging van de actieve zone.



Figuur 5-14: Transporten in en uit de actieve zones bij het Eierlandse Gat, als gebruikt in Tabel 5-5. De getallen zijn cf. Elias et al. (2024) en Figuur 5-6.

⁶⁸ Dat komt mede omdat de geul na de aanleg “verlegd” is naar de kop van de dam via ‘morfologisch baggeren’.

Behoeftte in de komende 15 jaar volgens rekenregel met actieve zone

Tabel 5-5: Behoeftte Eierlandse Gat komende 15 jaar volgens denkmudel rekenregel met actieve zone. De getallen zijn in km² of miljoen m³/jr. Oppervlakte is cf. Taal et al. (2023). Transporten zijn cf. Elias et al. (2024).

Naam	opp. actieve zone	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoeftte
Texel-Eierland	43,5	0,13	1,1	1,05	0,08
Vlieland-staart/Vliehors					
Rest actieve buitendelta					
TOTAAL	43,5	0,13	1,1	1,05	0,08

Historische suppletievolumes

Tabel 5-6: Historische suppletievolumes Eierlandse Gat, als indicatie voor behoeftte in de komende 15 jaar, in miljoen m³/jr.

Naam	Periode start	Periode eind	Historisch suppletievolume
Texel-Eierland	1995	2024	0
Vlieland-staart/Vliehors	1990	2023	0
TOTAAL			0

Advies behoeftte per jaar tot ca. 2040

In de syntheses Tabellen in 5.12 en hoofdstuk 6 zal ervoor gekozen worden de hogere waarde te nemen, cf. de rekenregel met actieve zone. Dit kleine getal valt voor het landelijke beeld overigens binnen de onzekerheden.

Behoeftte lange termijn, bij snellere zeespiegelstijging

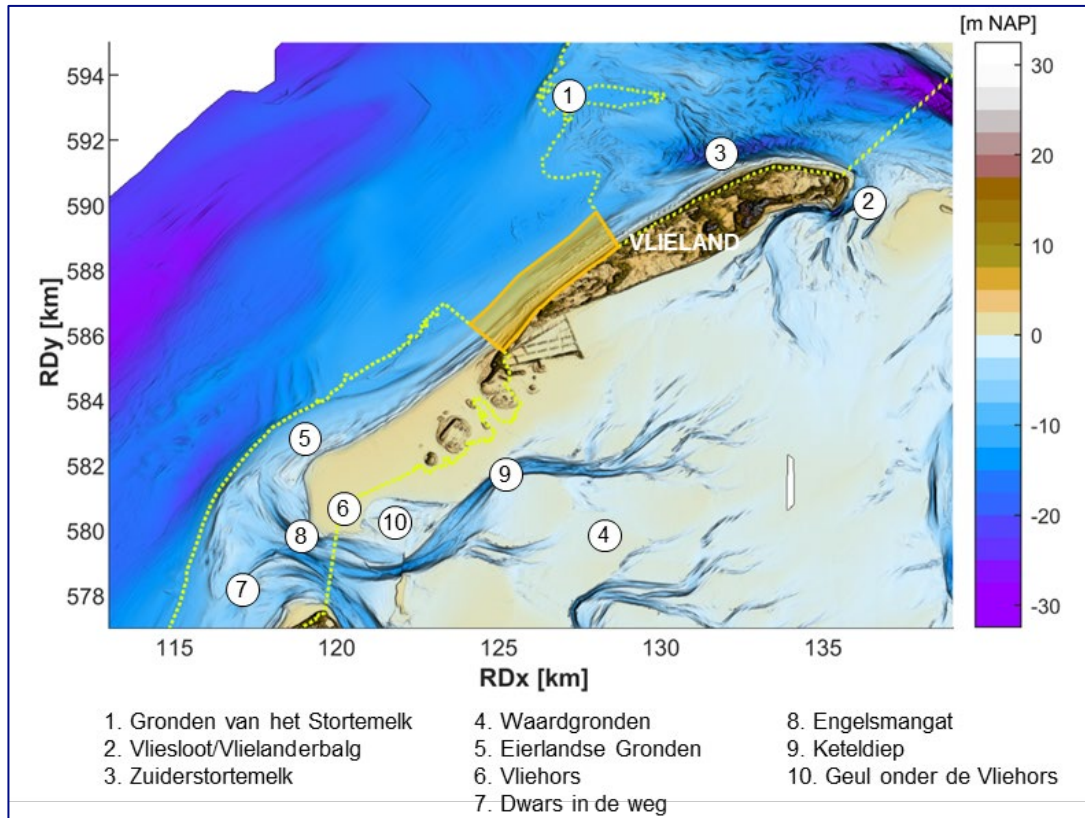
In Tabel 5-5 is voor de oppervlakte van de actieve zone dezelfde gebruikt als in Taal et al. (2023). Aanpassen / verbeteren van die inschatting blijkt nu nog niet mogelijk. Hetzelfde geldt ten aanzien van de onzekerheid over de transporten tussen actieve zone en bekken, hoewel uit Bijlage B blijkt dat er vooruitgang is gemaakt in het begrijpen van de ontwikkeling daarvan op lange termijn. Het verbeteren van een inschatting van het netto transport lijkt ook minder belangrijk omdat er momenteel geen import naar het bekken is. Dit verandert wel bij snellere zeespiegelstijging (zie Taal et al., 2023).

5.5 Centrale eilandkust Vlieland

5.5.1 Centrale eilandkust Vlieland: begrenzing, gedrag en sedimentbalans

Dit kustvak is relatief kort. Het loopt van einde Vliehors (ca. raai 4100) tot waar de invloed van de buitendelta van het Vlie begint (ca. raai 4600). Langs dit stuk kust (en ook verder oostwaarts) liggen vrijwel overal strandhoofden. De meeste daarvan zijn aangelegd tussen 1854 en 1885. In 1995 zijn er nog twee aangelegd op de Noordoosthoek⁶⁹ (volgend kustvak, waar de erosieproblematiek veel groter is, zie verder 5.6.2). De strandhoofden helpen om de getijstroom van de kust af te houden, maar lossen sedimenttekorten niet op (zie b.v. Quataert et al., 2021). Dit deel van het kuststelsel kenmerkt zich door een doorgaande, dominante bank. In dit gebied is één suppletie uitgevoerd, op de vooroever, in 2017.

⁶⁹ Deze verschillen van de andere strandhoofden in de zin dat het meer 'lange dammen' zijn (vgl. Eierlandse dam)

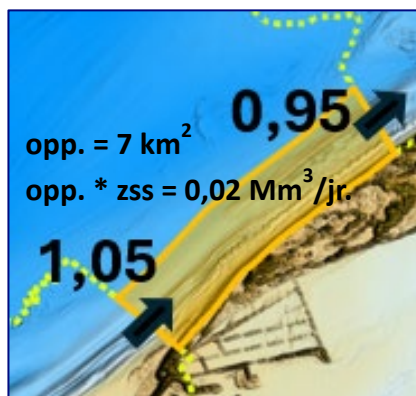


Figuur 5-15: Overzicht en genoemde morfologische elementen bij de centrale eilandkust van Vlieland, gebaseerd op de meest recente Vaklodgingen en AHN4. Het gele vlak is de actieve zone van de centrale eilandkust. De gele stippellijnen omsluiten actieve zones van de zeegaten.

Er is kustnabij een west-oost gericht transport dat tussen 0,45 en 0,5 miljoen m³/jr. ligt (Huisman, 2024). Voor de hele actieve zone komt Elias et al. (2024) op een inkomend transport vanaf het Eierlandse Gat van 1,05 miljoen m³/jr. en een uitgaand transport naar de eilandkop van 0,95 miljoen m³/jr. (Figuur 5-16). De actieve zone neemt toe met 0,13 miljoen m³/jr. Deze toename vindt in alle diepteklassen plaats en treedt vrijwel lineair op tussen 1991 en 2021. De (ondiepe) vooroever groeit met 0,01 miljoen m³/jr., de zeereep met 0,06 miljoen m³/jr. en de strandzone met 0,06 miljoen m³/jr.

5.5.2 Sediment- en suppletiebehoefte Centrale eilandkust Vlieland

De behoefte wordt, cf. de aanpak die in 2.4 uiteen is gezet, hieronder gepresenteerd. Figuur 5-16 geeft het overzicht incl. de ligging van de actieve zone.



Figuur 5-16: Transporten in en uit de actieve zone bij de centrale eilandkust van Vlieland, als gebruikt in Tabel 5-7. De getallen zijn cf. Elias et al. (2024) en Figuur 5-6.

Behoeftte in de komende 15 jaar volgens rekenregel met actieve zone

Tabel 5-7: Behoeftte centrale eilandkust Vlieland komende 15 jaar volgens denkmudel rekenregel met actieve zone. Getallen zijn in km² of miljoen m³/jr. Oppervlakten zijn cf. Taal et al. (2023), inclusief de erin genomen onzekerheidsmarge. De transporten zijn cf. Elias et al. (2024).

Naam	opp. actieve zone	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoeftte
Centrale kust Vlieland	7	0,02	1,05	0,95	0,00

Historische suppletievolumes

Tabel 5-8: Historische suppletievolumes centrale eilandkust Vlieland, als indicatie voor behoeftte in de komende 15 jaar, in miljoen m³/jr.

Naam	Periode start	Periode eind	Historisch suppletievolume
Centrale kust Vlieland	1990	2023	0,05

Advies behoeftte per jaar tot ca. 2040

Het is waarschijnlijk dat in de komende decennia geen suppleties in dit deel van de kust nodig zijn. Als de behoeftte aan zand wordt aangevuld zal dit bij de kop van het eiland, onderdeel van de buitendelta van het Vlie, worden gedaan. Het advies is, voor de zekerheid, de hogere waarde te nemen, dus **uit te gaan van 0,05 miljoen m³/jr.** cf. de historische suppletievolumes. Het blijven in elk geval kleine getallen, die zeker voor het landelijke beeld duidelijk binnen de onzekerheden vallen.

Behoeftte lange termijn, bij snellere zeespiegelstijging

De resultaten uit Taal et al. (2023) gelden nog steeds. Er kunnen geen betere schattingen van de oppervlakte actieve zone gegeven worden.

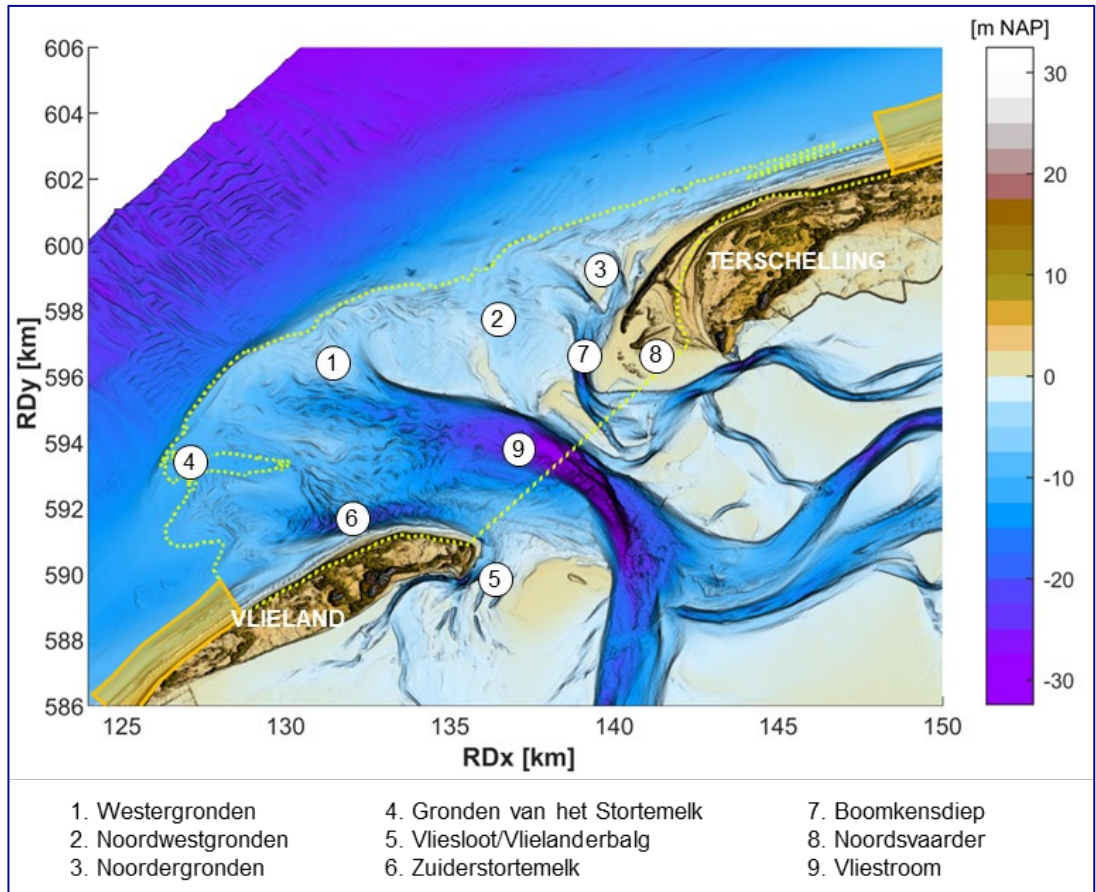
5.6 Zeegat van het Vlie

5.6.1 Overzicht en gedrag op schaal hele Zeegat van het Vlie

De buitendelta van dit zeegatsysteem heeft een omvang van ongeveer 8 km in zeewaartse richting en 22 km in langsricting. Het merendeel van het plaatoppervlak en volume bevindt zich aan de zijde van Terschelling, ten noorden van de Vliestroom in de Noordwestgronden en Noordergronden. Die ontvangen via bypassing sediment vanaf de Gronden van de Stortemelk en de Westergonden.

Tussen 1992 en 2022 omvat het zeegat één enkele hoofdgeul: de Vliestroom. Langs de aanliggende eilanden bevinden zich kleinere geulen; het Zuiderstortemelk langs de noordoostpunt van Vlieland en het Boomkendsdiep langs de eilandkop van Terschelling. De eilandkop van Terschelling wordt gevormd door de Noordsvaarder.

Het bekken van dit zeegatsysteem is verbonden met de bekkens van het Eierlandse Gat en het Zeegat van Texel. Samen worden ze ook aangeduid als de 'Westelijke Waddenzee'. De Vliestroom splitst in het bekken in een zuidelijke en een noordwestelijke tak. Direct naast / onder Vlieland ligt nog het kleinere geulenstelsel van de Vliesloot en Vlielanderbalg. Deze geulen vormden de toegang tot de haven van Oost-Vlieland en zijn ook bepalend voor de suppletie strategie bij de noordoostpunt van Vlieland (zie 5.6.3).



Figuur 5-17: Overzicht en genoemde morfologische elementen van het Zeegat van het Vlie, gebaseerd op de meest recente Vaklodgingen en AHN4. De gele vlakken zijn de actieve zones van de centrale eilandkusten. De gele stippellijn omsluit de actieve zone van het zeegat (actieve buitendelta plus eilandkop- en staart).

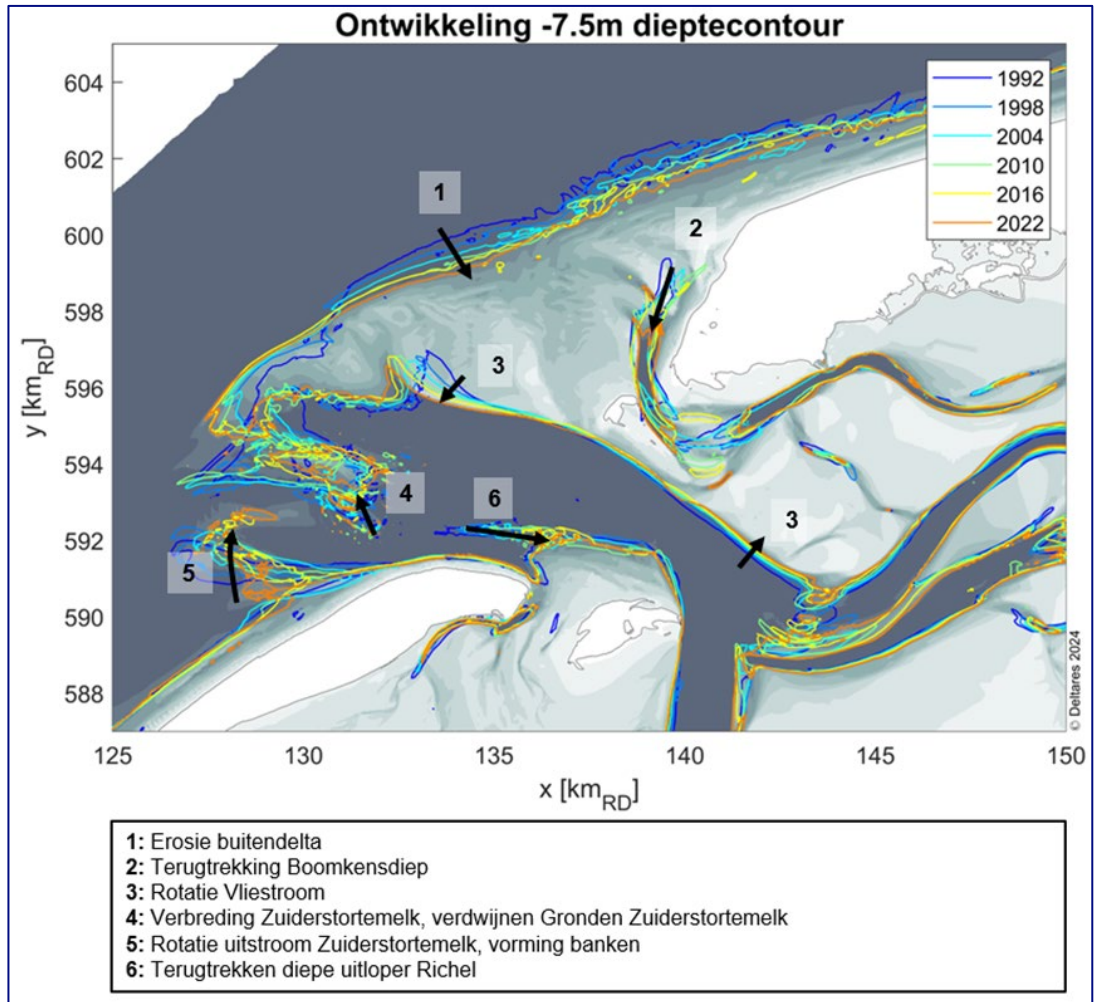
De deelgebieden in het Zeegat van het Vlie zijn:

1. de 'actieve buitendelta', besproken in 5.6.2
2. de kop van Vlieland, besproken in 5.6.3
3. de Noordsvaarder op Terschelling, besproken in 5.6.4.
4. het bekken, niet apart besproken.

5.6.2 Actieve Buitendelta: begrenzing, gedrag en sedimentbalans

Begrenzing en morfologische ontwikkeling

In 5.6.1 is de hele buitendelta van het Zeegat van het Vlie besproken. Sinds de afsluiting van de Zuiderzee is deze sterk in volume afgenomen en landwaarts verplaatst. Met dit proces moet rekening worden gehouden als de begrenzing van de actieve zone wordt bepaald. In Elias et al. (2024) wordt voor deze grens een diepte van 10 meter onder NAP aangehouden. Hierbij hoort een oppervlakte van de actieve buitendelta van 149 km², wat vrij groot lijkt. Zij suggereren dat een nauwere begrenzing, vanwege het terugtrekkende karakter van de buitendelta, beter kan zijn. Zij presenteren daarom zowel een sedimentbalans voor de zeewaartse rand (tussen de NAP -10 m en -6 m contouren), die erodeert, als ook het buitendeltaplatform van de Wester- en Noordwestergonden (zone tussen de NAP -6 tot -1 m contouren), die aangroeit. In de analyses van De Beer et al. (2024) die hierop voortgaan, is ook een contourlijn van -7,5 meter gebruikt (zie Figuur 5-18) om te tonen hoe het noordelijke deel van de buitendelta opgeruimd wordt en zich verplaatst richting het zeegat.



Figuur 5-18: Overzicht van de ontwikkeling van de buitendelta, op basis van de contourlijnen van NAP -7,5 m.

De verandering van de buitendelta is een nog doorgaand proces, mede door de aanhoudende sedimentatie in het bekken. Dit is tussen 1992 en 2022 met 25,6 km² (oftewel 3,6% ten opzichte van 1992) afgenomen (De Beer et al., 2024). Het sediment daarvoor wordt in eerste instantie geleverd door de buitendelta. Ondanks de vrijwel lineaire afname van het sedimentvolume van de buitendelta is de vorm (het patroon van geulen en platen) over de laatste decennia vrij stabiel.

Om een omhullende contour te verkrijgen van het actieve deel van de buitendelta (te zien in Figuur 5-17) is voor het deel oostelijk van de hoofdgeul (Vliestroom) de -6 meter genomen als zeewaartse grens. Voor de Vliestroom zelf en het deel westelijk daarvan is het de contour van -10 meter. De oppervlakte waarover het suppletiezand verspreid wordt zal kleiner zijn in de komende 15 jaar (zie verder de toelichting bij Tabel 5-9).

Sedimentbalans

De aanlandingsbanken voor de kust van Noordwest Terschelling variëren in aantal en volume en bevatten gemiddeld 10 miljoen m³ aan sediment in de periode 2008-2022. De centrale bank vertoont een sterke groei in omvang en volume van 28 miljoen m³. De groei van deze centrale bank laat zien dat een deel van het sediment van de vooroever landwaarts is verplaatst.

Het merendeel van de sedimentverliezen treedt op aan de zeewaartse zijde van de buitendelta. Elias et al. (2024) berekenen een grote volumeafname in de zone tussen 10 en

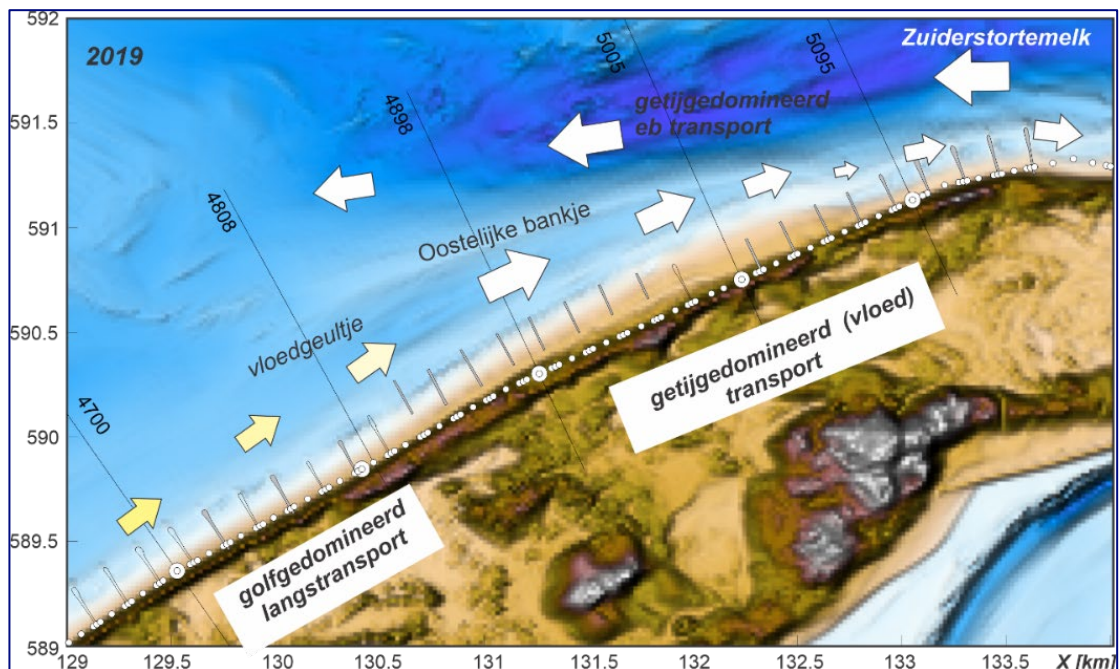
20 meter onder NAP: 1,3 miljoen m³/jr. over de periode vanaf 1987. Voor de gehele zone tussen 10 tot 1 meter diep is de volumetrend ook negatief, maar daar zitten ook de geulen bij. Het merendeel van de sedimentverliezen treedt echter op aan de zeewaartse zijde van dit gebied. De zone tussen de 10 en 6 meter diep heeft volumeafname (2,4 miljoen m³/jr.) terwijl zone tussen de 6 en 1 meter diep, bij de Noordwestergronden, juist volumetoename kent (0,7 miljoen m³/jr.). Ook boven 1 meter diep, oftewel de ondiepe kustzones van Vlieland en Terschelling, vertonen een toename in sedimentvolume. Hierom stelt dit rapport voor de zeewaartse grens van de actieve buitendelta van het Zeegat van het Vlie op de contour van 8 of, waarschijnlijk beter, 6 meter diepte te leggen (5.6.5).

Elias et al. (2024) berekenen, met als zeewaartse dieptegrens nog de -10 meter NAP, voor de actieve buitendelta een sedimentaanbod (vanaf 1987 gemiddeld) van 2,8 miljoen m³/jr. Dit is ruimschoots genoeg om te voldoen aan de sedimentvraag van het bekken, die wordt geschat op 1,4 miljoen m³/jr. (Elias en Wang, 2020). Zij stellen dat, gezien de grote erosie aan de noordoostzijde van de buitendelta en het oostelijk migreren van de aanlandingsbanken, het zeer waarschijnlijk is dat veel van het overige volume richting de kust van Terschelling en de vooroever ervan is verplaatst.

5.6.3 Vlieland kop/dorp

De meeste studies laten het deel van het eiland dat tot het Zeegat van het Vlie wordt gerekend beginnen rond raai 4600. Hierdoor kunnen de meeste suppleties bij Vlieland tot dit kustvak worden gerekend. Langs deze kust moeten veel maatregelen genomen worden om erosie tegen te gaan. Deze kust staat onder druk van twee grote geulen: Zuiderstortemelk en Vliesloot.

Tussen raai 4600 en 4700 ligt het meest westelijke deel van het Zuiderstortemelk, maar de geul ligt daar nog ver zeewaarts. Bij het noordelijkste punt van het eiland, rond raai 5200 sluit de geulwand vrijwel direct aan op het strand. Daarna is er de eilandkop die veel onderhoud vraagt. De geul kromt zich daar om de kop heen.



Figuur 5-19: Overzicht van de dominante processen bij Vlieland Noordoost, overgenomen uit (Elias, 2021).

In Elias (2021b) is de morfologische ontwikkeling van de noordoostzijde van Vlieland onderzocht. Figuur 5-19 is daaraan ontleend en schetst het complexe gedrag, mede

veroorzaakt door een vooroeversuppletie in 2005. Die bevorderde uiteindelijk een nieuwe kustlangse geul tussen de Zuiderstortemelk en de kust. Die geul versterkte de erosie via de vorming van een nieuw bankje langs het Zuiderstortemelk. Het dichtzetten van het geultje heeft de erosieproblematiek niet opgelost, aangezien deze dan elders ontstond. Zie verder: Elias (2021), De Beer et al. (2024) en Quataert et al. (2021).

De Vliesloot heeft zich in de afgelopen twee eeuwen ingegraven in keileemlagen en ligt daardoor vrij stabiel. Het zorgt wel voor hoge stroomsnelheden dicht onder de kust. Zand wordt wel effectief afgevoerd door de geul, maar er is geen aanvoer. De zeereep heeft zich in het verleden daarom landwaarts verplaatst. In het meest oostelijke kustvak, tussen het laatste strandhoofd en het havenhoofd is zeer duidelijk erosie van het strand te zien. Bij het havenstrand, rond raai 5450 en 5460, zijn veel aanvullende, kleine suppleties uitgevoerd. Het is bijna onmogelijk de kustlijn tot zeewaarts van de BKL te herstellen omdat het strand grenst aan een diepe getijdengeul (Vliesloot). Door de suppleties gaat de kustlijn van het havenstrand niet verder achteruit.

Vanuit het oogpunt van de sedimentbalans is dit deel van de kust stabiel, maar het historische suppletievolume sinds 1990 is wel bijna 0,3 miljoen m³/jr. Het afgevoerde sediment kan via het Zuiderstortemelk of de Vliesloot het bekken in zijn gegaan, maar ook via de Vliestroom zeewaarts de buitendelta op zijn gegaan.

5.6.4 Noordsvaarder Terschelling

De westelijke kop van Terschelling is tussen 1850 en 1865 door aanlanding / verzanding ontstaan. Nu heeft het zowel lokaal een erosieve kustlijn (door het opdringen van geul Boomkendsdiep) als delen met een uitbouwende kustlijn (door het aanlanden van de buitendeltabanken). Het beleid is de natuurlijke dynamiek bij de Noordsvaarder ongestoord plaats te laten vinden. Daarom is ook niet overal een Basiskustlijn gedefinieerd, maar pas vanaf raai 100. Rond raai 400 begint het aanlanden van de buitendeltabanken.

Het verhalen en daarna verspreiden van de aangelande banken bepaalt de kustontwikkeling op langere termijn. Verder naar het oosten draagt het ook bij aan kustuitbouw. Tot het midden van het eiland is de kust stabiel of uitbouwend en is de kenmerkende brede zandige kustlijn van het eiland te zien. Voor de sedimentbalans ligt de grens bij raai 900, hoewel de aanlandingsgebieden zich uitstrekken tot raai 1100. Infrastructuur achter zeereep en strand is er vanaf raai 800 (West aan Zee).

Bij een aanlanding wordt de kustlijn in (relatief) korte tijd sterk zeewaarts verplaatst. Dit wordt onherroepelijk gevolgd door erosie van de nieuwe kust, omdat de aangelande bank zich over de kustlijn gaat verspreiden. De achteruitgang van de kust rondom raaien 500 tot 800 (waarbij nu lokaal ook de Basiskustlijn wordt overschreden) heeft te maken met het verschuiven van het aanlandingspunt van de banken naar het zuidwesten. Vroeger waren de aanlandingen bij dat deel van de kust (raai 500-800) en resulteerden toen in een uitbouw. De nieuwe 'bultvormige' uitbouw ontstaat ten zuidwesten daarvan. Meer informatie is te vinden in De Beer et al. (2024)

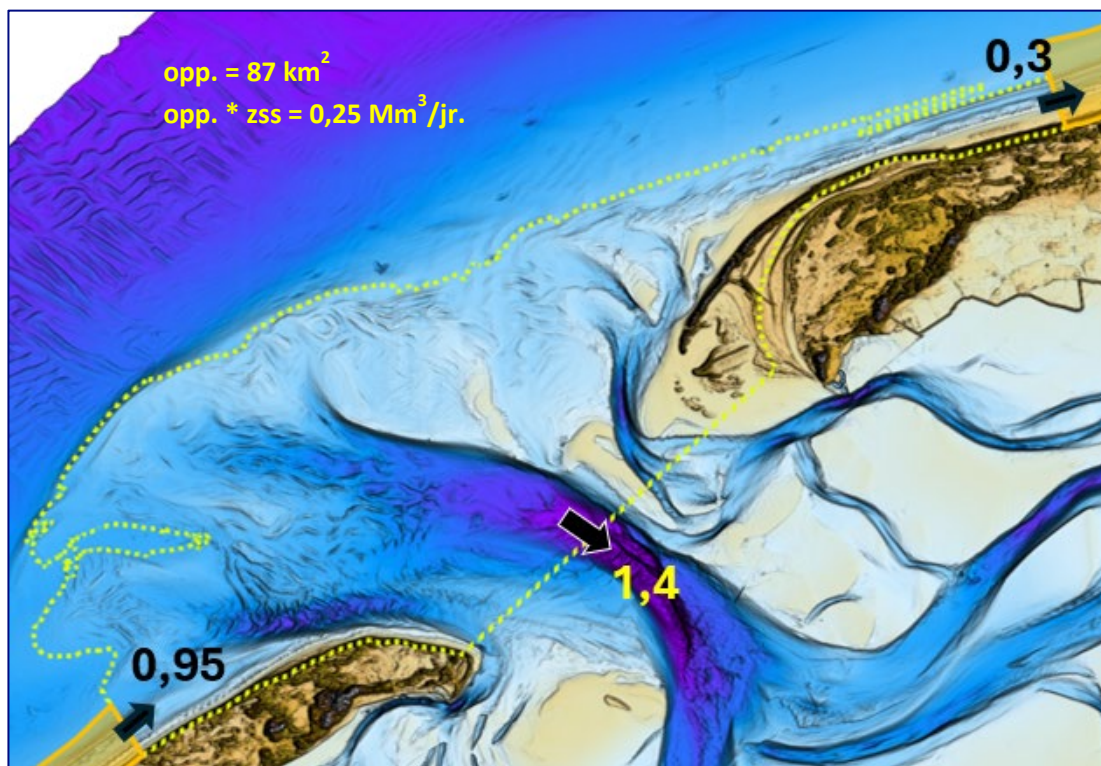
5.6.5 Sediment- en suppletiebehoefte van het Zeegatsysteem

De behoefte wordt, cf. de aanpak die in 2.4 uiteen is gezet, hieronder gepresenteerd. Figuur 5-20 geeft het overzicht incl. de ligging van de actieve zone.

Behoefte in de komende 15 jaar volgens rekenregel met actieve zone

Tabel 5-9: Behoefte Zeegat van het Vlie komende 15 jaar cf. denkmodel rekenregel met actieve zone. De getallen zijn in km² of miljoen m³/jr. Oppervlakte is cf. Taal et al. (2023). Transporten zijn cf. Elias et al. (2024).

Naam	opp. actieve zone	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoefte
Vlieland kop/dorp	127 → 87	0,25	0,95	2,8 → 1,7	1,00
Noordsvaarder					
Rest actieve buitendelta					
TOTAAL	87	0,25	0,95	1,7	1,00



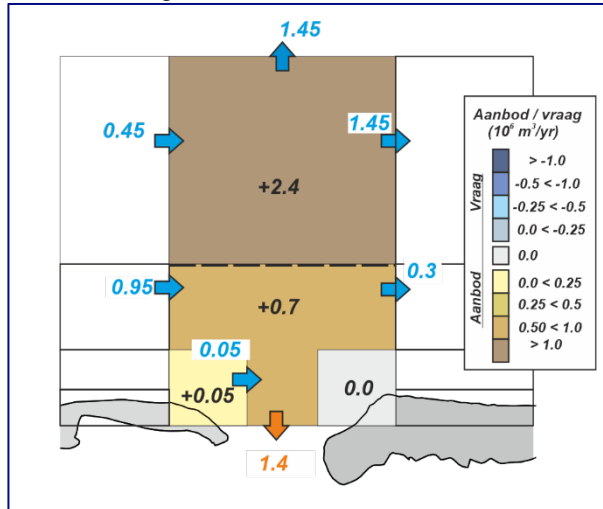
Figuur 5-20: Transporten in en uit de actieve zones bij het Zeegat van het Vlie, als gebruikt in Tabel 5-9. De getallen zijn aangepast (zie tekst) t.o.v. Elias et al. (2024) en Figuur 5-6.

Opmerkingen / Toelichting bij bovenstaande tabel

Voor het bepalen van de getallen waren de volgende keuzes / aannamen nodig:

- De oppervlakte van 134 km² komt uit Taal et al. (2023), maar lijkt te groot. De omhullende zoals in Figuur 5-17 aangegeven heeft een oppervlakte van 127 km². In de onderliggende data van Elias et al. (2024) is te vinden dat de huidige oppervlakte van de buitendelta boven -8 m diepte ca. 87 km² is en de oppervlakte boven -6 m diepte ca. 69 km² is. Het gebied tussen -8 meter en -6 meter wordt nog altijd kleiner. In die zin is de 87 km² voor het totaal mee te groeien oppervlakte een 'voldoende juiste' aanname
- Het berekende transport uit de actieve buitendelta van het Zeegat van het Vlie (2,8 miljoen m³/jr. in Elias et al., 2024) is opgebouwd als 1,4 miljoen m³/jr. naar het bekken en 1,4 miljoen m³/jr. transport kustlangs. Het kustlangse transport is grotendeels het gevolg van het meenemen van de terugtrekkende rand in de sedimentbalans van de actieve buitendelta. Dit zou beter als een verlies op dieper water / diepe vooroever beschouwd kunnen worden, als geschetst in Figuur 5-21.

- Wat resteert aan netto transporten uit de actieve buitendelta is het transport naar het bekken (1,4 miljoen m³/jr.) plus 0,3 miljoen m³/jr. die Huisman (2024) schat als kustlangs transport naar de actieve zone van de rechte eilandkust van Terschelling.⁷⁰
- De correctie op Elias et al. (2024), ook verbeeld in Figuur 5-21, is ook doorgevoerd in de berekening van de sedimentbehoefte van de rechte eilandkust van Terschelling, in 5.7.2.



Figuur 5-21: Transporten in en uit de actieve buitendelta van het Zeegat van het Vlie: een correctie op Figuur 5-6 in dienst van de berekeningen van de sedimentbehoefte met de rekenregel met actieve zone.

Historische suppletievolumes

Tabel 5-10: Historische suppletievolumes Zeegat van het Vlie, als indicatie voor behoefte in de komende 15 jaar, in miljoen m³/jr.

Naam	Periode start	Periode eind	Historisch suppletievolume
Vlieland kop/dorp	1990	2023	0,3
Noordsvaarder			0
TOTAAL			0,3

Advies behoefte per jaar tot ca. 2040

De historische volumes lijken representatiever voor de komende 15 jaar dan het gebruik van de rekenregel, mede gezien de voorgestelde bijstelling voor het netto oostwaartse transport en het kleinere oppervlak van de actieve buitendelta. Voor de komende 15 jaar is de keuze of extra zand inbrengen in het oostelijk deel van de buitendelta wenselijk is. Vanuit het oogpunt 'prioriteit geven aan natuurlijke processen' is dit niet nodig. In alle gevallen lijkt de uitkomst van de rekenregel met actieve zone (1 miljoen m³/jr.) te veel. Het meest plausibel lijkt uitgaan van 'geen extra suppletiebehoefte bovenop wat gemiddeld bij Vlieland moet worden aangebracht', dus **0,3 miljoen m³/jr.**⁷¹

Behoefte lange termijn, bij snellere zeespiegelstijging

In Tabel 5-9 is voor de oppervlakte van de actieve zone een kleinere waarde gebruikt dan in Taal et al. (2023). Het gaat om 87 km² in vergelijking met 134 km². Als deze waarde voor de lange termijn wordt overgenomen leidt ertoe dat de totale sedimentbehoefte bij een

⁷⁰ Voor de komende 15 jaar geldt dat het proces van bankaanlandingen op de noordwestkust van Terschelling niet stopt. Het proces van incidentele grote 'pulsen' van sediment zet zich nog steeds voort, maar in steeds kleinere hoeveelheden, totdat de terugtrekking van de buitendelta is voltooid. Omdat dit sediment geleverd wordt door die terugtrekking is het niet logisch dit te beschouwen daarom als 'te compenseren transport uit de actieve buitendelta'.

⁷¹ Dit blijft uiteraard arbitrair, maar het lijkt niet nodig op landelijk niveau de gemiddelde jaarlijkse behoefte aan suppleties te verhogen voor een (zeer waarschijnlijk dan éénmalige, gegeven een tijdvak van 15 jaar) suppletie bij de westzijde van Terschelling.

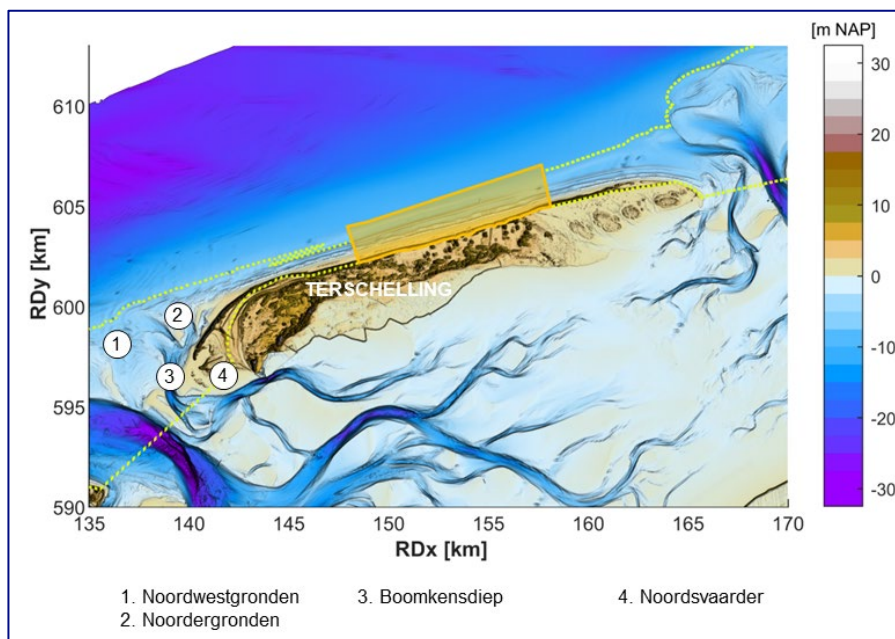
zichtwaarde van de zeespiegel iets vermindert. Dit is tegenover het Nederlandse totaal geen significant verschil, maar wel voor dit zeegat.

Ten aanzien van de onzekerheid over de transporten van de actieve zone naar het bekken, blijkt uit Bijlage B dat er vooruitgang is geboekt, maar dat niet met vertrouwen al een betere aanname is te doen in vergelijking met Taal et al. (2023). In de secties 6.3 en 6.5 staan berekeningen voor de behoefte aan zand voor suppleties in de komende 15 jaar als de netto transporten naar de bekken voor een hoger percentage (37%) uit slib bestaan. Voor de langere termijn, bij zichtwaarden van zeespiegelstijging, is dat nog niet gedaan.

5.7 Centrale eilandkust Terschelling

5.7.1 Centrale eilandkust Terschelling: begrenzing, gedrag en sedimentbalans

Dit kustvak begrenst Elias et al. (2024) met de raaien 1100 en 2100 (begin Boschplaat). Het wordt gekenmerkt door een 2 tot 3 banken systeem. Er is alleen in 1993 gesuppleerd, op de vooroever, als pilot, met een omvang van 2 miljoen m³. Ten westen van dit kustvak, ruwweg tussen West aan Zee en Midland aan Zee (raai 1100) hebben de aanlandingsgebieden van de Noordergronden (zie ook 5.6.4) directe invloed op de sedimentbalans.⁷²

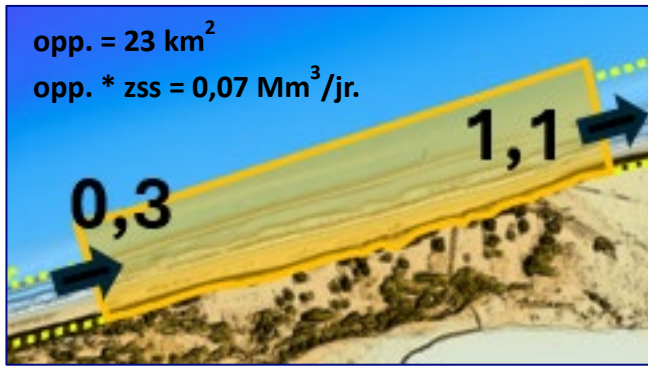


Figuur 5-22: Overzicht en morfologische elementen bij de centrale eilandkust van Terschelling, gebaseerd op de meest recente Vaklodingen en AHN4. Het gele vlak is de actieve zone van de centrale eilandkust. De gele stippellijnen omsluiten actieve zones van de zeegaten.

5.7.2 Sediment- en suppletiebehoefte Centrale eilandkust Terschelling

De behoefte wordt, cf. de aanpak die in 2.4 uiteen is gezet, hieronder gepresenteerd. Figuur 5-23 geeft het overzicht incl. de ligging van de actieve zone.

⁷² Elias et al. (2024) zien een trendbreuk in de data vanaf 2014. Sindsdien neemt het volume van de actieve zone relatief snel af (-1,2 miljoen m³/jr.). Zij suggereren verschillende oorzaken. Het is mogelijk dat de continue verdieping van de vooroever en de buitendelta het kustgedrag zijn gaan beïnvloeden. Door terugtrekking van de buitendelta kan het golfklimaat langs de centrale eilandkust zijn veranderd. Een tweede mogelijkheid is de verandering in toevoer van sediment vanaf de buitendelta naar de kust. Zij zien duidelijke veranderingen in de sediment-bypassing-banken.



Figuur 5-23: Transporten bij de actieve zone van de centrale eilandkust van Terschelling, zie Tabel 5-11.

Behoeftte in de komende 15 jaar volgens rekenregel met actieve zone

Tabel 5-11: Behoeftte centrale eilandkust Terschelling komende 15 jaar volgens denkmodel rekenregel met actieve zone. Getallen zijn in km² of miljoen m³/jr. Oppervlakten zijn cf. Taal et al. (2023), inclusief de erin genomen onzekerheidsmarge. De transporten zijn cf. Elias et al. (2024)].

Naam	opp. actieve zone	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoeftte
Centrale kust Terschelling	23	0,07	0,3	1,1	0,87

Opmerkingen / Toelichting bij bovenstaande tabel:

De term 'transport in' die is gebruikt voor het berekenen van de behoeftte is gekoppeld aan de berekening bij het Zeegat van het Vlie. De reden om voor 0,3 miljoen m³/jr. te kiezen is uitgelegd in 5.6.5. Voor de komende 15 jaar is dit waarschijnlijk nog een onderschatting omdat het proces van aanlandingsbanken nog doorgaat.

Historische suppletievolumes

Tabel 5-12: Historische suppletievolumes centrale eilandkust Terschelling, als indicatie voor behoeftte in de komende 15 jaar, in miljoen m³/jr.

Naam	Periode start	Periode eind	Historisch suppletievolume
Centrale kust Terschelling	1990	2023	0,06 ⁷³

Advies behoeftte per jaar tot ca. 2040

De getallen volgens 'denkmodel rekenregel' zijn reëel als op enig moment besloten wordt de Boschplaat te gaan onderhouden⁷⁴. Dan ontstaat een grote behoeftte aan sediment die, als gevolg van de begrenzings, toegerekend wordt aan de rechte eilandkust. Het is niet te zeggen of die keuze gemaakt wordt, maar het lijkt verstandig hier in beperkte mate rekening mee te houden. Hierom is voorlopig uitgegaan van **een beperkte verhoging van de historische suppletievolumes, op 0,2 miljoen m³/jr.**

Behoeftte lange termijn, bij snellere zeespiegelstijging

De resultaten uit Taal et al. (2023) gelden nog steeds. Er kunnen geen betere schattingen van de oppervlakte actieve zone gegeven worden.

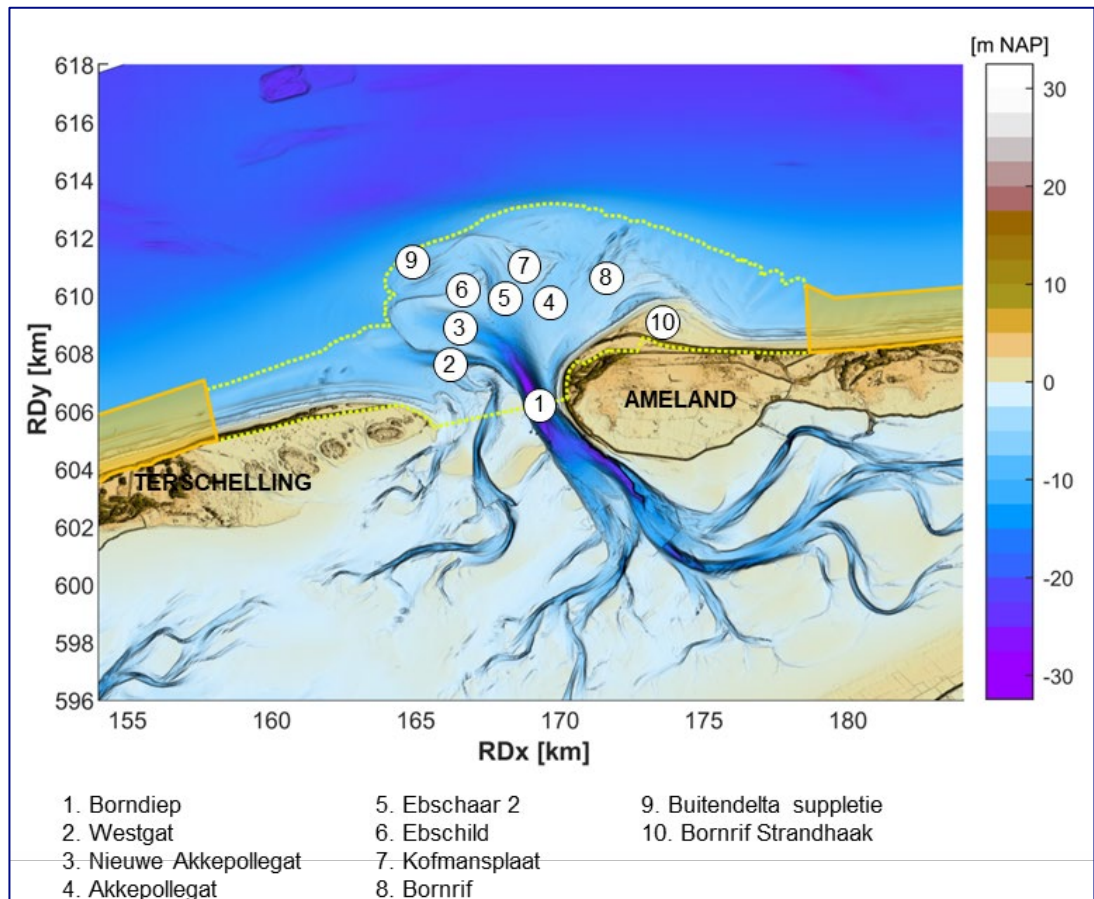
⁷³ Hoewel de suppletie uit 1993 die voor dit getal zorgt geen verband had met kustlijnverzorging is deze uit oogpunt van consistentie wel meegenomen.

⁷⁴ Merk op dat dit een ander regime is dan bij de staart van Ameland. Daar is trouwens extra sedimentbehoefte door bodemdaling als gevolg van gaswinning, maar dat is niet aanwijsbaar de reden voor de andere strategie.

5.8 Zeegat van Ameland

5.8.1 Overzicht en gedrag op schaal hele Zeegat van Ameland

De huidige configuratie kent een duidelijke hoofdgeul aan de oostzijde van het zeegat, langs de westzijde van Ameland, het Borndiep. Tot ongeveer 2019 vormde het Akkepollegat de dominante uitstroomegeul over de buitendelta. In 2020 heeft de landwaarts gelegen ebschaar de functie ervan overgenomen. Op de buitendelta bevinden zich drie duidelijke plaatgebieden. De grootste plaat, Bornrif, ligt oostelijk van het Akkepollegat.



Figuur 5-24: Overzicht en genoemde morfologische elementen van het Amelandse Zeegat, gebaseerd op de meest recente Vaklodgingen en AHN4. De gele vlakken zijn de actieve zones van de centrale eilandkusten. De gele stippellijn omsluit de actieve zone van het zeegat (actieve buitendelta plus eilandkop- en staart).

De morfodynamiek van de buitendelta wordt gedomineerd door de vorming en verplaatsing van verschillende ebschaar- en ebschildsystemen. Vanaf het Bornrif verbinden periodiek kleinere platen met de kust van Ameland, (Elias et al. 2019).⁷⁵ Aan de westzijde van de buitendelta zijn nog twee grotere plaatgebieden te onderscheiden. De Kofmansplaat ligt zeewaarts en vormt het ebschild van de onderliggende ebschaar. Een groot ebschild heeft zich ook gevormd rond het Nieuwe Akkepollegat.

⁷⁵ De cyclische verplaatsing van sediment over de buitendelta van het bovenstroomse naar het benedenstroomse eiland wordt ook wel "sediment-bypassing" genoemd (b.v. Elias et al., 2019). De bekende Bornrif Strandhaak is echter een overblijfsel van een grote zandplaat. In 1989 heeft die bankaanlanding net plaats gevonden.

De deelgebieden in het Zeegat van Ameland zijn:

1. de 'actieve buitendelta', besproken in 5.8.2;
2. de Boschplaat op Terschelling, besproken in 5.8.3;
3. de Westkop van Ameland, besproken in 5.8.4
4. het bekken, niet apart besproken.

5.8.2 Actieve Buitendelta: begrenzing, gedrag en sedimentbalans

Begrenzing en morfologische ontwikkeling

Elias et al. (2024) leggen de zeewaartse grens van de actieve zone op NAP -8 m. Dit wordt onderbouwd met de waarneming dat de grootste volumeverliezen optreden in de zone tussen de NAP -8 en -16 m NAP. Dat gebied omvat de zeewaartse rand van de buitendelta, die structurele terugtrekking vertoont en daarom ook niet als deel van de actieve zone kan worden gezien. Deze terugtrekking is waarschijnlijk het resultaat van de aanpassing van de buitendelta t.g.v. lange termijn veranderingen (zie Elias et al. 2019 voor details). Deze terugtrekking resulteerde in de vorming van banken op de actieve buitendelta en dat maakt het ook aannemelijk dat veel van het sediment landwaarts is verplaatst.

Het diepste deel van de buitendelta NAP -16 m en 20 m (diepe vooroever) vertoont ook een afname in volume, maar veel minder dan de zone tussen de NAP -8 en -16 m NAP.

Sedimentbalans

De actieve buitendelta (dus ondieper dan NAP -8 m) neemt toe met 1,0 miljoen m³/jr. De tegenstrijdigheid tussen volumetoename en suppletiebehoefte in de actieve buitendelta ligt in het feit dat de volumetoename vooral in het diepere deel van dit vak plaatsvindt. De volumes van strand en zeereep namen veel minder toe dan er is gesuppleerd. Bijna de helft het aangebrachte zand is uit de strand- en zeereepzone getransporteerd⁷⁶.

5.8.3 Boschplaat Terschelling

De Boschplaat is de grootste eilandkwelder van het Waddengebied. In het verleden was de Boschplaat ver oostelijk uitgebouwd, het zeegat in. De Boschplaat vertoont echter al decennia, sinds ca. 1975, erosie en terugtrekking (Elias et al. 2019). Het merendeel van die afname trad eerst op in de vooroever, maar de laatste 30 jaar trekt ook de kust zich sterker terug. Een groot duingebied zeewaarts van de stuifdijk dat in 1989 nog aanwezig was, is vrijwel geheel verdwenen in de recente bodemopname. Elias et al. (2024) constateren een afnemende trend van 0,7 miljoen m³/jr. Dit sediment verplaatst zich naar de actieve buitendelta van het Zeegat van Ameland. Het beleid is de natuurlijke dynamiek ongestoord plaats te laten vinden. Daarom is niet overal een Basiskustlijn gedefinieerd.

5.8.4 Ameland-kop

De oostelijke grens van dit stuk kust is gelegd bij raai 1120 (zie de overgang naar het gele vlak in Figuur 5-25. Dat betekent dat vrijwel de gehele strandhaak van het Bornrif erin is opgenomen. Het meest onderhoud is nodig voor de westzijde van Ameland. Vanaf hier naar het zuiden ligt het Borndiep dicht langs het eiland. Aan de westzuidwest zijde zijn ook harde verdedigingswerken aangelegd, maar de voet van de bestorting erodeert. Hierdoor kunnen strandvallen optreden die in de toekomst problemen kunnen veroorzaken voor de waterveiligheid. De bestorting is een essentieel onderdeel van de waterkering.

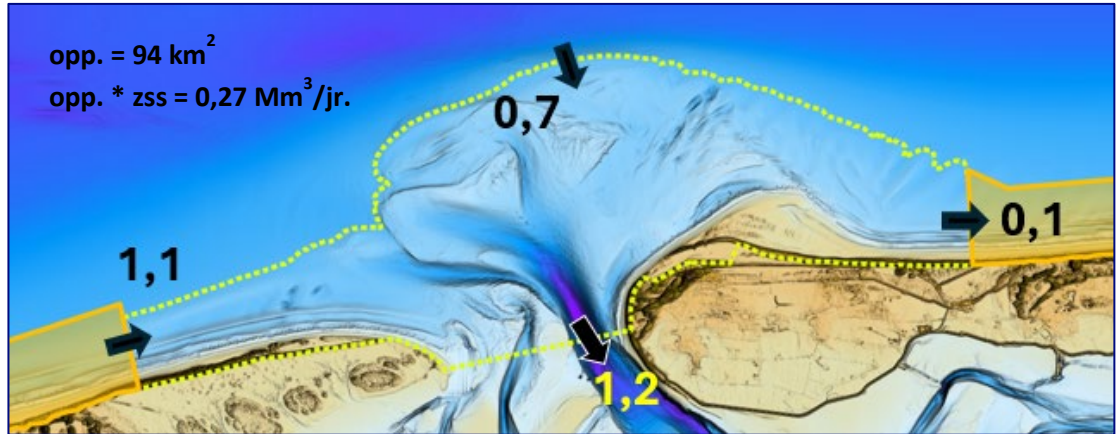
Langs de westkant van deze eilandkop is er een zuidelijk, naar het bekken gericht transport, dat Huisman (2024) op 0,3 miljoen m³/jr. berekent. Dat voedt een deel van de import naar het

⁷⁶ Dit ging netto naar het diepere deel van de actieve buitendelta, maar in de realiteit zal veel ervan het bekken direct hebben gevoed via het Borndiep (en leverde de rest van de actieve buitendelta minder zand aan het bekken)

bekken van 1,2 miljoen m³/jr. Verder oostelijk nemen de transporten in oostelijke richting toe. Dat is ook te zien aan de vervorming van de Bornrif Strandhaak. Ten westen van het aanlandingspunt (raai 100-400) is er ook erosie door inscharende kortsluitgeulen en zijn suppleties nodig om de kustlijn te handhaven.

5.8.5 Sediment- en suppletiebehoefte van het Zeegatsysteem

De behoefte wordt, cf. de aanpak die in 2.4 uiteen is gezet, hieronder gepresenteerd. Figuur 5-25 geeft het overzicht incl. de ligging van de actieve zone.



Figuur 5-25: Transporten in en uit de actieve zones bij het Zeegat van Ameland, als gebruikt in Tabel 5-13. De getallen zijn cf. Elias et al. (2024) en Figuur 5-6.

Behoefte in de komende 15 jaar volgens rekenregel met actieve zone

Tabel 5-13: Behoefte Zeegat van Ameland komende 15 jaar volgens denkmodel rekenregel met actieve zone. De getallen zijn in km² of miljoen m³/jr. Oppervlakte is cf. Taal et al. (2023). Transporten zijn cf. Elias et al. (2024).

Naam	opp. actieve zone	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoefte
Boschplaat	94	0,27	1,8	1,3	0
Ameland-West / kop					
Rest actieve buitendelta					
TOTAAL	94	0,27	1,8	1,3	0

Opmerkingen / Toelichting bij bovenstaande tabel:

De waarde '0' bij 'behoefte is niet de uitkomst van de rekenregel, want die is negatief. Van tevoren is gesteld dat de behoefte per definitie niet negatief kan worden.

Historische suppletievolumes

Tabel 5-14: Historische suppletievolumes Zeegat van Ameland, als indicatie voor behoefte in de komende 15 jaar, in miljoen m³/jr.

Naam	Periode start	Periode eind	Historisch suppletievolume
Boschplaat	-	-	-
Ameland-West / kop	1990	2023	0,63
TOTAAL			0,63

Opmerkingen / Toelichting bij bovenstaande tabel:

Dit is inclusief de suppletie op de buitendelta, die in 2019 is afgerond.

Advies behoefte per jaar tot ca. 2040

Het ligt zeer voor de hand uit te gaan van de historische suppletievolumes. Er moet aan de westkant van Ameland namelijk zeer regelmatig gesuppleerd worden.

Behoeftelange termijn, bij snellere zeespiegelstijging

In Tabel 5-13 is voor de oppervlakte van de actieve zone dezelfde waarde gebruikt als in Taal et al. (2023). Aanpassing of verbetering van die inschatting lijkt nu niet nodig, omdat bij de inschatting van Taal et al. (2023) op expertoordeel de zeewaartse grens van de actieve buitendelta al op de zich terugtrekkende rand⁷⁷ was gelegd. Anderzijds blijkt uit het voorgaande dat 'voldoende sediment in de actieve buitendelta cf. rekenregel' niet genoeg is voor het handhaven van de kustlijn. Door de ligging van het Borndiep blijven suppleties langs de westkust van Ameland niet liggen in de te onderhouden kustzone, maar worden afgevoerd naar bekken en/of buitendelta. Hiermee lijkt de situatie aan de westzijde van Ameland op kustplaatsen in de Deltakust en Hollandse kust, waar het netto kustlangs transport ook zorgt voor extra nood aan suppleties.

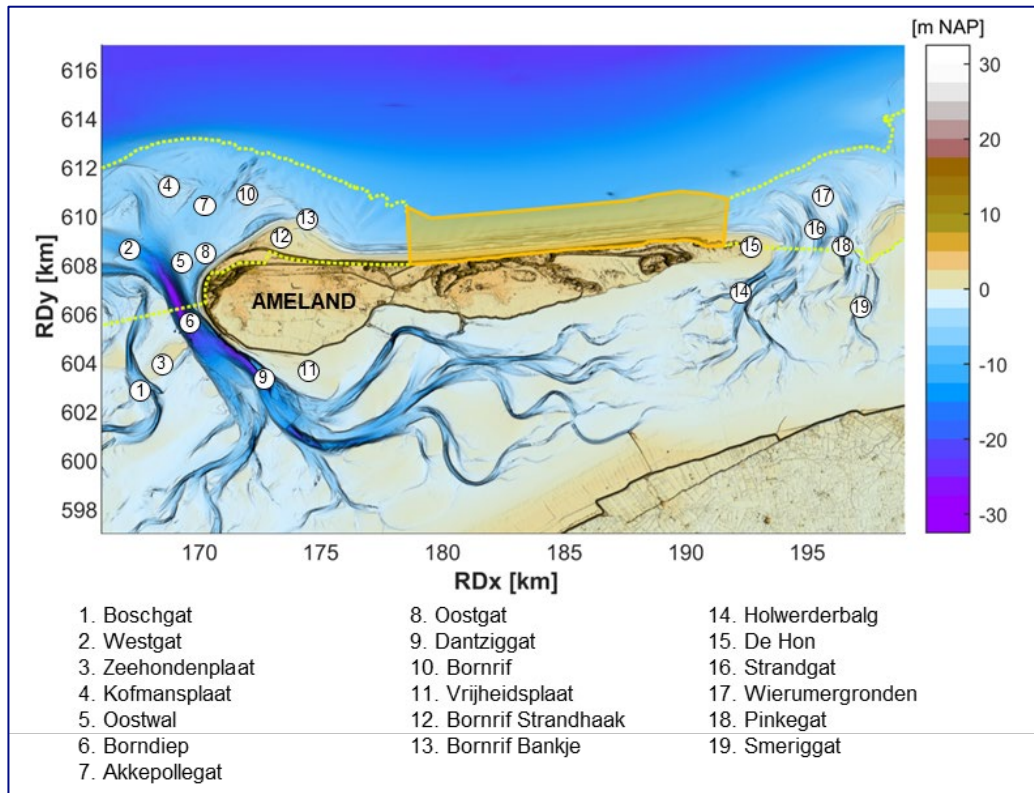
Wat betreft de onzekerheid over de transporten van de actieve zone naar het bekken blijkt uit Bijlage B dat er vooruitgang is geboekt, maar dat een betere aanname in vergelijking met Taal et al. (2023) nog niet mogelijk is. In de secties 6.3 en 6.5 staan berekeningen voor de behoefte aan zand voor suppleties in de komende 15 jaar, waarbij wordt uitgegaan van een hoger percentage slib (37%) in de netto transporten naar de bekken. Voor de langere termijn, bij zichtwaarden van zeespiegelstijging, zijn dergelijke berekeningen nog niet uitgevoerd.

⁷⁷ Merk op dat in dit zeegat de rand zich wel terugtrekt, maar aangestuurd door een geleidelijker proces: het verminderen van de komberging door sedimentatie in het bekken.

5.9 Centrale eilandkust Ameland

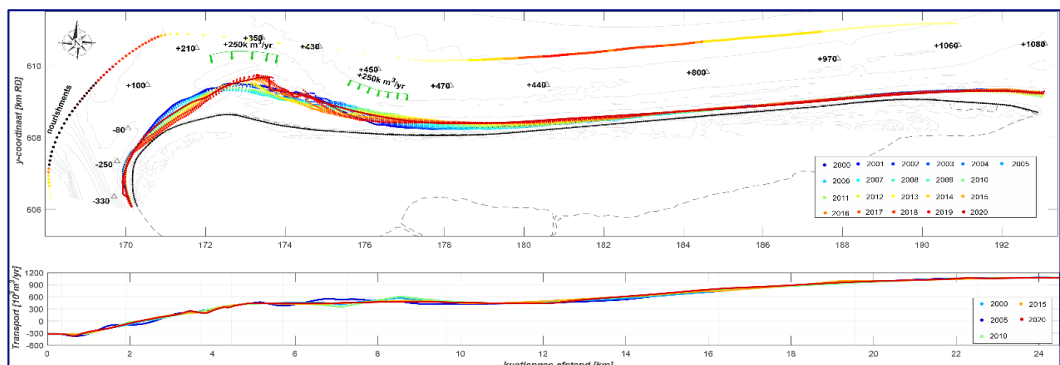
5.9.1 Centrale eilandkust Ameland: begrenzing, gedrag en sedimentbalans

Dit kustvak is begrensd door de raaien 1120 en 2100.



Figuur 5-26: Overzicht en morfologische elementen bij de centrale eilandkust van Ameland, gebaseerd op de meest recente Vakloedingen en AHN4. Het gele vlak is de actieve zone van de centrale eilandkust. De gele stippellijnen omsluiten actieve zones van de zeegaten.

Op de ondiepe vooroever zijn duidelijk brekerbanken waar te nemen. De ontwikkeling daarvan lijkt samen te hangen met het aanleggen van de vooroeversuppleties. De centrale eilandkust van Ameland is namelijk één van de meest gesuppleerde delen van de Nederlandse kust. Het periodiek aanlanden van grote zandvolumes op de noordwestkust (zie 5.8.2) is klaarblijkelijk onvoldoende om de kust van voldoende zand te voorzien. De suppleties hebben sinds 1990 wel geleid tot stabilisatie van deze kustlijn.



Figuur 5-27: Kustlijnpositie en schatting van de langstransporten in de actieve zone van Ameland. De getrokken lijnen in de bovenste figuur geven de ligging van de kustlijn voor alle jaren, de getallen geven de berekende langstransporten. De onderste figuur geeft berekende langstransporten door golven en getij voor verschillende jaren (uit Huisman, 2024).

De behoefte aan suppleties komt in het bijzonder door de grote transporten in oostelijke richting. Huisman (2024) toont aan dat bij km. 12 het transport al 0,5 miljoen m³/jr. bedraagt en dat dit vervolgens groeit tot 1 miljoen m³/jr. langs de eilandstaart (km. 24).

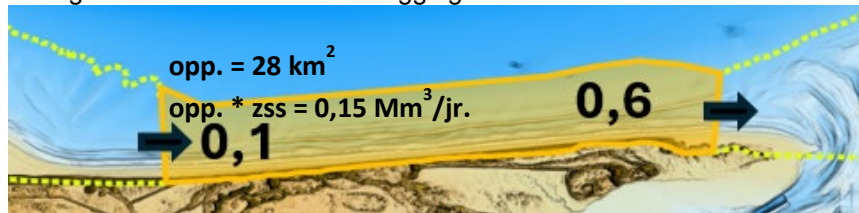
Sedimentbalans

Elias et al. (2024) laten zien dat in alle delen van de actieve zone volumetoename is, in totaal ca. 0,2 miljoen m³/jr. Deze toename is kleiner dan het suppletievolume (0,8 miljoen m³/jr.) en wat vanuit het westen wordt aangevoerd (0,1 miljoen m³/jr.) Zij berekenen dat veel sediment (0,7 miljoen m³/jr.) dus vanuit de actieve zone van de centrale eilandkust naar de actieve buitendelta van het westelijk deel van het Friesche Zeegat (het Pinkegat) verplaatst moet zijn. Dit grote langtransport past bij de resultaten van Huisman (2024) rond raai 2100. Als echter de extra accommodatieruimte door bodemdaling⁷⁸ als gevolg van gaswinning (zie Bijlage C) meegerekend wordt is een langtransport van 0,6 miljoen m³/jr. een betere schatting.

5.9.2

Sediment- en suppletiebehoefte Centrale eilandkust Ameland

De behoefte wordt, cf. de aanpak die in 2.4 uiteen is gezet, hieronder gepresenteerd. Figuur 5-28 geeft het overzicht incl. de ligging van de actieve zone.



Figuur 5-28: Transporten in en uit de actieve zones bij de centrale eilandkust van Ameland, te gebruiken in Tabel 5-15. De getallen zijn aangepast (zie 5.9.1) t.o.v. Elias et al. (2024) en Figuur 5-6.

Behoefte in de komende 15 jaar volgens rekenregel met actieve zone

Tabel 5-15: Behoefte centrale eilandkust Ameland komende 15 jaar volgens denkmodel rekenregel met actieve zone. Getallen zijn in km² of miljoen m³/jr. Oppervlakten zijn cf. Taal et al. (2023), inclusief de erin genomen onzekerheidsmarge. De transporten zijn cf. Elias et al. (2024).

Naam	opp. actieve zone	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoefte
Centrale kust Ameland	28	0,15	0,1	0,6	0,65

Opmerkingen / Toelichting bij bovenstaande tabel:

In plaats van de relatieve zeespiegelstijging van 2,9 mm/jr. is uitgegaan van een hogere waarde, vanwege de bodemdaling door gaswinning, van 5,3 mm/jr.⁷⁹

Historische suppletievolumes

Tabel 5-16: Historische suppletievolumes centrale eilandkust Ameland, als indicatie voor behoefte in de komende 15 jaar, in miljoen m³/jr.

Naam	Periode start	Periode eind	Historisch suppletievolume
Centrale kust Ameland	1990	2023	0,68

⁷⁸ Deze is berekend als 2,26 miljoen m³, wat (35 jaar) gemiddeld 0.065 miljoen m³/jr. is.

⁷⁹ Deze waarde is het gemiddelde over de hele actieve zone en ontleend aan Bijlage C. Het vastgestelde volumeverlies door gaswinning is gedeeld over het hele oppervlak van de actieve zone. Lokaal is de daling dus veel sterker

Advies behoefte per jaar tot ca. 2040

De historische volumes en de berekening met de rekenregel met actieve zone liggen dicht bij elkaar. Het Advies is te kiezen voor de eerste⁸⁰.

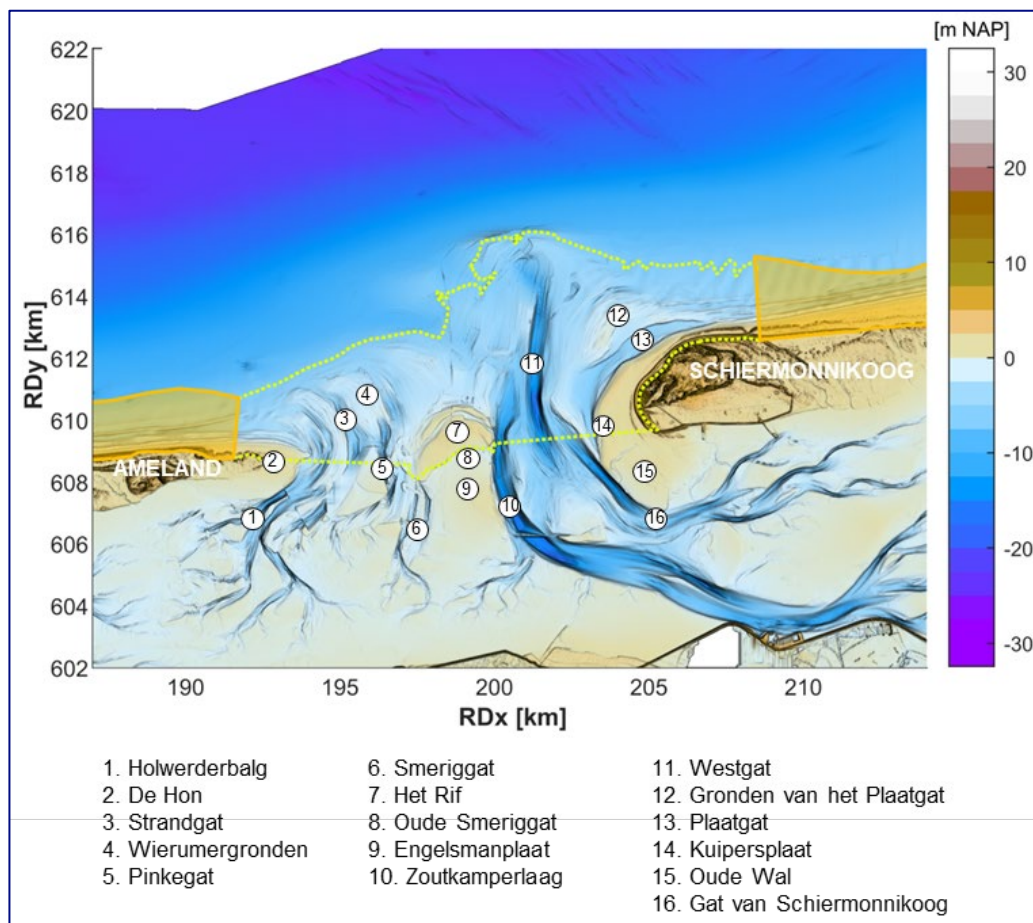
Behoeftelange termijn, bij snellere zeespiegelstijging

De resultaten uit Taal et al. (2023) gelden nog steeds. Er kunnen geen betere schattingen van de oppervlakte actieve zone en/of de transporten uit de actieve zone gegeven worden.

5.10 Friesche Zeegat

5.10.1 Overzicht en gedrag op schaal hele zeegat

Het Friesche Zeegat is een combinatie van twee zeegatsystemen: het Pinkegat aan de westzijde en de Zoutkamperlaag aan de oostzijde. De Engelsmanplaat (waarvan de hoge, zeewaartse rand ook wel Het Rif genoemd wordt) en het onderliggende wantij vormen de scheiding tussen de beide systemen. Pinkegat en Zoutkamperlaag zijn ook de naam van de beide hoofdgeulen van de zeegaten.



Figuur 5-29: Overzicht en genoemde morfologische elementen van het Friesche Zeegat, gebaseerd op de meest recente Vaklodgingen en AHN4. De gele vlakken zijn de actieve zones van de centrale eilandkusten. De gele stippellijn omsluit de actieve zone van het zeegat (actieve buitendelta plus eilandkop- en staart).

⁸⁰ Methodisch lijkt dit ook juist omdat bij de rekenregel een transport 'kustvak uit' is gebruikt cf. de sedimentbalans waarin het volgende is gebeurd: meer 'put' door bodemdaling leidt tot minder transport het kustvak uit. Op deze wijze zal (extra) bodemdaling in de rekenregel nooit tot extra sedimentbehoefte leiden. Bovendien volgt uit Huisman (2024) dat de transporten aan de oostzijde van Ameland wel kunnen oplopen tot 1 miljoen m³/jr. Tenslotte: het feit dat de transporten in Tabel 5-15 zijn op één decimaal geeft een extra argument.

De actieve buitendelta van het Pinkegat bestaat vooral namelijk uit de Wierumergronden, een groot ebschild rond de uitstroom van de geul Pinkegat. In 2021 is die uitstroom verdeeld over meerdere geulen.

De buitendelta van de Zoutkamperlaag is sterk veranderd onder invloed van de afsluiting van de Lauwerszee⁸¹. De Strandhaak, die in 1987 te zien was en die was ontstaan na de afsluiting van de Lauwerszee, is in 2021 geheel verheeld met de eilandkop van Schiermonnikoog. De hoofdgeul Zoutkamperlaag kent in 2021 twee min of meer gescheiden geulen door de keel van het zeegat. Aan de oostzijde van de buitendelta liggen de Gronden van het Plaatgat. Dit is een opeenvolging van ondiepe banken, voormalige ebschilden, die langzaam richting de kust migreren.

Er zijn geen suppleties uitgevoerd in het Friesche Zeegat en langs de kust van Schiermonnikoog.

De deelgebieden in het Friesche Zeegat zijn:

1. de 'actieve buitendelta', besproken in 5.10.2
2. de eilandstaart van Ameland, besproken in 5.10.3
3. de Kop van Schiermonnikoog, besproken in 5.10.4
4. het bekken, niet apart besproken.

5.10.2 Actieve Buitendelta: begrenzing, gedrag en sedimentbalans

Op basis van de analyses in Elias et al. (2024) is de grens tussen het ondiepe en diepe deel van de actieve buitendelta op -6 meter gekozen. De oppervlakte van de actieve buitendelta van het gehele Friesche Zeegat is in Taal et al. (2023) geschat op 79 km².

Dieper dan NAP -6 m is er een aanzienlijke volumeafname. Tussen de NAP -16 m en -8 m bedraagt deze gemiddeld 1,2 miljoen m³/jr., en tussen NAP -8 m en -6 m nog eens 0,2 miljoen m³/jr. De belangrijkste oorzaak van de afname is de afsluiting van de Lauwerszee. Deze afsluiting zorgde ervoor dat de getijdebieten afnamen. Het buitendeltavolume was daardoor te groot en de buitendelta ging zich terugtrekken. Een deel van het overschot aan sediment kwam in de Strandhaak die op Schiermonnikoog aanlandde. Een ander deel zal door langstransport naar de diepe vooroever van Schiermonnikoog zijn gegaan. Tenslotte zal ook een deel van het overschot in het bekken beland zijn.

De actieve buitendelta kent een netto volumetoename, die met name plaatsvindt in de zone tussen NAP -3 en -6 m (+1,9 miljoen m³/jr.). De eilandkusten (boven -1 m NAP) en de vooroever tussen de NAP -1 en -3 m vertonen beide een volumeverlies, respectievelijk 0,1 miljoen m³/jr. (Ameland, de Hon) en 0,4 miljoen m³/jr. (Schiermonnikoog).

Elias et al. (2024) gaan uit van een transport van 1 miljoen m³/jr. van de actieve buitendelta naar de actieve zone van de noordkust van Schiermonnikoog, gebaseerd op de simulaties van Huisman (2024). Zij berekenen een transport van het diepe deel van de vooroever naar het ondiepere deel van 0,65 miljoen m³/jr.

5.10.3 Ameland-staart

Op de staart van Ameland (ook wel de Hon genoemd) zijn geen suppleties uitgevoerd. Voor het berekenen van de historische volumes is voor dit rapport alles aan de centrale eilandkust toegedeeld.⁸² Qua morfologisch gedrag lijkt het erop dat de Hon zich meer heeft teruggetrokken in de fase dat het Pinkegat een meergeulensysteem was. Wanneer het Pinkegat later naar een één-geulensysteem evolueert, verplaatst de Hon zich juist zeewaarts.

⁸¹ De afsluiting van de Lauwerszee in 1969 verkleinde het bekkenoppervlak met ongeveer 30%, waardoor het getijprisma afnam van 306 miljoen m³ naar 200 miljoen m³ (Oost, 1995; Wang, 2007).

⁸² In 2019/2020 is tot aan raai 2300 gesuppleerd

Er moet rekening worden gehouden met het feit dat bodemdaling door b.v. gaswinning in Elias et al, 2024 niet is meegenomen. Voor de meeste vakken kan dit vrijwel zeker als een verwaarloosbare factor in de sedimentbalans worden beschouwd, maar voor het oosten van Ameland is dat wellicht niet het geval.

In Vermeer et al. (2023) is geschat dat, als de gemiddelde zakking van de Hon 0,20 m is, gaat dit bij een totaaloppervlakte van 3,1 km² om 0,62 miljoen m³ volumeafname door de zakking van de ondergrond. Dit geeft over de periodes waarover de trends zijn bepaald (34 jaar) een 'fout' in de jaarlijkse volumes die binnen de onzekerheden valt (0,02 miljoen m³/jr.) Voor de doelen van dit rapport is dit acceptabel.

5.10.4 Kop Schiermonnikoog

Schiermonnikoog kende de laatste decennia vooral groei. Wel wisselen perioden van wel of geen aangroei op de eilandkop elkaar af. Sinds 2006 nemen de volumes af in het zuidwestelijke deel van de eilandkop.

Tot nu toe hebben op heel Schiermonnikoog geen zandsuppleties plaatsgevonden. Dit is ook te danken aan de vrij zeewaartse positie van de BKL vanaf de duinvoet (veelal honderden meters zeewaarts), waardoor beperkte overschrijding kan worden toegestaan. Recentelijk vindt bij raai 440-540 erosie van de kustlijn opgetreden doordat een zandplaat het kuststelsel binnendringt en richting de kust migreert, waardoor de geul Plaatgat de kust in wordt gedrukt. De verwachting is dat deze erosie op termijn zal overgaan in natuurlijke aanzanding door verheling van de zandplaat met de kust, maar het is onzeker of dit op termijn van enkele jaren al zal gebeuren.

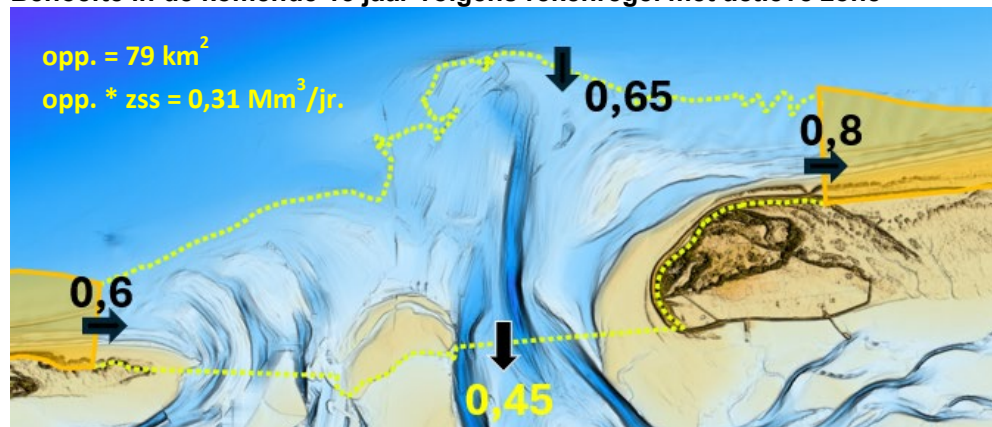
De grens tussen 'kop' en 'Noordkust Schiermonnikoog' kan ergens tussen raaien 520 (richting raaien) en 720 (grens in Elias et al, 2024 en in Figuur 5-30) getrokken worden. Dit maakt voor de beschouwingen in dit rapport niet uit.

De langstransporten vertonen een tweedeling in richting. Aan de westzijde van het eiland (van raai 100, de grens met het bekken, tot raai 200) zijn de transporten zuidelijk gericht (het bekken in). Ten noorden / oosten daarvan zijn de transporten oostelijk gericht.

5.10.5 Sediment- en suppletiebehoefte van het Zeegatsysteem

De behoefte wordt, cf. de aanpak die in 2.4 uiteen is gezet, hieronder gepresenteerd. Figuur 5-30 geeft het overzicht incl. de ligging van de actieve zone.

Behoefte in de komende 15 jaar volgens rekenregel met actieve zone



Figuur 5-30: Transporten in en uit de actieve zones bij het Friesche Zeegat, als gebruikt in Tabel 5-17. De getallen zijn aangepast (zie 5.9.1) t.o.v. Elias et al. (2024) en Figuur 5-6.

Tabel 5-17: Behoeft e Friesche Zeegat komende 15 jaar volgens denkmodel rekenregel met actieve zone. De getallen zijn in km² of miljoen m³/jr. Oppervlakte is cf. Taal et al. (2023). Transporten zijn cf. Elias et al. (2024).

Naam	opp. actieve zone	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoeft e
Ameland-staart	79	0,31	1,25	1,25	0,31
Schiermonnikoog kop					
Rest actieve buitendelta					
TOTAAL	79	0,31	1,25	1,25	0,31

Opmerkingen / Toelichting bij bovenstaande tabel:

In plaats van de relatieve zeespiegelstijging van 2,9 mm/jr. is hier uitgegaan van een hogere waarde, vanwege de bodemdaling door gaswinning, van 4 mm/jr.⁸³

Historische suppletievolumes

Tabel 5-18: Historische suppletievolumes Friesche Zeegat, als indicatie voor behoeft e in de komende 15 jaar, in miljoen m³/jr.

Naam	Periode start	Periode eind	Historisch suppletievolume
Ameland-staart	1990	2023	0
Schiermonnikoog kop	1990	2023	0
TOTAAL			0

Advies behoeft e per jaar tot ca. 2040

Dit is één van de weinige actieve zones waarvoor wèl een behoeft e berekend wordt met de rekenregel, maar waar niet gesuppleerd is. Ook geldt dat er aan de oostzijde van Ameland extra accommodatieruimte is door de bodemdaling vanwege gaswinning. Het lijkt erop dat deze nu effectief wordt ingevuld vanuit de grote kustlangse transporten langs Ameland. De bodemdaling heeft daardoor geen effect op de ontwikkeling van de buitendelta's. Ook speelt ongetwijfeld mee dat het Friesche Zeegat een combinatie van twee zeegatsystemen is. Daarnaast was er in de afgelopen decennia meer zand beschikbaar in het zeegatsysteem Zoutkamperlaag om aan te landen op Schiermonnikoog. Dit kwam door het krimpen van de buitendelta na het afsluiten van de Lauwerszee.

Ervan uitgaand dat de (beide) actieve buitendelta(s) volledig sedimentdelend zijn met de onderdelen ervan (dus ook de eilandstaart van Ameland en de kop van Schiermonnikoog), is het advies **uit te gaan van 0,31 miljoen m³/jr.**

Behoeft e lange termijn, bij snellere zeespiegelstijging

In Tabel 5-17 is voor de oppervlakte van de actieve zone dezelfde gebruikt als in Taal et al. (2023). Aanpassen / verbeteren van die inschatting lijkt nu niet nodig omdat er bij de inschatting van Taal et al. (2023) op expertoordeel de zeevaartse grens van de actieve buitendelta al op de zich terugtrekkende rand was gelegd.

Ten aanzien van de onzekerheid over de transporten van de actieve zone naar het bekken, blijkt uit Bijlage B dat er vooruitgang is gemaakt, maar dat niet met vertrouwen al een betere aanname is te doen in vergelijking met Taal et al. (2023). In de secties 6.3 en 6.5 staan berekeningen voor de behoeft e aan zand voor suppleties in de komende 15 jaar als de netto transporten naar de bekkens voor een hoger percentage (37%) uit slib bestaan. Voor de langere termijn, bij zichtwaarden van zeespiegelstijging, is dat nog niet gedaan.

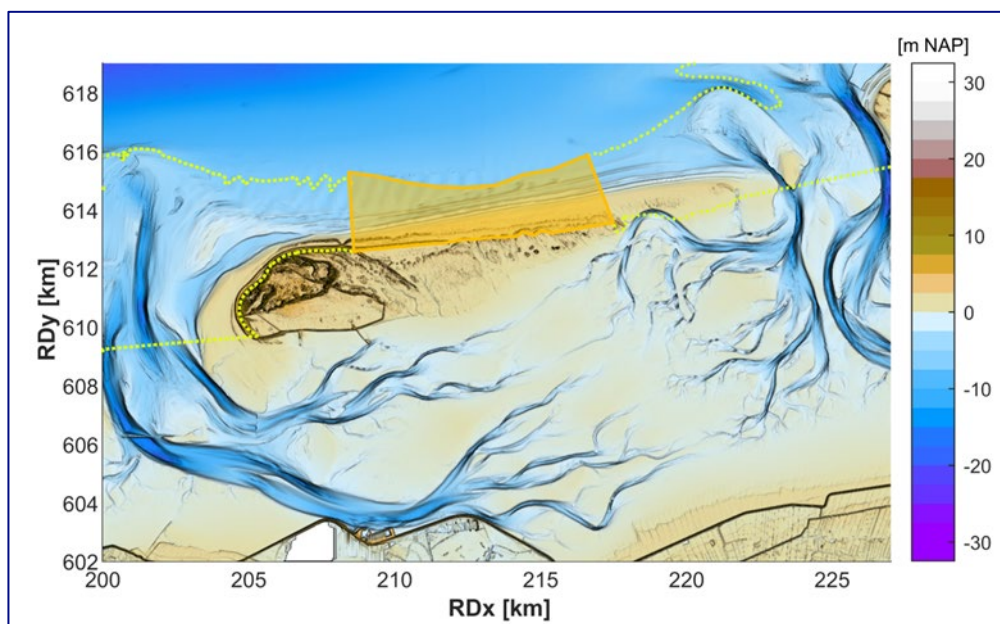
⁸³ Deze waarde is het gemiddelde over de hele actieve zone en ontleend aan Bijlage C. Het vastgestelde volumeverlies door gaswinning is gedeeld over het hele oppervlak van de actieve zone. Lokaal is de daling dus veel sterker

5.11 Noordkust Schiermonnikoog, Groninger wad en Eems-Dollard

5.11.1 Noordkust Schiermonnikoog: begrenzing, gedrag en sedimentbalans

De noordkust omvat een deel centrale eilandkust (ca. raaien 720 – 1040) en feitelijk de gehele eilandstaart.⁸⁴ In 5.10.4 zijn al algemene kenmerken van de kust van Schiermonnikoog benoemd. De aangelande strandhaak heeft vertraagd invloed op de mate van uitbouw en terugtrekking van deze kust. Het zand doet er een tijd over oostwaarts te verplaatsten. Na de uitbouw volgt logischerwijs een terugtrekking, die rond 2020 halverwege het eiland te situeren was (bijv. raai 1200).

Merk op dat ook vóór de aanlanding van de strandhaak er grote transporten kustlangs waren, vanaf de eroderende buitendelta naar het oosten, waardoor het strand van Schiermonnikoog breder werd en de oostpunt uitbouwde.



Figuur 5-31: Overzicht bij de centrale eilandkust van Schiermonnikoog, gebaseerd op de meest recente Vaklodgingen en AHN4. Het gele vlak is de actieve zone van de centrale eilandkust. De gele stippellijnen omsluiten actieve zones van de zeegaten.

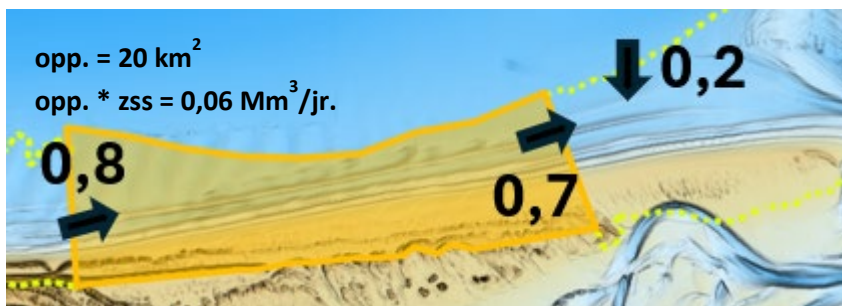
Langs de hele noordkust zijn de transporten oostelijk gericht. Ze hebben een maximum rond raai 800 (van zo'n 0,6 miljoen m³/jr.). Ze nemen daarna oostwaarts af tot ongeveer 0,25 miljoen m³/jr. langs de eilandstaart richting het Groninger wad.

Elias et al. (2024) rapporteren een volumetoename van 1,0 miljoen m³/jr. voor de gehele noordkust van Schiermonnikoog. Het grootste deel van deze toename (0,9 miljoen m³/jr.) vindt plaats op de eilandstaart, zichtbaar in de oostwaartse verlenging ervan. De ondiepe vooroever van het centrale deel van het eiland behoudt gemiddeld een constant volume.

5.11.2 Sediment- en suppletiebehoefte Noordkust Schiermonnikoog

De behoefte wordt, cf. de aanpak die in 2.4 uiteen is gezet, hieronder gepresenteerd. Figuur 5-32 geeft het overzicht incl. de ligging van de actieve zone.

⁸⁴ Hoewel strikt genomen het oostelijkst deel van de eilandstaart aan de eerste buitendelta van het Groninger Wad kan worden toebedeeld. Voor dit rapport is deze keuze niet van belang / van invloed.



Figuur 5-32: Transporten in en uit de actieve zones bij de centrale eilandkust van Schiermonnikoog, als gebruikt in Tabel 5-19. De getallen zijn aangepast (zie 5.9.1) t.o.v. Elias et al. (2024) en Figuur 5-6.⁸⁵.

Tabel 5-19: Behoeftte centrale kust Schiermonnikoog komende 15 jaar volgens denkmodel rekenregel met actieve zone. Getallen zijn in km² of miljoen m³/jr. Oppervlakten zijn cf. Taal et al. (2023), inclusief de erin genomen onzekerheidsmarge. De transporten zijn cf. Elias et al. (2024).

Naam	opp. actieve zone	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoeftte
Centrale kust Schiermonnikoog	20	0,06	0,8	0,7	0,00

Historische suppletievolumes

Tabel 5-20: Historische suppletievolumes kust Schiermonnikoog, als indicatie voor behoefte in de komende 15 jaar, in miljoen m³/jr.

Naam	Periode start	Periode eind	Historisch suppletievolume
Centrale kust Schiermonnikoog	1990	2023	0

Advies behoefte per jaar tot ca. 2040

Het lijkt vrijwel uitgesloten dat hier een behoefte aan suppleties of sediment zal zijn in de komende 15 jaar.

Behoeftte lange termijn, bij snellere zeespiegelstijging

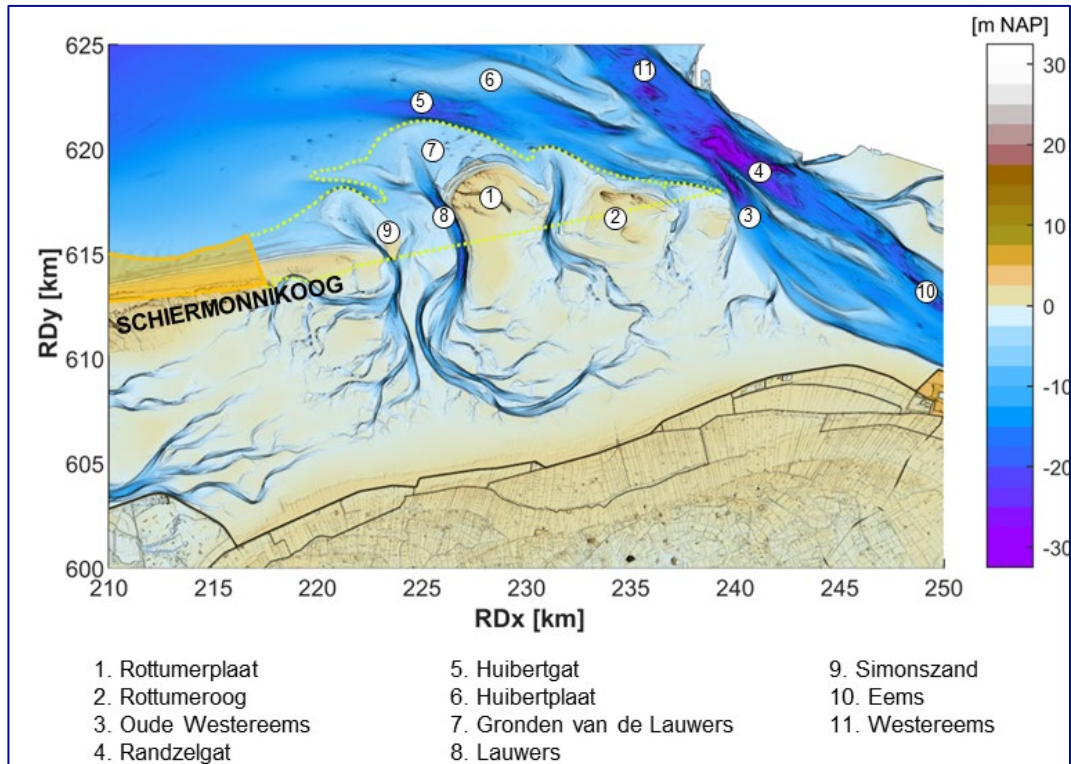
De resultaten uit Taal et al. (2023) gelden nog steeds. Er kunnen geen betere schattingen van de oppervlakte actieve zone en/of de transporten uit de actieve zone gegeven worden.

5.11.3 Groninger wad Buitendelta's: begrenzing, gedrag en sedimentbalans

Begrenzing en morfologische ontwikkeling

Ten oosten van Schiermonnikoog liggen vier kleinere zeegaten met in elkaar overlopende bekkens en buitendelta's. De eerste twee liggen tussen de eilandstaart van Schiermonnikoog en de Rottumerplaat en hebben als hoofdgeulen Eilanderbalg en Lauwers. Dat deel is zeer dynamisch en er vormen zich kleinschalige geulen en banken (Elias et al., 2021). De Eilanderbalg schoof in de afgelopen dertig jaar bijvoorbeeld zo'n 3,3 km naar het oosten terwijl de Lauwers vrij stabiel lag. Dat deed het tussenliggende bankencomplex sterk in breedte afnemen. Tussen Rottumerplaat en Rottumeroog ligt het zeegat van het Schild en ten oosten ligt nog de geul Sparregat. In Elias et al. (2021) staan de veranderingen rondom Rottumerplaat en Rottumeroog uitvoerig beschreven.

⁸⁵ In Elias et al. (2024) staat voor 'langtransport uit' 0,9 miljoen m³/jr. Dit is aangepast cf. Bijlage D. Om de sedimentbalans te sluiten is er meer transport vanuit diepe vooroever naar de eilandstaart nodig à 0.2 miljoen m³/jr.



Figuur 5-33: Overzicht en genoemde morfologische elementen de buitendelta's van het Groninger wad, gebaseerd op de meest recente Vaklodingen en AHN4. Het gele vlak is de actieve zone bij Schiermonnikoog. De gele stippellijn omsluit de actieve zone van de zeegaten.

Sedimentbalans

In Elias et al. (2024), die veel nieuwe kennis (sinds Kustgenese 2.0) over de evolutie van het bekken en het Eems-estuarium bevat, wordt beschreven hoe de diepe vooroever een sterke, continue afname in volume heeft met een trendwaarde van $-3,1$ miljoen $\text{m}^3/\text{jr.}$, wat gemiddeld over het hele gebied bijna 1 m extra diepte betekent. Die volumeafname lijkt een indicatie te zijn dat de Eemsmonding zich landwaarts terugtrekt. Een groot volumeverlies treedt op in de Westereems, waar de geul sterk is verdiept (tussen 1,5 en 2 meter). Een ander deel van de Eemsmonding met volumeafname is het centrale deel van het Huibertgat. De erosie in deze beide geulen wordt ruimschoots gecompenseerd door de sterke volumetoename in andere delen van de monding.

Voor de actieve buitendelta's bij het Groninger wad en het deel van de eilanden samen berekenen Elias et al. (2024) een gemiddelde volumetoename van $0,25$ miljoen $\text{m}^3/\text{jr.}$ Daarnaast berekenen ze een volumetoename van $0,6$ miljoen $\text{m}^3/\text{jr.}$ in de bekkens van het Groninger wad. Dit, samen met het terugtrekken van de buitendelta's leidt tot een transport van de diepe vooroever naar de actieve buitendelta's van $0,65$ miljoen $\text{m}^3/\text{jr.}$

Elias et al. (2024) komen uiteindelijk op een netto toename van $0,3$ miljoen $\text{m}^3/\text{jr.}$ voor de Eemsmonding en een import naar het Eems estuarium van $3,5$ miljoen $\text{m}^3/\text{jr.}$ De import naar het Eems estuarium is zeer waarschijnlijk nog groter geweest omdat ook bodemdaling, baggeren en verspreiden⁸⁶ van sediment en invang in kwelders een rol spelen.

Als dit wordt vergeleken met de aannamen die zijn gedaan in Taal et al. (2023) dan blijkt dat een verbeterd denkmodel gebruikt is. Het is met name (i) het netto transport naar en van de eilandstaart van Schiermonnikoog die beter bekend is ($0,7$ miljoen $\text{m}^3/\text{jr.}$ in plaats van de eerder veronderstelde $1,2$ miljoen $\text{m}^3/\text{jr.}$ en (ii) het inzicht dat er door de terugtrekkende

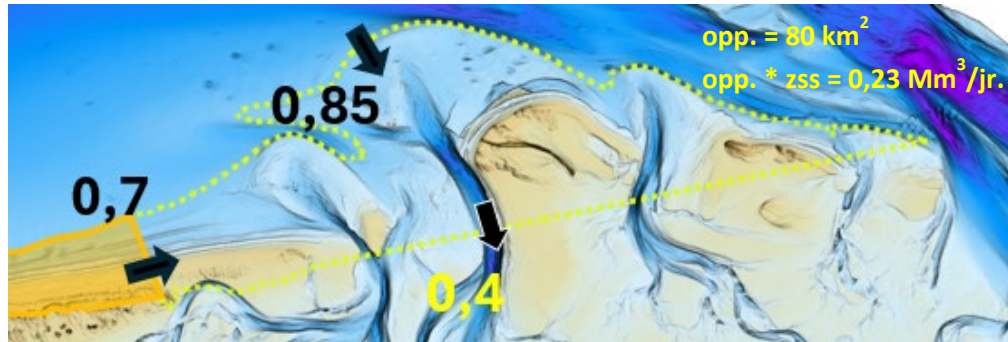
⁸⁶ Baggeren en storten zorgt voor grote bruto volumeveranderingen, maar het nettoverschil is klein

buitendelta's momenteel netto transport vanaf dieper water naar de actieve zone is. In Figuur 5-35 zijn de getallen die voor de komende 15 jaar gebruikt kunnen worden samengevat. De actieve buitendelta's zijn duidelijk een put van sediment geweest, mede door het terugtrekken van de randen ervan. Op basis hiervan kan aangenomen worden dat er geen behoefte aan suppleties nodig zal zijn in de komende decennia.

Voor de Eems-Dollard wordt geen sediment- of suppletiebehoefte berekend. Daarom wordt volstaan met wat hiervoor is opgenomen ten aanzien van de netto transporten en de verwijzingen naar de belangrijkste literatuur: Elias et al. (2021).

5.11.4 Sediment- en suppletiebehoefte

De behoefte wordt, cf. de aanpak die in 2.4 uiteen is gezet, hieronder gepresenteerd. Figuur 5-34 geeft het overzicht incl. de ligging van de actieve zone.



Figuur 5-34: Transporten in en uit de actieve zones bij het Groninger wad, als gebruikt in Tabel 5-21. De getallen zijn cf. Elias et al. (2024) en Figuur 5-6.

Behoefte in de komende 15 jaar volgens rekenregel met actieve zone

Tabel 5-21: Behoefte Groninger wad komende 15 jaar volgens denkmodel rekenregel met actieve zone. De getallen zijn in km^2 of miljoen m^3/jr . Oppervlakte is cf. Taal et al. (2023). Transporten zijn cf. Elias et al. (2024).

Naam	opp. actieve zone	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoefte
Groninger wad (incl. staart Schier)	80	0,23	1,55	0,4	0

Historische suppletievolumes

Tabel 5-22: Historische suppletievolumes Groninger wad, als indicatie voor behoefte in de komende 15 jaar, in miljoen m^3/jr .

Naam	Periode start	Periode eind	Historisch suppletievolume
n.v.t.	-	-	-
TOTAAL	-	-	-

Advies behoefte per jaar tot ca. 2040

Het lijkt vrijwel uitgesloten dat er een behoefte aan suppleties is in de komende 15 jaar.

Behoefte lange termijn, bij snellere zeespiegelstijging

In Tabel 5-21 is voor de oppervlakte van de actieve zone dezelfde gebruikt als in Taal et al. (2023). Aanpassen / verbeteren van die inschatting lijkt nu niet nodig. Ten aanzien van de onzekerheid over de transporten van de actieve zone(s) naar de bekkens, blijkt uit Bijlage B dat er vooruitgang is gemaakt, maar dat niet met vertrouwen al een betere aanname is te doen in vergelijking met Taal et al. (2023). Het valt op dat de huidige import vanuit de actieve zone naar het Groninger wad (0,4 miljoen m^3/jr .) veel kleiner is dan de bandbreedte die wordt gegeven hiervoor in Taal et al. (2023): 1,3 tot 6,2 miljoen m^3/jr .

5.12 Synthese sediment- en suppletiebehoefte hele Waddenkust

Behoefte in de komende 15 jaar volgens rekenregel met actieve zone

Tabel 5-23: Behoefte hele Waddenkust komende 15 jaar volgens denkmodel rekenregel met actieve zone. De getallen zijn in km² of miljoen m³/jr. Voor onderbouwing zie de desbetreffende secties.

Naam	opp. actieve zone	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoefte
Zeegat van Texel	144	0,42	0,55	1,45	1,32
Centrale eilandkust Texel	31	0,09	0,2	0,8	0,69
Eierlandse Gat	43,5	0,13	1,1	1,05	0,08
Centrale eilandkust Vlieland	7	0,02	1,05	0,95	0
Zeegat van het Vlie	87	0,25	0,95	1,7*	1,00
Centrale eilandkust Terschelling	23	0,07	0,3*	1,1	0,87
Zeegat van Ameland	94	0,28	1,8	1,3	0
Centrale eilandkust Ameland	28	0,15	0,1	0,6	0,65
Frische Zeegat	79	0,31	1,25	1,25	0,31
Noordkust en oostelijk van Schiermonnikoog	Niet meenemen				
TOTAAL	536,5	1,75	**	**	4,91***

* Deze getallen corresponderen met elkaar, zie de uitleg in 5.6.5 en 5.7.2.

** Het is niet juist transporten over de actieve zones op te tellen. Dat zou suggereren dat een netto transport in een specifieke actieve zone een netto transport uit een andere kan compenseren. De opgetelde behoeften kloppen wel

*** De afrondingen zorgen dat de som 4,91 is en niet 4,92.

Behoefte in de komende 15 jaar volgens rekenregel met rekenkundig kustfundament

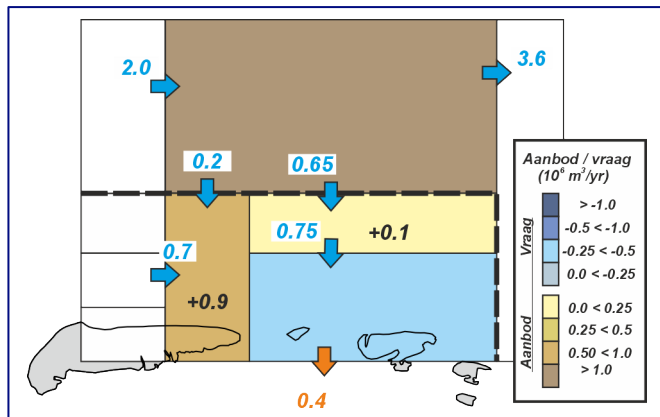
Tabel 5-24: Behoefte hele Waddenkust komende 15 jaar volgens denkmodel rekenregel met de grenzen van het rekenkundig kustfundament als in Kustgenese 2.0. De getallen zijn in km² of miljoen m³/jr.

Naam	opp.	opp. * zss	Transport in	Transport uit	Behoefte
Zeegat van Texel	183	0,5		1,25	
Centrale eilandkust Texel	96	0,3			
Eierlandse Gat	92	0,3		-0,3	
Centrale eilandkust Vlieland	30	0,1			
Zeegat van het Vlie	205	0,6		14	
Centrale eilandkust Terschelling	52	0,2			
Zeegat van Ameland	142	0,4		1,2	
Centrale eilandkust Ameland	68	0,2			
Frische Zeegat	173	0,5		0,45	
Noordkust en oostelijk van Schiermonnikoog	329	1,0		*	
TOTAAL (cf. Rijkswaterstaat, 2020), maar met zss = 2,9 mm/jr.**	1435⁸⁷	4,2	-	6 *	10,2

⁸⁷ Dit is geen optelling van de getallen erboven. Dit totaal is regelrecht overgenomen uit Rijkswaterstaat (2020). De getallen per zeegat zijn cf. de polygonen in Figuur 2-10. Som daarvan is 1371 km². Met zeespiegelstijging = 2,9 mm betekent dit een behoefte veroorzaakt door zeespiegelstijging van 4,0 miljoen m³/jr.

* Voor het totale transport uit het rekenkundig kustfundament liggen drie varianten voor: In Rijkswaterstaat (2020) is een totaal van 6 miljoen m³/jr. (+/- 1,7 miljoen m³/jr.) voor de gehele Waddenkust gebruikt (dit is in Tabel 5-24 overgenomen). Hierin is een netto transport naar Eems en/of oostwaarts ervan à 1,2 miljoen m³/jr. aangenomen (+/- 1,2 miljoen m³/jr.). Een tweede variant is de berekening van Elias et al. (2024) voor de transporten naar de bekkens over te nemen. Dat geeft voor de gehele Waddenkust 8,2 miljoen m³/jr. De derde variant is wel de berekening van Elias et al. (2024) te gebruiken, maar de berekende transporten naar Eems en/of oostwaarts ervan die niet vanuit de actieve zone plaatsvinden uit te sluiten, zoals Figuur 5-35 laat zien. Dat leidt tot 5,75 miljoen m³/jr.⁸⁸

**In het licht van de grote oppervlakte van het rekenkundig kustfundament is correctie voor de bodemdaling onder Ameland en Friesche Zeegat in deze tabel achterwege gelaten. Als dit wel als correctie op de berekening wordt ingebracht dan levert dit (Bijlage D) een extra sedimentbehoefte van 0,2 miljoen m³/jr. Voor de eindconclusies van dit rapport zal dit geen verschil maken.



Figuur 5-35: Transporten tussen de vakken bij het Groninger wad: een correctie op Figuur 5-7 in dienst van de berekeningen van de sedimentbehoefte met de rekenregel en rekenkundig kustfundament.

Historische suppletievolumes

Tabel 5-25: Historische suppletievolumes hele Waddenkust, als indicatie voor behoefte in de komende 15 jaar, in miljoen m³/jr.

Naam	Historisch suppletievolume
Zeegat van Texel	0,96
Centrale eilandkust Texel	1,26
Eierlandse Gat	0
Centrale eilandkust Vlieland	0,05
Zeegat van het Vlie	0,30
Centrale eilandkust Terschelling	0,06
Zeegat van Ameland	0,63
Centrale eilandkust Ameland	0,68
Friesche Zeegat	0
Noordkust en oostelijk van Schiermonnikoog	n.v.t.
TOTAAL	3,94

⁸⁸ Toelichting: Het transport naar de Eems gebeurt volgens Elias et al. (2024) vanuit de diepe vooroever voor het Groninger Wad. Deze 3,8 miljoen m³/jr. wordt deels gevoed vanuit het rekenkundig kustfundament zeewaarts van Schiermonnikoog en het Friesche Zeegat (2 miljoen m³/jr.). Deze moet er dus weer bij opgeteld worden: tussenresultaat voor de gehele Waddenkust 8,2 - 3,8 + 2 miljoen m³/jr.). Echter: de diepe vooroever levert ook nog aan de actieve buitendelta van het Groninger Wad: 0,65 miljoen m³/jr. (zie detail uit Elias et al., 2024). Eindresultaat voor de gehele Waddenkust is 8,2 - 3,8 + 2 - 0,65 = 5,75 miljoen m³/jr.

Advies behoefte per jaar tot ca. 2040

In de voorgaande secties is per kustvak uiteengezet wat het Advies voor de behoefte in de komende 15 jaar is. Vaak bleek de beste aanname te verkrijgen door te redeneren vanuit wat gemiddeld historisch is aangebracht, maar soms is beargumenteerd dat het beter is uit te gaan van de rekenregel met actieve zone. Hieronder is dit samengevat.

Tabel 5-26: Advies behoefte hele Waddenkust per jaar tot ca. 2040, in miljoen m³/jr.

Naam	Behoefte
Zeegat van Texel	1,32
Centrale eilandkust Texel	1,26
Eierlandse Gat	0,08
Centrale eilandkust Vlieland	0,05
Zeegat van het Vlie	0,30
Centrale eilandkust Terschelling	0,20
Zeegat van Ameland	0,63
Centrale eilandkust Ameland	0,68
Friesche Zeegat	0,31
Noordkust en oostelijk van Schiermonnikoog	n.v.t.
TOTAAL	4,83

6 Sediment- / suppletiebehoefte komende 15 jaar

6.1 Inleiding op de gepresenteerde waarden

In de onderstaande secties worden de getallen overgenomen en samengevat die in de voorgaande hoofdstukken en specifiek de secties met de synthese (3.6, 4.3.5 en 5.12), zijn gepresenteerd. Allereerst (6.2 en 6.3) worden de methoden samengevat die zijn gebaseerd op een rekenregel voor sedimentbehoefte. Zoals in 2.2 uitgelegd, zijn de uitkomsten de som van de sedimentbehoefte als gevolg van extra accommodatieruimte door zeespiegelstijging (volume per jaar = oppervlakte * stijgsnelheid) en de netto transporten in / uit het gebied.

In 6.2 wordt deze rekenregel toegepast op het rekenkundig kustfundament, conform Rijkswaterstaat (2020). Hierin is aangenomen dat binnen het rekenkundig kustfundament een zodanige verdeling van sediment plaatsvindt dat dit als geheel 'behoud van sediment' moet hebben om de strategische doelen van het kustbeleid op lange termijn te bereiken (zie 1.2.1).

Van der Spek (2025) en Elias et al. (2024) laten zien dat er weinig kustdwarse uitwisseling is tussen diepe en ondiepe vooroever en dat op de diepe vooroever grote kustlangse en zelfs zeewaartse transporten zijn. Dat betekent dat er weinig netto transport in kustdwarse richting naar de ondiepe vooroever gaat. Dit suggereert dat voor een veel kleiner deel dan het rekenkundig kustfundament 'behoud van sediment' moet gelden om de strategische doelen te bereiken. In Taal et al. (2023) is voor het eerst gesteld dat dit de 'actieve zone' is, waarin de suppleties zich grotendeels verspreiden.

In 6.3 staan de resultaten voor de rekenregel bij toepassing op de actieve zone(s). De totale omvang van dit areaal is veel kleiner dan het rekenkundig kustfundament. Dit is de belangrijkste reden dat een veel lagere behoefte is berekend (ondanks dat er soms meer rekening gehouden moest worden met transporten uit het areaal).

Voor beide toepassingen van de rekenregel (dus 6.2 en 6.3) voor de behoefte aan zand (in plaats van sediment in brede zin) geldt dat een deel van de bodemveranderingen in de Waddenzee met slib gebeuren. Als dat zonder correctie wordt vertaald in transporten van zand vanuit de kustzone naar de bekkens in de Waddenzee geeft dat een fout. In zowel Rijkswaterstaat (2020) als Elias et al. (2024) is aangenomen dat het verschil tussen bodemopnames in de Waddenzee voor 8% is veroorzaakt door netto sedimentatie van slib. Daarom is bewust gekozen voor de lage kant van de marge die Oost (1995) geeft. De bovengrens die hij aangeeft is 37%. Als met de bovengrens de transporten van zand uit het rekenkundig kustfundament of de actieve zones worden uitgevoerd, leidt dit tot een lagere uitkomst voor de behoefte aan zand in de kustzone. Meer specifiek verandert de berekende behoefte door transport naar de bekkens (zie Figuur 5-6 en Figuur 5-7) van 4,7 miljoen m³/jr.⁸⁹ naar 3,2 miljoen m³/jr. in totaal.⁹⁰

De derde methode (6.4) gaat niet uit van een rekenregel, maar van historische suppletie-volumes. Hierbij zijn diverse afwijkingen per kustvak inbegrepen, zoals de extra noodzaak tot suppleren bij uitgebouwde kustplaatsen en geulen die dicht bij het strand liggen.

⁸⁹ Omdat het Eierlandse Gat een exporterend bekken is, is dit hierin niet meegenomen

⁹⁰ Onderbouwing: Zeegat Texel wordt 0,86 i.p.v. 1,25; Zeegat Vlie wordt 0,96 i.p.v. 1,4; Amelander Zeegat wordt 0,82 i.p.v. 1,2; Friesche Zeegat wordt 0,31 i.p.v. 0,45; Groninger Wad wordt 0,27 i.p.v. 0,4 miljoen m³/jr. Voor de transporten naar de Eems en het Eierlandse Gat (exporterend) is hierbij geen correctie doorgevoerd.

In 6.5 worden, gegeven de kennis in dit rapport, de geadviseerde waarden voor de komende 15 jaar gegeven. Ook deze getallen zijn overgenomen uit 3.6, 4.3.5 en 5.12. Er is een zeespiegelstijging van 2,9 mm/jr. gebruikt. Uitgebreidere uitleg van de aanpak staat in 2.4.

6.2 Sedimentbehoefte cf. rekenregel met rekenkundig kustfundament

Tabel 6-1: Behoeft van de Nederlandse kust volgens denkmodel rekenregel met het rekenkundig kustfundament. De getallen zijn in miljoen m³/jr. Voor onderbouwing zie secties 3.6, 4.3.5, 5.12 en Rijkswaterstaat (2020). Merk op dat de zeespiegelstijging in de laatste 30 jaar 2,9 mm/jr. is. Rijkswaterstaat (2020) gaat uit van 1,86 mm/jr.

Naam	Behoeft
Deltakust	5,4
Hollandse kust	2,0
Waddenkust	10,2
TOTAAL	17,6⁹¹

Bij toepassing van 37% slib in de transporten naar de bekkens van de Waddenzee verandert de berekende behoeft van de Waddenkust naar 8,7 miljoen m³/jr. en de totale behoeft naar 16,1 miljoen m³/jr.

6.3 Sedimentbehoefte cf. rekenregel met concept 'actieve zone'

Tabel 6-2: Behoeft van de Nederlandse kust in de komende 15 jaar volgens denkmodel rekenregel met actieve zone. De getallen zijn in miljoen m³/jr. Voor onderbouwing zie secties 3.6, 4.3.5 en 5.12.

Naam	Behoeft
Deltakust	2,3-2,8
Hollandse kust	1,3
Waddenkust	4,9
TOTAAL	8,5 - 9,0

Bij toepassing van 37% slib in de transporten naar de bekkens van de Waddenzee verandert de berekende behoeft van de Waddenkust met deze rekenregel naar 3,9 miljoen m³/jr.⁹² en de totale behoeft naar 7,5 - 8,0 miljoen m³/jr.

6.4 Historische suppletievolumes

Tabel 6-3: Suppletiebehoeft Nederlandse kust in de komende 15 jaar met de historische suppletievolumes als uitgangspunt. De getallen zijn in miljoen m³/jr. Voor onderbouwing zie secties 3.6, 4.3.5 en 5.12.

Naam	Behoeft
Deltakust	3,0
Hollandse kust	3,3
Waddenkust	3,9
TOTAAL	10,2

⁹¹ Dit is het totale rekenkundig kustfundament cf. Rijkswaterstaat (2020). Met de oppervlaktes van Figuur 2-10 zijn de behoeften per deelsysteem respectievelijk 5,3 + 1,8 + 10 miljoen m³/jr. en het totaal 17,1 miljoen m³/jr.

⁹² Deze correctie is minder groot dan bij het rekenkundig kustfundament omdat bij gebruik van deze methode het Amelanders Zeegat en het Groninger Wad geen behoeft aan sediment hebben (zie Figuur 5-25 en Figuur 5-34)

6.5 Advies voor de behoefte komende 15 jaar

In Tabel 6-4 en Tabel 6-5 staan de geadviseerde waarden voor de sediment- en/of suppletiebehoefte van de Nederlandse kust. Het verschil tussen beide tabellen is de aanname van de hoeveelheid slib die deel uitmaakt van het netto transport naar de bekkens van de Waddenzee. Bij de interpretatie van deze getallen kan in acht genomen worden dat er nu geen sedimentbehoefte wordt verondersteld voor de diepe vooroever. Zie hiervoor de uitgebreide onderbouwing in van der Spek (2025), samengevat in 1.2.3. Dit sluit aan bij (en is impliciet onderdeel van) de keuze die in Rijkswaterstaat (2020) is gemaakt als voorgestelde suppletiestrategie, met de naam "ruim voortzetten huidige praktijk" (zij het niet zo expliciet geformuleerd). Het is in die zin ook niet verrassend dat de waarden van Tabel 6-4 en Tabel 6-5 vergelijkbaar zijn met die strategie.

Tabel 6-4: Advies voor de behoefte van de hele Nederlandse kust per jaar komende 15 jaar, in miljoen m³/jr. (afgerond op 0,1). Voor onderbouwing zie secties 3.6, 4.3.5 en 5.12. Merk op dat er niet simpelweg sprake is van kiezen tussen de getallen uit de tabellen van 6.3 en 6.4.

Naam	Behoefte
Deltakust	3,1
Hollandse kust	3,5
Waddenkust	4,8
TOTAAL	11,5*

* De som lijkt niet te kloppen, maar dat komt door de afrondingen

Tabel 6-5: Advies voor de behoefte van de hele Nederlandse kust per jaar tot ca. 2040 als wordt uitgegaan van een hogere (37%) bijdrage van slib in de sedimentatie van de Waddenzee, in miljoen m³/jr.

Naam	Behoefte
Deltakust	3,1
Hollandse kust	3,5
Waddenkust	4,3 ⁹³
TOTAAL	11,0*

* De som lijkt niet te kloppen, maar dat komt door de afrondingen

⁹³ Uit 5.12 is op te maken dat voor het Zeegat van Texel en voor het Friesche Zeegat de behoeften cf. de rekenregel met actieve zone zijn gebruikt. Bij de eerste leidt 37% i.p.v. 8% slib tot 0,39 miljoen m³/jr. minder transport naar het bekken (dus ook een 0,39 miljoen m³/jr. lagere behoefte). Bij het Friesche zeegat is de benodigde correctie 0,14 miljoen m³/jr. (0,31 i.p.v. 0,45).

7 Reflectie

7.1 Impact van de kennisontwikkeling

Om de resultaten van kennisontwikkeling te beoordelen kan gebruik gemaakt worden van de hiërarchie van output (welke producten zijn er), outcome (welke -inhoudelijke- stappen zijn gemaakt met deze producten) en impact (welke invloed hebben de gemaakte inhoudelijke stappen en is het hierbij mogelijk gebleken de afstand tussen wetenschap en beleid voldoende te overbruggen). Lodder (2024) onderzocht deze hiërarchie bij de Nederlandse kust, werkte dit uit en toonde aan dat de conceptualisatie de verbindende schakel is tussen wetenschappers en beleidsmakers. In voorliggend rapport is het gebruik van conceptuele modellen (zie uitwerking in Hoofdstuk 2) belangrijk.

Hieronder wordt allereerst (0) gereflecteerd op de impact van de nieuwe kennis: is deze al toepasbaar en hoe verbetert dit de conceptuele modellen / begrip van de werking van de Nederlandse kust, binnen de context van beleid en beheer? Vervolgens (7.3) worden de resterende kennisleemten besproken en worden suggesties gedaan voor prioritering, lees: de kennisontwikkeling waarvan de meeste impact verwacht kan worden.

7.2 Toepasbaarheid van de kennis

Toepasbaarheid voor de onderhoudsstrategie voor komende 15-25 jaar

Voorliggend rapport is de synthese van het onderzoeksproject 'Zandige Kust'. Dit project levert kennis voor het ontwikkelen en verbeteren van de onderhoudsstrategie voor de Nederlandse zandige kust.⁹⁴ Het bouwt voort op Rijkswaterstaat (2020), waarin de keuze is gemaakt voor de strategie "*Ruim voortzetten van de huidige praktijk*", met 11 miljoen m³/jr.⁹⁵ Dit past bij de berekeningen die in voorliggend rapport zijn gedaan.

De bijbehorende tijdstermijn is in dit rapport consequent als 'de komende ca. 15 jaar' besproken, cf. de vraagstelling. In bijna alle gevallen is het resultaat ook ruimer te interpreteren, naar 20 of 25 jaar. De scenario's van een mogelijke snellere stijging van de zeespiegel onderscheiden zich namelijk onderling maar beperkt tot 2050. De trend tot 2040 die dit rapport beschrijft zal hoogstwaarschijnlijk niet sterk veranderen in de tien jaren erna.

Dit rapport toont aan dat de hoeveelheden die de afgelopen 30 jaar zijn gesuppleerd passen bij de sedimentbehoefte die berekend kan worden met 'state of the art' morfologische kennis c.q. begrip van het gedrag van het Nederlandse kuststelsel. Dit begrip is gebaseerd op 'denken in hoeveelheden zand (sediment) op verschillende schalen van tijd en ruimte'. De uitwerking daarvan gebeurt met de morfologische schaalcascade. Om de hoeveelheden zand die nodig zijn te operationaliseren kan met een rekenregel gewerkt worden die de behoefte geeft afhankelijk van de oppervlakte van een 'sedimentdelend gebied' (op een niveau in de schaalcascade) en de netto transporten in en uit dat gebied. Dit rapport laat zien dat de komende 15 jaar de behoefte aan suppleties voornamelijk bepaald zal worden (blijven) door deze transporten. Dit wordt grotendeels gestuurd door de ligging van de BasisKustLijn. Hierdoor is er op een hoger schaalniveau soms netto uitbouw van de kust, terwijl lokaal

⁹⁴ Het woord strategie hierbij niet op zelfde niveau als 'strategische doelen' en ook niet direct over de 'tactical approach'. Het gaat juist om de wijze van de 'operationele doelen halen' (behoud kustlijn, lange termijn sedimentbalans op orde).

⁹⁵ Dit houdt in: voldoende zand voor handhaven van de kustlijn in komende 20 jaar met erbovenop langs de Waddeneilanden jaarlijks 0,9 miljoen m³ zand om de sedimentbehoefte van dat deel van het kustfundament op langere termijn aan te vullen.

suppleties nodig blijven. Dat is in het bijzonder goed te zien langs de Hollandse Kust, maar speelt ook op meerdere plaatsen langs de Deltakust en lokaal bij sommige Waddeneilanden.

Niet het hele kustfundament heeft sedimentbehoefte

Dit rapport onderbouwt waarom de zone tot -20 meter NAP (het kustfundament) niet volledig mee hoeft te groeien met de zeespiegelstijging om de strategische doelen te behalen. Er is een brede zone landwaarts van de NAP -20 meter grens (de diepe vooroever) waaruit aanzienlijke jaarlijkse sedimenttransporten plaatsvinden. Deze gaan echter niet naar de 'actieve zone', waarin gesuppleerd wordt (en waarbinnen suppleties zich verspreiden). Van der Spek (2025) bespreekt waar genoemde 'aanzienlijke jaarlijkse sedimenttransporten' wel heen zullen zijn gegaan, alles zeewaarts. Ook andersom is er relatief weinig netto zeewaarts transport van de actieve zone naar de diepe vooroever is (in vergelijking met de hoeveelheden suppleties). Het lijkt niet nodig specifiek te sturen op compensatie van deze verliezen, tenzij hiervoor nieuwe argumenten komen omdat een diepere ligging van de diepe vooroever de strategische doelen van het kustbeleid in gevaar brengt. Dat lijkt nu niet het geval.⁹⁶ Dit alles behoeft een kanttekening voor de situaties waar een geul de begrenzing van een actieve zone vormt. Daar is op tijdschaal van decennia vaak wel substantieel transport uit de actieve zone naar dieper water, vooral als de geulen sediment effectief afvoeren.

Op basis van het voorafgaande kan over nut en noodzaak van een indicator voor 'behoud kustfundament' nagedacht worden. Rijkswaterstaat heeft aangegeven behoefte te hebben aan een uitwerking daarvan, als aanvulling op de indicator 'Basiskustlijn', om de jaarlijkse suppletiehoeveelheden nog beter te verdelen over de kust. Dit rapport geeft een sedimentbehoefte per kustvak op basis van een rekenregel met gebruik van de actieve zone. Als de behoefte aan de indicator nog aanwezig is, adviseert Deltares het verschil tussen theoretische behoefte (rekenregel met actieve zone) en uitgevoerde suppleties (over een voldoende lang tijdvak) hiervoor te gebruiken.

Aansluitend op vorige alinea's kan nu goed betoogd worden dat het systeemtechnisch niet van belang is of loswallen juist binnen of juist buiten de doorgaande lijn van -20 meter liggen. Beleidsmatig is er nu wel belangrijk onderscheid. Verderop, bij het bespreken van de onderzoeksprioriteiten voor de Hollandse Kust, komt dit onderwerp terug.

Onzekerheden en veiligheidsmarges in de resultaten

Hoofdstuk 6 presenteert veel getallen. Dit is gedaan om de lezer een volledige indruk te geven van de onzekerheid die in de uitkomsten zit. Vanuit oogpunt van toepasbaarheid van de kennis is het belangrijkste dat deze indruk ook leidt tot effectief gebruik van de resultaten in de praktijk. Deze paragraaf reflecteert hierop.

De conclusie dat een jaarlijks suppletievolume tussen 9 miljoen m³/jr. en 11,5 miljoen m³/jr. (Tabel 6-4) voldoende is om aan de gemiddelde jaarlijkse behoefte tegemoet te komen lijkt gerechtvaardigd. De bovengrens (11 miljoen m³/jr.) volgt als bij elk van de kustvakken de hogere waarden genomen wordt. De meeste gevallen zijn kustvakken waar duidelijk meer suppleties nodig zijn geweest dan uit de rekenregel volgt., wat veelal samenhangt met de aanwezigheid van bolwerken (zie Figuur 2-8). Dit is het duidelijkst te zien bij de Hollandse Kust, maar speelt ook bij delen van de Deltakust. Daarnaast zijn er kustvakken (vooral bij de Waddenkust) waar minder suppleties zijn geweest dan uit de rekenregel met actieve zone volgt. Dit is het resultaat van enerzijds het beleid de ruimte voor natuurlijk processen te laten prevaleren boven handhaven van de kustlijn (soms is zelfs geen Basiskustlijn vastgesteld) en

⁹⁶ Deze conclusie is geen opstap naar verandering van het beleid 'geen zandwinning in het kustfundament'. Taal et al. (2023) geeft aan de zone tot -20 meter NAP te blijven hanteren voor het uitsluiten van zandwinning, om extra verliezen te voorkomen. Voorliggend rapport ondersteunt die aanbeveling.

anderzijds komt dit door grootschalige morfologische veranderingen in terugtrekkende buitendelta's die extra zand leverden aan eilandkusten.

Voor verdere interpretatie van de resterende onzekerheden staan hieronder de belangrijkste aannamen bij de berekeningen van de sediment- en suppletiebehoeften.

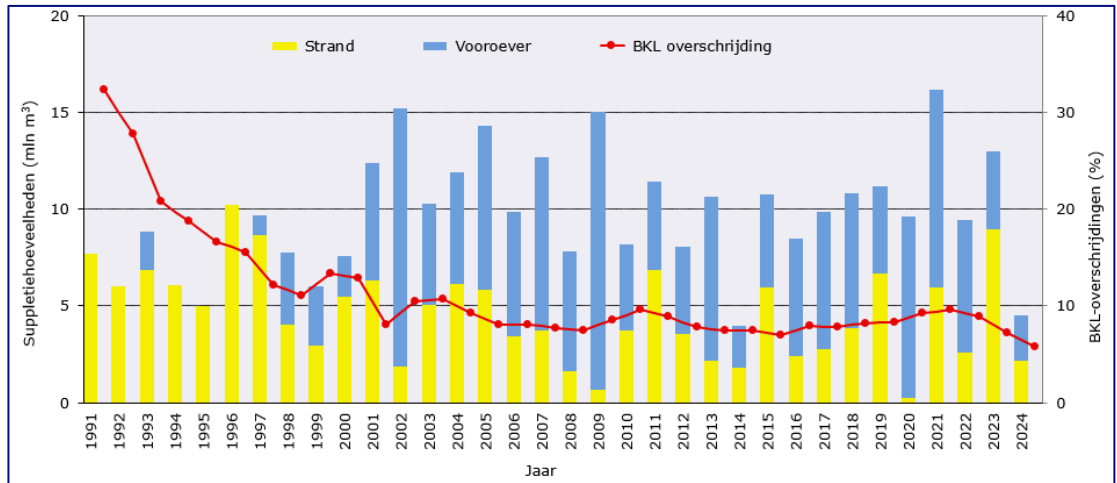
Bij de rekenregel met actieve zone:

- De oppervlakte van de actieve zone is ontleend aan Taal et al. (2023) inclusief de extra band van 250 meter (200 meter aan zeezijde en 50 meter bij de zeereep). Deze onzekerheidsband is overal toegepast, behalve bij de buitendelta's van de Waddenkust. De onzekerheidsband geeft in totaal 22,7 km² extra oppervlakte die 'mee moet groeien' (landelijk gemiddeld een toename van 15%). Toegepast in de rekenregel met een relatieve zeespiegelstijging van 2,9 mm per jaar is dit slechts 0,07 miljoen m³/jr., een klein getal in vergelijking met de uitkomsten.
- Voor de buitendelta's geldt dat de oppervlakte van het actieve deel op basis van de kennis in Elias et al. (2024) gemiddeld iets kleiner lijkt dan Taal et al. (2023) veronderstelt. Deze extra kennis is in de berekeningen meegenomen. Ook hier gaat het uiteindelijk om een oppervlak (zeker minder dan 50 km²) dat een klein verschil in sedimentbehoefte geeft in vergelijking met de uitkomsten.
- De transporten van en naar de actieve zones zijn bij de huidige zeespiegelstijging de dominante factor voor de sedimentbehoefte. De schattingen daarvan zijn gebaseerd op Elias et al. (2024), welke voor het transport naar de bekkens van de Waddenzee ontleend zijn aan Elias en Wang (2020). Deze transporten naar de bekkens geven absoluut gezien de grootste onzekerheden. Ook verschillen de transporten van Elias et al. (2023) bij een aantal kustvakken met Huisman (2024). Het is lastig voor al deze onzekerheden een goede bandbreedte te geven. Sommige afwijkingen zullen een stochastisch karakter hebben, andere (denk bijvoorbeeld aan de rol van slib in de sedimentatie van de Waddenzee) niet.⁹⁷

Bij gebruik historische volumes:

- Na 2000 is jaarlijks meer gesuppleerd en ook relatief meer onderwatersuppleties, zie Figuur 7-1. Dit heeft invloed op het historisch suppletievolume en daarmee de inschatting voor de toekomst. Een vergelijking tussen kustvakken waarvoor ook de periode 1990-2000 is meegenomen om het historisch suppletievolume te bepalen en kustvakken waar dit niet gebeurde kan daarom een vertekend beeld geven. Gemiddeld over Nederland is de kust uitgebouwd, zeker langs de Hollandse kust (zie b.v. Figuur 2-7). Op basis van Figuur 7-1 kan verondersteld worden dat het mogelijk was geweest om met minder suppleren de kustlijn te handhaven. Dat zou dan waarschijnlijk wel meer strandsuppleties hebben gevraagd (en minder zand in het profiel voor dezelfde of hogere kosten).
- De periode waarover het historisch suppletievolume bepaald kon worden is soms kort, waardoor de berekende waarde extra onzekerheid heeft.

⁹⁷ Elias et al. (2024) berekent uiteindelijk 'meest representatieve trends' in sedimentvolumes en leidt aan de hand daarvan de gemiddelde transporten af. Dit is vrijwel altijd op basis van de meest recente periode, waarin vaak ook suppleties plaatsvonden die een extra aanbod van sediment in een kustvak betekenden, wat ook weer invloed heeft op de berekende transporten. Hier staat weer tegenover dat een aantal van de berekende / gebruikte transporten tussen twee actieve zones zijn. Die waarden hebben geen invloed op de landelijke uitkomsten. Alle transporten uit de actieve zones langs de Deltakust zijn netto bepaald op (zie Figuur 3-1, Figuur 3-7, Figuur 3-8) 1,5 miljoen m³/jr. Voor de Hollandse Kust is dit (zie Figuur 4-1) 0,3 miljoen m³/jr. (naast de 0,55 miljoen m³/jr. die ten goede komt aan de actieve zone van het Zeegat van Texel). Voor de Waddenkust gaat het in totaal om netto 4,4 miljoen m³/jr. netto transport naar de bekkens. Daar staat netto 2,2 miljoen m³/jr. import vanuit het diepe deel van de terugtrekkende buitendelta's in de oostelijke Waddenzee tegenover (Figuur 5-6, Figuur 5-7 en Figuur 5-35), maar die getallen kunnen niet zomaar tegen elkaar worden weggestreept.



Figuur 7-1: Uitgevoerde suppleties voor regulier onderhoud van de kustlijn en percentage overschrijdingen van de BKL (uit Rijkswaterstaat, 2024).

Bij bepalen meest plausibele waarden:

- Bij het advies voor 'de beste aanname voor de komende 15 jaar' (uiteindelijk leidend tot Tabel 6-4 en Tabel 6-5) wordt meestal gekozen voor de hoogste waarde van de theoretische behoefte versus de historische volumes. Dit betekent dat de uitkomsten structureel aan de 'bovenkant van de bandbreedte zitten'. Hiermee volgt dit rapport grotendeels de overwegingen die Rijkswaterstaat (2020) had. Met alle gepresenteerde getallen kunnen gemotiveerd andere scenario's / strategieën voor de jaarlijkse suppletiehoeveelheid ontwikkeld worden.
- Alle berekeningen gelden voor de huidige condities:
 - o Een relatieve snelheid van zeespiegelstijging van 2,9 mm/jr.
 - o De huidige ligging van de BKL.
 - o De voorkeur voor onderwatersuppleties.
 - o De afwegingen die nu gemaakt worden tussen 'ruimte aan natuurlijke processen' en 'handhaven kustlijn', vooral van belang langs de Waddenkust.
 - o De suppleties die zijn of worden uitgevoerd als pilot op de buitendelta van het Zeegat van Ameland en bij de Vlakte van de Raan zijn een uitzondering.

Houdbaarheid van de tactische aanpak'

Het bestrijden van erosie (handhaven kustlijn gegeven ligging BKL) blijft goed mogelijk. Het lijkt aannemelijk dat hiervoor geen significante toename in suppletiehoeveelheden nodig zijn tot zeker 2050, zoals hierboven al is beargumenteerd. Een eventuele toename daarna zal meest waarschijnlijk geleidelijk zijn, maar op die termijn is de aanname van voortzetten huidige beleid een veel belangrijkere onzekerheid.

De resultaten stemmen evenwel zeer optimistisch over de houdbaarheid van de 'tactische aanpak op lange termijn. Dit optimisme volgt ook uit de verkenningen die zijn gedaan door het Deltaprogramma en het advies van het ENW (Expertise Netwerk Waterveiligheid, 2024) daarover. In alle drie de denkrichtingen voor de verre toekomst (Meebewegen, Beschermen en Zeewaarts) lijken zandsuppleties voor de kust de aangewezen manier om het beschermingsniveau tegen overstromingen vanuit de zee langs de Westkust van Zuid-Holland, Noord-Holland en delen van Zeeland te handhaven bij een zeespiegelstijging tot ruim over de 5 meter.

De huidige aanpak heeft veel mogelijkheden de kust adaptief te beheren, vooral omdat het werken met sediment feitelijk 'werken met de natuur' is. Deze flexibiliteit biedt ruimte om 'meer te doen' met zand als dit vanuit andere beleidsvelden gewenst is. Voorwaarde daarbij

is dat 'met het systeem mee gewerkt wordt'. Binnen (of grenzend aan) de reguliere kustlijn zijn hiervoor al experimenten geweest (variërend van onderzoek naar systeemsuppleties tot het uitvoeren van pilots).

7.3 Onderzoeksprioriteiten

In acht genomen het voorafgaande zijn prioriteiten voor onderzoek naar het Nederlandse kuststelsel te geven voor toekomstige discussies en aanpassingen van de strategie⁹⁸. Merk op dat in Elias et al. (2024) ook een uitgebreide sectie staat met aanbevelingen. Deze komen niet allemaal terug in onderstaande paragrafen.

Deltakust

De belangrijkste onzekerheid bij dit deel van het Nederlandse kuststelsel is de omvang van het gebied dat in de verre toekomst (na 2050) meedoet met de verspreiding van suppleties. Momenteel profiteert de actieve zone van de deltakust op veel plaatsen van de aanvoer van zand uit de voormalige buitendelta's. Het belang van het verminderen van deze onzekerheid ligt niet zozeer in de sedimentbehoefte voor de komende decennia (die zal vergelijkbaar zijn met de huidige), maar in het begrijpen van de gevolgen op lange termijn van maatregelen die de komende decennia worden overwogen. Het lijkt belangrijk niet te kiezen een ruimtelijke strategie die (snel) de behoefte aan zand doet oplopen omdat de omvang van de actieve zone hierdoor (extra snel?) toeneemt⁹⁹. Als de actieve zone vergelijkbaar blijft met de huidige omvang en niet (een groot deel van) de voormalige buitendelta gaat omvatten zal dit toekomstig kustonderhoud veel eenvoudiger en betaalbaarder houden.

In de sedimentbalans van de monding van de Westerschelde is er nog veel onzekerheid over de sedimentuitwisseling met Vlaanderen. Door samen te werken met de Vlaamse partijen en hun gegevens te integreren, kan deze onzekerheid mogelijk verminderd worden.

Hollandse Kust

Voor dit deelsysteem is er voornamelijk systeemkennis nodig die het mogelijk maakt de strategie te optimaliseren (waar en hoe suppleren om kosten en baten van de planning, het ontwerp en de uitvoering te balanceren).

Het denkmodel van de actieve zone en de begrenzing ervan die in Taal et al. (2023) is aangenomen lijken ook voor een toekomst met sterk toegenomen zeespiegelstijging robuust. Bij dit deelsysteem speelt in hoge mate de ruimtelijke druk op de kustzone: het gaat soms om dichtbevolkte gebieden met flinke ruimtelijke vraagstukken. Lokaal kan het aantrekkelijk zijn de succesvolle zandige strategie te gebruiken om de ruimtelijke kwaliteit te verbeteren¹⁰⁰. Dat vraagt detailkennis van de kust.

Elias et al. (2024) rapporteert dat langs de Hollandse kust direct zeewaarts van de actieve zone een strook te onderscheiden is die sterker verdiept dan het aangrenzende deel van de diepe vooroever. Het is vooral zichtbaar ten zuiden van IJmuiden. De observatie past nu niet in het algemene denkmodel van de ontwikkeling van de ononderbroken, golfgedomineerde kust. Onderzoek naar de oorzaken en hoe dit kan worden ingepast in de bestaande denkmodellen wordt aanbevolen.

⁹⁸ Onderzoek voor beter begrip van de 'lokale morfologie', om beslissingen over suppleties programmeren en ontwerpen te ondersteunen, wordt hier niet meegenomen. Deze scope valt onder het programma Beheer en Onderhoud Kust.

⁹⁹ Dat treedt bijvoorbeeld op als gekozen wordt voor lokaal uitbouwen van de kustlijn of (extremer) het aanleggen van een tweede kustlijn of eilanden.

¹⁰⁰ Zoals dat ook gebeurd is bij het ontwerpen van de versterkingen bij de Zwakke Schakels (permanente verandering van de kustlijn) en bij de Zandmotor bij Delfland (tijdelijke verandering / extra areaal)

In Elias et al. (2024) is aangehaald dat optimalisatie in het sedimentbeheer wellicht mogelijk is bij het onderhoud van de Euro-Maasgeul en IJgeul. Als het technisch en organisatorisch mogelijk zou zijn om de specie daaruit in of zeer nabij de actieve zone te verspreiden, zou dit kunnen bijdragen aan de handhaving van de kustlijn in de komende decennia. De loswallen liggen nu te ver van de actieve zone om van daar sediment naar de kustlijn te kunnen transporteren. Voordat deze optie wordt overwogen, is echter meer inzicht nodig in de sedimentsamenstelling van deze baggerspecie en de transportcapaciteit van het morfologische systeem om het sediment effectief te verspreiden.¹⁰¹

Waddenkust

Het belangrijkste verschil tussen dit deelsysteem en de beide andere is de relatie met de bekkens en het relatief grotere belang voor ecologie en natuurlijke processen in het hele Waddengebied. Dat geldt zowel voor de bekkens als voor grote delen van de eilandkusten, waar vaak ook geen BKL is vastgelegd of waar de kustlijn vooralsnog niet wordt gehandhaafd (ruimte voor natuurlijke processen staat voorop). Het aanwijzen van de belangrijkste kennisleemten voor de strategie op middellange en lange termijn is hier daarom sterker gekoppeld aan de (toekomstige) visie op het gebied als de zeespiegel sneller stijgt. In de sectie over de Boschplaat bij Terschelling is de lastige keuze al aangegeven tussen enerzijds 'arealen (specifieke) natuur behouden' tegenover 'inzetten op meebewegen en natuurlijke processen'. Goede morfologische scenario's kunnen hierbij helpen. Hieraan lijkt nu al behoefte, zie bijvoorbeeld de discussies over de natuurkwaliteit van de Waddenzee bij een snellere zeespiegelstijging. Dit leidt tot onderzoeken in lijn van Bijlage B. Voor een belangrijk deel liggen die nog in het fundamenteel natuurwetenschappelijke domein.

Vanuit het oogpunt van sedimentbehoud lijkt een belangrijke vraag voor de komende decennia of er strategieën zijn waarbij de grote hoeveelheden zand in de buitendelta's beter behouden blijven en/of beter gebruikt worden voor de strategische doelen van het kustbeleid. Kennisvragen hebben het karakter van 'hoe omvangrijk moeten buitendelta's zijn en wat is de invloed van de ontwikkeling van het bekken hierop?', 'hoe kan het proces van sediment bypassing beïnvloed worden ten gunste van de strategische doelen?'¹⁰² en 'kan door vastlegging van slib in het bekken de behoefte aan zand verminderd worden en hoe doe je dat?'. Dit vraagt uiteraard uitwerking, maar het is evident dat de sedimentbehoefte van de actieve buitendelta een grote component is van de totale sedimentbehoefte van de Waddenkust bij snellere zeespiegelstijging.

Tenslotte moet gememoreerd worden dat voor Elias et al. (2024) geen nieuwe waarden zijn bepaald voor de netto transporten naar de bekkens in de Waddenzee. Ze zijn overgenomen uit de studies voor Kustgenese 2.0. Ten tijde van de afronding van dit rapport lopen studies die een nieuwe en verbeterde bepaling van die waarden kunnen geven. Het kon echter niet binnen de scope van dit rapport worden opgepakt. Er is wel een onzekerheidsband als gevolg van de bijdrage van slib in de sedimentatie van de bekkens aangegeven.

¹⁰¹ Elias et al. (2024) zegt hierover: "De invloed van de loswallen op de sedimentbalans is, onder de gehanteerde aannames, beperkt. Dit komt doordat de loswallen zich op de diepe vooroever bevinden en er weinig directe uitwisseling lijkt te zijn met de actieve zone. Een analyse van de morfologische veranderingen van de loswallen kan echter meer inzicht geven in de herverdeling van het sediment. Daarnaast bestaat er onzekerheid over de gestorte volumes. Een actuele database, vergelijkbaar met die voor de suppletiehoeveelheden, met een onderverdeling in zand- en slibvolumes, is essentieel voor nauwkeurige verwerking van de gestorte volumes."

¹⁰² In Elias et al. (2024) is hierover opgemerkt: "Vooraf het beter begrijpen van welk deel van de buitendelta echt actief uitwisselt met zones die de ligging van de kustlijn bij de eilanden bepalen, is belangrijk. Voor de komende decennia lijkt het niet logisch om systeemsuppleties toe te passen in delen van de actieve buitendelta die dieper liggen dan ongeveer NAP -8 meter." Hierbij is aangetekend dat "Uitspraken over wat dit betekent voor de sedimentbehoefte op langere termijn om functies en waarden van de kustzone te behouden alleen met een grotere onzekerheid kunnen worden gedaan."

Rol van bodemdaling

Bij het bepalen van de sedimentbehoefte is de bodemdaling niet apart meegenomen. De rekenregel wordt uitgevoerd met het getal voor 'relatieve zeespiegelstijging'. Dat betekent dat op landelijk niveau er geen correctie nodig is. Hiertegenover staat dat bij de berekening van de transporten veelal is uitgegaan van de resultaten van Elias et al. (2024). In die sedimentbalans is de bodemdaling die een extra put voor sediment veroorzaakt niet meegenomen. In dit rapport is alleen voor de situatie bij Ameland en de diepe bodemdaling door gaswinning een aangepaste rekenregel gebruikt. Een aspect dat in de beschouwingen niet is opgenomen is de mate waarin de bodemdaling een lokale gradiënt in sedimentbehoefte veroorzaakt. In die gevallen zal de behoefte relatief snel opgevuld worden (en als het luwe condities heeft ook deels met slib). De invloed van de gaswinning bij Ameland op de bodemligging van de actieve zone ter plaatse lijkt beperkt geweest de afgelopen decennia omdat er voldoende sediment beschikbaar was om de bodemdalingsschotel op te vullen. In Bijlage C is uiteengezet dat dit in de praktijk heeft geleid tot minder aanvoer van sediment richting het Friesche Zeegat. Buiten de actieve zone, denk hierbij in het bijzonder aan de eilandkust achter de eerste duinenrij, is de invloed op de bodemligging wel significant geweest (zie ook Bijlage C). Dit inzicht lijkt relevant voor de beoordeling van de risico's van bodemdaling onder het Waddengebied (omvat zowel kustzone als bekken).

8 Referenties

- Beer, de A., N. Vermeer, E. Elias, J. Löhr, 2024. Morfologie van de eilandkoppen van het Zeegat van het Vlie. Deltares rapport 11210366-004-ZKS-0001.
- Cleveringa, J. en Elias, E. 2022. Kombergingsrapportage Eierlandse Gat. Deltares rapport 11208040-002-ZKS-0001.
- Cleveringa, J. en Oost, A.P. 2017. Morfologie Kombergingsgebied Borndiep; KPP 2017 BO03 Waddenzee Kennisontwikkeling morfologie en baggerhoeveelheden. Deltares rapport 11200521-000-ZKS-0004
- Colina Alonso, A., van Maren, D. S., Elias, E. P. L., Holthuijsen, S. J., & Wang, Z. B. 2021. The contribution of sand and mud to infilling of tidal basins in response to a closure dam. *Marine Geology*, 439, 106544. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106544>
- Consortium Deltares-IMDC-Svašek-Arcadis (2013). Ontwikkeling mesoschaal Westerschelde (factsheets). Project LTV Veiligheid en Toegankelijkheid; LTV V&T-rapport K-16
- Deltares, 2020a. Technisch Advies Sedimentbehoefte Kustfundament ten behoeve van het beleidsadvies Kustgenese 2.0. Deltares rapport 1220339-009-ZKS-0014.
- Deltares, 2020b. Kustgenese 2.0 - integrale analyse. Deltares rapport 1220339-009-ZKS-0008.
- Elias, E.P.L., 2021a. De morfologische ontwikkeling van de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks. Deltares rapport: 11206794-004-ZKS-0006.
- Elias, E.P.L., 2021b. Morfologische ontwikkeling kust Noordoost Vlieland. Deltares rapport 11206794-001-ZKS-0002.
- Elias, E.P.L., 2023. Morfologische ontwikkeling van het Eierlandse Gat. Deltares rapport: 11208035-004-ZKS-0004
- Elias E. en Cleveringa, J.. 2021. Kombergingsrapportage Lauwers en Groninger Wad. Deltares rapport 11206799-002
- Elias en Quataert, 2021. Morfologische ontwikkeling Noord-Beveland en Breezand: regio advies kusterosie Banjaardstrand en Breezand. Deltares rapport: 11206794-001-ZKS-0002.
- Elias en Quataert, 2024. Morfologische analyse Nieuwe Schulpengat. Deltares rapport 11207897-002
- Elias, E.P.L., Wang, Z.B., 2020. Sedimentbalans Waddenzee. Synthese ten behoeve van Technisch Advies Kustgenese 2.0. Rapport 1220339-007-ZKS-0010, Deltares, Delft, 29 p.
- Elias, E., Colina Alonso, A., Van Maren, B. (2021). Morfologische veranderingen Eems-Dollard en Groninger Wad. Deltares rapport: 11203742-000. 145 pp.
- Elias, E., Quataert, E., Pearson, S., 2021. Morfologische analyse vooroeversuppletie Callantsoog. Deltares rapport: 11206794-004. 90 pp.
- Elias, E.P.L., Taal, M., Cleveringa, J., van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B. and van der Werf, J.J., 2023. Large-scale morphological changes and sediment budget of the Western Scheldt estuary 1955–2020: the

impact of largescale sediment management. Netherlands Journal of Geosciences, Volume 102, e12. <https://doi.org/10.1017/njg.2023.11>.

- Elias, E. P. L., Van der Spek, A. J., Pearson, S. G., & Cleveringa, J., 2019. Understanding sediment bypassing processes through analysis of high-frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands. *Marine Geology*, 415, 105956. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.06.001>
- Elias, E., Quataert, E., Taal, M., Vermeer, N. 2024. Sedimentbalans Nederlandse Kust. Rapport 11207897-002-ZKS-0007, Deltares, Delft, 209 p.
- Expertise Netwerk Waterveiligheid, 2024. Reflectie op rapport Ruimte voor Zeespiegelstijging, advies nummer 24-07. <https://www.enwinfo.nl/adviezen/advies-reflectie-rapport-ruimte-zeespiegelstijging/>
- Huisman, B.J.A., 2024. Transporten in de ondiepe Nederlandse kustzone. Rapport 11207897-002-ZKS-0005, Deltares, Delft, 92 p.
- Huisman, B.J.A., Vermeer, N., Tonnon, P.K., Kuijk, N. van, Brand, E. 2025. Evaluatie suppletiebehoefte Hondsbossche Duinen. Rapport 11210366-001-ZKS-, Deltares, Delft. (in prep.)
- Kennisprogramma Zeespiegelstijging, 2023. Hoe kan Nederland de stijging van de zeespiegel aan? Tussenbalans van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging.
- Lazar, M., Elias, E.P.L., 2023. Challenges of nature based flood protection. A case study of Banjaardstrand (The Netherlands). *Coastal Sediments*, 2023 https://doi.org/10.1142/9789811275135_0194
- Lodder, Q., 2016 en 2018. Memo Rekenregel suppletievolumen. RWS bedrijfsinformatie, 16-12-2016 en versie 1.1. d.d. 13-9-2018.
- Lodder, Q.J. 2024. Connecting science and policy in Dutch coastal management. The role of system understanding and conceptual models. Thesis. Technical University Delft. ISBN: 978-94-6384-581-6
- Lodder, Q., de Looft, H., Brakenhoff, L., 2021. Memo Historische suppletievolumes voor handhaven kustlijn Delta, Holland en Waddengebied. RWS Bedrijfsinformatie, 4-5-2021.
- Luijendijk, A.P., Van Oudenhoven, A. 2019. The Sand Motor: A Nature-Based Response to Climate Change: Findings and Reflections of the Interdisciplinary Research Program NatureCoast. Delft: Delft University Publishers - TU Delft Library.
- Mastbergen, D. & Quataert, E., 2020. Beheerbibliotheek Zeeuws-Vlaanderen. Beschrijvingen van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Rapport 11203683-000-ZKS-0008, Deltares.
- Meijers, C., Oost, A. J. Cleveringa, M. Taal. 2025. Kombergingsrapportage Vlie: Overzicht van informatie en kennis van het fysisch systeem. Versie 2024. Kenmerk: 11210370-001
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000. Derde Kustnota, Traditie, Trends en Toekomst.
- Mulder, J. 2000. Zandverliezen in het Nederlandse kuststelsel. Rijkswaterstaat RIKZ.
- Nichols, M.M., 1989. Sediment accumulation rates and relative sea-level rise in lagoons. *Marine Geology* 88, 201-219.
- Oost, A.P. 1995. Dynamics and Sedimentary Development of the Dutch Wadden Sea with Emphasis on the Frisian Inlet. A Study of Barrier Islands, Ebb-Tidal Deltas, Inlets and Drainage Basins. *Geologica*

Ultraiectina, Mededelingen van de Faculteit Aardwetenschappen 126, Utrecht University (Utrecht): 454 pp.

Oost, A., Cleveringa, J., Taal, M. 2020. Kombergingsrapport Friesche Zeegat. Pinkegat en Zoutkamperlaag. Deltares rapport 11205229-001-ZKS-0002

Programmadirectie Natura 2000, 2009. Aanwijzingsbesluit Westerschelde en Saeftinghe. PDN/2009-122

Quataert, E., Mastbergen, D., 2019. Beheerbibliotheek Rijnland. Beschrijvingen van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Rapport 11203683-000-ZKS-0006. 88 pp.

Quataert, E., Elias, E., De Wilde, T., 2024. Regionaal Advies: Strand-geulwandsuppletie Noord-Beveland. Deltares rapport: 11209263-001-ZKS-0002.

Quataert, E., Elias, E., IJff, S., Hijma, M., 2021. Beheerbibliotheek Kust Vlieland. Beschrijving van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Rapport 11206794-002-ZKS-0002. 81 p.

Quataert, E., IJff, S., Hijma, M., 2021. Beheerbibliotheek Kust Delfland. Beschrijving van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Rapport 11206794-002-ZKS-0001. 96 p.

Quataert, E., Oost, A., Hijma, M., Elias, E., 2020. Beheerbibliotheek Terschelling. Beschrijving van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Rapport 11205236-001-ZKS-0002. 75 p.

Quataert, E., Oost, A., Hijma, M., Elias, E., 2020. Beheerbibliotheek Texel. Beschrijving van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Rapport 11205236-001-ZKS-0003. 87 p.

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

Rijkswaterstaat, 2024. Kustlijnkaarten 2025.

Röbke, Vet, L. de, Santinelli, G., Meijer-Holzhauer, H., 2001. TKI Dutch Coastline Challenge, Werkpakket 1. Systeemkennis morfologie en toekomstprojectie suppletieopgave voor de kustvakken Noord-Holland en Texel. Rapport 11207047-001-HYE-0001

Spek, van der, A. 2025. Ontwikkeling diepe vooroever Nederlandse kust. Project 11207897. Deltares, Delft. (in prep.)

Spek, van der, A.J.F., 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. (met bijdragen van HKV), 2023. Zeespiegelmonitor 2022. Deltares rapport 11209266-000-ZKS-0001, 151 pp.

Taal, M., Mastbergen, D., Cleveringa, J., Schrijvershof, R., Plancke, Y., Wang, Z., Werf, J. van der, Spek, a. van der, 2019. Mesoschaal Westerschelde, Integratierapport 2014-2018. Deltares, Delft.

Taal M., Quataert, E., van der Spek, A., Huisman, B., Elias, E. Wang, Z., Vermeer, N. (2023). Sedimentbehoefte Nederlands kustsysteem bij toegenomen zeespiegelstijging. Rapportnummer: 11207897-002-ZKS-0004, Deltares, Delft, 115 p.

- Taal M., Huisman, B., Elias, E. van der Spek, A., Quataert, E., Vermeer, N., Wang, Z., Dagalaki, V. (2025). Zand en Zee in Balans op lange termijn. Rapportnummer: 11207897-002-ZKS-009, Deltares, Delft (in prep.)
- Vermeer, N., Van der Werf, J., 2022. Morfologische studie Zeeuws-Vlaanderen. Rapportnummer: 11208035-004-ZKS-0003, Deltares, Delft, 71 p.
- Vermeer, N., Hijma, M., Maarse, M., Quataert, E., 2023. Beheerbibliotheek Kust Ameland. Beschrijvingen van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Rapport 11209263-002-ZKS-0002. 79 p.
- Vermeer, N., Hijma, M., Maarse, M., Quataert, E., 2024. Beheerbibliotheek Kust Noord-Holland. Beschrijvingen van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Rapport 11209263-002-ZKS-0004. 89 p.
- Vermeer, N., Hijma, M., Maarse, M., Quataert, E., 2025. Beheerbibliotheek Kust Voorne & Goeree. Beschrijvingen van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Rapport 11210366-002. 83 p.
- Vermeer, N., Hijma, M., Maarse, M., Van der Spek, A. en Quataert, E., 2024. Beheerbibliotheek Kust Walcheren en Noord-Beveland. Beschrijvingen van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Rapport 11210366-002-ZKS-0003
- Vermeer, N., Quataert, E., Hijma, M., Maarse, M., 2022. Beheerbibliotheek Kust Schiermonnikoog. Beschrijvingen van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Rapport 11208035-002-ZKS-0005. 81 p.
- Vermeer, N. Quataert, E., IJff, S. en Hijma, M., 2022. Beheerbibliotheek Schouwen. Beschrijvingen van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Rapport 11208035-002-ZKS-0001, Deltares.
- Vet, de, P.L.M., B.C. van Prooijen, P.M.J. Herman, T.J. Bouma, D.S. van Maren, B. Walles, J.J. van der Werf, T. Ysebaert, E. van Zanten, Z.B. Wang (2024). Response of estuarine morphology to storm surge barriers, closure dams and sea level rise. Geomorphology, Volume 467, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109462> .
- Vroom, J., Cleveringa, J., Oost, A., Taal, M., Kombergingsrapportage Marsdiep: Overzicht van informatie en kennis van het fysisch systeem. Versie 2023. Kenmerk: 1209267-001-ZKS-0005,
- Wang, Z.B. 2007. Morfologische ontwikkeling van Het Rif en de Engelsmanplaat. Analyse naar mogelijke invloed van de bodemdaling. Rapport Z3973 WL Delft Hydraulics, Delft
- 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>
- Waterschap Scheldestromen, 2014. Brochure Zwakke Schakel West-Zeeuws-Vlaanderen.

A Sedimentbalans monding Westerschelde

A.1 Aanleiding tot het onderzoek

Het onderzoek in het programma *Beheer & Onderhoud Kust* ondersteunt Rijkswaterstaat bij het onderhoud en beheer van de kust. Sinds 1990 is het kustbeheer gericht op dynamisch handhaven van de kustlijn (Rijkswaterstaat, 1990; Hillen & de Haan 1993; Hillen & Roelse, 1995; de Ruig, 1998). Met name bij de zeegaten treden structurele zandverliezen en erosieproblemen op. Het beter begrijpen van het morfologische systeem en de sedimentuitwisselingen tussen kust, zeegat en bekken is een belangrijk doel van het deelproject Zeegaten. Met de systeemkennis over de werking van zeegatsystemen wordt het beheer van en onderhoud aan eilandkoppen ondersteund.

In de afgelopen jaren is er veel inzicht verkregen in de werking en ontwikkeling van de Voordelta, de mondingsgebieden van de (voormalige) estuaria in zuidwest Nederland (o.a. Elias et al. 2016). Toch rijzen er nog veel vragen over de sedimentuitwisseling tussen de monding en het estuarium. Een probleem bij het opstellen van een sedimentbalans van de monding is de afbakening van het studiegebied. In het noorden wordt de monding van de Westerschelde begrensd door de kust van Walcheren. Deze grens is duidelijk te trekken, zowel geografisch als morfologisch gezien. Aan de zuidzijde is het lastiger. De landgrens tussen België en Nederland ligt ruwweg over het midden van de Vlakte van de Raan, waardoor deze geen morfologische afbakening geeft. De Vlakte van de Raan strekt zich in het Belgische deel nog ver zeewaarts en zuidelijk uit en gaat dan min of meer vloeiend over in de Vlaamse Banken. Naast een onduidelijke morfologische begrenzing is er ook een verschil in meetfrequentie en nauwkeurigheid tussen het Belgische en Nederlandse meetdata te onderscheiden. Ook zijn de vele ingrepen en baggerwerkzaamheden rond en in de Haven van Zeebrugge en de Wielingen een complicerende factor.

In deze bijlage wordt een verdiepende slag gemaakt in het beter begrijpen van de sedimenthuishouding van de monding en de sedimentuitwisseling tussen de Westerschelde en de monding door:

- (1) uitwerking van het sedimentboxmodel van het Nederlandse deel van de monding en
- (2) berekening van de actieve volumebalans van het gehele mondingsgebied.

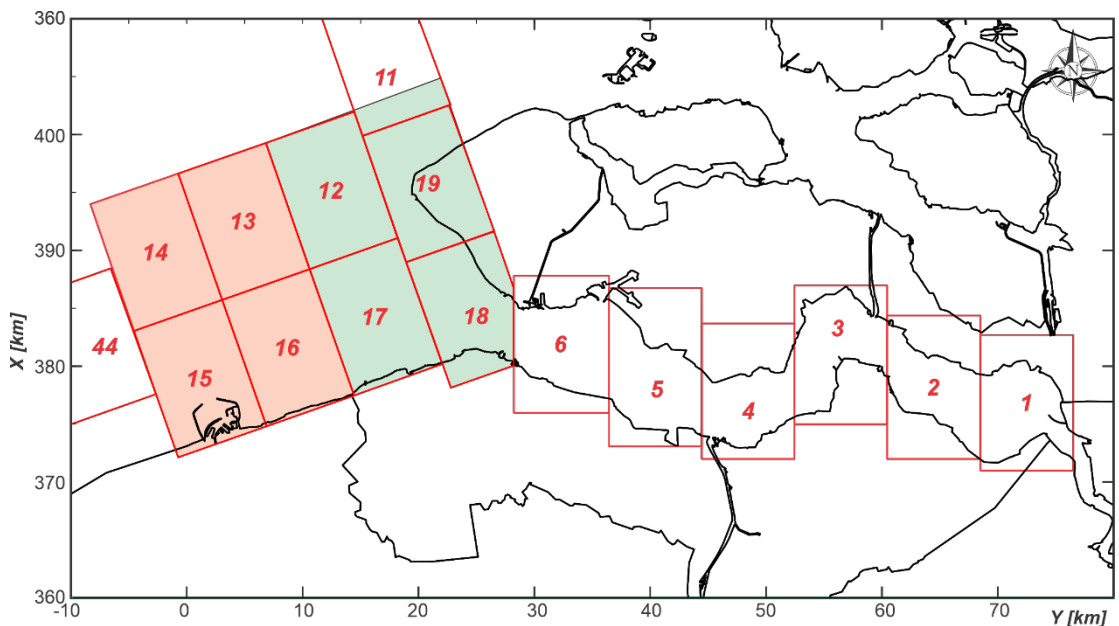
De memo bestaat uit 4 inhoudelijke hoofdstukken. In Hoofdstuk 2 worden de beschikbare bodemkaarten voor het mondingsgebied beknopt beschreven. Hoofdstuk 3 geeft een actualisatie van de sedimentbalans van het Nederlandse deel van de monding. Dit hoofdstuk vat eerdere studies samen, geeft de resultaten van de berekende volumeveranderingen en vat deze volumes samen in een sedimentboxmodel. Ter discussie is een gedetailleerde balans bijgevoegd waarin de sedimentuitwisseling tussen de verschillende morfologische onderdelen van de monding wordt gegeven. Hoofdstuk 4 bevat de resultaten van een volumeberekening op basis van de actieve volumebalans van het gehele mondingsgebied gepresenteerd. Hoofdstuk 5 vat de resultaten van deze memo beknopt samen.

A.2 Beschikbare meetdata, bodemkaarten en ingrepen

A.2.1 Inleiding

De monding van de Westerschelde bestaat uit een Nederlands en een Belgisch deel. De grootste onzekerheid in bodemligging en volumeontwikkeling ligt in het Belgische deel. Gedeeltelijk komt dit door een mindere dekking daarnaast wordt dit deel sterk beïnvloed door baggerwerkzaamheden waarvan de gegevens onzekerheid bevatten.

De volumebalans wordt dan ook voor beide delen afzonderlijk uitgewerkt. Het onderscheid tussen de 2 delen is gebaseerd op de indeling van de meetvakken (Figuur bijlage A-1). Deze indeling is niet exact gelijk aan de staatsgrens, maar geeft wel een goede benadering hiervan. Soortgelijke indelingen zijn ook in de eerdere studies van Elias et al. (2016) en Nederbragt en Liek (2004) gehanteerd.



Figuur bijlage A-1: Onderscheid in Belgische deel van de monding (rood) en Nederlandse deel (groen) op basis van de Zeeuwse Kaartbladindeling.

A.2.2 Meetdata en Bodemkaarten

Voor de berekening van de volumeveranderingen is het nodig een volledige dekking van het interessegebied te hebben in alle beschouwde jaren (zie Appendix A voor dekking van de meetdata). Een keuze kan zijn om alleen de bodemkaarten met volledige dekking mee te nemen. Dit zou betekenen dat veel van de oudere datasets niet gebruikt worden. Een andere optie is om de bodemkaarten te combineren om zo de beschikbare data optimaal te benutten (Tabel Bijlage A-1 en Figuur bijlage A-2).

Bij het samenvoegen van data worden de volgende richtlijnen gebruikt:

1. als basis wordt de bodem met grootste dekking gebruikt.
2. missende gebieden worden opgevuld met de dichtstbijzijnde meting (deze moet binnen een interval van 1 tot 2 jaar vallen).
3. de kaarten worden geïnspecteerd op missende datapunten en onrealistische waarden en waar nodig gecorrigeerd.

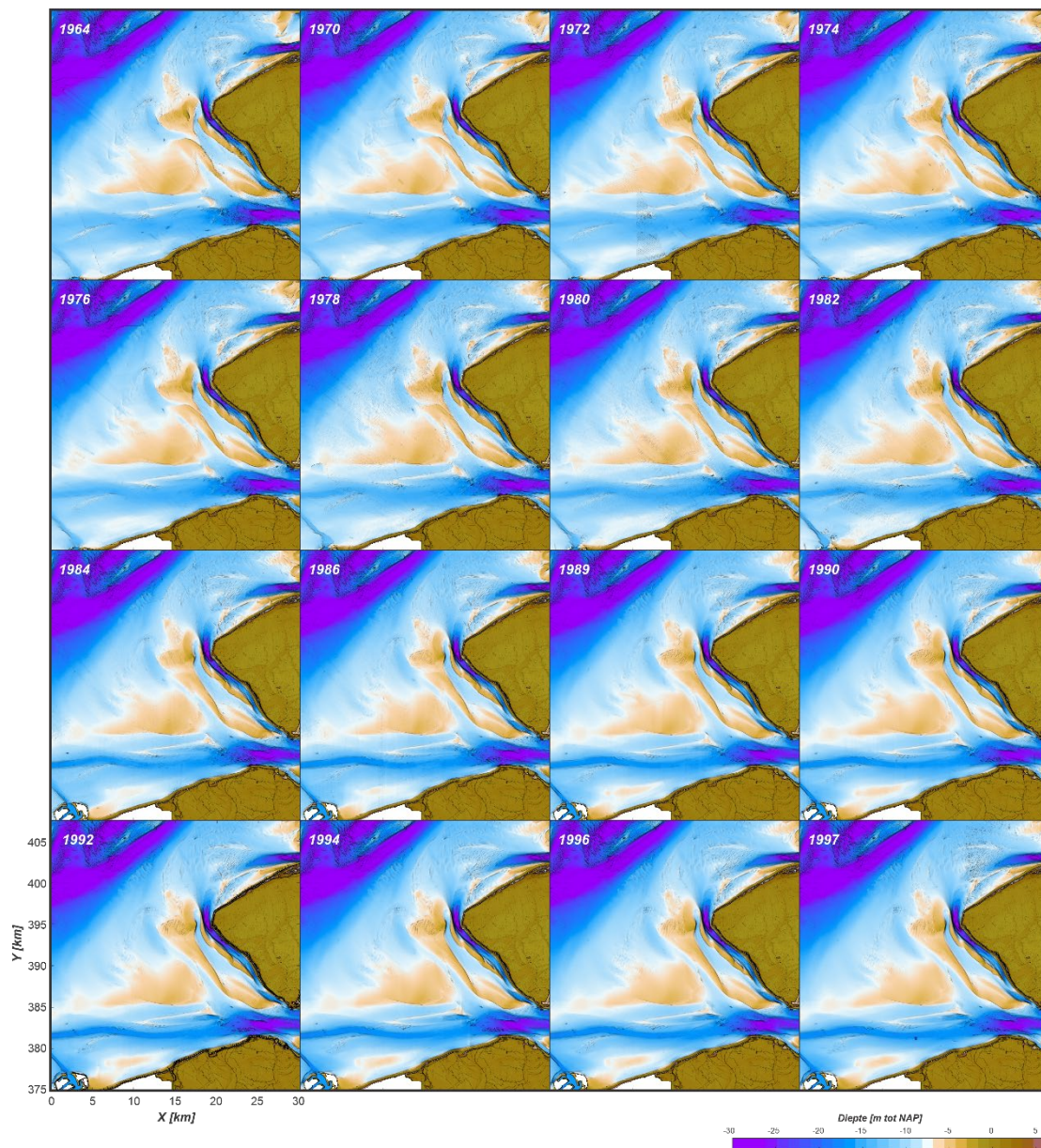
In de periode 2014-2019 wordt een iets andere methode gehanteerd. In deze jaren is een groot deel van de Nederlandse kustzone ingemeten, maar niet de gehele monding. De missende gebieden (met name het zeewaartse deel van de Vlakte van de Raan) is hier door lineaire interpolatie ingevuld.

De verkregen bodems en de onderliggende data zijn samengevat in Figuur bijlage A-2 en Figuur bijlage A-3. In alle bodems is het AHN toegevoegd om de aanliggende kusten van Walcheren en Zeeuws-Vlaanderen in te vullen. Toevoeging van het AHN is vooral uitgevoerd voor de visualisatie en wordt niet meegenomen in de volumebalans aangezien deze alleen de data tot NAP +3 m gebruikt.

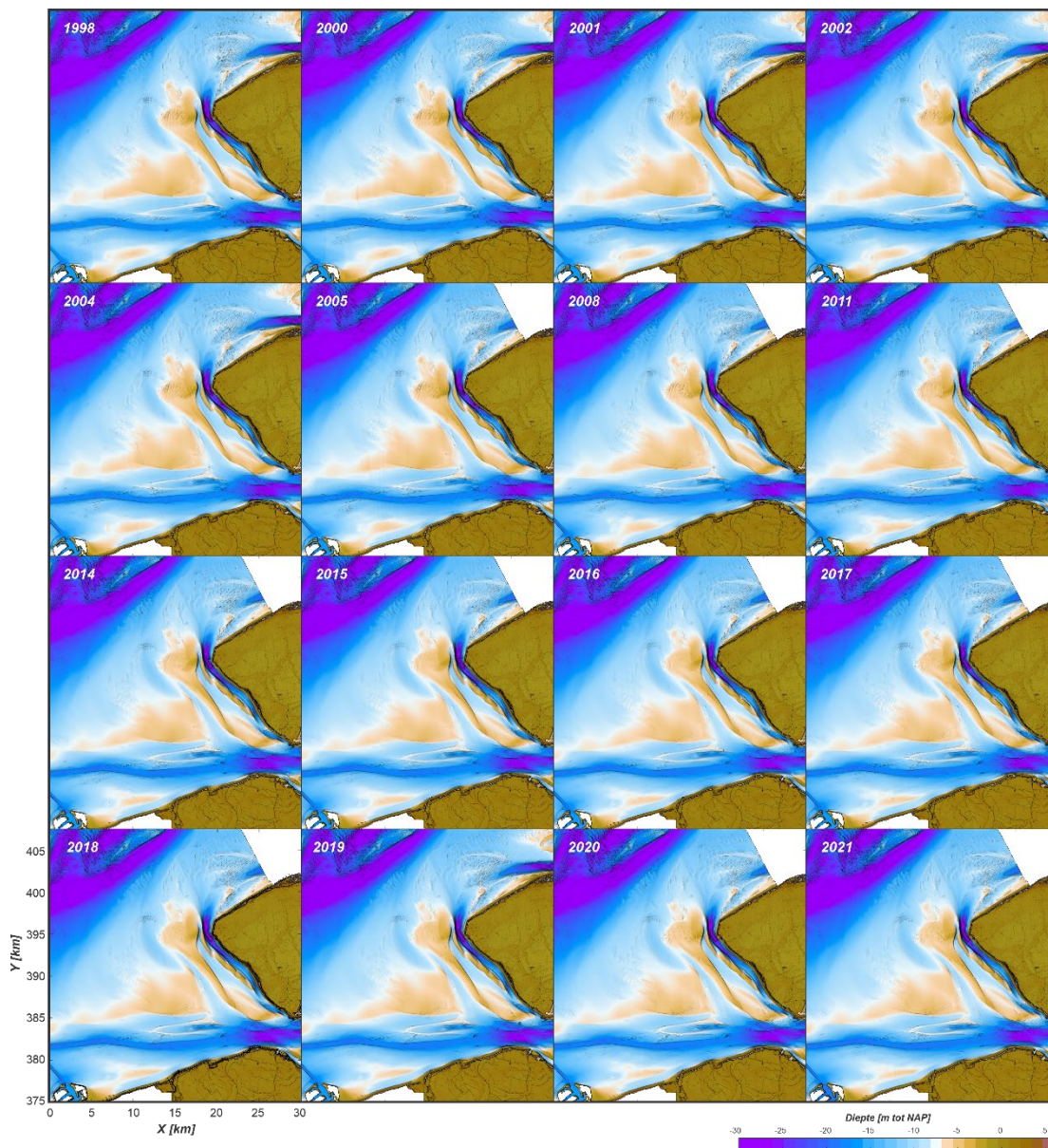
Door het iets anders samenvoegen van de jaren en het toevoegen van het AHN kunnen de geconstrueerde bodemkaarten iets afwijken van eerdere studies. Het grootschalige volumeverloop zal hierdoor niet drastisch veranderen, maar in detail zal dit wel kleine verschillen opleveren.

Tabel Bijlage A-1: Overzicht van de jaren gebruikt bij het samenstellen van Figuur bijlage A-2 en Figuur bijlage A-3.

Kaart	Gebruikte bodemdata (Figuur bijlage A-2)		Gebruikte bodemdata (Figuur bijlage A-3)
1964	1964 + 1969	1998	1998 + 1999 + 2000
1970	1969 + 1972	2000	2000 + 1999 + 2001
1972	1972 + 1970 + 1969	2001	2001 + 2000
1974	1974 + 1975 + 1976	2002	2002 + 2001
1976	1976 + 1975 + 1978	2004	2004 + 2003 + 2005
1978	1978 + 1979 + 1980	2005	2005
1980	1980	2008	2008
1982	1982 + 1981 + 1980	2011	2011
1984	1984 + 1985 + 1986	2014	2014
1986	1986 + 1987 + 1989	2015	2015 + lineaire interpolatie 2014-2017
1989	1989 + 1990	2016	2016 + lineaire interpolatie 2014-2017
1990	1990 + 1989	2017	2017
1992	1992 + 1993	2018	2018 + lineaire interpolatie 2017-2020
1994	1994 + 1995 + 1993	2019	2019 + lineaire interpolatie 2017-2020
1996	1996 + 1995 + 1997	2020	2020
1997	1997	2021	2021



Figuur bijlage A-2: Overzicht van de samengestelde bodemkaarten voor de periode 1964-1997.



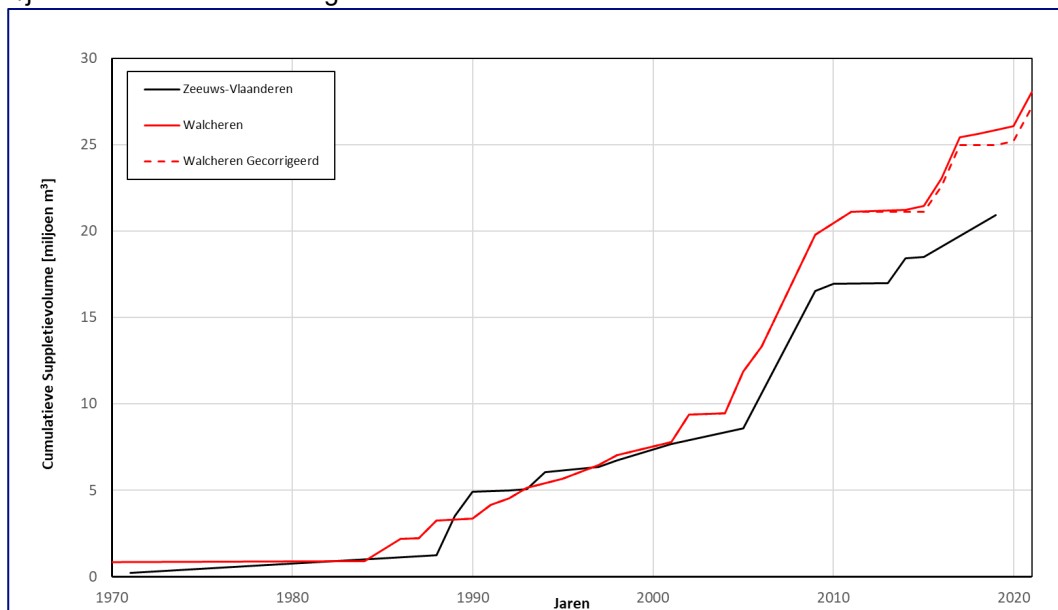
Figuur bijlage A-3: Overzicht van de samengestelde bodemkaarten voor de periode 1998-2021.

A.2.3 Ingrepen (baggeren, storten en suppleties) in het Nederlandse deel van de monding.

Zandsuppleties

Langs de eilandkusten van het Nederlandse deel van de monding zijn in het verleden vele zandsuppleties uitgevoerd. Bij Walcheren zijn er vanaf de Westkappelse Zeewering tot Vlissingen (km. 21,65 – km. 34,75) in totaal 45 suppleties uitgevoerd met een totaal volume van 27,1 miljoen m³ sinds 1952. Een klein deel van het suppletiezand (0,86 miljoen m³) is afkomstig uit de Sardijngeul en draagt dan ook niet bij aan een volumeverandering in het sedimentbudget (zie lijn Walcheren gecorrigeerd in Figuur bijlage A-4). In totaal is er dus 27,2 miljoen m³ aan zand toegevoegd aan het kustfundament door de suppleties. Het suppletievolume ligt in de periode tot 2001 relatief laag. Tussen 1975 en 1990 is er gemiddeld 0,17 miljoen m³/jaar gesuppleerd. Het suppletievolume neemt daarna toe. Tussen 1990 en 2001 ligt het gemiddeld op 0,39 miljoen m³/jaar. Vanaf 2001 neemt het volume dan nog verder toe tot 1,57 miljoen m³/jaar in de periode 2002-2009. Vanaf 2009 ligt het gemiddeld dan met 0,68 miljoen m³/jaar weer lager.

Het suppletievolume in Zeeuws-Vlaanderen (km. 0,17 – km. 14,87) bedraagt 20,9 miljoen m³. Gemiddeld is dit 0,42 miljoen m³/jaar. Dit gemiddelde geeft een iets vertekend beeld, omdat met name in de periode 2005-2009 er grote suppleties zijn uitgevoerd. In de periode 1970-1990 lag het gemiddelde suppletievolume op 0,23 miljoen m³/jaar en tussen 1992 en 2001 bedraagt dit 0,31 miljoen m³/jaar. Het volume neemt toe tot een maximum van 2,2 miljoen m³/jaar tussen 2005 en 2009. In de periode 2010-2020 ligt het gemiddelde met 0,47 miljoen m³/jaar dan weer een stuk lager.

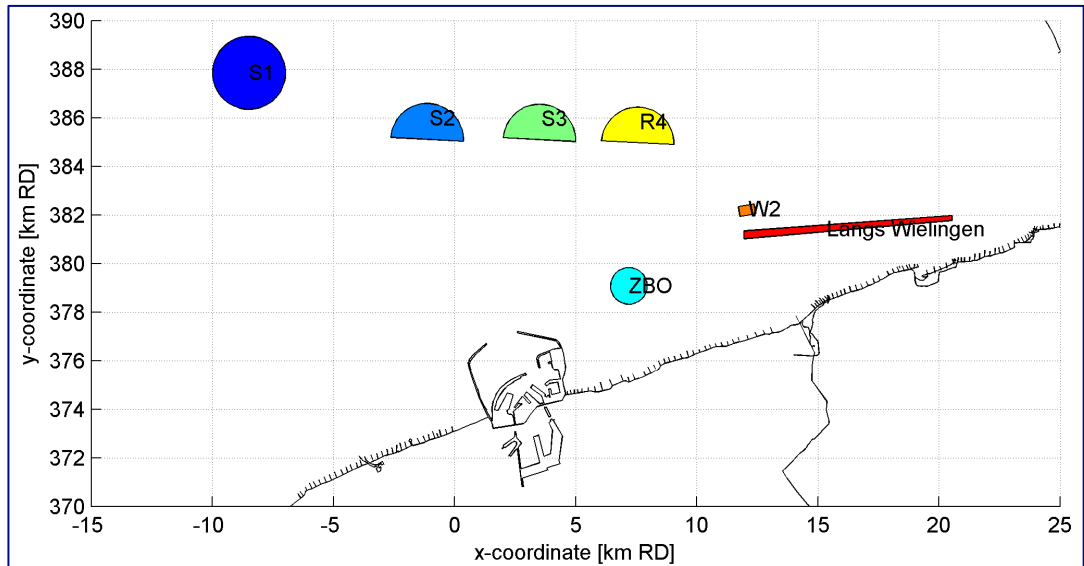


Figuur bijlage A-4: Cumulatieve suppletievolumes langs de kust van Walcheren en Zeeuws-Vlaanderen sinds 1970.

Baggerwerkzaamheden in de Wielingen

Er is slechts beperkte informatie beschikbaar over baggerwerkzaamheden in het Nederlandse deel van de Wielingen. Het is niet duidelijk of er voor 2000 en na 2003 onderhoudsbaggerwerkzaamheden of verdiepingen zijn uitgevoerd.

Uit de beschikbare literatuur kan wel worden geconcludeerd dat er in 2000-2001 in het kader van de verdieping 2,1 miljoen m³ is gebaggerd in de Wielingen en afgevoerd naar de stortzones in het Belgische deel van de monding. Aanvullend is er in 2001 nog 2,1 miljoen m³ gebaggerd en gestort langs de geulrand (in locaties SV02 – SV26 – zie locatie “Langs Wielingen” in Figuur bijlage A-5). Aangezien deze stortlocatie naast de Wielingen ligt geeft dit geen verandering in de volumebalans. In 2003 is er in het kader van het onderhoud 1,0 miljoen m³ gebaggerd en naar locatie W2 afgevoerd. Ook dit vak ligt nog binnen het balansgebied waardoor dit voor de volumebalans geen rol speelt. In 2013 zijn nog beperkte baggerwerken uitgevoerd (0,15 miljoen m³) dit materiaal is ook naar W2 afgevoerd.



Figuur bijlage A-5: Locaties van de verschillende stortzones in de monding.

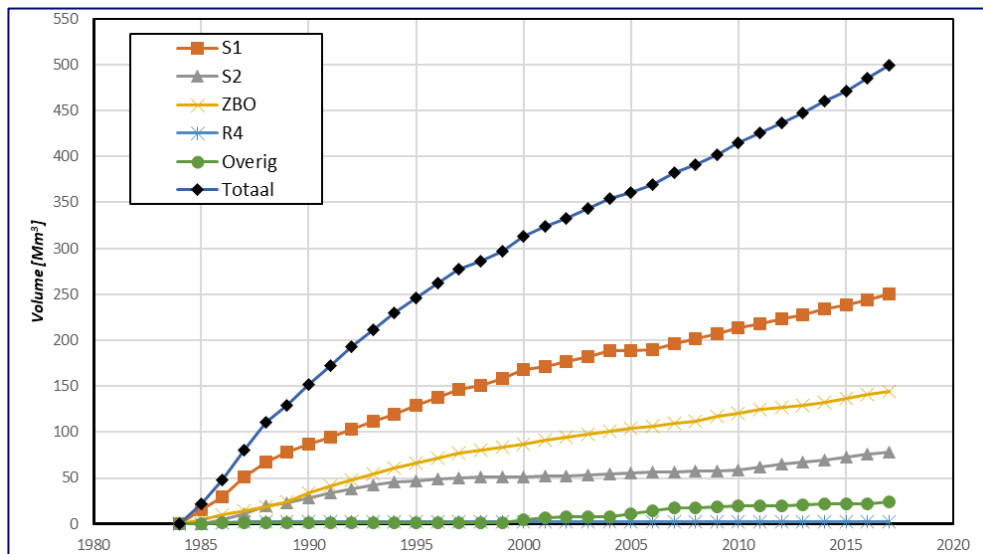
Baggerwerkzaamheden in de Sardijngeul.

In de Sardijngeul vindt regelmatig onderhoudsbaggerwerk plaats (Van der Werf et al. 2011). Het gebaggerde sediment wordt lokaal teruggeplaatst. Daarom heeft dit geen significant effect op de sedimentbalans. De suppletievolumes zijn gecorrigeerd om dubbeltelling te voorkomen. Zandwinning vond in het Nederlandse deel van de monding niet plaats.

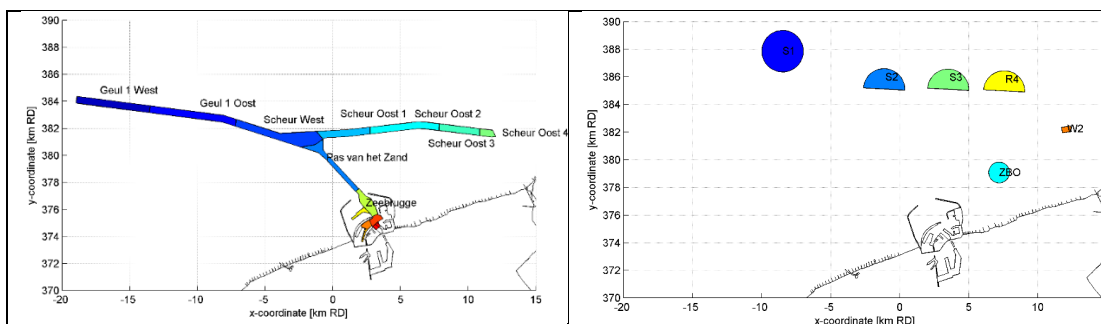
A.2.4 Ingrepen in het Belgische deel van de monding (een eerste inventarisatie)

Een schatting van de bagger- en stortvolumes in het Belgische deel van de monding is gebaseerd op Vroom (2015) voor de periode 1984-2007 en op Lauwaert et al. (2019) voor de periode 2007-2018. De tijdseries van de jaarlijkse volumes vertonen een groot stortvolume tot 1995 (gemiddeld 22 miljoen m³/jaar) en een kleiner volume sindsdien (gemiddeld 12 miljoen m³/jaar). Over de gehele periode ligt het gemiddelde stortvolume op 15 miljoen m³.

Het merendeel van de baggeractiviteiten vindt plaats in de haven van Zeebrugge, de toegangsgemaal (Pas van het Zand) en in de Scheur. Storten vindt plaats in een vijftal stortgebieden. Het merendeel van het materiaal wordt gestort in gebied S1 (50%), kleinere storthoeveelheden zijn geplaatst in ZBO (29%), S2 (16%) en alle overige gebieden (5%).



Figuur bijlage A-6: Overzicht stortvolumes Westerscheldemonding verdeeld in de belangrijkste stortvlakken.



Figuur bijlage A-7: Locaties van baggerzones (links) en stortzones (rechts) Vroom (2015).

Santermans (2013) laat zien dat er een grote variatie in sedimentsamenstelling in de Wielingen kan optreden. Het percentage slib varieert over het algemeen tussen de 10 en 50% in het meest zeewaarts gelegen meetpunt (zo ter hoogte van het Zwin). Bij de rede van Vlissingen liggen de slibpercentages veel lager (1-5%). De slibpercentages in de haven van Zeebrugge en in de toegangsheul liggen echter veel hoger. In Tabel Bijlage A-2 worden deze waarden samengevat.

Tabel Bijlage A-2: Slibpercentage voor de verschillende baggerlocaties (Vroom & Schrijvershof, 2015).

Slibpercentage (% < 63 μm)	%
Zeebrugge	
CDNB	66 (1990) / 94 (2000)
Voorhaven	60
Pas van het Zand	66
Scheur West	49
Scheur Oost	18
Wielingen	5

A.3 Actualisatie sedimentbalans Westerschelde estuarium en monding

A.3.1 Inleiding

In het verleden zijn er verschillende studies uitgevoerd, waarin de sedimentbalans van de monding is opgelost. Hoofdstuk 3.2 geeft een overzicht van de studies van Elias et al. (2016) en Elias en Van der Spek (2015) en de studie uitgevoerd door Nederbragt en Liek (2004). Het estuarium is recentelijk uitvoerig geanalyseerd en gerapporteerd in Elias et al. (2023). De belangrijkste inzichten uit deze studie zijn samengevat in H.3.2.3. In Hoofdstuk 3.3, 3.4 en 3.5 worden resultaten van een nieuwe volumeberekening en sedimentbalansmodel van het Nederlandse deel van de monding gepresenteerd.

A.3.2 Bestaande studies

Elias et al. (2016) en Elias en van der Spek (2015).

De meest recente schatting van de sedimentbalans van de monding is gemaakt door Elias et al. (2016). In deze studie is het sedimentverlies van het Nederlandse deel van de monding geschat op 0,8 miljoen m^3/jaar (1965-2010). In deze studie werd verder geconcludeerd dat structurele erosie aanwezig is op de Vlakte van de Raan (0,7 miljoen m^3/jaar sinds 1984).

Het sedimentverlies van de monding over een langere periode is lager dan de meer recente verliezen. Dit komt doordat er een duidelijk piek in de volumeontwikkeling te onderscheiden is (zie Figuur bijlage A-8). Kijken we alleen naar de periode 1980-2010 dan ligt het verlies in het

Nederlandse deel van de monding op 1,2 miljoen m³/jaar en over de periode 1990-2010 ligt dit verlies zelfs op 1,6 miljoen m³/jaar (Elias et al. 2016, pag. 20, Tabel 2).

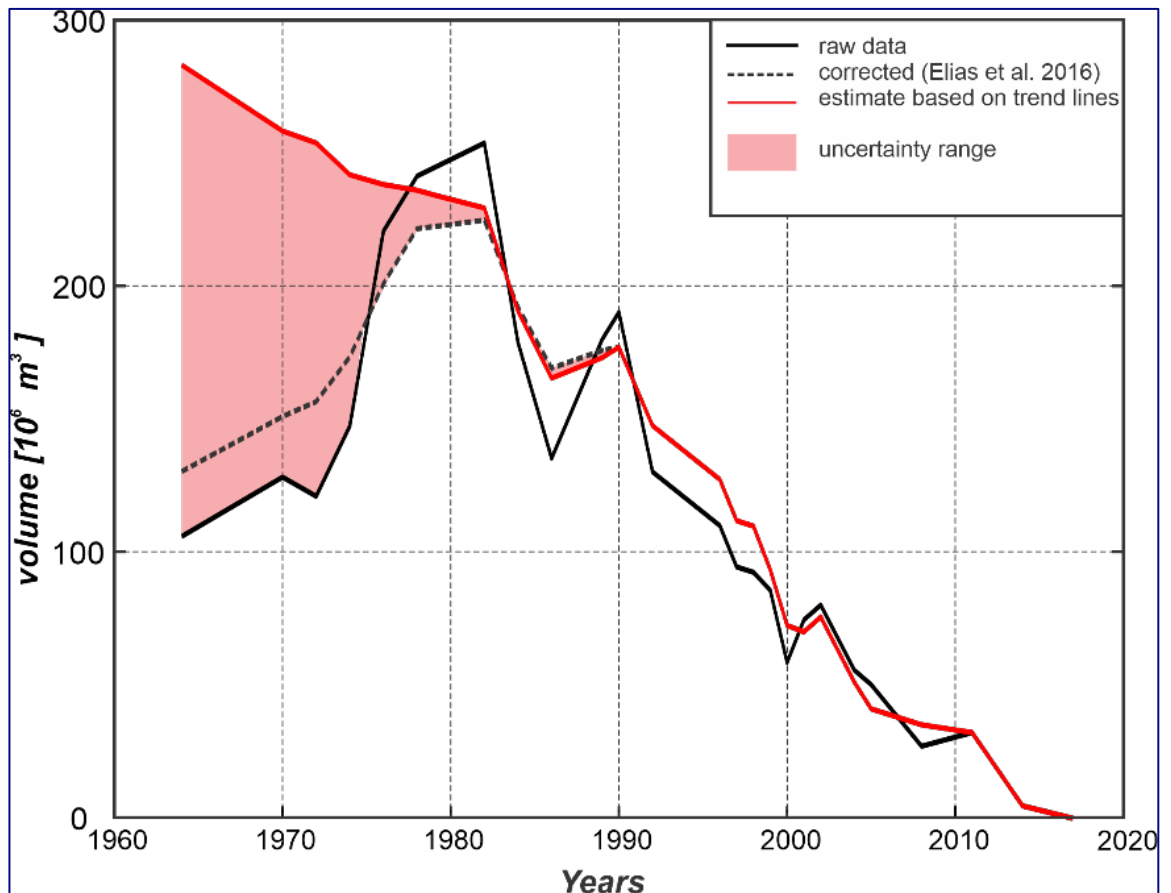
Een schatting van het verlies van de totale Westerscheldemonding (inclusief het Belgische deel) is gegeven in Elias & Van der Spek (2015). In totaal vindt er 211 miljoen m³ verlies plaats tussen 1970 en 2011. Een groot verlies, bijna -50 miljoen m³, treedt op rond Zeebrugge. De verlenging van de havendammen tot 4-km lengte tussen 1972 en 1986 heeft geresulteerd in ontgroning en verdieping rond de havendammen. Daarnaast is de toegangseul gebaggerd. Baggeren heeft ook plaatsgevonden in de Wielingen, waarna dit sediment werd neergelegd in stortzones langs de eul. De grootste verandering trad op tussen 1979 en 2000 (meer dan 3 miljoen m³/jaar erosie), maar sindsdien zijn de erosiesnelheden afgenomen tot (< 1 miljoen m³/jaar).

De grootste morfologische veranderingen doen zich voor langs de zuidwestkust van Walcheren waar geulen en banken verplaatsen. Bankverplaatsing geeft wel grote bruto verandering in morfologie, maar weinig netto verandering in sedimentvolume. Een relatief kleine structurele erosie is wel aanwezig in het Oostgat doordat deze eul dieper wordt en erosie van de kustlijn veroorzaakt. Deze erosie wordt tegengegaan door (grootschalige) suppleties. Alleen al in de periode 2009-2010 werd 7,1 miljoen m³ gesuppleerd door het aanbrengen van o.a. een grote eulwandsuppletie. Het totale suppletievolume tussen 1967 en 2011 bedraagt 17 miljoen m³. Grote zandverliezen treden ook op langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen. Hier is in totaal 20,9 miljoen m³ aan zand gesuppleerd sinds 1971.

De tijdseries van volumeontwikkeling van de gehele monding (zwarte lijn in Figuur bijlage A-8) worden gekenmerkt door een initieel sterke toename van de volumes, bijna 150 miljoen m³, tussen 1964 en 1984 en een afname vanaf 1984 tot heden. Zoals eerder al geconcludeerd geeft dit gemiddeld over de gehele periode een veel lagere erosiesnelheid dan een gemiddelde over een recente periode. Het is echter de vraag of deze piek wel echt opgetreden is of dat dit een resultaat is van meeton nauwkeurigheden. Elias et al. (2016) concluderen op basis van de sedimentatie-erosie patronen dat er duidelijk onrealistische bodemveranderingen optreden. Het corrigeren van deze onnauwkeurigheden is echter geen makkelijke taak. De grootste onnauwkeurigheden zijn echter zichtbaar in de oude kaarten (voor 1980). Nemen we deze oude kaarten niet mee in de analyse, maar gebruiken we een voortzetting van de trendlijnen dan wordt een schatting van de bandbreedte van de volumeveranderingen verkregen (zie rode gebied in Figuur bijlage A-8). Op basis van deze aanpak zouden veel hogere volumeverliezen over de gehele periode worden verkregen.

Als belangrijkste boodschap kan worden meegegeven:

1. Er is onzekerheid in de lange-termijn trends, en
2. De huidige trend (sinds 1980) vertoont een duidelijk erosief verloop met een jaargemiddelde waarde van ~6 miljoen m³/jaar.



Figuur bijlage A-8: Overzicht van de berekende volumeverandering in de monding van de Westerschelde tussen 1964 en 2017. De zwarte lijn geeft hierbij de ongecorrigeerde resultaten en de rode lijn die van de gecorrigeerde ontwikkeling. Het rode gebied geeft dan de onzekerheid in de volumebalans weer (uit Elias et al. 2023).

Nederbragt en Liek (2004)

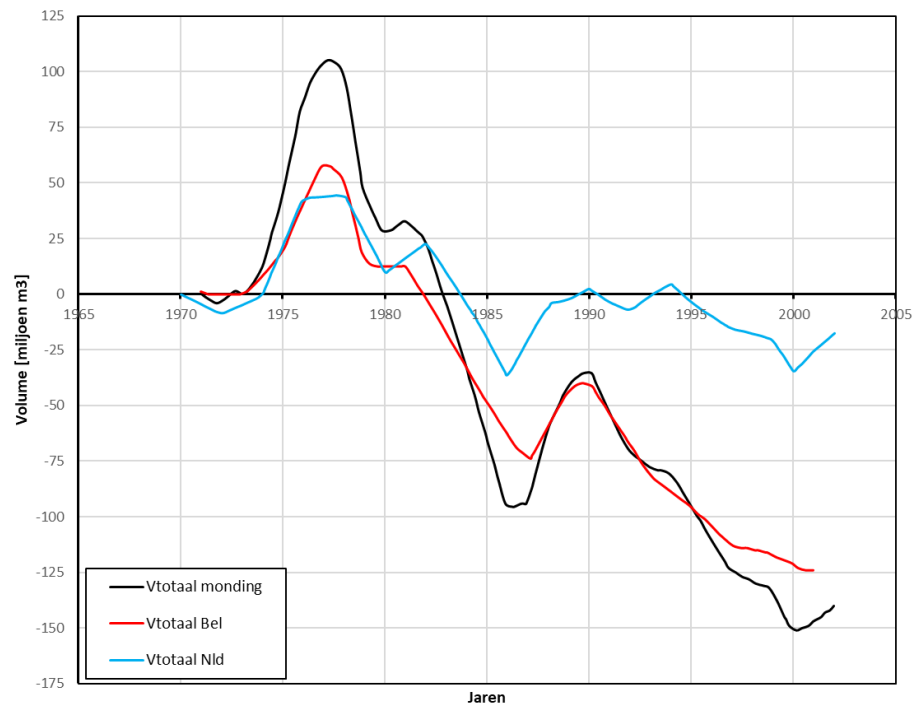
Een complete balans van de Westerschelde en het Nederlandse deel van de monding wordt gepresenteerd in Nederbragt en Liek (2004). Deze studie laat zien dat in de periode 1971 tot en met 2001 ruwweg 100 miljoen m^3 sediment is verloren uit het Nederlandse deel (Figuur bijlage A-9). Het merendeel van het verlies treedt op in de Westerschelde (-75 miljoen m^3) en een kleiner deel (-25 miljoen m^3) in de monding. Het zandverlies is vrijwel gelijk aan de zandwinning.

Invulling van een sedimentbudget (Figuur bijlage A-10) geeft een gemiddelde import in de monding van 2 miljoen m^3 /jaar in de periode 1971 tot en met 1989. Na 1990 slaat het systeem om van importerend naar exporterend. De export varieert tussen de 1,9 en 5,7 miljoen m^3 /jaar. De uitwisseling tussen monding en Westerschelde laat een soortgelijke omslag zien. Tussen 1971 en 1989 treedt er gemiddeld 1,8 miljoen m^3 import op, terwijl er in de periode 1990-2001 er een export van 1,5 miljoen m^3 /jaar optreedt. Let op dat in deze balans de uitwisseling met de Schelde en Saeftinghe 0 bedraagt. In de studie van Elias et al. (2023) bedraagt de uitwisseling ongeveer 1 miljoen m^3 , er moet dus 1 miljoen m^3 import bij Nederbragt en Liek (2004) worden opgeteld om de balansen te vergelijken.

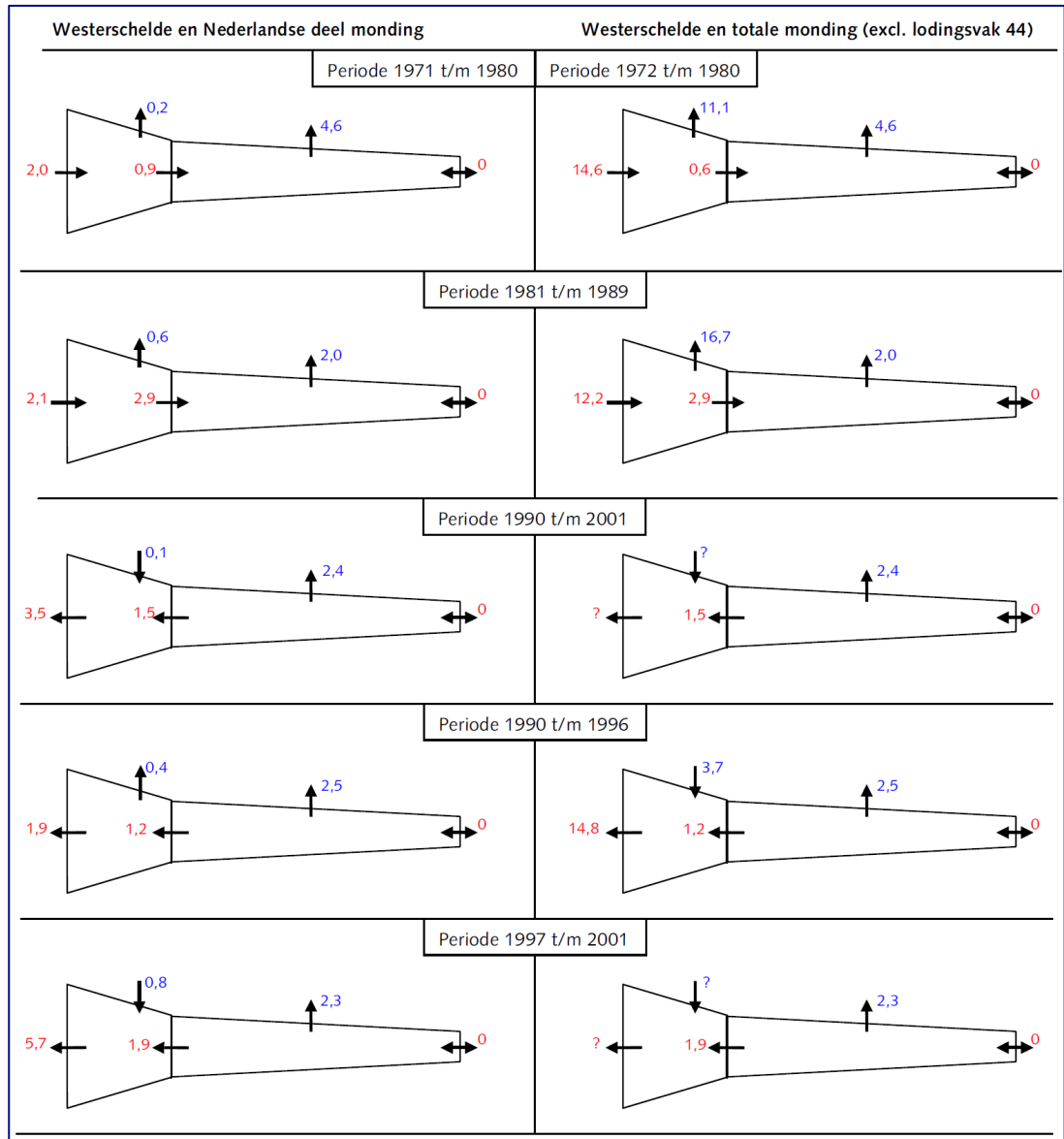
Het meenemen van het Belgische deel van de monding resulteert in een grote verandering van de berekende transporten in de monding. Tussen 1971 en 2001 vindt er 145 miljoen m^3 erosie plaats in de monding, waarvan het merendeel (120 miljoen m^3) in het Belgische deel. Nederbragt en Liek merken op dat:

- de netto onttrekking in de monding het gevolg is van het ontbreken van stortvak S1 in de volumebalans.
- Kwantitatief hangen de uitspraken over import of export de monding dan ook sterk af van het wel of niet meenemen van lodingsvak 44. Als stortvak S1 geheel of gedeeltelijk wordt toebedeeld aan het lodingsvak, laat de volumeontwikkeling in het Belgische deel van de monding een dalende lijn zien en wordt dus erosie geconstateerd. Deze erosie is wel van een andere orde dan die van het Nederlandse deel van de monding. Voor het Belgische deel van de monding zonder lodingsvak 44 is namelijk pas vanaf 1990 structurele erosie te zien, daarvoor vindt sedimentatie plaats.

Het gemiddelde transport richting de monding tussen 1972 en 1989 wordt berekend op 13,4 miljoen m³/jaar. In de periode 1990-1996 treedt ook hier een omslag op met een verlies van 14,8 miljoen m³. De periode na 1997 kan niet worden berekend door missende bagger- en stortgegevens.



Figuur bijlage A-9: Volumeontwikkeling van de monding (zwarte lijn) onderverdeeld in Nederlandse deel (blauw) en Belgische deel (rood) gebaseerd op Nederbragt en Liek (2004).



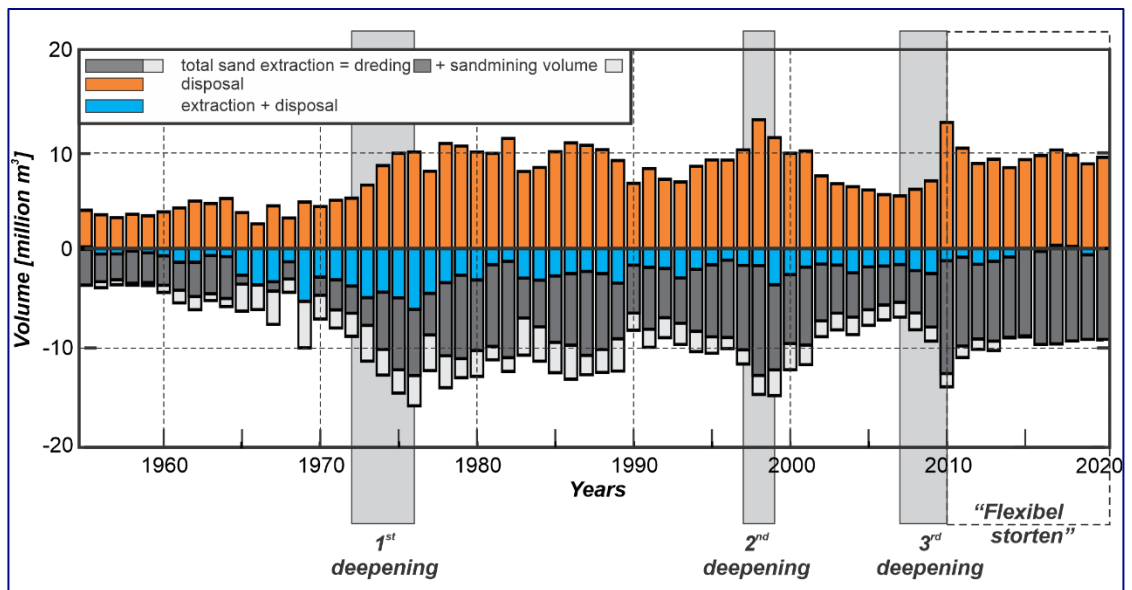
Figuur bijlage A-10: Zandbalans (in miljoen m³/jaar) voor de Westerschelde en het Nederlandse deel van de monding (links) en de Westerschelde en totale monding (rechts) met een interval van ongeveer 10 jaar. Getallen die niet ingevuld konden worden door het ontbreken van de gegevens zijn weergegeven met een ?.

Samenvatting van inzichten m.b.t het estuarium (Elias et al., 2023)

Een schatting van de uitwisseling tussen de monding en het estuarium kan worden verkregen door een sedimentboxmodel van de Westerschelde op te stellen (zie Elias et al. 2023 voor details). Dit sedimentboxmodel is in principe een opsomming van alle winst- en verliesposten, (baggeren, storten, zandwinning), de gemeten bodemhoogteverandering en de uitwisseling naar andere gebieden (Saefinghe en Schelde).

Gedetailleerde bodemmetingen ter bepaling van de verandering in sedimentvolume zijn beschikbaar sinds 1955. Tot 1996 zijn de metingen over het algemeen 2-jaarlijks opgenomen en vanaf 1996 wordt het estuarium jaarlijks opgenomen. Op basis van deze bodemkaarten kan een gedetailleerd beeld van de sedimentvolumeverandering worden verkregen (zwarte lijn in Figuur bijlage A-12, bovenste deelfiguur). Naast de bodemhoogteverandering spelen ook menselijke ingrepen een belangrijke rol. In de Westerschelde zijn 3 grote verdiepingen uitgevoerd: tussen 1973-1976 (ongeveer 57,5 miljoen m³ baggerwerk), 1997-1998 (17

miljoen m³) en in 2010 (7,7 miljoen m³). De hoofdgeul is hierbij in diepte toegenomen tot NAP -17,2 m. Als gevolg van deze verdiepingen is het onderhoudsbaggerwerk sterk toegenomen van zo'n 0,5 miljoen m³/jaar in 1950 tot 7-10 miljoen m³/jaar in de huidige situatie. Het gebaggerde sediment wordt terug in de Westerschelde verspreid. Naast baggeren en storten heeft ook zandwinning een rol gespeeld. Tussen 1956 en 2014 is er 119 miljoen m³ aan zand onttrokken (Figuur bijlage A-11).



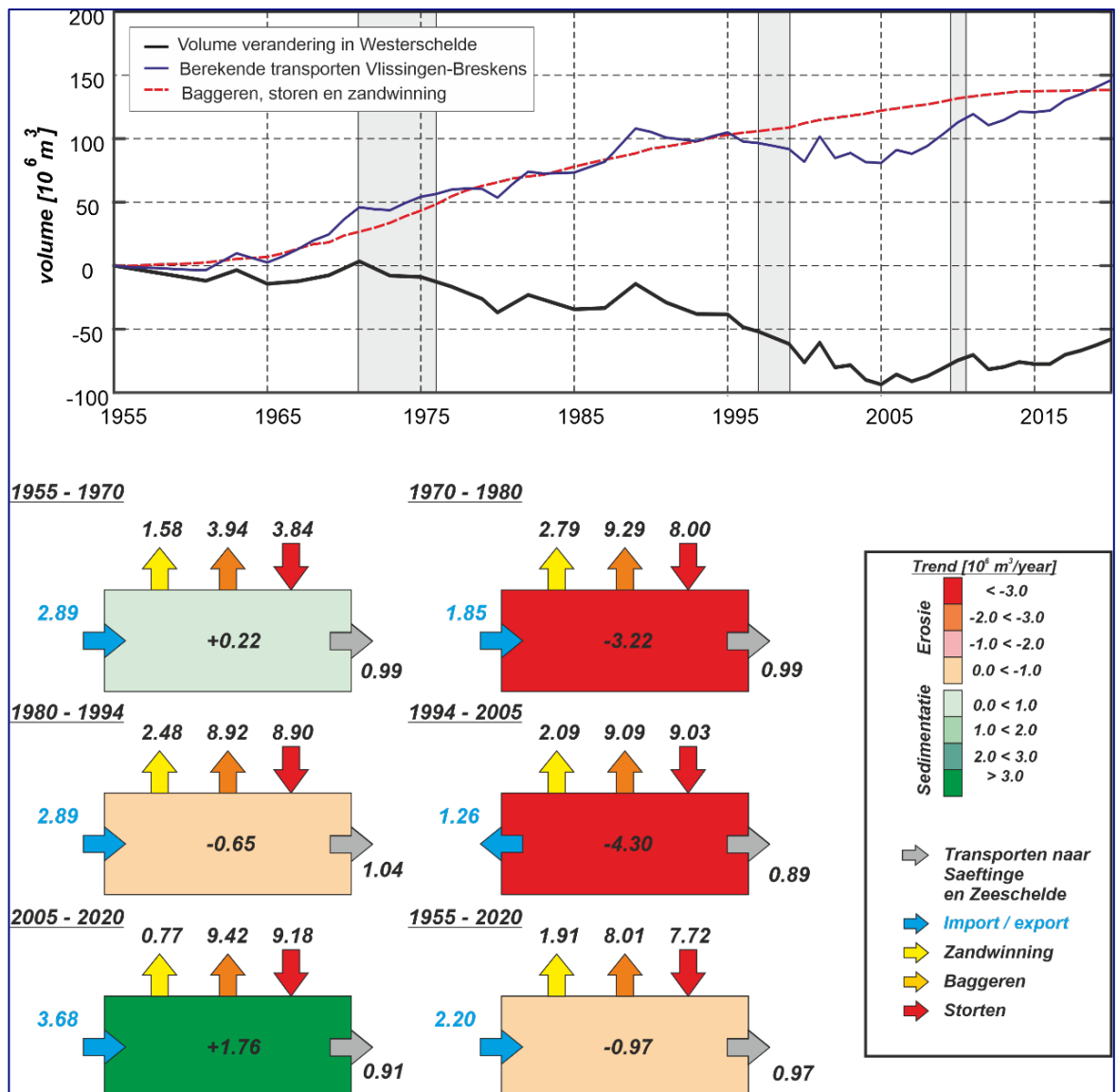
Figuur bijlage A-11: Overzicht van de bagger- en stortvolumes en zandwinning uitgevoerd in de Westerschelde over de periode 1955 - 2020. Gedurende deze periode zijn ook 3 verdiepingen uitgevoerd.

Voor het invullen van het simpele box model (zie onderste deelfiguren in Figuur bijlage A-12) zijn naast deze winst- en verliesposten ook de uitwisselingen met de Schelde en het Verdrongen land van Saeftinghe belangrijk. In eerdere studies, zoals Haecon (2006), wordt een sediment transport van 0,30 miljoen m³ richting het Land van Saeftinghe gehanteerd. De schattingen voor de uitwisseling met de Zeeschelde vertonen een wat grotere spreiding. De meest recente studies van Vandenbruwaene et al. (2017), Plancke et al. (2021) en Vos et al. (2021) geven schattingen van de zand-slib uitwisseling over de periode 2016-2021. Vandenbruwaene et al. (2017) concludeert op basis van een uitgebreide sedimentbalansstudie van de Schelde dat er over de periode 2001-2011 een gemiddeld westelijk transport van slib optreedt met een waarde van 0,25 miljoen m³/jaar. Zand transport is oostelijk gericht met een waarde van 0,61 miljoen m³/jaar. Plancke et al. (2021) en Vos et al. (2021) geven een oostelijk zandtransport van 1 miljoen m³/jaar in de periode 2011-2016, dit reduceert tot ongeveer de helft (0,48 miljoen m³/jaar) tussen 2016 en 2019. De slibtransporten (0,16 miljoen m³/jaar) zijn westelijk gericht tussen 2011 en 2016 en oostelijk gericht (0,16 miljoen m³/jaar) in de periode 2016-2019.

Deze waarden worden gebruikt voor invulling van het box model en de berekening van sedimenttransporten over de lijn Vlissingen-Breskens (Figuur bijlage A-12, onderste deelfiguren).

Over de gehele periode (1955-2020) resulteert invulling van alle waarden in een netto sediment import van 2,2 miljoen m³/jaar. Op basis van de sedimentvolume verandering van het bekken zijn er verschillende perioden met meer en minder sedimentimport en zelfs een periode met sedimentexport te onderscheiden. In de periode vóór de eerste verdieping, tussen 1955 en 1970, wordt een import van 2,9 miljoen m³/jaar berekend. Een klein deel van deze import resulteert in een toename van de bodemhoogte (10%). Ruwweg 1/3 van deze

import is gerelateerd aan de verliezen naar Schelde en Saeftinghe. Het grootste deel (1,6 miljoen m³/jaar) is echter gerelateerd aan de zandwinning.



Figuur bijlage A-12: Overzicht van de sedimentbalans van het Westerschelde estuarium. Boven: Tijdsreeks van sedimentvolumeontwikkeling in het estuarium (zwarte lijn) en de transporten het estuarium in over de lijn Vlissingen-Breskens (blauwe lijn) en de transporten het estuarium uit (rode lijn). Onder: overzicht van het 1-box sedimentmodel over geselecteerde perioden (1955-1970, 1970-1980., 1980-1994, 1994-2005, 2005-2020 en 1955-2020). Blauwe pijlen zijn de berekende sedimenttransporten over de lijn Vlissingen-Breskens.

Tussen 1970 en 1980 neemt de diepte van het estuarium sterk toe (1^e verdieping). Gemiddeld neemt het estuarium met 3,3 miljoen m³/jaar in sedimentvolume af in deze periode. Dit verlies wordt veroorzaakt door de sterk toegenomen zandwinning (2,79 miljoen m³/jaar). Daarnaast wordt er in deze periode 9,3 miljoen m³/jaar gebaggerd en 8,0 miljoen m³/jaar teruggestort. Dit geeft ook een verlies van meer dan 1,0 miljoen m³/jaar. De grote herverdeling van sediment leidt ook tot een tijdelijke afname van de sedimentimport tot 1,9 miljoen m³/jaar. Na deze verdieping nemen de sedimentimporten in de periode 1980-1994 weer toe tot 2,9 miljoen m³/jaar. Dit is vrijwel gelijk aan de transporten voor de verdieping. Doordat de zandwinning in deze periode veel hoger is (2,48 miljoen m³/jaar) neemt de diepte

van het estuarium toe. Naast zandwinning vindt er door baggeren en storten een herverdeling van sediment plaats (8,9 miljoen m³/jaar).

De periode 1994-2005 vertoont afwijkend gedrag. In deze periode treedt er juist een netto export op van 1,3 miljoen m³/jaar. Op basis van een gedetailleerde zandbalans op macrocel-niveau (Elias et al. 2023) kan worden geconcludeerd dat deze export is gerelateerd aan de sterke verdieping van de hoofdgeul, waardoor er veel zand vrijkomt. Doordat een groot deel van het gebaggerde sediment in het westelijk deel van het estuarium gestort wordt, ontstaat er een surplus aan sediment dat eigenlijk alleen zeewaarts kan worden afgevoerd. In de periode 2005-2020 ontstaat juist het tegenovergestelde beeld. Het bekken vertoont een grote aanzanding (+1,8 miljoen m³/jaar) en daardoor ook een grote netto import. In deze periode verandert de stortstrategie. Er wordt nu meer op de platen in het oostelijk deel van de Westerschelde verspreid. Dit sediment draagt hierbij aan bankvorming en een verhoging van de bodemhoogte. Hierdoor is dit sediment verder niet beschikbaar voor herverdeling in het systeem. Er moet nu een grote sediment import in het westelijk deel plaatsvinden om de balans sluitend te krijgen.

Een vergelijking tussen de studies

Import en export van het estuarium

Uit zowel de studie van Nederbragt en Liek (2004) en Elias et al. (2023) blijkt dat het Westerschelde estuarium over de lange termijn importerend is. Wel wisselen perioden met import en export elkaar af. Tot ongeveer 1990 is er een duidelijke import te onderscheiden. Zonder de verliezen naar de Schelde en Land van Saefthinghe geven beide studies een vergelijkbare schatting van deze importen: 1,74 miljoen m³/jaar door Nederbragt en Liek en 1,9 miljoen m³/jaar door Elias et al. (2023).

Vanaf 1990 vindt een periode van export plaats. Nederbragt en Liek schatten deze export op gemiddeld 1,5 miljoen m³/jaar over de periode 1990-2001. De langere tijdseries in de studie van Elias geven weer dat er een tijdelijke periode van export optreedt tot 2005, daarna is er weer een sterk importerend systeem zichtbaar. Elias berekent een export in de monding over de periode 1994-2005 van 1,2 miljoen m³/jaar en een verlies naar de Schelde van 0,9 miljoen m³/jaar. Het totale verlies ligt daarmee iets hoger dan berekend door Nederbragt en Liek. De conclusies van beide rapporten zijn wat betreft het estuarium en de richtingen van het transport wel vergelijkbaar.

Transporten in de monding

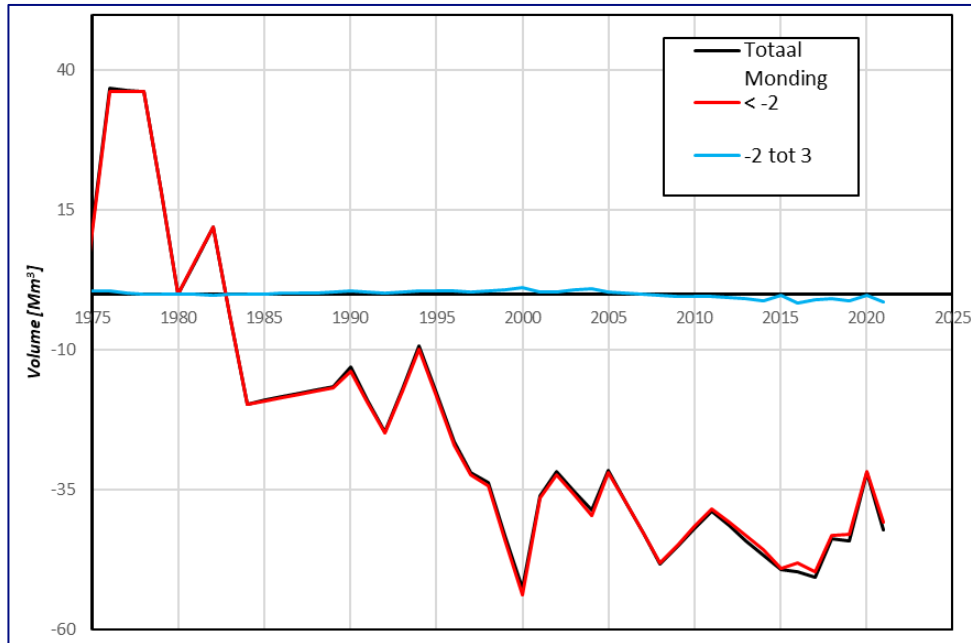
Elias en Van der Spek (2016) geven als schatting van de verliezen in het Nederlandse deel van de monding een verlies van 0,8 miljoen m³/jaar tussen 1965-2010. Dit verlies is groter over de recente periode, namelijk 1,2 miljoen m³/jaar (1980-2020) en 1,6 miljoen m³/jaar (1990-2010). Deze verliezen zijn in lijn met Nederbragt en Liek. Zij geven als schatting voor de periode 1970-2001 een verlies van 1,3 miljoen m³/jaar (op basis van de trendlijn).

A.3.3 Heranalyse van de sedimentvolumeverandering van het Nederlandse deel van de monding

De bodemkaarten zoals getoond in Hoofdstuk 2.2 zijn gebruikt om de volumeveranderingen in het Nederlandse deel van de monding opnieuw te berekenen. Deze berekening gebruikt de data voor Zeeuwse Kaartbladen 11, 12, 17, 18 en 19 (Figuur bijlage A-1).

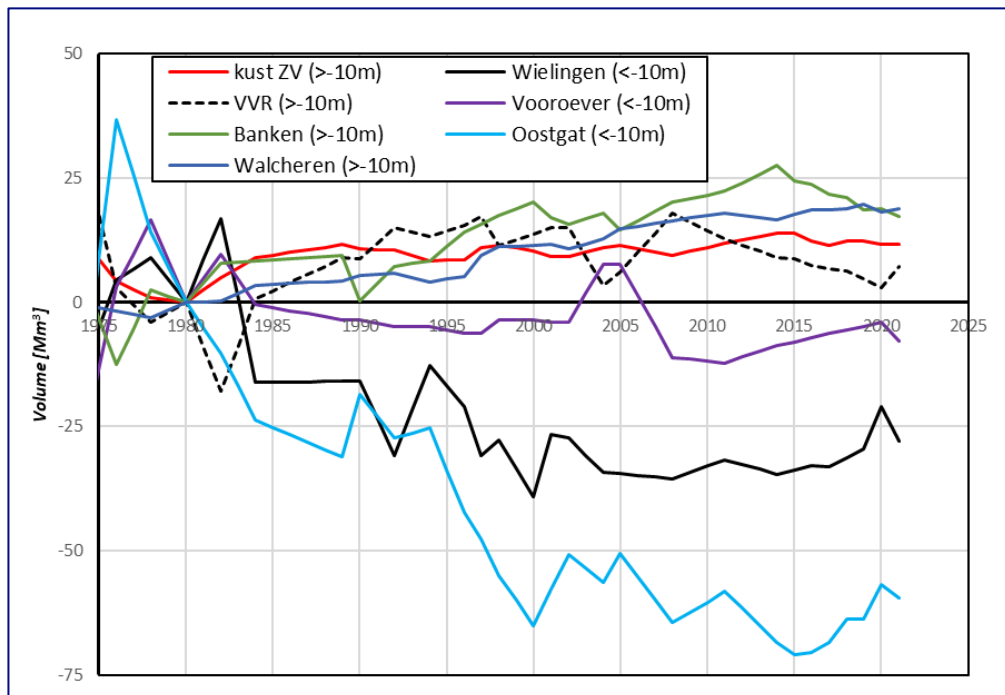
De volumes zijn berekend voor de totale Nederlandse monding en er is onderscheid gemaakt in het natte deel (dieper dan NAP -2 m) en het intergetijde deel (NAP -2 tot +3m). Zo'n onderscheid is logisch in het estuarium, maar in de monding is dit eigenlijk niet nodig, omdat daar nauwelijks intergetijdengebieden zijn. Het totale volumeverlies tussen 1980 en 2021 bedraagt 42 miljoen m³. Het maximale verlies van 50 miljoen m³ trad op in 2017. Sindsdien lijken de volumes iets toe te nemen. Op basis van de trendline over de periode 1980-2021

bedraagt het verlies -1,1 miljoen m³/jaar. Dit verlies is groter tussen 1980 en 1997 (-1,5 miljoen m³/jaar) en kleiner sindsdien (-0,3 miljoen m³/jaar).



Figuur bijlage A-13: Verandering in sedimentvolume t.o.v. de 1980 volumes in het Nederlandse deel van de Westerscheldemonding.

De volumeverliezen kunnen ook per morfologische eenheid worden weergegeven. Deze morfologische eenheden zijn gedefinieerd in Figuur bijlage A-16. De tijdseries geven weer dat de grootste netto verliezen optreden in de geulen Oostgat en Wielingen. De kustzones (Zeeuws-Vlaanderen en Walcheren) nemen in volume toe. Ook het bankengebied (Elleboog, Bankje van Zoutelande) neemt in volume toe.



Figuur bijlage A-14: Sedimentvolumes van de verschillende morfologische eenheden in het Nederlandse deel van de monding relatief t.o.v. het 1980 volume.

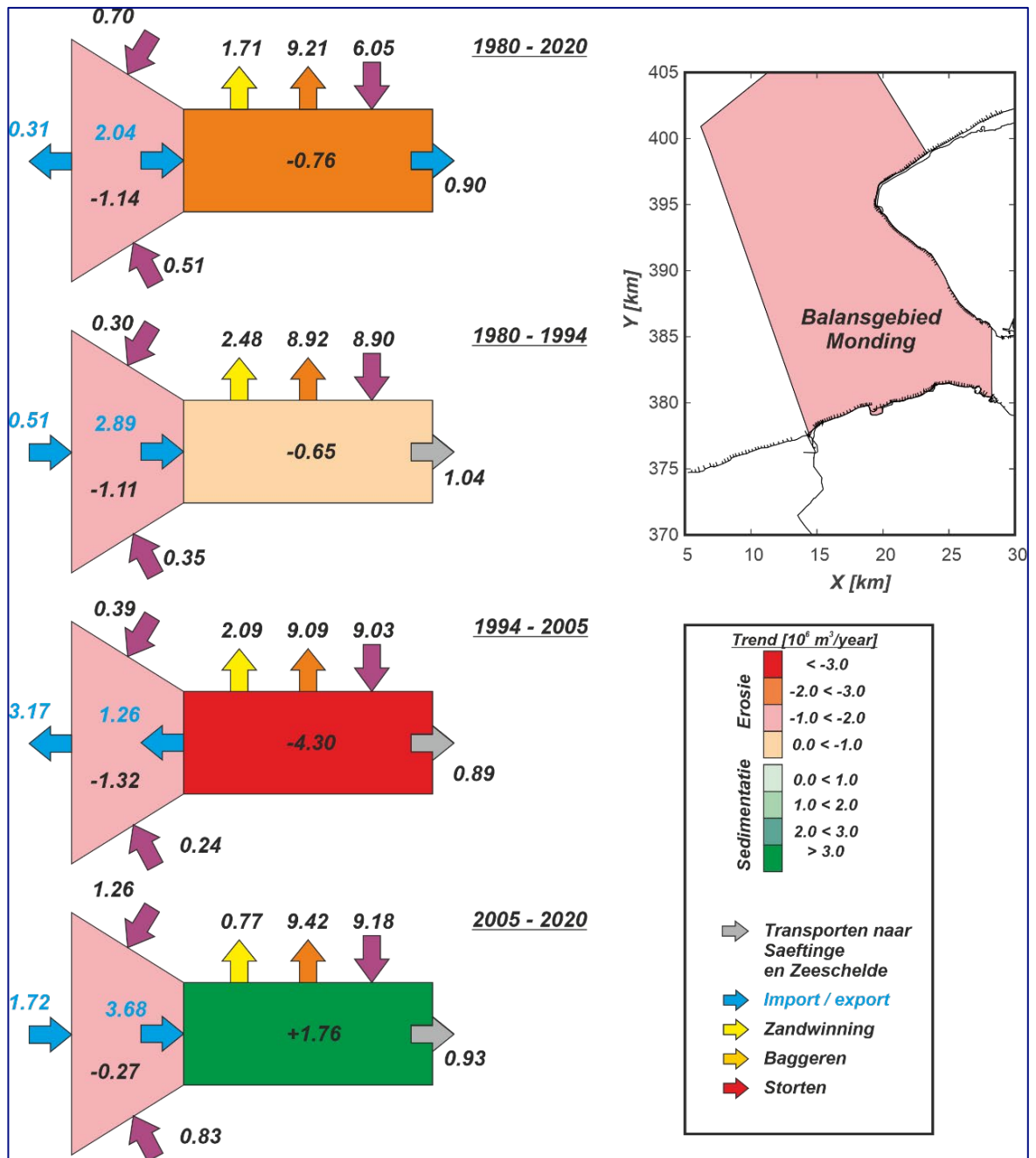
A.3.4 Een 2-box model van monding en estuarium (2-box model)

De volumetijdseries vormen de basis voor de invulling van een 2-box sedimentmodel van de monding en het estuarium. Dit 2-boxmodel beschouwt het Nederlandse deel van de monding (zeewaarts van de lijn Vlissingen-Breskens) als 1 element en het estuarium (landwaarts van de lijn Vlissingen-Breskens) als 2^{de} element (Figuur bijlage A-15).

Het boxmodel kan vervolgens worden opgelost over de totale periode 1980-2020. Daarnaast worden de voor het estuarium gedefinieerde perioden 1980-1994, 1994-2005 en 2005-2020 beschouwd. De uitgevoerde suppleties worden hierbij volledig toegekend aan de monding. Verliezen van suppletiezand naar de duinen worden hierbij niet meegenomen.

Over de gehele periode (1980-2020) vindt er een import van 2 miljoen m³/jaar sediment plaats het estuarium in. Erosie van het Nederlandse deel van de monding bedraagt 1,1 miljoen m³/jaar. Daarnaast wordt er voor 1,2 miljoen m³/jaar gestort langs de aangrenzende kusten. Het totale sediment aanbod (erosievolume + de zandsuppleties) is dus 2,3 miljoen m³/jaar, wat betekent dat er nog aanvullend een klein transport van 0,3 m³/jaar uit de monding heeft plaatsgevonden. Dit netto zeewaarts transport geeft geen goede afspiegeling van het gedrag van de monding en is vooral het resultaat van de periode 1994-2005. In deze periode vindt er zowel een export van het estuarium plaats, maar ook een groot volumeverlies in het Nederlandse deel van de monding. Dit betekent dat er veel sediment zeewaarts (richting het Belgische deel van de monding) moet zijn verplaatst.

De meest recente periode (2005-2020) vertoont een tegengestelde trend. Het estuarium heeft nu een grote sedimentvraag. Deze sedimentvraag kan gedeeltelijk worden voldaan door de erosie van de Vlake van de Raan en de uitgevoerde suppleties. Daarnaast moet er 1,7 miljoen m³ aan sedimenttransport (import) van België naar Nederland zijn opgetreden.



Figuur bijlage A-15: Overzicht van het 2-boxen model van het Nederlandse deel van de monding en het estuarium over de periode 1980-2020 en de perioden 1980-1994, 1994-2005, 2005-2020.

A.3.5

Een schatting van de sedimentuitwisseling binnen het Nederlandse deel van de monding

Dit hoofdstuk is toegevoegd ter discussie. De doelstelling van deze analyse is meer begrip van de sedimenthuishouding te verkrijgen door een gedetailleerde volumebalans en het hieruit afleiden van de meest waarschijnlijke sedimentstromen. In deze analyse zijn het toekennen van de juiste morfologische eenheden en de het doen van aannamen over uitwisseling van cruciaal belang.

Definities

Een gedetailleerd boxmodel is gebaseerd op een indeling van de monding in 7 morfologische zones: (1) Zeeuws-Vlaanderen, (2) Wielingen, (3) Vlakte van de Raan – VVR, (4) Banken, (5) Oostgat, (6) Walcheren en (7) Diepe vooroever.

Deze indeling wordt verkregen door het uitvoeren van twee stappen:

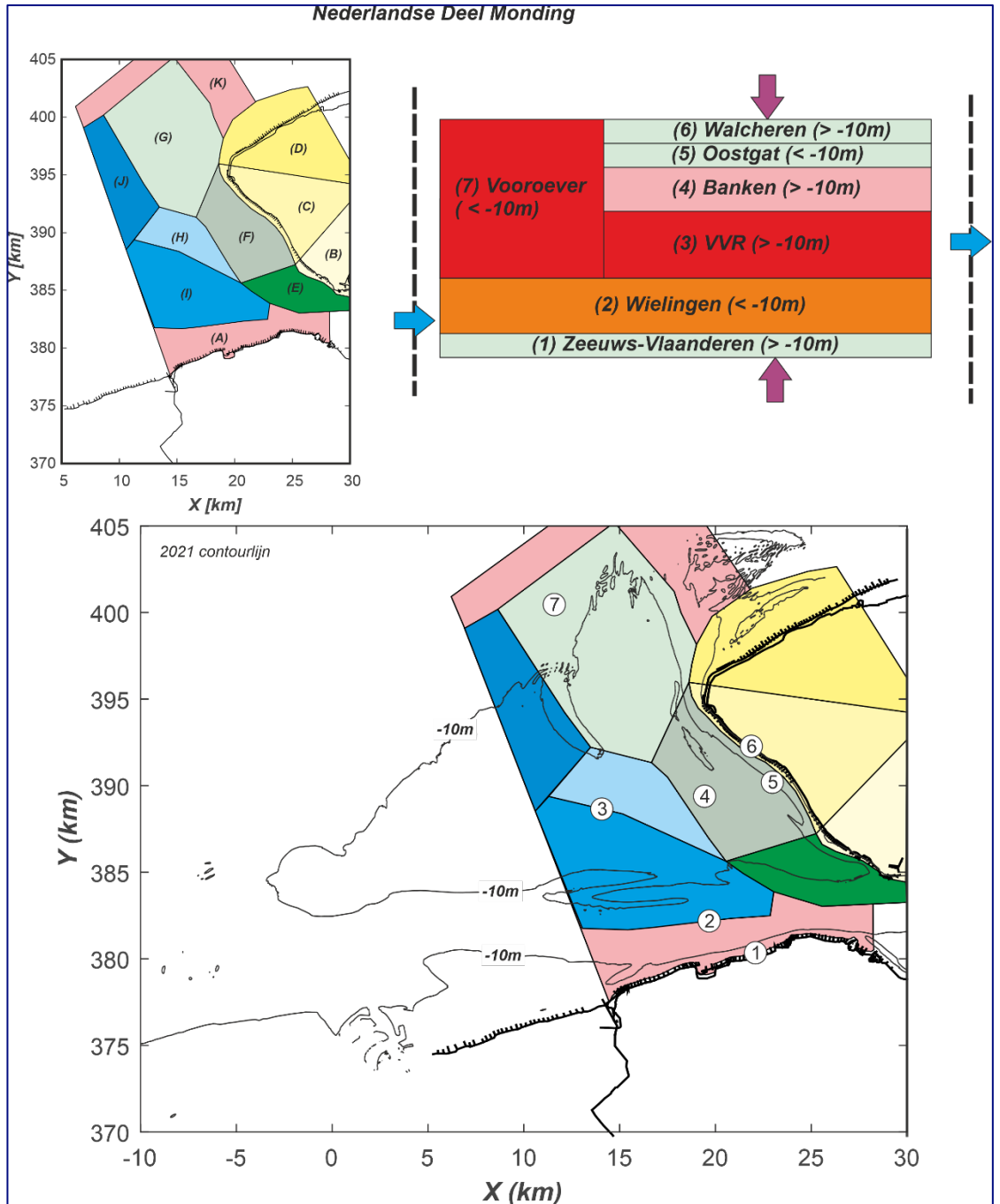
Stap 1: De onderverdeling van de monding in 11 deelpolygonen met vaste geografische afbakening zoals weergegeven in (Figuur bijlage A-16, linkerzijde):

- (A) Kust Zeeuws-Vlaanderen (begrenzing door de Wielingen).
- (B-D) Kust Walcheren (begrenzing door diepe deel van het Oostgat.
- (E-G) Banken gebied (actieve zone), begrenzing door de Walvischstaart.
- (H-J) Vlake van de Raan
- (K) Omliggende vooroever.

Daarnaast wordt een vaste diepte contour (de -10m NAP) gebruikt om de verschillende elementen van elkaar te scheiden. Deze contour is vast in diepte maar de ligging kan per bodemopname dan wel anders zijn.

- 1) Kust van Zeeuws-Vlaanderen: deelpolygoon (A) alle waarden boven -10m en kleiner dan +3 m NAP.
- 2) Wielingen: deelpolygoon (A) $< -10m$ + (I) $< -10m$.
- 3) Vlake van de Raan: H $> -10m$ + (I) $> -10m$ + J $> -10m$.
- 4) Banken: (F) $> -10m$, E $> -10m$, G $> -10m$,
- 5) Oostgat: (B) $< -10m$, (C) $< -10m$, (D) $< -10m$, (E) $< -10m$, (F) $< -10m$.
- 6) Walcheren: (B) -10m tot +3m, (C) $> -10m$ tot + 3m, (D) $> -10m$ tot + 3m.
- 7) Vooroever: (J) $< -10m$, (G) $< -10m$, (K).

Let op dat bij het gebruik van meebewegende contouren de transporten eigenlijk niet direct uit de volumes kunnen worden bepaald. Dit zou vooral bij hoge dynamiek een probleem opleveren. Voor de hier gepresenteerde resultaten is dit probleem minder belangrijk omdat er alleen met grote gebieden gewerkt wordt. De veranderingen in oppervlakte van deze gebieden is relatief beperkt. Deze transporten zijn gebaseerd op expert-judgement en aannamen benodigd voor het afleiden van de richting en onderlinge uitwisseling. Deze aannamen worden beschreven in de resultaten.



Figuur bijlage A-16: Principeschets van de gebruikte onderverdeling in deelpolygonen (links) en het detail sedimentboxmodel van de monding (rechts). De paarse pijlen geven de suppleties weer, de blauwe lijnen de sedimenttransporten.

Resultaten

1980-2020

De sedimentbalans over de gehele periode laat een import zien van 2 miljoen m³/jaar het estuarium in en een uitstroom uit de monding van 0,31 miljoen m³/jaar. De monding zelf vertoont een verdieping van de diepere delen (vooroever en geulen, < -10 m) en sedimentatie in de ondiepere (> -10m) gebieden.

Voor het oplossen van het detail-boxmodel zijn aanvullende aannamen benodigd. Deze aannamen zijn als volgt.

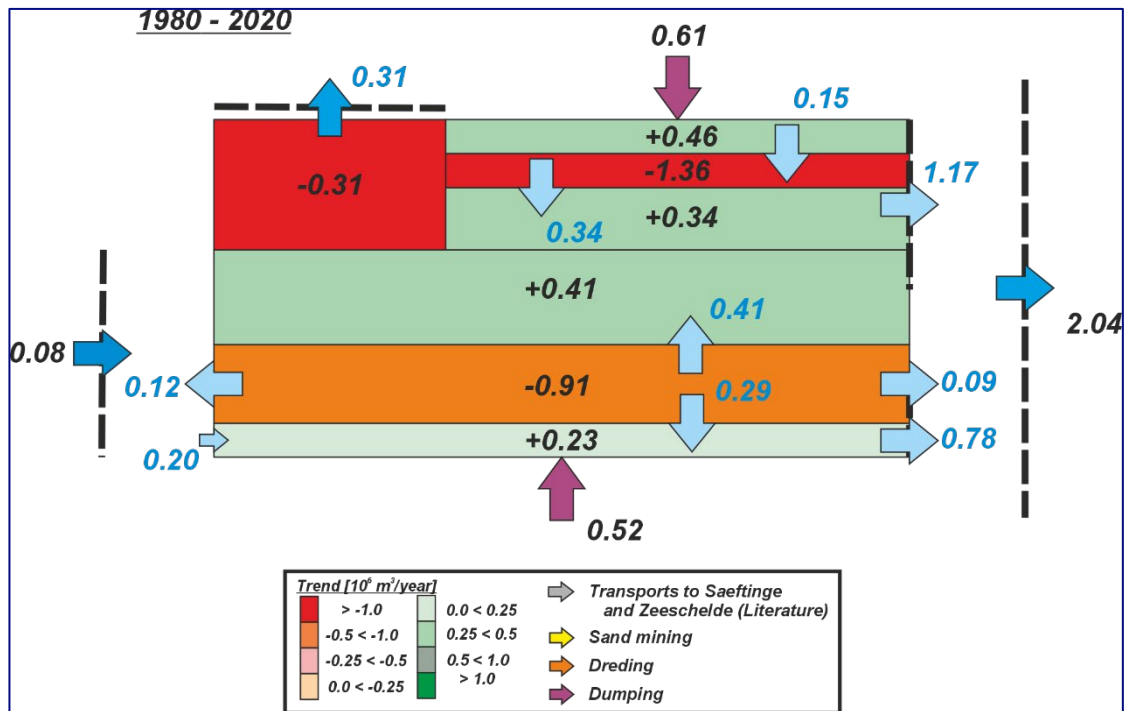
- (1) De uitwisseling langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen is gelijk aan de aanzanding van Mesocel (Mc) 2 en kan worden afgeleid uit de volumebalans van het estuarium (0,78 miljoen m³/jaar in Figuur bijlage A-17) .
- (2) De brandingstransporten langs de kust van België richting Zeeuws-Vlaanderen zijn geschat op 0.2 miljoen m³/jr. en bij de zeedijk van Westkapelle op 0 miljoen m³/jr. (Huisman, 2024).
- (3) De volumeverandering van de morfologische eenheid Diepe Vooroever (0,31 miljoen m³/jaar in Figuur bijlage A-17) geeft een schatting van de transporten richting de buitendelta van de Oosterschelde.

Door gebruik te maken van aannamen 1 tot 3 is het mogelijk de transporten tussen de verschillende morfologische eenheden te beredeneren.

Over de periode 1980-2020, geeft deze laatste aanname een netto uitstroom richting de buitendelta van de Oosterschelde van 0,31 miljoen m³/jaar. De totale uitstroom is iets kleiner. Het brandingstransport langs de Belgische kust richting Nederland is geschat op 0,20 miljoen m³/jaar, dat betekent dat er ook een klein verlies uit de Wielingen moet opreden van 0,12 miljoen m³/jaar. Er is dus netto een kleine import van 0.08 miljoen m³/jaar opgetreden langs de Belgische grens van de monding. Deze import is kleiner dan het verlies aan de noordzijde van de monding (0,31 miljoen m³/jaar), waardoor de monding als geheel een netto export vertoont van 0,23 miljoen m³/jaar.

De actieve kustzone van Zeeuws-Vlaanderen, hier gedefinieerd als het gebied tussen -10 en +3m NAP, neemt met gemiddeld 0,23 miljoen m³/jaar in volume toe. Deze toename is kleiner dan de 0,52 miljoen m³/jaar die er hier toegevoegd wordt door suppleties. Dit surplus aan zand is waarschijnlijk oostwaarts verplaatst en heeft dan bijdragen aan de sedimentatie in Mc2. Gebruiken we de opgetreden sedimentatie in Mc2 van 0,78 miljoen m³/jaar als indicatie voor de sedimentinvoer, dan zal de Wielingen nog 0,29 m³/jaar bijgedragen moeten hebben.

De volumetoename van Mc2 verklaart slechts een deel van de 2,04 miljoen m³/jaar aan sediment import door de monding. Er moet nog 1,26 m³/jaar aanvullend zijn geïmporteerd. Een bron voor deze transporten zijn de zandsuppleties langs de kust van Walcheren (0,61 miljoen m³/jaar) en de verdieping van het Oostgat (-1,36 miljoen m³/jaar). Ongeveer 3/4 van het suppletiemateriaal (0,46 miljoen m³/jaar) heeft bijgedragen aan de volumetoename van de kustzone van Walcheren. Een kleiner deel (0,15 miljoen m³/jaar) is richting het Oostgat verplaatst of rechtstreeks vanaf de kustzone afgevoerd richting het estuarium. Het merendeel van de erosie van het Oostgat lijkt oostwaarts te zijn afgevoerd. Een klein deel (0,34 miljoen m³/jaar) heeft waarschijnlijk bijgedragen aan de volumetoename van het voorliggende banken gebied. Op basis van de ze balans is er vanuit het Oostgat een transport richting de Westerschelde van 1,17 miljoen m³/jaar, het overige deel (0,09 miljoen m³/jaar) moet vanuit de Wielingen zijn aangevoerd.

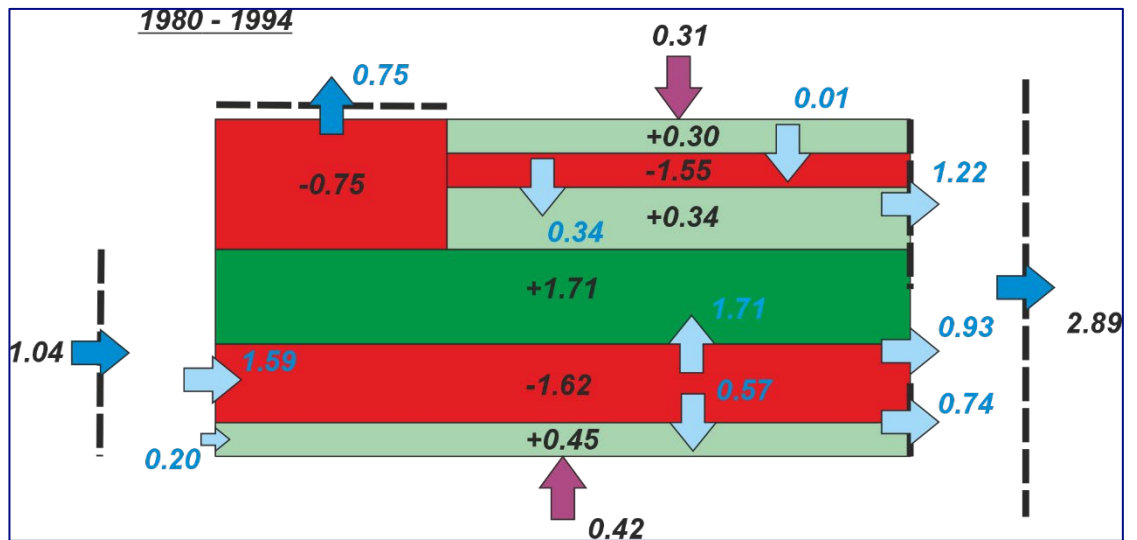


Figuur bijlage A-17: Detailmodel monding van de monding over de periode 1980-2020.

1980-1994

De netto import van het estuarium bedraagt in deze periode 2,89 miljoen m^3/jaar . Met een gemiddelde daling van de monding van -1,12 miljoen m^3/jaar en relatief beperkt suppletievolume van 0,73 miljoen m^3/jaar is er nog een netto sedimentbehoefte van 1,04 miljoen m^3/jaar . Gaan we uit van een verlies van de vooroever van 0,75 miljoen m^3/jaar dan bedraagt de uitwisseling tussen het Belgische en Nederlandse deel 1,79 miljoen m^3/jaar (import).

De kustzone van Zeeuws-Vlaanderen vertoont een toename van 0,45 miljoen m^3/jaar , wat iets hoger is dan de uitgevoerde suppleties (0,42 miljoen m^3/jaar). Het kustlangse verlies naar Mc2 is in deze periode 0,74 miljoen m^3/jaar . Dit betekent dat de Wielingen voor deze sedimentbehoefte 0,57 miljoen m^3/jaar moet leveren. Het totale aanbod van de Wielingen (inclusief de aanvoer vanuit België) bedraagt 3,41 miljoen m^3/jaar en bestaat uit een lokale verdieping (1,62 miljoen m^3/jaar) en de aanvoer van 1,79 miljoen m^3/jaar . Dit aanbod is ruim voldoende om de sedimentvraag van Mc2 te voldoen. Het is ook waarschijnlijk dat er sediment richting de Vlakte van de Raan is geleverd. In totaal blijft er dan 0,93 miljoen m^3/jaar over voor transport richting het estuarium. De totale bijdrage van het zuidelijke deel van de monding in de uitwisseling met het estuarium bedraagt: 0,93 miljoen m^3/jaar + 0,74 miljoen m^3/jaar = 1,67 miljoen m^3/jaar . Het noordelijke deel moet dan nog 1,22 miljoen m^3/jaar leveren. Dit zand komt voornamelijk uit de verdieping van het Oostgat. De suppleties op de kust van Walcheren zijn vrijwel gelijk aan toename in sedimentvolume van de kust. De toename in sedimentvolume van de Banken (0,34 miljoen m^3/jaar) wordt geleverd door het Oostgat.



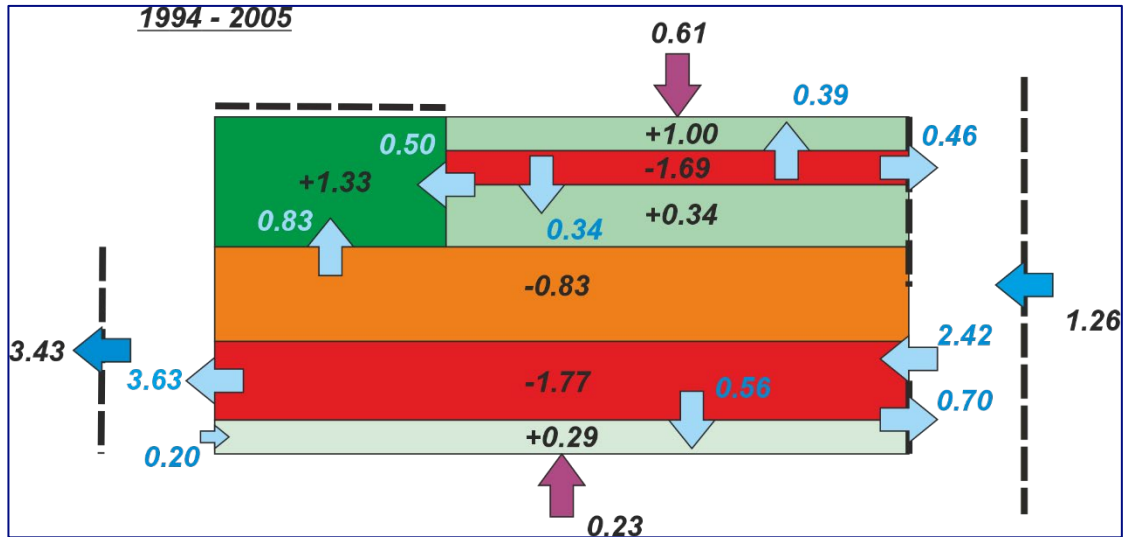
Figuur bijlage A-18: Detailmodel van de monding over de periode 1980-1994.

1994-2005

De periode 1994-2005 wijkt sterk af van de andere perioden doordat er een sedimentexport (1,26 miljoen m³/jaar) uit het estuarium optreedt. Ook de monding vertoont een grote verdieping (-1,33 miljoen m³/jaar) en er is 0,84 miljoen m³/jaar gesuppleerd. Er moet in deze periode een groot zeewaarts transport zijn opgetreden. Dit is zichtbaar in de diepe vooroever polygoon. Hier treedt een aanzanding op van +1,33 miljoen m³/jaar. Er moet ook een groot sedimenttransport naar het Belgische deel van de monding of noordelijk richting de Oosterschelde zijn opgetreden van in totaal 3,43 miljoen m³/jaar. De erosie van de vlakte van de Raan (-0,83 miljoen m³/jaar) en van het Oostgat zijn voldoende om in de sediment toename van de diepe vooroever te voldoen.

De kustzone van Walcheren vertoont een grote volumetoename van 1,0 miljoen m³/jaar welke groter is dan de uitgevoerde suppleties (0,61 miljoen m³/jaar). Erosie van het Oostgat (-1,69 miljoen m³/jaar) is ruimschoots voldoende om dit en de volumetoename van de Banken te compenseren (+0,34 miljoen m³/jaar). Er zou vanuit deze redenering nog een transport van 0,46 miljoen m³/jaar moeten optreden richting het estuarium.

Ook in deze periode vertoont Mc2 een consistente invulling van 0,70 miljoen m³/jaar. De erosie van de Wielingen is voldoende om aan deze vraag te voldoen. De toename in kustvolume van Zeeuws-Vlaanderen (0,29 miljoen m³/jaar) is vrijwel gelijk aan de uitgevoerde suppleties (0,25 miljoen m³/jaar). Om de balans sluitend te krijgen moet er een groot zeewaarts transport door de Wielingen optreden van 2,42 miljoen m³/jaar in de monding en 3,63 miljoen m³/jaar langs de staatsgrens. Hiervan komt 0,2 miljoen m³/jaar langs de kustzone terug binnen. De netto uitwisseling is dus 3,43 miljoen m³/jaar.



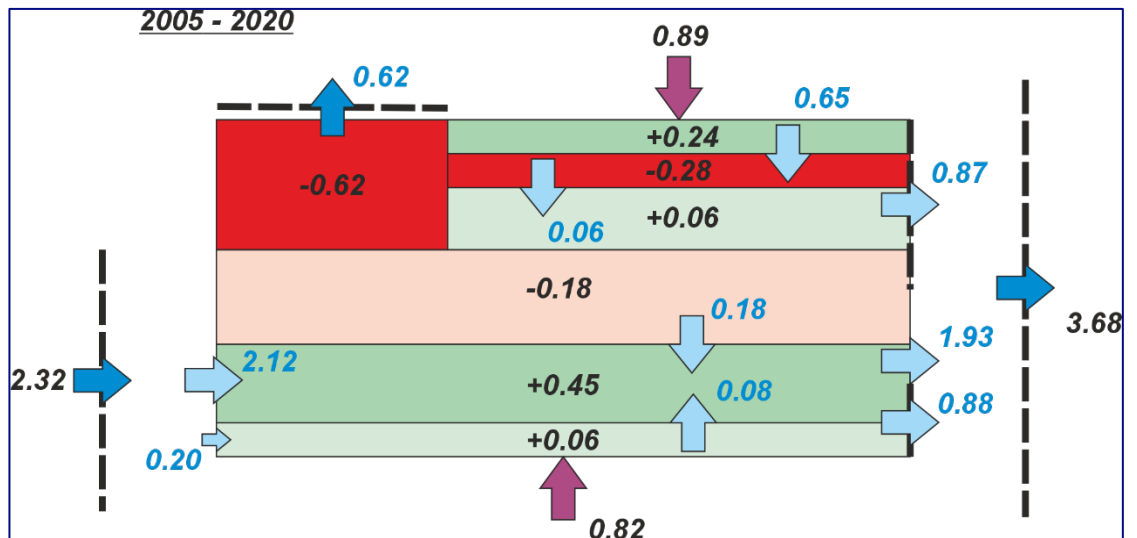
Figuur bijlage A-19: Detailmodel van de monding over de periode 1994-2005.

2005-2020

In de meest recente periode heeft het estuarium een veel grotere sedimentbehoefte (3,68 miljoen m³/jaar). Met een gelijke aanname dat het verlies van de vooroever richting de Oosterschelde monding representeert (0,62 miljoen m³/jaar), resulteert de grote sedimentbehoefte van het estuarium in een netto sediment import vanuit het Belgische deel van 2,32 miljoen m³/jaar. Hiervan gaat 0,20 miljoen m³/jaar langs de kust en er is een doorvoer door de Wielingen van 2,12 miljoen m³/jaar

Een (groot) deel van de sedimentbehoefte wordt opgevangen door de hogere suppletievolumes over de recente periode. Langs de kusten van Zeeuws-Vlaanderen en Walcheren is 1,71 miljoen m³/jaar gesuppleerd, waarvan 0,82 miljoen m³/jaar langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen. Deze kustzone is slechts met 0,06 miljoen m³/jaar toegenomen, dus een groot deel moet door langstransport zijn afgevoerd.

Langs de kust van Walcheren is er 0,89 miljoen m³/jaar gesuppleerd waarvan er 0,24 miljoen m³/jaar achterblijft in de kustzone. Het Oostgat is met -0,28 miljoen m³/jaar in volume afgenomen en de naastliggende banken met 0,06 miljoen m³/jaar toegenomen. In totaal blijft er dan 0,87 miljoen m³/jaar over voor import naar het estuarium. Op basis van de invulling van Mc2 wordt geschat dat de landwaartse transporten langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen 0,88 miljoen m³/jaar bedragen. Dit betekent dat de Wielingen nog 1,93 miljoen m³/jaar moet bijdragen om een totale import van 3,68 miljoen m³/jaar te verkrijgen. Deze 1,93 miljoen m³/jaar wordt voor een klein deel geleverd door erosie van de Vlakte van de Raan (-0,18 miljoen m³/jaar), maar hoofdzakelijk door een instroom vanuit België. Deze instroom moet 2,12 miljoen m³/jaar bedragen om een sluitende balans te verkrijgen.



Figuur bijlage A-20: Detail sedimentboxmodel monding voor de periode 2005-2020.

A.4 Een “actieve” volumebalans van de totale monding

A.4.1 Methode

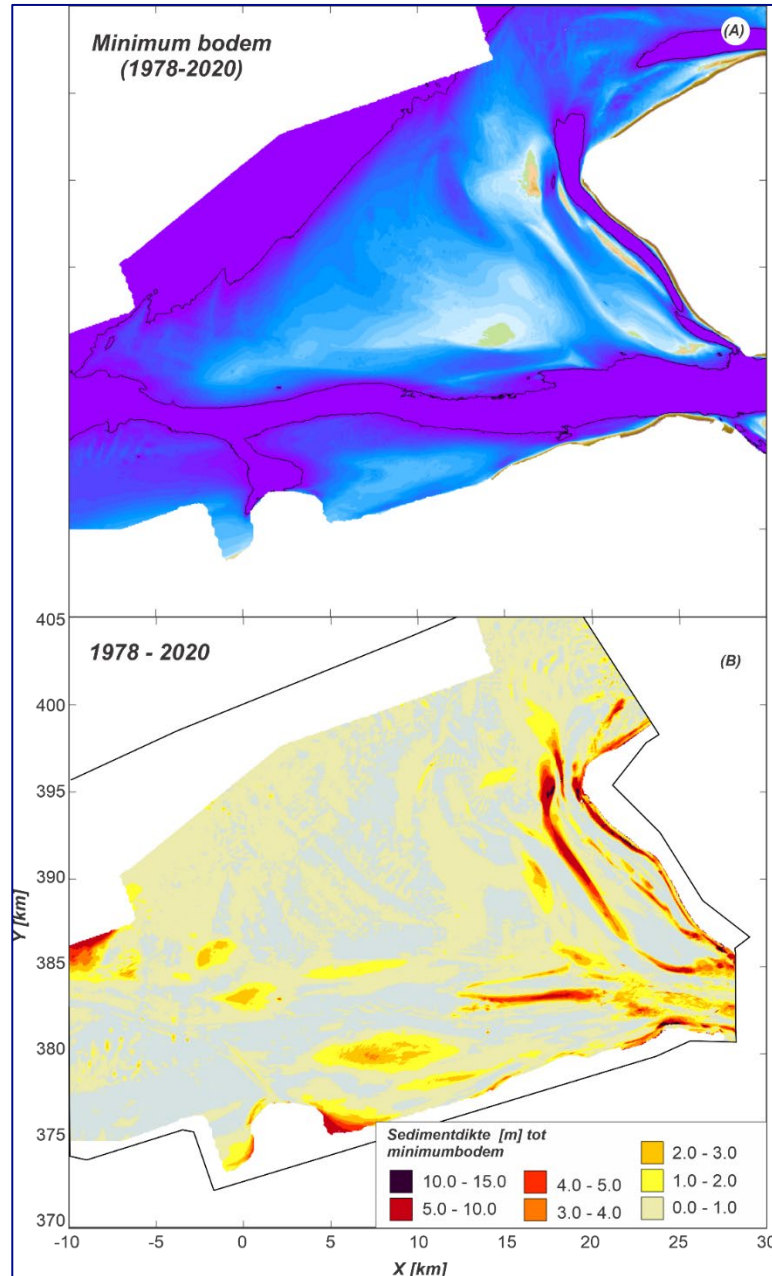
Het kwantificeren van sedimentvolumes van het gehele mondingsgebied is gebaseerd op de actieve bodemlaag zoals toegepast in de studies naar de aanlandingsbanken van Schiermonnikoog (Elias, 2022) en Ameland (Elias et al. 2022) en het Eierlandse Gat (Elias et al. 2022). Deze actieve bodemlaag wordt bepaald aan de hand van de minimum bodemligging (Figuur bijlage A-21A), die daarbij gedefinieerd wordt als de onderkant van de morfologische enveloppe voor een bepaalde tijdsperiode (Pearson et al., 2022). 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 (de passieve bodemlaag). Alleen het deel van de bodem dat zich boven de minimum bodemligging bevindt neemt deel aan de morfologische verandering (de actieve bodemlaag).

Het verschil tussen de gemeten bodemligging en de minimum bodemligging geeft dan een schatting van de hoeveelheid sediment, de dikte van het sedimentpakket, die zich in de morfologisch actieve laag bevindt (Figuur bijlage A-21B). Let hierbij op dat de sedimenthoeveelheid in de actieve zone dus niet de toekomstige sedimentvoorraad weergeeft. Bij een structureel eroderend gebied (bijvoorbeeld een terugtrekkende eilandkop) is de minimumbodem vrijwel gelijk aan de huidige bodem. Dit betekent dat het sedimentvolume van de huidige bodem dan nihil is.

Bij de bepaling van de minimum bodem wordt per rasterpunt van het bodembestand gekeken of er in alle jaren een bodemwaarde aanwezig is. Als een waarde ontbreekt in één van de jaren wordt het punt niet meegenomen in de analyse. Om een zo goed mogelijk dekking te verkrijgen in de monding zijn daarom alleen de jaren 1978 – 2020 gebruikt in de analyse, waarbij de bodemkaarten zo goed mogelijk gevuld zijn. Ten zuiden van Zeebrugge mist echter data in de kustzone, waardoor dit gebied niet meedoet in de analyse. Richting de Westerschelde is de afbakening van het balansgebied zodanig gekozen dat deze aansluit op de westelijke grens van Macrocel 1. Aan de noordzijde, langs de kust van Walcheren, is de afbakening net ten zuiden van Domburg gelegd en loodrecht op de kust. De overige grenzen zijn bepaald door de beschikbaarheid van de meetdata.

Let op dat deze analyse eerder is uitgevoerd met de originele bodemkaarten als basis en nog niet de bodemkaarten zoals weergegeven in Hoofdstuk 2. De reconstructie van nieuwe

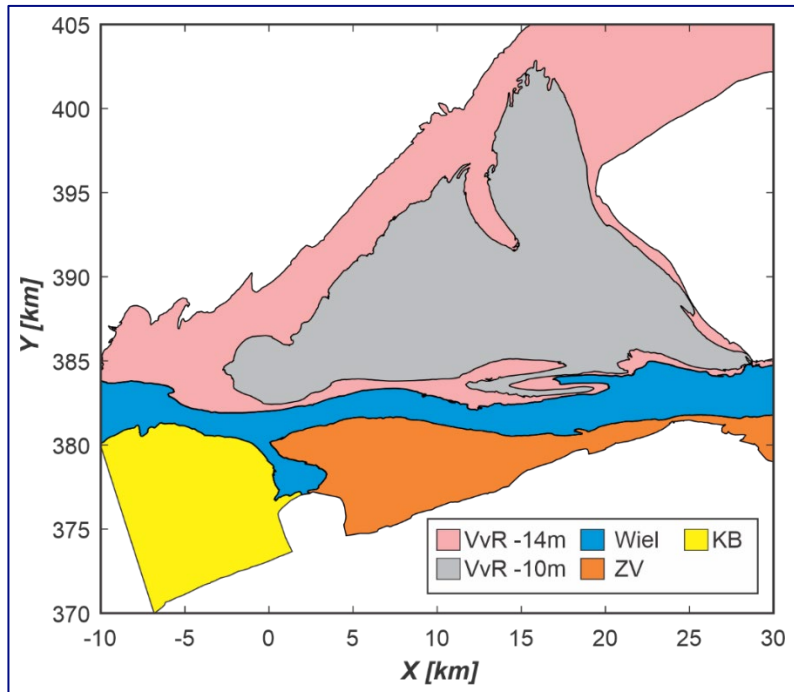
bodemkaarten over de periode 1983-1988 geeft hier een groter verschil in volumeverandering.



Figuur bijlage A-21: Overzicht van de methode om de sedimentvolumes van het gehele zeegat te berekenen. (A) de minimum bodemligging tussen 1978 en 2020, (B) voorbeeld van de van de sedimentlaag in 2020.

A.4.2 Indeling in balansgebieden

Kwantificering van de sedimentvolumes is gebaseerd op een indeling in een vijftal balansgebieden (Figuur bijlage A-22). Als eerste stap zijn hierbij representatieve contouren bepaald. De -10m contour is de diepste contour waarbij de Vlakte van de Raan altijd een gesloten contour heeft (Figuur bijlage A-22, grijze vlak). De NAP -14m contourlijn geeft een goede afbakening van de Wielingen en de zeezijde van de Vlakte van de Raan (Figuur bijlage A-22, blauwe en rode vlakken). Het gebied ten zuiden van de Wielingen (de ondiepe kustzone) is onderverdeeld in 2 delen met de haven van Zeebrugge als scheiding.



Figuur bijlage A-22: Overzicht van de verschillende gebieden waarover de volumes zijn bepaald. (1) Vlakte van de Raan (VvR) op basis van de NAP -14m contour (rood). (2) VvR op basis van de NAP -10m contour (grijs), (3) Wielingen (NAP -14m contourlijn - blauw), en de kustzone landwaarts van de -14m contour onderverdeeld in de delen ten zuiden (geel) en ten noorden van Zeebrugge (oranje).

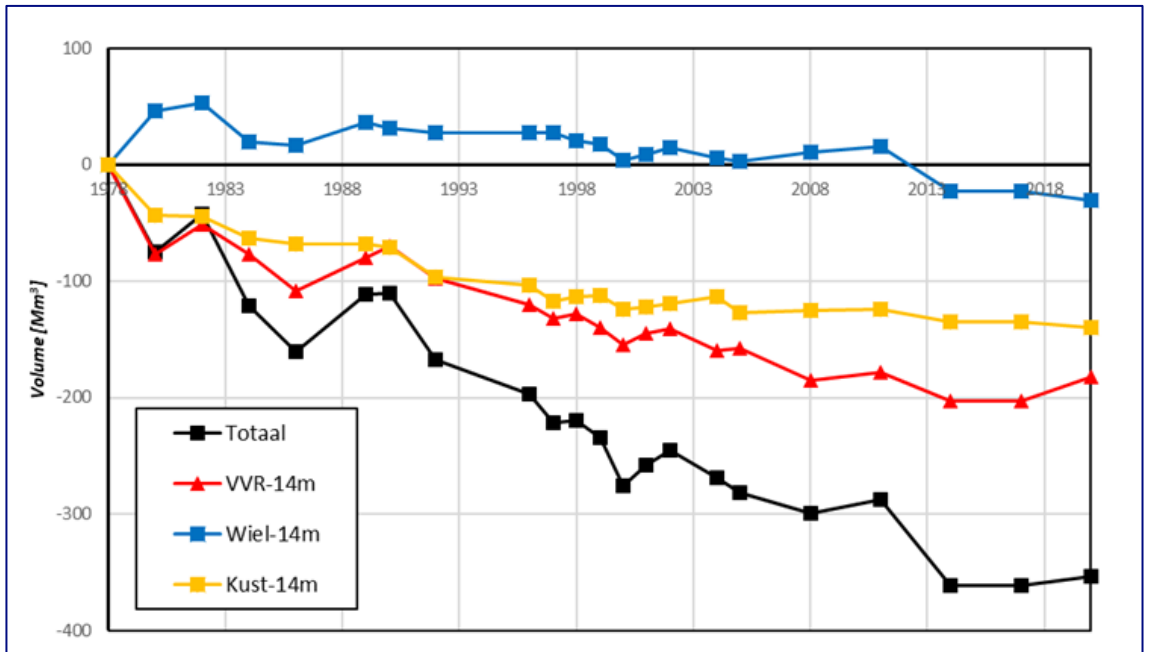
A.4.3 Resultaten volumebalans

De ontwikkeling van het totale balansgebied en de afzonderlijke deelgebieden zijn samengevat in Figuur bijlage A-23 en Tabel Bijlage A-3. In totaal is het gehele mondingsgebied met 353 miljoen m³ in sediment afgenomen. Deze afname verloopt vrijwel lineair tot 2014. In de jaren 2014-2020 vindt er juist een stabilisatie (kleine toename) plaats. De totale erosiesnelheid bedraagt 8,3 miljoen m³/jaar.

Een analyse van de deelgebieden laat zien dat het merendeel van de erosie optreedt op de Vlakte van de Raan (-182 miljoen m³/jaar) en in de kustzone (-140 miljoen m³/jaar). De volumeverandering van de Wielingen is beperkt (-31 miljoen m³/jaar). De beperkte afname in volume van de Wielingen is mede een gevolg van de gehanteerde begrenzing. Deze begrenzing verandert jaarlijks op basis van de -14 m contourlijnen. Voor de Wielingen geeft dit een grote toename in oppervlakte van 47 miljoen m³. Doordat de oppervlakte toeneemt wordt ook een groter aandeel van het sedimentvolume aan de Wielingen toegekend.

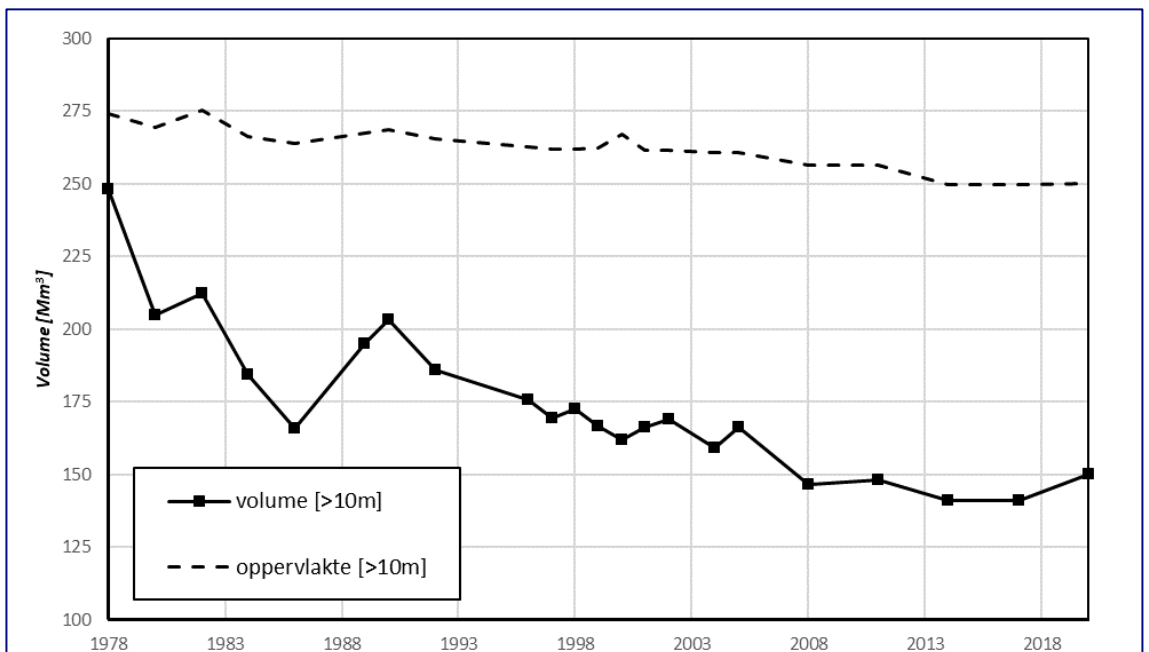
Tabel Bijlage A-3: Overzicht van de volumeontwikkeling van de buitendelta. Volumes bepaald t.o.v. de minimumbodem over de periode 1987-2020. De ontwikkeling van de volumes t.o.v. de 1978 bodem wordt weergegeven in Figuur bijlage A-23.

Gebied	Volume [miljoen m ³]		Oppervlakte [km ²]		Gemiddelde sediment dikte [m]	Hoogte Verandering [m]
	Gemiddeld	Verandering	Gemiddeld	Verandering		
Vlakte vd Raan	360	-182	500	-16	0.72	-0.37
Wielingen	116	-31	93	+47	1.29	-1.09
Kust	122	-140	135	-21	0.90	-0.85
Totaal	599	-353	728	+11	0.82	-0.50



Figuur bijlage A-23: Ontwikkeling van volumes t.o.v. het 1978 volume voor de totale monding en de verschillende deelgebieden.

Een schatting van de volumes van het centrale deel van de Vlakte van de Raan is gebaseerd op de omhullende van de -10m contour. Deze contour laat zien dat het centrale deel relatief veel in oppervlakte is afgenomen, van 275 km² naar 250 km², een afname van een kleine 10%. Het actieve volume is afgenomen met 98 miljoen m³, wat procentueel gezien neerkomt op een verlies van 40%. Ook voor dit deel is een stabilisatie van de afname te onderscheiden in de meest recente bodems. Tussen 2017 en 2020 nemen de volumes zelfs iets toe. Over de gehele periode is dit deel van de Vlakte van de Raan in hoogte afgenomen met 0,39 m tussen 1978 en 2020, ofwel -0,01 m/jaar.



Figuur bijlage A-24: Ontwikkeling van volume, oppervlakte en hoogte van de Vlakte van de Raan op basis van de omhullende van de NAP -10m contour.

A.5 Conclusies en aanbevelingen

A.5.1 Conclusies

- De sedimentimport van de Westerschelde over de periode 1980-2020 wordt geschat op 2,0 miljoen m³/jaar. De uitwisseling met het Belgische deel van de monding lijkt gemiddeld over de gehele periode beperkt (< 0,1 miljoen m³/jaar). Er is een klein verlies vanuit de monding in noordelijke richting (0,3 miljoen m³/jaar).
- Grote fluctuaties in uitwisseling tussen het Belgische en Nederlandse deel lijken op te treden. Het zeewaartse verlies uit de monding richting België en de Oosterschelde is het grootst tussen 1994 en 2005 (3,4 miljoen m³/jaar).
- Vanaf 2005 bedraagt de netto sedimenttoevoer vanaf het Belgische deel 2,3 miljoen m³/jaar.
- De Vlake van de Raan, gedefinieerd door de omhullende van de –10m NAP contour, is in de periode 1984-2017 in volume en oppervlakte afgenomen. Het totale volumeverlies bedraagt 100 miljoen m³ terwijl de oppervlakte met 25 km² is afgenomen. Dit geeft een gemiddelde hoogteafname van 1 cm per jaar. Sinds 2008 lijken de volumeverliezen af te nemen.
- Een sluitende sedimentbalans van de gehele Westerscheldemonding kan nog niet worden opgesteld, maar veel aanvullend inzicht in het Nederlandse deel van de monding is verkregen.

A.5.2 Aanbevelingen

De detailbalansen bevatten aannamen over de onderlinge uitwisselingen tussen de verschillende morfologische eenheden. Deze aannamen kunnen worden getoetst door op een kleiner schaalniveau de sedimentatie-erosie patronen te analyseren en verplaatsingen van de morfologische elementen te beschrijven. Daarnaast verdient het de aanbeveling om deze aannamen te toetsen bij de verschillende morfologische experts binnen dit gebied.

Een sluitende sedimentbalans van de gehele Westerscheldemonding (inclusief Belgische deel) opstellen was binnen deze studie nog een brug te ver. Essentieel voor zo'n balans zijn (1) het beter begrijpen van de onzekerheden in de Belgische bodemdata en (2) het correct interpreteren van de bagger- en stortvolumes nabij Zeebrugge. Deze volumes bevatten een significant aandeel slib, waardoor de gemeten bodemhoogteverandering en de gebaggerde en gestorte volumes waarschijnlijk niet direct 1 op 1 gekoppeld zijn. Hoe met deze onzekerheid om te gaan is nog niet direct duidelijk, maar moet wel worden opgepakt om een sluitende balans van de gehele monding te verkrijgen.

A.6 Referenties Sedimentbalans monding Westerschelde

Elias, E.P.L., 2022. Aanlandingsbanken Schiermonnikoog. Rapport Deltares, Delft, 45 pp.

Elias, E.P.L., 2022. Morfologische ontwikkeling Eierlandse Gat. Rapport Deltares, Delft, 77 pp.

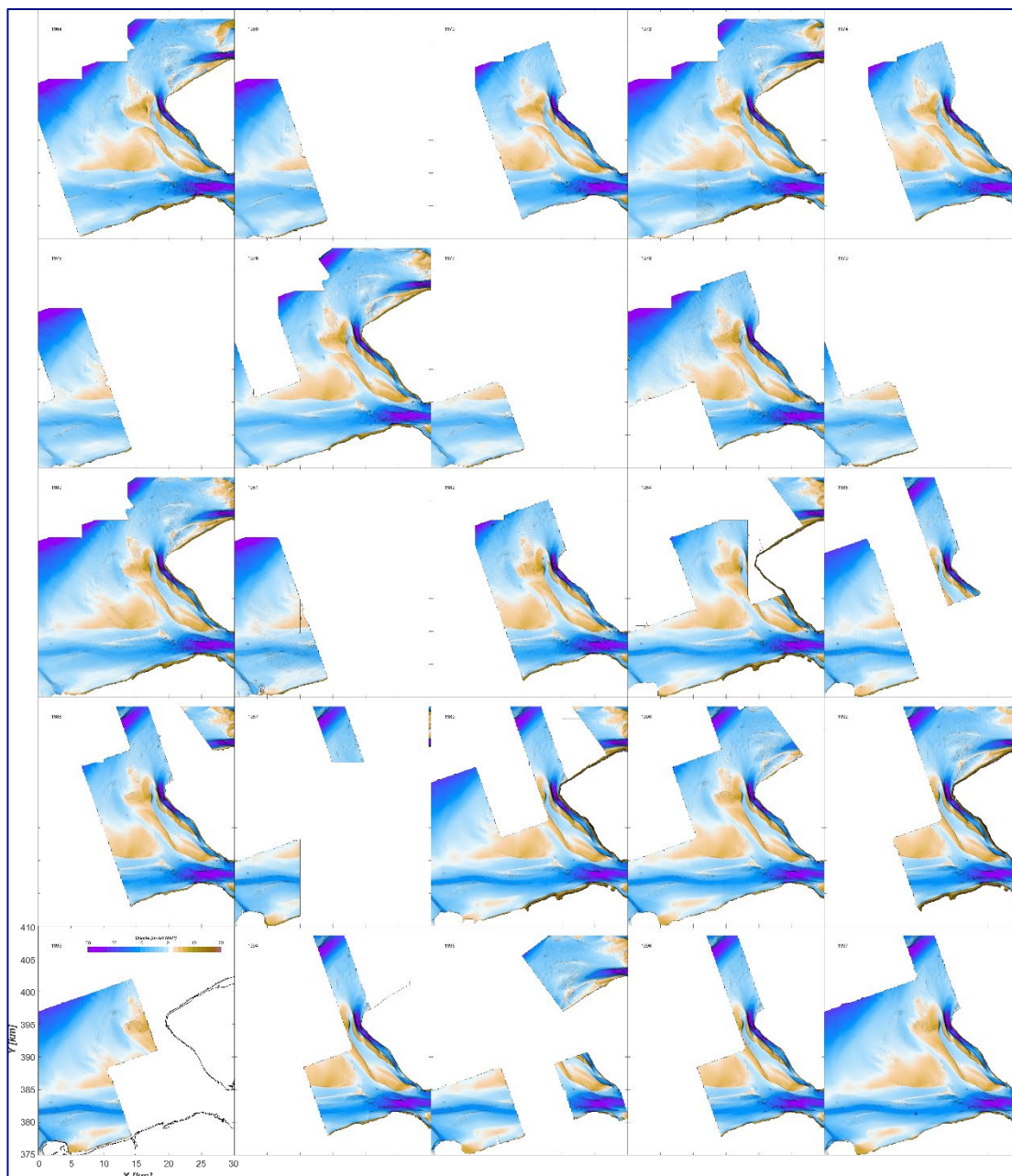
Elias, E. P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B., Cleveringa, J., Jeuken, C., Taal, M., Van der Werf, J., (2023). Large-scale morphological changes and sediment budget of the Western Scheldt estuary 1955-2020 – The impact of large-scale sediment management. Submitted to the Netherlands Journal of Geosciences.

Elias, E.P.L., Vermeer, N., de Vegt, H. 2022. Morfologisch onderzoek Zeegat van Ameland. Een verdiepend onderzoek naar de uitwisseling tussen buitendelta, kust en bekken. Rapport Deltares, Delft, 59 pp.

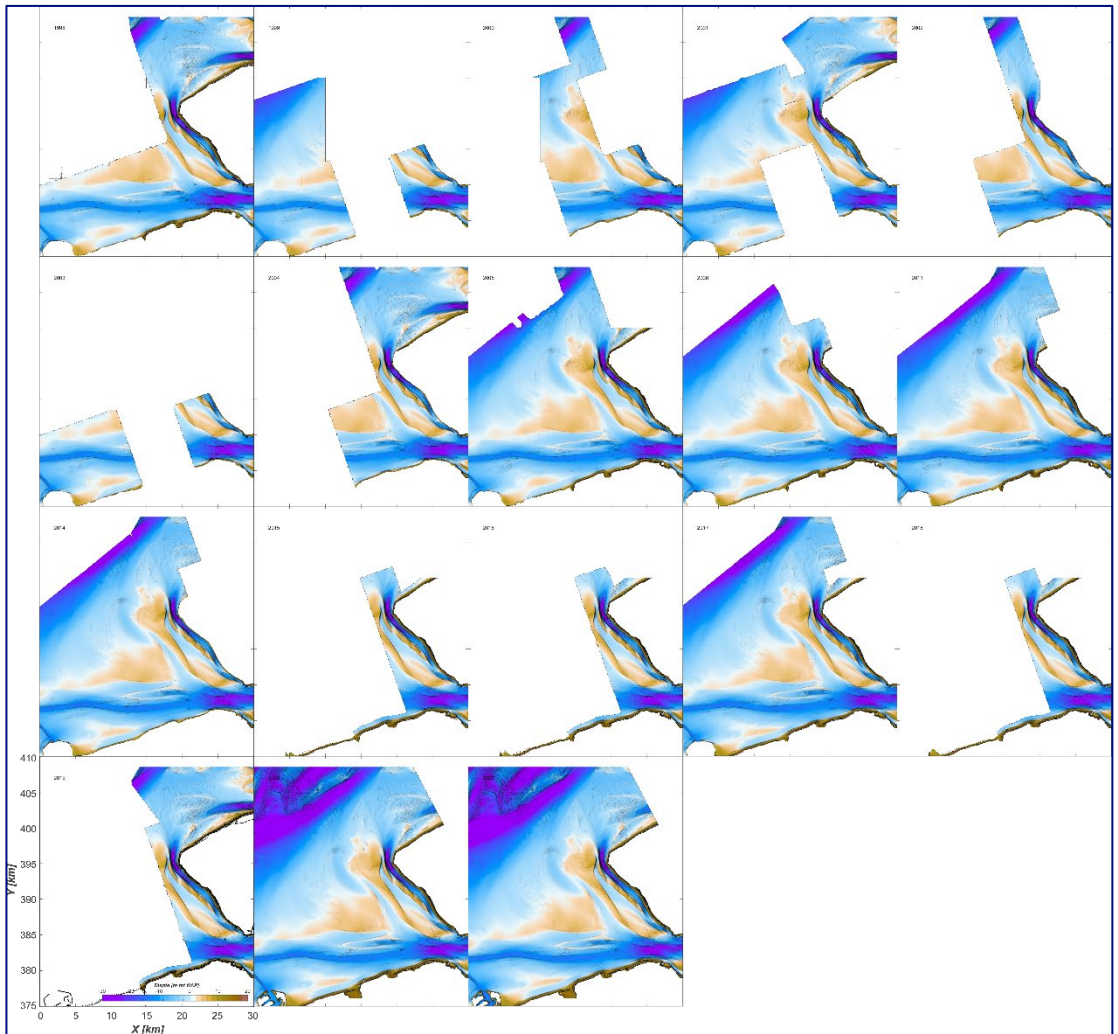
Haecon, (2006). Actualisatie van de zandbalans van de Zee- en Western Scheldt. Report 1249760008/lvp.

- Lauwaert, B, Fettweis, M, de Witte, B, Van Hoey, G, Timmermans, S., Hermans, L, (2019).
Vooruitgangsrapport juni 2019 over de effecten op het mariene milieu van bagger-speciestortingen.
Rapport BL/2019/01, KBIN, OD Natuur-BMM – Koninklijk Belgisch Instituut voor
Natuurwetenschappen, 32p.
- Nederbragt, G., Liek, G (2004). Beschrijving zandbalans Westerschelde en monding. Rapport RIKZ/2004.020.
Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ., 70 p.
- Van der Werf, J.J., Giardino, A., Santinelli, G., (2011). Aanzanding en onderhoudsbaggerwerkzaamheden in
de Sardijngeul Rapport 1204421-004, Deltares, Delft, 44 p.
- Vandenbruwaene, W.; Levy, Y.; Plancke, Y.; Vanlede, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Integraal plan
Boven-Zeeschelde: Deelrapport 3 – Sedimentbalans Zeeschelde, Rupel en Durme. Versie 5.0. WL
Rapporten, 13_131. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.
- Vroom, J. & Schrijvershof, R., (2015). Overzicht ingrepen periode 1985-2014. Memo 1210301-001-ZKS-005,
Deltares, Delft, 40p.

A.7 Meetdata Sedimentbalans monding Westerschelde



Figuur bijlage A-25: Overzicht beschikbare meetdata 1964 – 1997.



Figuur bijlage A-26: Overzicht beschikbare meetdata 1998 – 2021.

B Resultaten onderzoek morfologisch gedrag Waddenzee onder zeespiegelstijging

B.1 Inleiding

De morfologische ontwikkelingen van de Waddenzee zijn belangrijk voor het beheer van het kuststelsel om verschillende redenen. Ten eerste, de Waddenzee en de Noordzeekust zijn een zanddelend systeem. Het zand dat sedimenteert in de Waddenzee is afkomstig uit de kustzone en veroorzaakt daar een afname in sedimentvolume. Dit kan, afhankelijk van tijd en plaats en schaalniveau waarop het plaatsvindt leiden tot erosie van de Noordzeekust en behoefte aan zandsuppleties. Het begrijpen en voorspellen van morfologische ontwikkelingen in de Waddenzee is daarom van belang voor het bepalen van de toekomstige sediment- en suppletiebehoefte van de Waddenkust.

Ten tweede, de morfologische ontwikkelingen van de Waddenzee beïnvloeden de ecologische waarden en het economische gebruik (gas- en zoutwinning, scheepvaart). De Waddenzee heeft belangrijke ecologische waarden, vooral door de aanwezigheid van uitgebreide wadplaten. De toekomstige omvang van de wadplaten en dus de ecologische waarden worden beïnvloed door de morfologische ontwikkelingen in de Waddenzee en de (invloed van de) relatieve zeespiegelstijging erop. Daarom is het belangrijk om morfologische ontwikkelingen van de Waddenzee te begrijpen en te voorspellen.

Voorspelling van de morfologische ontwikkelingen rondom de Waddenzee kan gebaseerd worden op data-analyse, modellering en combinaties daarvan. Data-analyse levert inzichten over de historische ontwikkelingen. Deze inzichten kunnen worden gebruikt om de ontwikkelingen in de nabije toekomst te voorspellen. Data-analyse draagt daarnaast bij aan het opzetten en verbeteren van morfologische modellen. Met die modellen kunnen de toekomstige ontwikkelingen worden voorspeld voor verschillende scenario's van zeespiegelstijging.

Dit document is geschreven als onderdeel van de rapportage voor het Zeespiegelstijging Zandig Kust project, en heeft als doel de inzichten in de morfologische ontwikkelingen rondom de Waddenzee samen te vatten. Het geeft een overzicht van data-analyse (hoofdstuk 2) en modellering (hoofdstuk 3) voor de morfologische ontwikkelingen rondom de Waddenzee, uitgevoerd in de afgelopen jaren. De resultaten van de verschillende studies (binnen en buiten het Zeespiegelstijging Zandig Kust project) zijn samen beschouwd m.b.t. de verschillende beheeraspecten in hoofdstuk 4, gevolgd door aanbevelingen voor verder onderzoek.

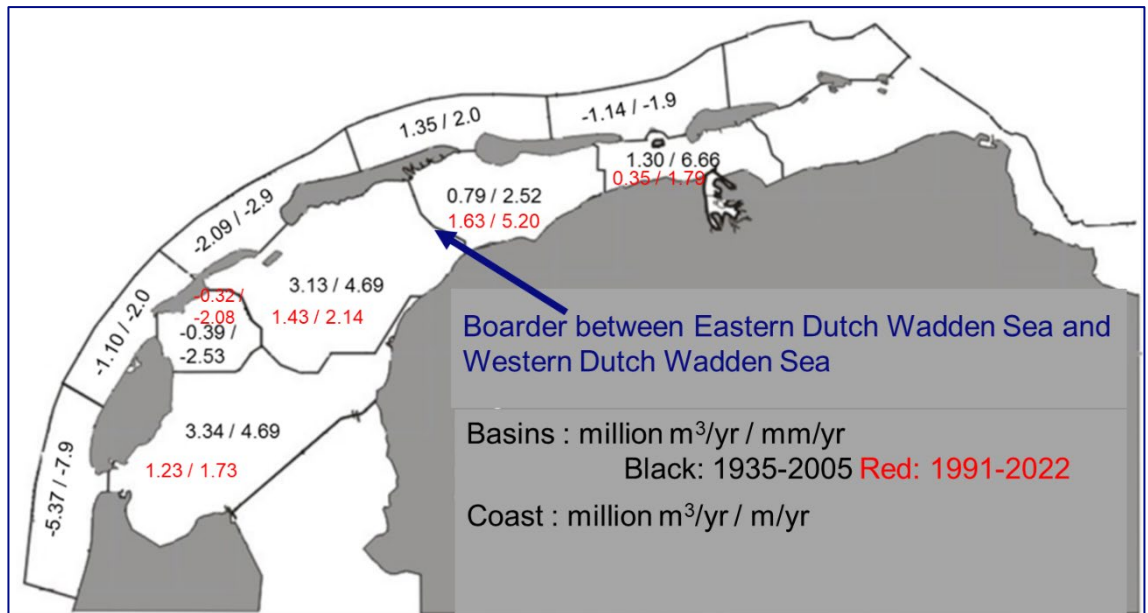
B.2 Data-analyse

Waarnemingen vormen een belangrijke bron van kennis over de werking van het morfologische systeem in het Waddenzegebied. Sinds het promotiewerk van Elias (2006) zijn veel inzichten verkregen uit de analyse van morfologische veranderingen in en buiten de Nederlandse Waddenzee aan de hand van de bodemhoogtegegevens die beschikbaar zijn vanaf de tijd rondom de afsluiting van de Zuiderzee. De grootschalige sedimentbalans uit de analyse geeft direct antwoorden op de vragen als:

- Wat zijn de sedimentuitwisselingen door de zeegaten tussen de Noordzee en de Waddenzee?
- Wat is de sedimentatiesnelheid in een Waddenzeebekken?

Uit de analyse van gegevens tot 2005 zijn de volgende conclusies getrokken (Elias e.a., 2012; Wang e.a., 2018):

- In alle bekkens in de Nederlandse Waddenzee treedt sedimentatie op, behalve Eierlandse Gat waarin erosie optreedt. Maar zelfs in het Eierlandse Gat zijn de wadplaten verhoogd en de verhoging is ruim voldoende om de zeespiegelstijging te compenseren.
- De sedimentatie in de Waddenzee is in belangrijke mate beïnvloed door de ingrepen in het verleden, in het bijzonder de afsluitingen van de Zuiderzee en Lauwerszee.
- In het westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee is er (tot 2005) nog steeds een grote sedimentvraag als gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee, terwijl de sedimentimport door de bijbehorende zeegaten gelimiteerd is door de sedimenttransportcapaciteiten. In het oostelijke deel van de Nederlandse Waddenzee is de morfologie al dicht bij het dynamische evenwicht, waardoor de sedimentimport door de zeegaten voornamelijk door de sedimentvraag wordt beperkt.



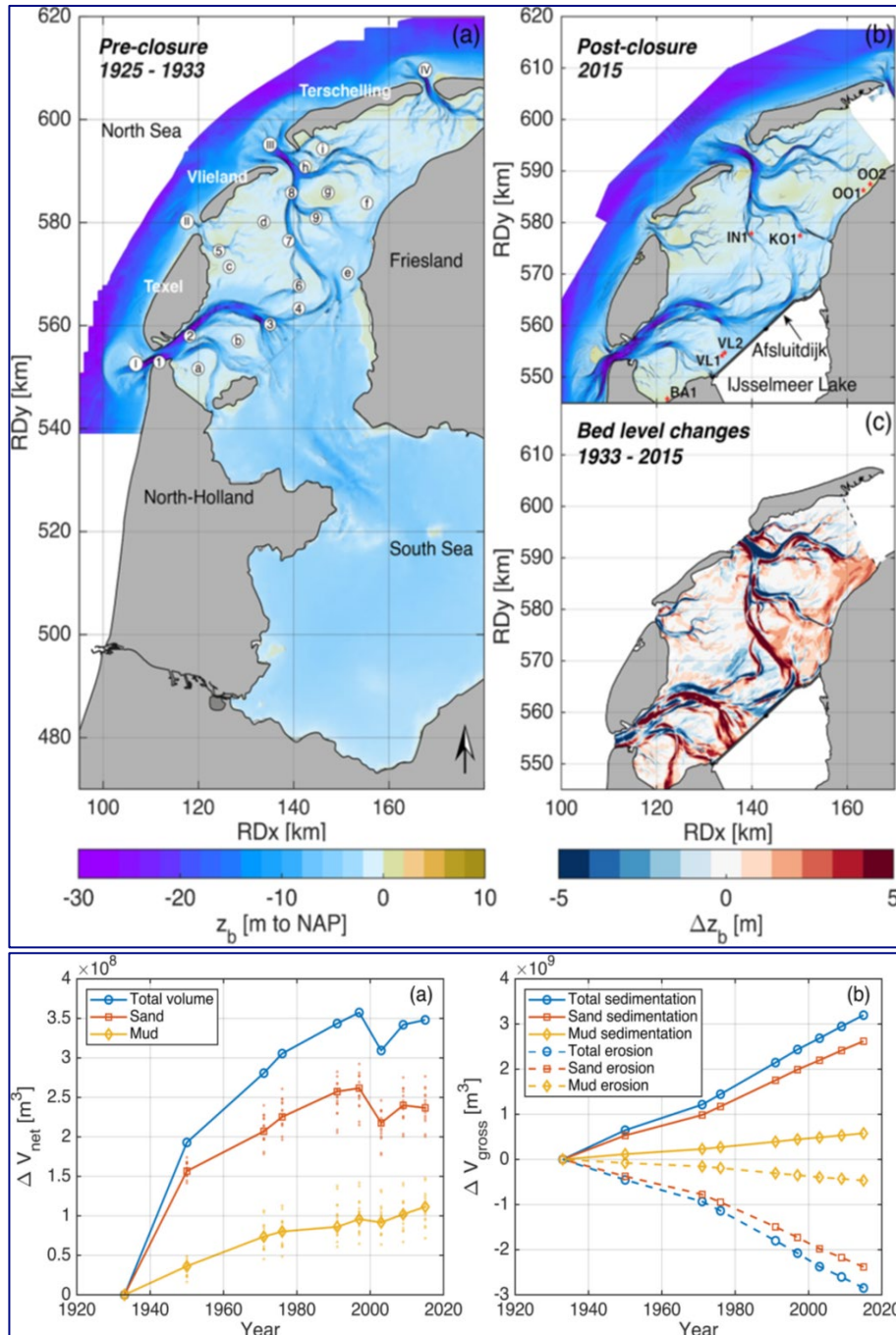
Figuur bijlage B-1: Sediment balans uit analyse van bodemhoogtegegevens voor de perioden 1935-2005 (zwart, uit Wang e.a., 2018) en 1991-2022 (rood, uit Elias e.a., 2024). In de Waddenzeebekkens geeft het getal voor het streepje sedimentatie volume aan in miljoen m³ per jaar en het getal na het streepje in mm/jaar.

In de afgelopen jaren zijn meerdere analyses uitgevoerd. De resultaten van de meest recente analyse m.b.t. de sedimentatie in de Waddenzee (Elias e.a., 2024) is samengevat in Figuur bijlage B-1, samen met de resultaten van een eerdere analyse (Elias e.a., 2012; Wang e.a., 2018).

Een vergelijking van de resultaten uit de twee analyses geeft aan dat de sedimentatiesnelheid in de Waddenzee is afgenomen in de afgelopen decennia. Dit geldt voor alle bekkens, behalve dat van het Zeegat van Ameland. Vooral in de twee grote bekkens in het Westelijke deel, Marsdiep en Vlie, is de verandering groot. Dit komt overeen met de uitkomst van de analyse door Colina Alonso e.a. (2024), die de gegevens in het westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee tot 2015 heeft beschouwd, zie Figuur bijlage B-2. Door onderscheid te maken tussen de bijdragen van zand en slib aan de waargenomen morfologische veranderingen is uit de analyse bovendien geconcludeerd dat er praktisch geen zand is geïmporteerd naar het Westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee sinds eind vorige eeuw. Er is dus blijkbaar een trendbreuk ontstaan rondom de eeuwwisseling m.b.t. uitwisseling van zand door de zeegaten Marsdiep en Vlie: de grote import is in ieder geval sterk afgenomen.

De vraag is dan: wat heeft de trendbreuk veroorzaakt? Antwoord op de vraag kan nog niet worden gegeven. Wel kunnen de volgende hypothesen worden gegeven:

- Aanpassing morfologisch evenwicht. Een voor de hand liggende verklaring voor de afgenomen zandimport is dat de versterking t.o.v. het morfologische evenwicht door de afsluiting van Zuiderzee is gedempt en de morfologie in het bekken benadert een nieuw evenwicht. Dit komt niet overeen met de inzichten uit eerdere studies en aan de empirische relaties voor evenwicht worden nog niet voldaan in bijvoorbeeld het Marsdiep. Deze verklaring kan alleen van toepassing zijn als een bekken na de afsluiting een ander soort morfologisch evenwicht krijgt dan een normaal Waddenzeebekken, bijvoorbeeld omdat het bekken langer is dan anders. Opgemerkt wordt dat ook het huidige Marsdiep bekken relatief kort is t.o.v. de getijgolfengte.
- Niet uniforme data. Een andere mogelijke verklaring is dat de bodemhoogtegegevens geen uniforme dataset vormen, doordat de meetmethode in de tijd is veranderd. In de appendix is uitgelegd dat dit inderdaad een mogelijkheid is. De hypothese is dat de oudere lodingen gebruikmaken van de lokale NAP referentie merken die bewegen in de tijd, terwijl de nieuwere metingen gebruikmaken van satellietwaarnemingen.
- Invloed van kustonderhoud. Sinds 1990 wordt de kustlijn onderhouden door suppleties, waarbij de BKL niet mag worden overschreden. Hierdoor vermindert het effect van een mechanisme dat het sedimenttransport van een buitendelta naar het bijbehorende bekken bevordert: terugtrekken van nabijgelegen kust door erosie vergroot het volume van de buitendelta zonder dat er op de buitendelta sedimentatie optreedt. Dit vergroot het sedimenttransport naar het bekken omdat er meer sedimentoverschot (minder sedimentvraag) op de buitendelta ontstaat.
- Uitputting van geschikt sediment. Er is tot nu toe uitgegaan van een onbeperkt sedimentaanbod buiten de zeegaten, ook omdat de zandvoorraad langs de Noordzeekust wordt aangevuld met suppleties. Maar het is wel de vraag of het onbeperkte aanbod ook geldt voor de geschikte sedimentfracties voor import naar de Waddenzee. In de Waddenzee is de korrelgrootte van sediment kleiner dan buiten de zeegaten en vertoont een afnemende trend in de landwaartse richting. Dit is een indicatie dat fijnere fracties van sediment beter geschikt zijn voor import naar de Waddenzee dan grovere fracties. Het is plausibel dat bij erosie op een buitendelta de fijnere fracties van sediment eerder worden geërodeerd. Een hypothese is dus dat de afgenomen zandimport door uitputting van fijnere sedimentfracties is veroorzaakt. Onderzoek is nodig om de juiste verklaring voor de trendbreuk te vinden.



Figuur bijlage B-2: Sedimentbalans analyse voor het westelijke deel van Nederlandse Waddenzee tot 2015, waarbij de bijdragen van zand en slib aan de veranderingen zijn gesplitst (Colina Alonso e.a., 2021).

Naast zand dat via erosie van de Noordzeekust en op de buitendelta's wordt aangeboden is slib ook belangrijk voor de morfologische ontwikkeling in de Waddenzee, vooral voor het meestijgen met de zeespiegelstijging (Wang en Van der Spek, 2015). In tegenstelling tot zand wordt slib van verder weg aangevoerd door de stroming in de Noordzee en de aanvoer is beperkt door het aanbod bij de bron. Een analyse van de slibbalans is uitgevoerd door Colina Alonso e.a. (2024) en laat zien dat de aanvoer en afzetting van slib nu al ongeveer in balans zijn in het hele Waddenzeesysteem (zie Figuur bijlage B-3). Dit leidt tot de vraag: zal er een slibtekort ontstaan bij hogere zeespiegelstijgingsnelheid?



Figuur bijlage B-3: Slibbalans van de hele Waddenzee (Colina Alonso e.a., 2024).

B.3 Modelling

Twee verschillende typen modellen worden gebruikt voor voorspellingen van morfologische ontwikkelingen in en rondom de Nederlandse Waddenzee: proces-gebaseerde modellen op basis van Delft3D en geaggregeerde modellen op basis van ASMITA. Voor lange-termijn voorspellingen zoals voor de ontwikkelingen onder invloed van zeespiegelstijging wordt tot nu toe vooral het ASMITA model gebruikt. De proces-gebaseerde modellen worden minder gebruikt, niet alleen door de veel groter vereiste rekeninspanningen, maar vooral ook doordat deze modellen moeilijk een realistisch morfologisch evenwicht kunnen reproduceren. Binnen meerdere projecten, bij zowel Deltares (Kustgenese 2.0, Kennisprogramma Zeespiegelstijging, Zandige Kust, BenO Kust, ...) als de universiteiten (Seawad, WadSED, ParCA, ...) worden de modellen verbeterd vanuit oogpunt 'toepassing om de morfologische ontwikkelingen bij verschillende scenario's van zeespiegelstijging te voorspellen'.

De volgende werkzaamheden zijn uitgevoerd in de afgelopen jaren:

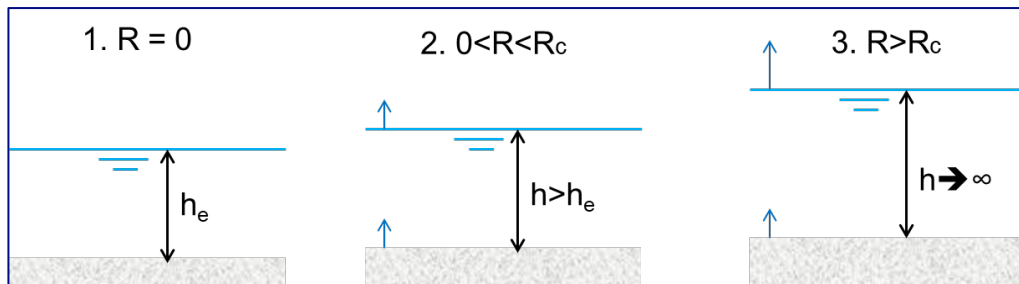
- Theoretische analyse
- Toepassing van de bestaande ASMITA modellen
- Verbetering parameters in bestaande modellen
- Verdere ontwikkeling van ASMITA
- Ontwikkeling van hybride model Delft3D-ASMITA

Hieronder worden de resultaten van deze werkzaamheden samengevat.

B.3.1 Inzichten uit theoretische analyse

Het ASMITA model kan worden gebruikt voor theoretische analyse waaruit inzichten worden verkregen over hoe een Waddenzeebekken zich ontwikkelt bij verschillende snelheden van zeespiegelstijging. Een uitgangspunt van het model is dat er een morfologisch evenwicht bestaat als de snelheid van zeespiegelstijging nul is: de wadplaten in het bekken hebben een bepaalde omvang (evenwichtsoppervlak en -hoogte) en de geulen hebben een bepaald

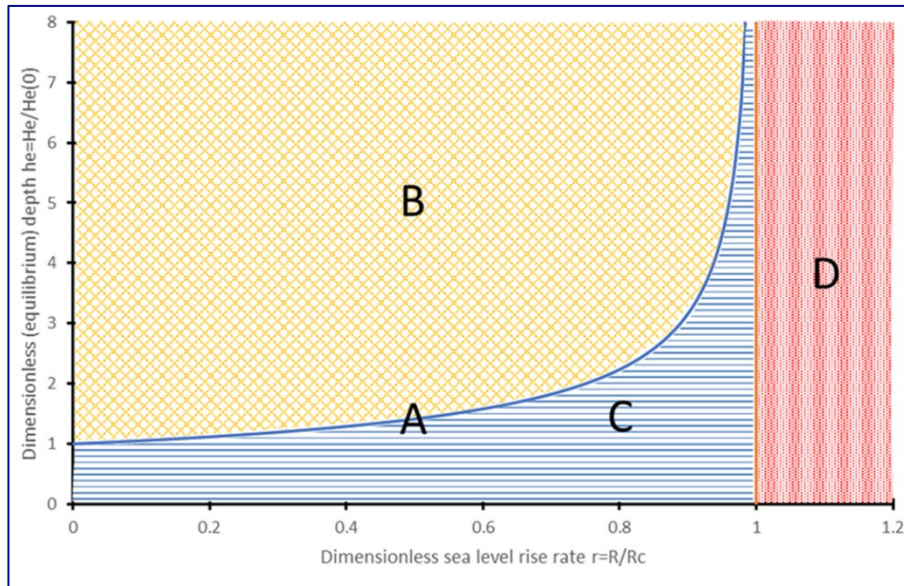
evenwichtsvolume, ofwel de gemiddelde diepte in het bekken heeft een evenwichtswaarde. Verder heeft ieder waddenbekken een maximale grootte van sedimentaanvoer. De gemiddelde diepte in het bekken neemt toe met zeespiegelstijging (of daling van de bodem). Zolang de dieptetoename kleiner is dan de sedimentatie t.g.v. deze maximale sedimentaanvoer ontstaat er een nieuw evenwicht waarbij de zeebodem evenveel stijgt als de zeespiegel. De sedimentatiesnelheid horend bij de maximale sedimentaanvoer is dus een kritische ZSS snelheid voor verdrinking van de Waddenzee. Als deze kritische ZSS snelheid wordt overschreden kan de sedimentatie in het bekken de zeespiegelstijging niet meer bijhouden en zal de gemiddelde waterdiepte blijven toenemen in de tijd. Dit betekent dat alle wadplaten op den duur zullen verdwijnen ('verdrinken'). Dit is conceptueel weergegeven in Figuur bijlage B-4.



Figuur bijlage B-4: Conceptueel model gedrag gemiddelde waterdiepte in een Waddenzeebekken bij verschillende snelheid van zeespiegelstijging (R =ZSS snelheid, R_c =kritische ZSS snelheid voor verdrinking).

De kritische zeespiegelstijgingssnelheid voor verdrinking en de voor de zeespiegelstijgingssnelheid afhankelijke waarde van de gemiddelde diepte kan worden bepaald aan de hand van het ASMITA model (Lodder e.a., 2019). Uit deze theoretische analyse worden de volgende inzichten verkregen over hoe een Waddenzeebekken zich gedraagt bij zeespiegelstijging (zie Figuur bijlage B-5):

- De dimensieloze zeespiegelstijgingssnelheid (snelheid van zeespiegelstijging gedeeld door de kritische waarde ervan) is maatgevend voor het gedrag van een bekken. Dit betekent dat de reactie van de verschillende Waddenzeebekkens op versnelling van zeespiegelstijging verschillend zullen zijn omdat de kritische zeespiegelstijgingssnelheid voor ieder bekken verschillend is (Wang e.a., 2018).
- Ook de tijdschaal voor het bereiken van het evenwicht behorende bij een bepaalde zeespiegelstijgingssnelheid heeft een vergelijkbaar gedrag als de evenwichtsdiepte: Het neemt niet-lineair toe met de toename van de zeespiegelstijgingssnelheid en wordt oneindig groot als de kritische zeespiegelstijgingssnelheid wordt overschreden.
- Als de zeespiegelstijgingssnelheid dicht in de buurt van de kritische waarde komt (~80%) zal het bekken zich hetzelfde gedragen als in het geval dat de kritische snelheid is overschreden. Dit betekent dat de kritische zeespiegelstijgingssnelheid niet te meten is door monitoren.
- Naast de dimensieloze zeespiegelstijgingssnelheid wordt de morfologische ontwikkeling ook bepaald door de uitgangssituatie die o.a. bepaald wordt door de menselijke ingrepen in het verleden.



Figuur bijlage B-5 Evenwichtsdiepte (dimensieloos gemaakt door te delen door de evenwichtswaarde zonder zeespiegelstijging) in een Waddenzeebekken als functie van zeespiegelstijgingssnelheid (dimensieloos gemaakt door te delen door de kritische zeespiegelstijgingssnelheid). De ontwikkelingen in een bepaald geval is verder afhankelijk van de uitgangssituatie (Lodder, 2024): A, het is al in dynamisch evenwicht, dus geen verder veranderingen; B, het bekken is te diep t.o.v. evenwicht en sedimentatie zorgt voor herstellen naar evenwicht; C, het bekken is te ondiep en erosie zorgt voor herstel naar evenwicht; D, kritische snelheid van ZSS overschreden en diepte in het bekken zal blijven toenemen in tijd.

B.3.2 Toepassingen van bestaande ASMITA modellen

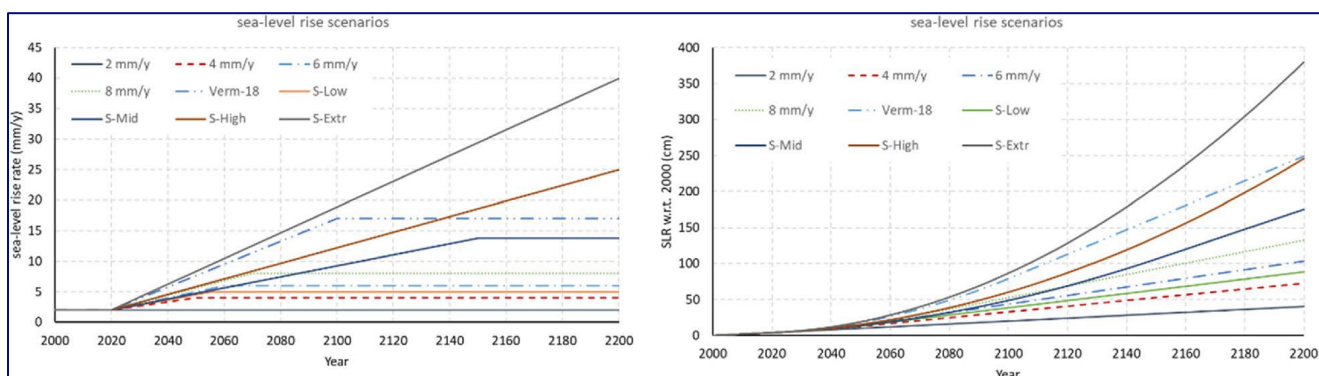
Voor elk van de verschillende bekkens in de Nederlandse Waddenzee bestaat er een ASMITA model dat rondom de eeuwwisseling is opgezet. Gelijk met de verbeteringen van deze modellen en verdere modelontwikkelingen worden deze bestaande modellen gebruikt om de morfologische ontwikkelingen bij verschillende scenario's van zeespiegelstijging te simuleren. Binnen het Kustgenese 2.0-project zijn simulaties uitgevoerd voor 5 scenario's van zeespiegelstijging. Deze simulaties zijn bedoeld om de ontwikkelingen van de sedimentuitwisseling door de verschillende zeegaten te voorspellen (Lodder e.a., 2022), maar de modelresultaten geven ook inzichten over hoe de wadplaten in de verschillende bekkens zullen veranderen bij verschillende scenario's van zeespiegelstijging (Huisman e.a., 2022). Binnen het kader van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging Zandige Kust project zijn er voor andere scenario's van zeespiegelstijging simulaties uitgevoerd om de toekomstige bodemligging in de Waddenzee te bepalen bij 0,5 m, 1 m, 2 m en 5 m zeespiegelstijging. De resultaten van deze simulaties m.b.t. sedimentuitwisselingen door de zeegaten, en de bijbehorende ZSS scenario's, zijn gepubliceerd door Wang e.a. (2024). Figuur bijlage B-6 laat alle gesimuleerde scenario's zien.

Hieronder worden de inzichten uit al deze modeltoepassingen in de afgelopen jaren samengevat. De resultaten m.b.t. de geprojecteerde sedimentimport naar de Waddenzee uit de simulaties (tot 2100) voor de vijf scenario's uit Kustgenese 2.0 zijn:

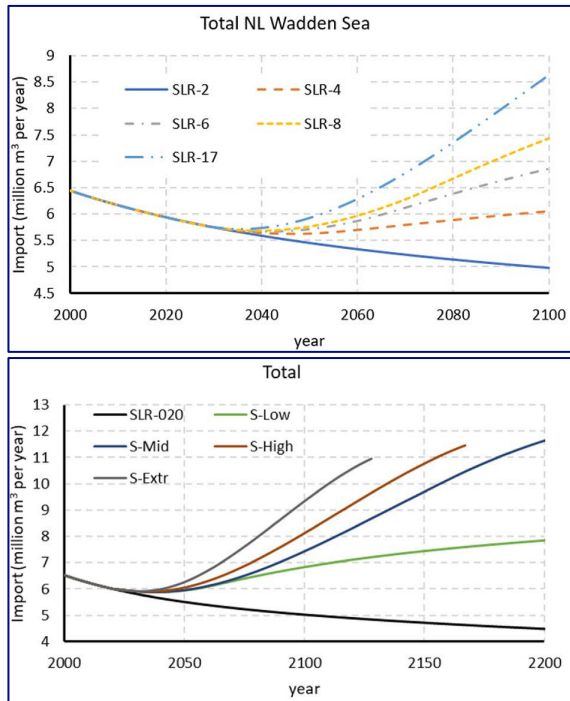
- De respons van de Waddenzee op versnelling van zeespiegelstijging toont vertraging in de tijd, en de vertraging verschilt per bekken. Het verschil in vertraging hangt af van twee factoren: de grootte van het bekken en de huidige morfologische staat van het bekken. Grotere getijdenbekkens hebben een langere vertraging vergeleken met kleinere bekkens. Bovendien kan de bestaande sedimentvraag in het bekken als gevolg van menselijke ingrepen in het verleden de vertraging groter maken.
- Er is een duidelijk verschil tussen het oostelijke en westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee wat betreft veranderingen in hun geprojecteerde sedimentimport. Voor het

oostelijke deel van de Waddenzee (het Zeegat van Ameland, Pinkegat en Zoutkamperlaag), waar de huidige morfologie dicht bij dynamisch evenwicht ligt (Wang et al., 2018), varieert de import in 2100 van ongeveer 0,8 miljoen m³/jr. voor het laagste van de vijf scenario's van zeespiegelstijging in Kustgenese 2.0 (2 mm/jaar) tot ongeveer 2,5 miljoen m³/jr. voor het hoogste scenario van zeespiegelstijging (17 mm/jaar), een verschil van factor 3,1 (310%). Voor het westelijke deel, waar de grote sedimentvraag vanwege de afsluiting van de Zuiderzee nog niet is gedempt, varieert deze tussen ongeveer 4,2 en 6,0 miljoen m³/jr., een factor van ongeveer 145% tussen het hoogste en laagste scenario van versnelling van de zeespiegelstijging.

- M.b.t. de totale geprojecteerde sedimentimport naar de gehele Nederlandse Waddenzee, worden de verschillen tussen de vijf scenario's van Kustgenese 2.0 pas significant (+5 – 10%) rond 2060 (Figuur bijlage B-7). De verschillen nemen toe in de tijd, maar zelfs in de laatste 40 jaar van deze eeuw zijn de verschillen relatief beperkt: in 2100 varieert de totale import tussen 5 miljoen m³/jr. (zeespiegelstijgingssnelheid is 2 mm/jr.) en 8,5 miljoen m³/jr. (zeespiegelstijgingssnelheid is 17 mm/jr.), d.w.z. een verschil van ongeveer 70% tussen de hoogste en laagste scenario's van zeespiegelstijging.
- Vanwege de vertraging in de respons van het systeem op zeespiegelstijging, geeft de sedimentimport op dit moment een goede indicatie van de sedimentimport voor de komende jaren tot decennia, ondanks de onzekerheid in toekomstige ontwikkeling van de zeespiegelstijging. Projecties gebaseerd op het extrapoleren van de huidige trend zijn dus langer geldig dan we eerder dachten.



Figuur bijlage B-6: De nieuwe scenario's van zeespiegelstijging, samen met de scenario's die zijn gebruikt door Lodder et al. (2022), waarbij de zeespiegelstijgingssnelheid na 2100 constant blijft. De linker grafiek toont de gebruikte zeespiegelstijgingssnelheden en de rechter grafiek toont de zeespiegel ten opzichte van referentie '0' in 2000.



Figuur bijlage B-7: Gesimuleerde sedimenttransportsnelheid naar de gehele Nederlandse Waddenzee voor de verschillende scenario's van zeespiegelstijging. Merk op dat na verdrinking in een bassin de sedimenttransportsnelheid door het zeegat constant wordt gehouden om deze figuur te maken.

Tabel Bijlage B-1: Jaar waarin verdrinking (plaatvolume nul wordt) optreedt in verschillende bekken in de verschillende simulaties (Wang e.a., 2024).

		Zeegat van Ameland	Vlie	Eierlandse Gat	Zeegat van Texel
Tidal range constant	S-High	2189	2167	-	2173
	S-Extr.	2142	2128	2166	2128
Tidal range increasing	S-High	-	2180	-	2197
	S-Extr.	2149	2135	2180	2141

De simulaties (tot 2200) voor de 4 nieuwe scenario's zijn vooral bedoeld om inzicht te verkrijgen in de respons van de Waddenzee rondom verdrinking (totaal verdwijnen van wadplaten). Verder zijn er ook simulaties voor gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om de invloed van een veranderende getijslag te begrijpen.

- Verdrinking trad op tijdens de simulaties in de zeegaten van Ameland, Vlie en Texel, voor scenario's van zeespiegelstijging S-Hoog en S-Extr., en in Eierlandse Gat voor het scenario's van zeespiegelstijging S-Extr. Het jaar waarin verdrinking in elk van deze gevallen optreedt, is weergegeven in Tabel Bijlage B-1.
- Wanneer verdrinking optrad in de simulaties, ontwikkelde de importsnelheid zich tot een maximum, maar de maximumwaarden zijn niet gelijk voor de verschillende scenario's van zeespiegelstijging. Blijkbaar vertegenwoordigt de maximumwaarde vlak voor verdrinking niet de maximale transportcapaciteit van het systeem.
- De conclusie dat de importsnelheid minder gevoelig is voor de zeespiegelstijgings-snelheid dan verwacht (Lodder et al. 2022) blijft geldig. De hoogste zeespiegelstijgings-snelheid (scenario S-Extr.) in 2100 is tot 18 mm/jr., d.w.z. factor 9 hoger dan het laagste scenario (2 mm/jr.). Voor 2200 is dit een factor 20 (40 vs. 2 mm/jr.). De geprojecteerde importsnelheid voor het hoogste scenario (S-Extr.) voor het oostelijke deel van de Nederlandse Waddenzee is ongeveer 330% (575% in 2200) van die voor het laagste scenario (2 mm/jr.), van het westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee

ongeveer 150% (205% in 2200) en van de hele Nederlandse Waddenzee ongeveer 180% (275% in 2200).

- De verwachte toename van de import tot 2100 ten opzichte van de huidige situatie (2020) bedraagt maximaal een factor 2,05 (205%) voor het scenario met de hoogste zeespiegelstijging (S-Extr.), wat aanzienlijk is, maar veel minder dan de toename van het zeespiegelstijgingspercentage (met factor 9 of 900%) zou doen vermoeden.
- Het effect van een toename in de tijd van de getijslag is dat de sedimentimport afneemt, en dat verdrinking later optreedt, ondanks de afgenomen sedimentimport.

De resultaten van de vijf scenario's van Kustgenese 2.0 m.b.t. de verandering van de wadplaten zijn uitgewerkt in term van volume-, areaal- en hoogteveranderingen (Figuur bijlage B-8) door Huismans e.a. (2022). In tegenstelling tot de sedimentimport zijn de veranderingen van wadplaten gevoelig voor zeespiegelstijgingssnelheid: bij hogere ZSS scenario's geldt dat een 2 keer zo snelle zeespiegelstijging tot ongeveer 2 keer zo veel verlies van plaatareaal leidt. De grootste bekkens zijn het meest kwetsbaar voor versnelling van zeespiegelstijging. Voor het hoogste scenario van Kustgenese 2.0 (17 mm/jr. in 2100) verliest het plaatareaal in Marsdiep en Vlie ongeveer 40%.

	SLR	Volume change	Area change	height change	Volume change	Area change	Height change
	(mm/yr)	(m ³)	(m ²)	(cm)			
Marsdiep	2	4.1E+06	6.6E+06	9.7E-01	7%	6%	2%
	4	-7.3E+05	-1.1E+06	-2.0E-01	-1%	-1%	0%
	6	-5.4E+06	-8.7E+06	-1.5E+00	-9%	-7%	-3%
	8	-9.8E+06	-1.6E+07	-2.8E+00	-17%	-13%	-6%
	17	-2.6E+07	-4.4E+07	-9.1E+00	-46%	-37%	-19%
Eierland	2	-1.2E+04	-5.3E+03	-7.9E-03	0%	0%	0%
	4	-2.8E+06	-1.3E+06	-1.9E+00	-5%	-1%	-3%
	6	-5.5E+06	-2.7E+06	-3.7E+00	-10%	-3%	-6%
	8	-8.0E+06	-4.1E+06	-5.3E+00	-14%	-4%	-9%
	17	-1.7E+07	-1.0E+07	-1.1E+01	-30%	-11%	-19%
Vlie	2	3.3E+06	3.2E+06	5.3E-01	2%	1%	1%
	4	-1.5E+07	-1.6E+07	-2.1E+00	-7%	-5%	-4%
	6	-3.1E+07	-3.5E+07	-4.7E+00	-16%	-10%	-8%
	8	-4.6E+07	-5.7E+07	-6.6E+00	-23%	-16%	-12%
	17	-9.7E+07	-1.5E+08	-1.3E+01	-49%	-43%	-22%
Ameland	2	-9.5E+05	-7.3E+05	-2.8E-01	-1%	0%	0%
	4	-9.5E+06	-7.5E+06	-2.9E+00	-8%	-4%	-4%
	6	-1.7E+07	-1.4E+07	-5.4E+00	-15%	-8%	-8%
	8	-2.4E+07	-2.0E+07	-7.6E+00	-20%	-11%	-11%
	17	-4.8E+07	-4.6E+07	-1.5E+01	-40%	-26%	-23%
Pinkegat & Zoutkamperlaag	2	-3.4E+05	-9.7E+04	-2.2E-01	0%	0%	0%
	4	-3.5E+06	-1.0E+06	-2.2E+00	-4%	-1%	-3%
	6	-6.4E+06	-2.0E+06	-4.1E+00	-7%	-2%	-5%
	8	-9.1E+06	-2.9E+06	-5.8E+00	-9%	-2%	-7%
	17	-1.8E+07	-6.2E+06	-1.2E+01	-19%	-5%	-14%

Figuur bijlage B-8: Overzicht van veranderingen in plaatvolume, -areaal en -hoogte in 2100, voor de verschillende bekkens en voor de verschillende scenario's van zeespiegelstijging. De kleuren geven aan hoe sterk de verandering is, met de hoogste verliezen in rode en kleinste verliezen of winst in groen.

De resultaten van de simulaties die voor Zandige Kust zijn gedaan leerden dat de totale import (na 80 of 180 jaar), als er een zeespiegelstijging is opgetreden van 0,5, 1, 2, 3 of 5 meter, zich zeer verschillend ontwikkelt per bekken. In de Oostelijke Waddenzee zijn de netto importen nu nog laag en zijn ze bij een 10x hogere zeespiegel soms ook 10x zo groot. Voor de zeegaten van Texel en Vlie in de Westelijke situatie is het verschil tussen de huidige situatie en die bij een 5 meter hogere zeespiegel in de buurt van een factor 2,5. Dat komt met name omdat de bijbehorende bekkens gelimiteerd worden in de transportsnelheid.

B.3.3 Verbetering modelparameters

De bestaande ASMITA modellen zijn rond de eeuwwisseling opgezet. Van alle modellen voor de verschillende zeegaten is eigenlijk alleen het model voor de Zoutkamperlaag gekalibreerd aan de hand van de gegevens over de ontwikkelingen na de afsluiting van de Lauwerszee. Later is er een theoretische beschouwing uitgevoerd waarin de modelparameters in ASMITA zijn gerelateerd aan de beter meetbare fysische parameters zoals in een proces-gebaseerd Delft3D model. Op basis van deze relaties kunnen de parameters in ASMITA modellen m.b.t. sedimentuitwisseling tussen morfologische elementen worden geschaald met de grootte van de Waddenzeebekkens. Aan de hand van deze schaalregels zijn de modelparameters aangepast voor alle zeegaten anders dan Zoutkamperlaag, en daarmee is de kritische snelheid van zeespiegelstijging voor verdrinking opnieuw bepaald (Wang e.a., 2024). De oude en nieuwe waarden van de kritische zeespiegelstijgingssnelheid voor de verschillende bekkens zijn weergegeven in Tabel Bijlage B-2. Vergeleken met de oude waarden zijn de nieuwe waarden voor relatief grotere bekkens groter geworden en voor kleiner bekkens kleiner.

Tabel Bijlage B-2: De berekende kritische zeespiegelstijgingssnelheid voor verdrinking R_c voor de verschillende zeegatsystemen in de Nederlandse Waddenzee, vóór en na aanpassing van de modelparameters aan de hand van de beschouwingen door Wang e.a. (2008).

Bekken	Marsdiep	Eierlandse Gat	Vlie	Zeegat van Ameland	Pinkegat	Zoutkamperlaag
Oude R_c	7,0	18,0	6,3	10,4	32,7	17,1
R_c (mm/jr.)	9,7	18,7	8,8	13,4	25,6	17,1

B.3.4 Verbetering ASMITA

Het volgende niveau van modelverbetering na de aanpassing van modelparameters is de verbetering van de software, door bijvoorbeeld functionaliteit toe te voegen. In de afgelopen jaren zijn er twee verbeteringen op dit niveau uitgevoerd: het implementeren van meer-fractie sedimenttransport en het uitbreiden van het model met kwelders.

Multifractie sedimenttransport

De theoretische analyse van de modelparameters (Wang e.a., 2008) heeft laten zien dat de parameters in de bestaande ASMITA modellen niet aan de afgeleide regels voldoen. Dit komt doordat de modellen werken met één sedimentfractie terwijl in werkelijkheid het sediment in de Waddenzee gegradeerd is. Zowel zand als slib zijn belangrijk voor de morfologische ontwikkelingen onder invloed van bijvoorbeeld zeespiegelstijging (Wang en van der Spek, 2015). Daarom is het ASMITA model verbeterd door de implementatie van een meer-fractie sedimenttransport module. Voorlopig is er aangenomen dat de verschillende sedimentfracties elkaar niet beïnvloeden behalve via de morfologische veranderingen waaraan alle sedimentfracties een bijdrage leveren. De eerste toepassing van het verbeterde ASMITA model is gedaan voor de Zoutkamperlaag om de ontwikkelingen na de afsluiting van de Lauwerszee in 1969 te simuleren. Uit deze eerste toepassing is gebleken dat met deze versie van ASMITA inderdaad de modelparameters beter zijn te relateren aan de fysische meetbare grootheden tijdens de kalibratie van het model. Verder zijn de volgende inzichten gekregen:

- De beweging van wantijen is belangrijk voor de morfologische ontwikkelingen in de nabij gelegen bekkens.
- Reststroming over de wantijen heeft belangrijke invloed op de morfologische ontwikkelingen.

Deze modelverbetering en de toepassing op Zoutkamperlaag is gerapporteerd door Huismans e.a. (2024).

Meenemen van kwelders

Naast de kale wadplaten en geulen maken kwelders ook onderdeel van de Waddenzee. Bonenkamp (2023) heeft een onderzoek gedaan naar de uitbreiding van het ASMITA model voor een zeegatsysteem van drie morfologische elementen (buitendelta, geulen, en platen) door kwelders mee te nemen als vierde morfologisch element. Anders dan de andere drie morfologische elementen waarvan het evenwicht door het normale getij wordt bepaald, wordt de ontwikkeling van een kwelder bepaald door springtij en stormvloed. Daardoor kan het model niet simpelweg uitgebreid worden door een extra element toe te voegen aan de bestaande software. Maar het onderzoek van Bonenkamp (2023) heeft ook laten zien dat het meenemen van de kwelders in de Waddenzee een zeer beperkt effect heeft voor de ontwikkelingen van de andere drie elementen, door de beperkte omvang van de kwelders in de Nederlandse Waddenzee. Dit betekent dat de conclusies uit de eerder uitgevoerde modelleringsstudies met ASMITA voor de Waddenzee blijven gelden ondanks het feit dat kwelders niet waren meegenomen. In het onderzoek van Bonenkamp (2023) is het effect van laterale uitbreiding van kwelders op het areaal wadplaat (en bekkengrootte) niet beschouwd. Nader onderzoek is nodig met modellen waarin de horizontale oppervlakken van morfologische elementen kunnen veranderen is aanbevolen.

B.3.5 Ontwikkeling hybride model Delft3D-ASMITA

Om de voordelen van het proces-gebaseerde model Delft3D en het geaggregeerde model ASMITA te combineren is het hybride Delft3D-ASMITA model ontwikkeld. Essentie van dit hybride model is dat er per roosterpunt in het Delft3D model een evenwichtsdiepte h_e is geïntroduceerd. Net zoals in het ASMITA model wordt dan de lokale evenwichtsconcentratie voor sediment berekend met

$$c_e = c_E \left(\frac{h_e}{h} \right)^n \quad (1)$$

Hierin is h de waterdiepte, en c_E de globale evenwichtsconcentratie. Deze vergelijking vervangt de sedimenttransportformule in het geval van zand of de Partheniade formulering voor erosie in het geval van slib. Verder werkt het hybride model hetzelfde als een Delft3D model, en deze ASMITA formulering is geïmplementeerd in Delft3D als een extra sedimenttransportformule.

Anders dan voor de morfologische elementen in het geaggregeerde ASMITA model is het in principe niet mogelijk de evenwichtsdiepte voor een Delft3D roosterpunt te definiëren. Maar voor bepaalde toepassingen, zoals het voorspellen van de respons van de Waddenzee op relatieve zeespiegelstijging waarvoor de kleinschalige veranderingen zoals migratie van geulen niet relevant zijn, kan men bijvoorbeeld de evenwichtsdiepte definiëren aan de hand van de bestaande bathymetrie. Het hybride model Delft3D-ASMITA is vooral voor dit type toepassing ontwikkeld. Verder kan het model worden gebruikt voor fundamenteel onderzoek om bijvoorbeeld de modelparameters in ASMITA beter te relateren aan de modelparameters in Delft3D.

Het hybride model is inmiddels toegepast voor het Zeegat van Ameland en voor de hele Nederlandse Waddenzee, om de morfologische ontwikkelingen onder verschillende scenario's van zeespiegelstijging te simuleren (Seyfert e.a., 2024). De resultaten van deze toepassingen zijn veelbelovend. De toepassingen hebben inzichten geleverd en hebben ook een aantal problemen duidelijk gemaakt:

- De implementatie van kwelders in het model verdient aandacht. In de uitgevoerde toepassingen zijn de kwelders meegenomen als hoger gelegen gebieden. Tijdens de

simulatie kan zeespiegelstijging deze gebieden veranderen tot intergetijdengebieden. Maar er is geen rekening gehouden met de aanwezigheid van vegetatie en de gebruikte getij-aandrijving houdt ook geen rekening met de voor ontwikkeling van kwelders relevante processen zoals door Bonenkamp (2023) zijn beschouwd.

- De modelresultaten blijken vrij gevoelig te zijn voor de reststroming. Bij de toepassing op de hele Nederlandse Waddenzee blijkt dat de reststromingscirculaties essentiële invloed hebben op het netto sedimenttransportpatroon. Deze gevoeligheid kan te maken hebben met de gebruikte sedimenteigenschappen (voorlopig volgens de bestaande ASMITA modellen met één sedimentfractie), maar het maakt het belang van het reproduceren van het reststromingspatroon in de Waddenzee duidelijk, wat extra eisen aan het gebruikte hydrodynamische model stelt.
- Behandeling van de kustzone. Door het introduceren van een evenwichtsdiepte en het gebruik van vergelijking (1) wordt het ontstaan van sedimentvraag door zeespiegelstijging goed weergegeven in het model. Maar dit principe is niet van toepassing voor de kustzone, waarvoor het algemeen bekend is dat zonder ingreep zeespiegelstijging terugtrekking van de kustlijn veroorzaakt. Dit betekent er voor de kustzone een andere formulering moet worden gebruikt dan vergelijking (1). In de uitgevoerde toepassingen zijn er voorlopig andere maatregelen gebruikt om het aanbod van sediment door kusterosie weer te geven (zie Seyfert e.a., 2024).

B.4 Synthese

B.4.1 Implicaties voor beheer

Kustonderhoud en bescherming tegen overstromingen

De data-analyses laten zien dat het zandtransport naar de Waddenzee lijkt af te nemen in de tijd. De modelleringsstudies laten zien dat het effect van een versnellende zeespiegelstijging op de sedimentimport naar de Waddenzee niet merkbaar is vóór 2040, als de versnelling in 2020 begint. Verder zijn de verschillen in sedimentimport naar de Waddenzee tussen de verschillende scenario's van zeespiegelstijging veel kleiner dan de verschillen in zeespiegelstijgingsnelheid zouden kunnen suggereren. Als de huidige zeespiegelstijgingsnelheid aanhoudt, zal de sedimentimport eerst afnemen omdat het systeem blijft reageren op menselijke ingrepen uit het verleden. De versnelling van de zeespiegelstijgingsnelheid zal deze dalende trend doen veranderen, maar niet eerder dan in 2040. Voor het hoogste scenario voor zeespiegelstijging in Kustgenese 2.0 (17 mm/jaar) zal de import naar verwachting met ongeveer 2,5 miljoen m³ per jaar toenemen in 2100 t.o.v. het huidige tempo. Dit betekent dat het effect van versnellende zeespiegelstijging op het verlies van zand uit de kustzone door import naar de Waddenzee naar verwachting beperkt zal zijn tot 2100.

Samengevat:

- Op korte termijn (~komende 20 jaar) zal de veranderende zeespiegelstijgingsnelheid geen merkbare invloed hebben op de zandsuppletiebehoefte.
- Op de lange termijn wordt het effect van zeespiegelstijging versnelling op suppletiebehoefte merkbaar, maar deze blijft beperkt.

De vertraagde respons van de morfologie van de Waddenzee op versnelling van zeespiegelstijging betekent dat de Waddenzee gemiddeld dieper kan worden in de (verre) toekomst, afhankelijk van de ontwikkeling van de zeespiegelstijging. Dit heeft consequenties voor de veiligheid tegen overstromingen rond de Waddenzee (Waddeneilanden en vastelandskust). Dit effect is beschouwd in de studie naar de hydraulische randvoorwaarden waarbij de ASMITA modelresultaten zijn gebruikt om de toekomstige bodemligging van de Waddenzee te bepalen (Zethof e.a., 2023).

Behoud van ecologische waarden

Het beperkte effect van veranderende zeespiegelstijging op de sedimentimport naar de Waddenzee zal negatieve gevolgen hebben voor het behoud van de ecologische waarden van de Waddenzee, aangezien de versnelling van zeespiegelstijging zal op de lange-termijn resulteren in een groter verlies van wadplaten (Huisman et al., 2022). Voor het behoud van de wadplaten en de ecologische waarden die ermee samenhangen, kan het in de toekomst wenselijk worden om sedimentimport naar de Waddenzee te bevorderen door bijvoorbeeld andere suppletie strategieën, zoals het suppleren op de buitendelta, in of net binnen de zeegaten. Er is nog onderzoek nodig om tot effectieve suppletie strategieën voor het behoud van wadplaten bij versnelde ZSS te komen.

Economisch gebruik

Gas- en zoutwinning veroorzaken bodemdaling in de Waddenzee, en de bodemdaling heeft vergelijkbaar effect op de morfologische ontwikkelingen als zeespiegelstijging. Daarom wordt het Hand-aan-de-Kraan principe gehanteerd, waarbij het begrip meegroeivermogen is geïntroduceerd. Het meegroeivermogen is niet hetzelfde als de kritische zeespiegelstijgings-snelheid voor verdrinking, maar de twee kunnen aan elkaar worden gerelateerd (Wang en Van der Spek, 2021). De hier beschreven studies zijn dus relevant voor het Hand-aan-de-Kraan principe.

Slib is belangrijk voor het meegroeien van de Waddenzeebodem met de zeespiegelstijging. De analyse van slibbalans voor de hele (trilaterale) Waddenzee heeft laten zien dat er mogelijk een tekort kan ontstaan van het slibaanbod in de toekomst als zeespiegelstijging sneller wordt. Dit betekent dat er zorgvuldig met slibbeheer moet worden gehandeld bij zaken zoals storten van baggerspecie en ontginnen van slib uit de Waddenzee.

Vaargeulonderhoud

De samengevatte studies hebben allemaal betrekking op grootschalige morfologische ontwikkeling rondom de Waddenzee. Daarom kunnen de resultaten niet direct worden gebruikt voor relatief kleinschalige problemen zoals vaargeulonderhoud. Daarvoor zijn studies naar meer gedetailleerde ontwikkelingen op kleinere ruimte- en tijdschalen nodig. Met nadruk moet worden gezegd dat de mogelijk grotere waterdiepte in de Waddenzee in de toekomst door snellere zeespiegelstijging niet als direct positief effect voor scheepvaart kan worden beschouwd, aangezien het om totale veranderingen van platen en geulen van het bekken gaat, wat niets zegt over de verandering van een lokale geul.

B.4.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek

- Studies naar verklaring van de uit data-analyse geconstateerde trendbreuk in de ontwikkeling van sedimentimport naar de Waddenzee. De studies kunnen in de eerste instantie richten op het testen van de vier hypothesen in hoofdstuk 2. Deze studies hebben hoge prioriteit omdat het begrijpen van de oorzaken achter trendbreuk essentieel is voor de voorspelling van de toekomstige ontwikkelingen van de Waddenzee.
- Onderzoek naar ontwikkeling van wantijen en de reststroming over de wantijen. Modelleringen met zowel ASMITA als Delft3D-ASMITA laten zien dat de reststroming over de wantijen belangrijke invloeden hebben op de morfologische ontwikkelingen. Dit onderzoek is fundamenteel van aard en wordt deels al opgepakt binnen het WadSED project (een gaande NWO-Perspectief project).
- Verdere modelontwikkelingen. Aan zowel ASMITA als Delft3D-ASMITA kan verder worden ontwikkeld. Daarbij kunnen Rijkswaterstaat, Deltares en Universiteiten samenwerken o.a. via onderzoekprogramma's zoals WadSED.
- Bij monitoring: maak naast veldwaarnemingen ook gebruik van modellering. Theoretische analyse aan de hand van ASMITA heeft laten zien dat het praktisch onmogelijk is om de vraag of er een grens van zeespiegelstijgings-snelheid is overschreden vast te stellen door alleen veldwaarnemingen. De aanbeveling is daarom bij evaluatie van

monitoringsgegevens de dan bestaande resultaten (/inzichten) uit modellering te toetsen tegen waarnemingen. Dit vereist weinig extra inspanning die meer inzichten kan leveren en de modelontwikkeling / -verbetering kan bevorderen.

B.5 Referenties bij resultaten onderzoek morfologisch gedrag Waddenzee:

- Bonenkamp, M., 2023. Long-Term Morphological Modelling of Tidal Inlet Systems: Implementing Salt Marshes in ASMITA. Msc. Thesis, Delft University of Technology, available at <http://repository.tudelft.nl/>.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B., De Ronde, J.G., 2012. Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. *Neth. J. Geosci.* 91, 293–310. <https://doi.org/10.1017/S0016774600000457>.
- Elias, E.P.L. Morphodynamics of Texel Inlet. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft University Press, Delft, The Netherlands, 2006; p. 261. Available online: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:92ad4ac0-9d54-4f5f-8536-80b7782a6aa6?collection=research> (accessed on 3 July 2019).
- Elias, E., Quataert, E., Taal, M., Vermeer, N. 2024. Sedimentbalans Nederlandse Kust. Rapport 11207897-002-ZKS-0007, Deltares, Delft, 209 p.
- 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 Coast Manag.* 216, 105969 <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105969>.
- Huismans Y., Wang, Z., Colina Alonso, A., Harlequin, D. 2025. Hindcast evolution of Zoutkamperlaag tidal basin with ASMITA. Rapport 11210366-001-ZKS-0001, Deltares, Delft
- Lodder, Q. J., Wang, Z. B., Elias, E. P., van der Spek, A. J., de Looft, H., and 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., Huismans, Y., Elias, E., de Looft, H., Wang, Z.B., 2022. Future sediment exchange between the Dutch Wadden Sea and North Sea Coast - insights based on ASMITA modelling. *Ocean Coast Manag.* 219, 106067 <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106067>.
- Seyfert, C., Aguilera Chaves, M, Wang, Z.B., Elias, E., Jagers, B., Huismans, Y. 2025. Modelling the effect of sea level rise using the Delft3D-ASMITA model. Deltares rapport 11207897-002-ZKS-0010
- Wang, Z.B. & van der Spek, A.J.F., 2021. Meegroeivermogen en kritische zeespiegelstijgingsnelheid voor verdrinking in de Nederlandse Waddenzee. Deltares rapport 11206346-002-BGS-002.
- Wang, Z.B.; De Vriend, H.J.; Stive MJ, F.; Townend, I.H. On the parameter setting of semi-empirical long-term morphological models for estuaries and tidal lagoons. In *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*; Dohmen-Janssen, C.M.; Hulscher SJ, M.H., Eds.; Taylor & Francis: Didcot, UK; London, UK; Abingdon, UK, 2008; pp. 103–111,.
- Wang, Z.B., Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Lodder, Q.J., 2018. Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea - impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100. *Neth. J. Geosci.* 97–3, 183–214.

- Wang, Z.B., Van der Spek, A., 2015. Importance of mud for morphological response of tidal basins to sea level rise. In *The Proceedings of the Coastal Sediments 2015*; Wang, P., Rosati, J.D., Cheng, J., Eds.; CD-ROM: San Diego, CA, USA, 2015; pp. 10.
- Wang, Z.B., Lodder, Q.J., Townend, I.H. and Yonghui Zhu, Future sediment transport to the Dutch Wadden Sea under severe sea level rise and tidal range change. *Anthropocene Coasts (2024) 7:12*
<https://doi.org/10.1007/s44218-024-00044-y>.
- Zethof, M. Jansen, M., Engelen, T. van, Knops, D., Stijnen, J., Berg, B. van den. 2023. Systeemanalyse waterveiligheid, Deelrapport Waddenzee en Eems-Dollard, Kennisprogramma Zeespiegelstijging – Spoor II – Systeemverkenningen. <https://open.overheid.nl/documenten/7709c2fd-39ba-431a-ba46-1887194938a2/file>.

C Bodemdaling bij Ameland, correctie op de sedimentbalans

C.1 Doelstellingen van deze bijlage

Het is bekend dat gaswinning bij Ameland zorgt voor een lokale bodemdaling. Deze is niet direct zichtbaar in de gemeten bodemdata, omdat deze door aanvoer van sediment grotendeels opgevuld wordt. De bodemdaling is echter wel een verliespost in de sedimentbalans. Dit memo geeft een schatting van dit verlies, met focus op de bodemdalingsschotel bij Ameland, omdat deze de grootste bijdrage geeft. In de sedimentbalans zijn de verliezen naar de Waddenzee gebaseerd op Kustgenese 2.0, waarin bodemdata is meegenomen in de berekening op basis van de rapportage van Hijma en Kooi (2018).

Voor dit memo is geen uitgebreid onderzoek uitgevoerd naar de effecten van bodemdaling, maar is een beknopte literatuuranalyse uitgevoerd (sectie 2), naast een sedimentvolumeberekening op basis van een recente voorspelling van de bodemdalingsschotel (sectie 3).

C.2 Inzichten uit bestaande literatuur.

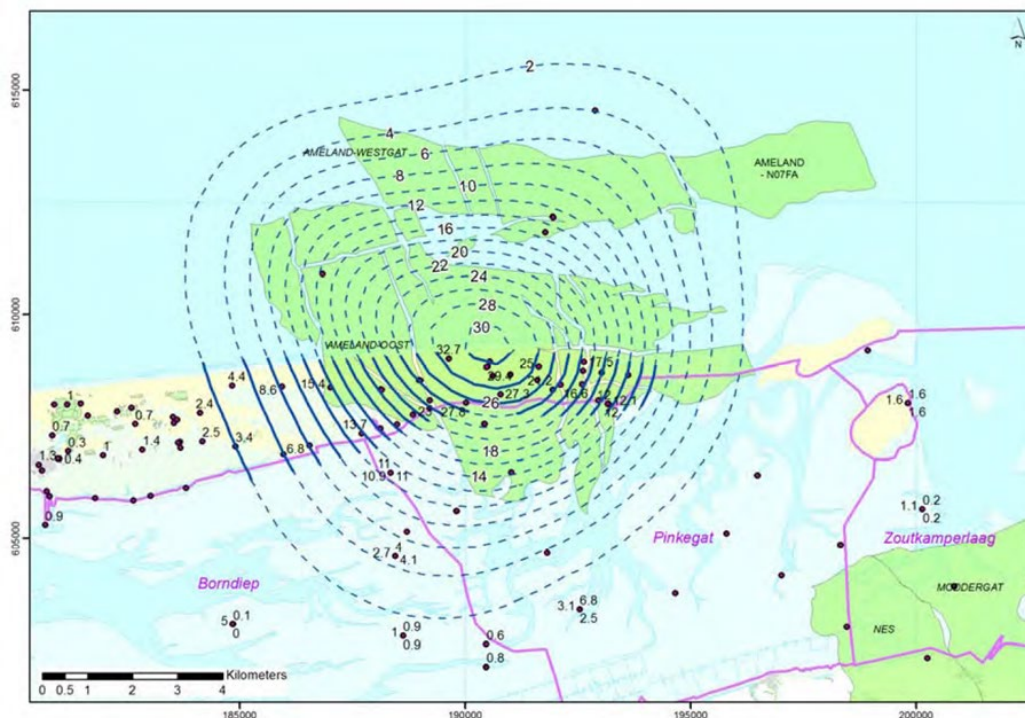
Binnen het onderzoeksprogramma Beheer en Onderhoud Kust zijn twee studies uitgevoerd waarin de effecten van gaswinning op de sedimentvolumes in de kustzone zijn beschreven: Vermaas en Marges (2015) en Hijma en Kooi (2018).

Vermaas en Marges (2015)

Deze studie presenteert schattingen van de bodemdaling over de periode 1990-2012. Deze volumes zijn berekend met schattingen van de bodemdalingsschotel zoals gepresenteerd door Ketelaar et al. (2011). De totale bodemdaling die tussen 1986 en 2009 optrad staat in Figuur bijlage C-1. De maximale verandering van 30 cm in deze periode is gemiddeld 1.3 cm per jaar. Dit is in vergelijking met de morfologische veranderingen beperkt. Het gemiddelde daarvan ligt in het Friesche Zeegat en de kuststrook namelijk tussen de 4 en 17 cm per jaar. Dat is tot meer dan een factor tien groter.

Het totale volume van het dalingsbekken is echter wel significant, door het grote oppervlak ervan. Over de periode 1986-1990 geeft Ketelaar et al. (2011) geen exacte volumes, maar wel de totaal verwachte bodemdaling tot 2050. Zij noemen een maximale diepte van 37 tot 42 cm., wat resulteert in 20 miljoen m³ volume, waarvan 3 miljoen m³ op Ameland, 5 miljoen m³ in de Waddenzee en 12 miljoen m³ in de Noordzee. Het is niet duidelijk of het volume op Ameland inclusief de duinen en/of het strand is of niet.

Om een schatting te kunnen maken van het volume als gevolg van bodemdaling tussen 1986 en 2009 is het totaalvolume relatief tot de totale verticale daling berekend: 30 cm / 42 cm * 17 miljoen m³ = 12,1 miljoen m³ of 30 cm / 37 cm * 17 miljoen m³ = 13,8 miljoen m³. De 17 miljoen m³ is het volume dat de Waddenzee en Noordzee betreft. Aangenomen is dus dat het volume op Ameland niet de duinen of het strand betreft.

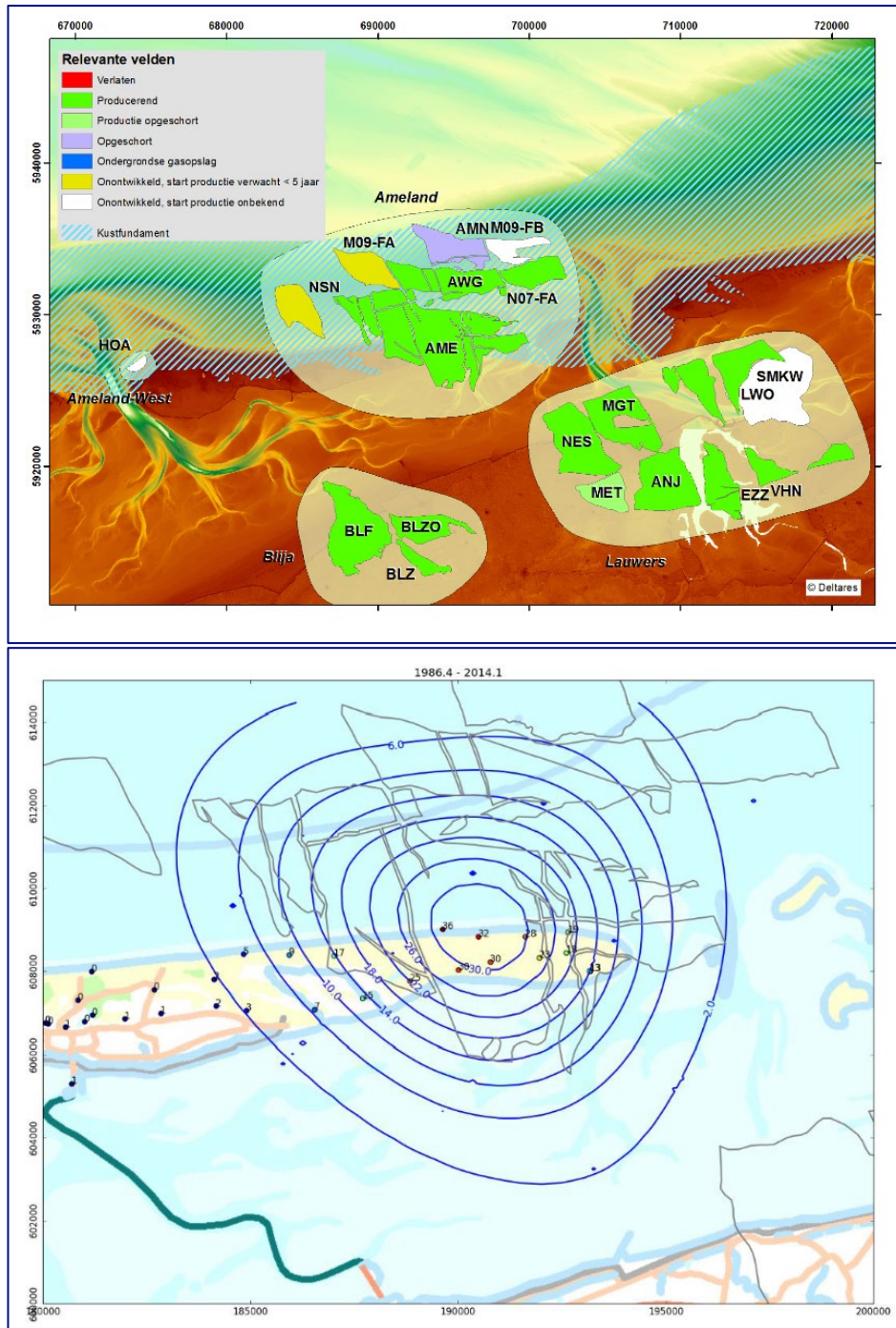


Figuur bijlage C-1: Bodemdaling (in cm) in de periode 1986-2009 getallen bij de punten tonen de ter plaatse gemeten daling (peilmerken op Ameland en peilmerkclusters in de Waddenzee die al in 1986 waren aangemeten). De onderbroken lijnen tonen de gemodelleerde bodemdaling door gaswinning. Bron: Ketelaar et al. (2011).

De bodemdaling heeft volgens Wang en Eysink (2011) geen zichtbaar effect op de morfologische ontwikkeling van het gebied. Het lijkt ook niet aannemelijk dat een daling van maximaal 1,3 cm per jaar sturend zal zijn voor de grootschalige morfologische veranderingen die in dit gebied plaatsvinden. Dit neemt echter niet weg dat het totale volume van 12 tot 14 miljoen m³ ten opzichte van de andere volumeveranderingen significant is. Dit volume komt direct of indirect van andere gebieden vandaan. Het brongebied van het sediment hoeft niet noodzakelijkerwijs in volume te zijn afgenomen. Door de netto oostwaartse stroming langs de Noordzee kust kan het dalingsgebied mogelijk aangevuld zijn door sediment afkomstig van de buitendelta het Ameland Zeegat (het Bornrif) en de suppleties die langs de kust van Ameland zijn uitgevoerd. Zonder de daling was dit sediment waarschijnlijk ook oostwaarts getransporteerd, maar was dan mogelijk verder getransporteerd.

Hijma en Kooi (2018)

Hijma en Kooi (2018) presenteren een overzicht van alle oorzaken van bodemdaling langs de gehele Nederlandse kust. In Hoofdstuk 3 presenteren zij de effecten van gaswinning. De belangrijkste inzichten voor het veld bij Ameland worden hier beknopt gepresenteerd. In het veld van Ameland heeft de grootste productie plaatsgevonden en is de grootste invloed zichtbaar. Afgezien van een klein, niet ontwikkeld, veld aan de westkant van Ameland vindt de meeste productie plaats aan de oostkant van Ameland. De gasvelden liggen deels onder de oostpunt van het eiland zelf, deels onder Waddenzee, maar met name aan de noordkant van het eiland (Figuur bijlage C-2). In het grootste deel van de velden wordt al tientallen jaren gas gewonnen, terwijl momenteel twee nieuwe velden, NSN en M09-FA, in gebruik worden genomen. Vrijwel alle velden liggen binnen de grenzen van het kustfundament.



Figuur bijlage C-2: Overzichtskaart van de gasvelden in de oostelijke Waddenzee (boven) en bodemdaling tussen 1986 en 2014 (in cm): gemodelleerd (contouren) en gemeten (punten) uit NAM 2017.

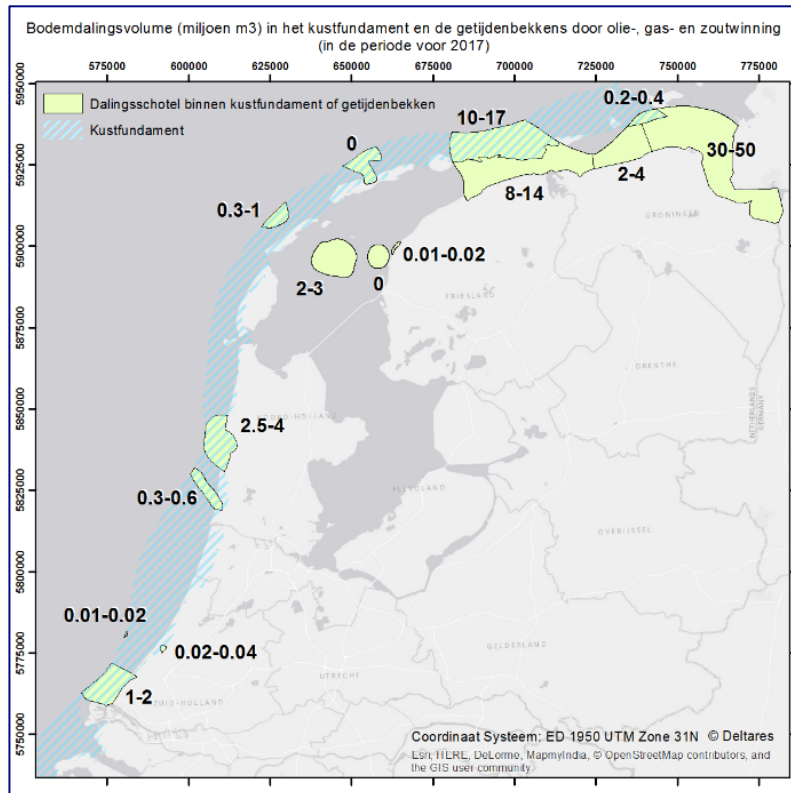
De reeds opgetreden bodemdaling is fors en bedraagt momenteel al bijna 40 cm in het centrum van de winning Figuur bijlage C-2, uit NAM, 2017). Het totale bodemdalingsvolume is in die tijd opgelopen tot ongeveer 13 miljoen m³. ¹⁰³De uiteindelijke bodemdaling die zal optreden is niet bekend, dit hangt uiteraard ook af van de toekomstige productie, maar ook van het na-ijleffect en de bijdrage van de nieuw gestarte velden (NSN en M09-FA). Deze

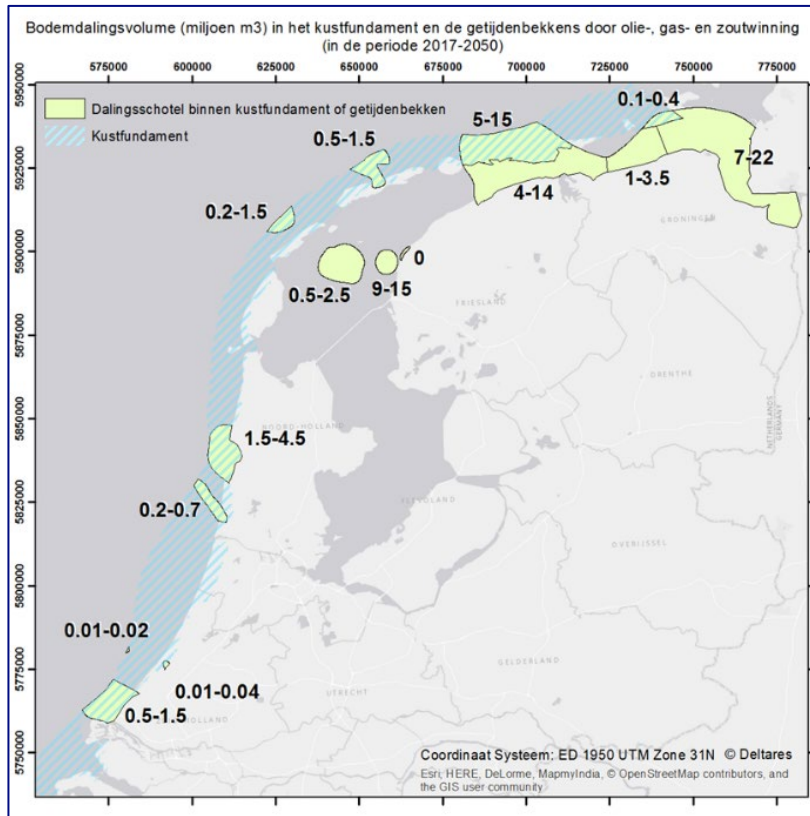
¹⁰³ Het is opvallend dat de 40 miljoen m³ aan de bovenzijde van de schatting van Ketelaar et al. (2011) zit, maar dat het volume wat nu berekend wordt veel minder is (13 i.p.v. 20 miljoen m³) dan zij bij die daling afschatte. Het sluit wel aan bij de schatting van volume van Vermaas t/m 2009 (die wel weer andere daling gebruikte). Dit geeft aan wat voor onzekerheid er nog in de berekeningen zit. De bodemdalingsschotels worden regelmatig anders gemodelleerd, wat tot andere getallen leidt. Hijma en Kooi (2018) gaan hier nog ook op in.

bijdrage lijkt overigens beperkt: in het winningsplan voor die velden wordt uitgegaan van hooguit enkele centimeters (NAM, 2015b). In het rapport van Schuttenhelm (2017) staat dat deskundigen 'off the record' een totale daling van 56 cm verwachten. Dit zou betekenen dat er nog zo'n 20 cm daling aan zit te komen. Hoewel deze claim dus (nog) niet onderbouwd is, mag wel aangenomen worden dat er nog lang relevante bodemdaling zal optreden rondom de velden van Ameland. Het uiteindelijke totale bodemdalingsvolume zal hierbij zeker meer dan 20 miljoen m³ bedragen, waarbij naar verwachting ongeveer 3/5 deel in de Noordzee zal liggen, 1/5 deel op Ameland zelf en 1/5 deel in de Waddenzee (Vermaas en Marges, 2015).

Hijma en Kooi (2018) vatten de bodemdalingsvolumes tot 2017 door olie-, gas- en zoutwinning samen in een overzichtsfiguur van de gehele Nederlandse kust (Figuur bijlage C-3). Deze figuur laat duidelijk zijn dat de grootste bodemdalingsvolumes opgetreden zijn in de oostelijke Waddenzee. Langs de Hollandse Kust zijn de maximale volumes 1 tot 4 miljoen m³, terwijl in de westelijke Waddenzee de grootste bodemdalingsvolumes zich voorgedaan hebben rondom het veld Zuidwal (2-3 miljoen m³). Rondom Ameland, en met name in het Eems-Dollardgebied, lopen de volumes op tot boven de 10 miljoen m³. Er is een projectie gemaakt van de verwachte bodemdalingsvolumes tussen 2017 en 2050 (Figuur bijlage C-3). Bij de meeste gasvelden heeft de grootste bodemdaling al plaatsgevonden en daarom zijn de verwachte volumes een stuk lager dan de opgetreden bodemdalingsvolumes. Rondom Ameland en in de Eems-Dollard worden nog wel aanzienlijke bodemdalingsvolumes verwacht.

De volumes zijn berekend door in een GIS-omgeving bodemdalingcontouren te plotten, die gebaseerd zijn op de beschikbare data uit winningsplannen en op de modellering van De Vos (2010). Hijma en Kooi (2018) maken in hoofdstuk 3.2.9. blz. 31 de opmerking, "dat de reeds opgetreden bodemdaling momenteel in het centrum van de winning al bijna 40 cm bedraagt en dat dit aanzienlijk hoger is dan volgt uit de modelstudie van De Vos (2010). Een projectie van de volumes op basis van deze bodemdalingsschotel zoals uitgevoerd in hoofdstuk 3 zal dus (veel) hogere volumes opleveren. "





Figuur bijlage C-3: Geschat bodemdalingsvolume door olie-, gas- en zoutwinning in de periode voor 2017 (boven) en voor de periode 2017-2020. De volumes zijn geschat op basis van data uit rapporten van de winbedrijven en De Vos (2010). De range in volume is ontstaan door rondom het berekende volume een onzekerheidsmarge van 25% aan te houden (Bron: Hijma & Kooi, 2018.).

C.3 Berekening van sedimentvolumes

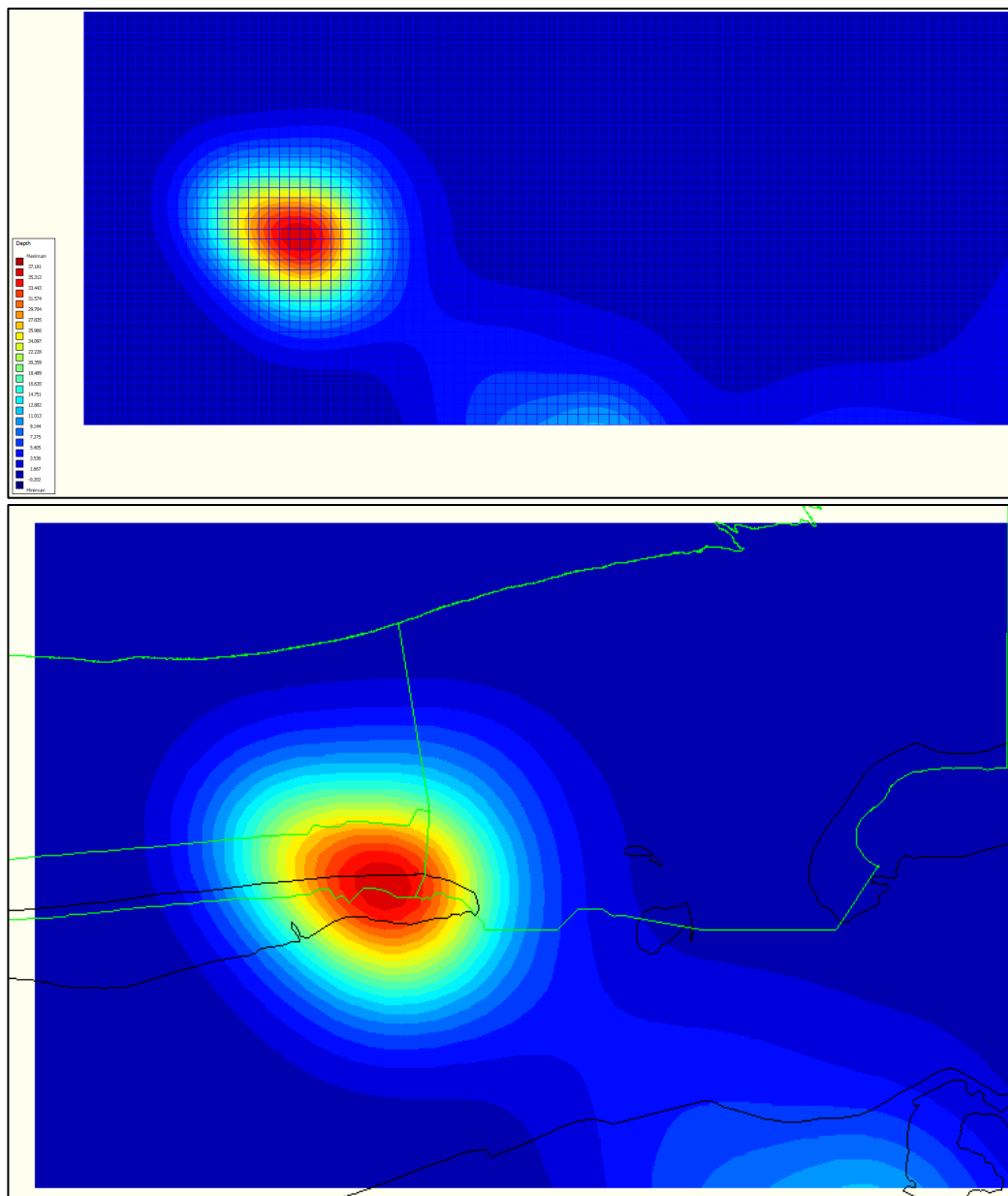
De berekening van de sedimentvolumes binnen de bodemdalingsschotel is gebaseerd op de 2021 projectie van de bodemdalingsschotel. Deze is vergrid op een rooster met 500x500m resolutie. Het totale balansgebied beslaat een oppervlakte van 727,25 km². De totale volumeverandering hiervan bedraagt 23,2 miljoen m³. Het centrum van de bodemdaling ligt in het midden van het eiland in de actieve kustzone.

Op basis van deze vergridding zijn de volumeveranderingen binnen de kustzone bepaald. De actieve kustzone van Ameland heeft een relatief klein oppervlakte maar vertoont wel de grootste bodemdaling. Dit resulteert in een volumeverandering van 2,26 miljoen m³. De diepe vooroever heeft een veel groter oppervlakte, maar een gelijkwaardig verlies van 2,48 miljoen m³. De buitendelta van het Friesche zeegat heeft een nog veel groter oppervlakte en vertoont daardoor ook een groter verlies van 2,89 miljoen m³. In totaal bedraagt het verlies uit de kustzone (gebieden 1-3 in Tabel Bijlage C-1) 7,63 miljoen m³.

De begrenzing van de bekkens is gebaseerd op de indeling gehanteerd binnen Kustgenese 2. Op basis van deze indeling bedragen de volumeverliezen in de bekkens samen 5,8 miljoen m³. De verliezen van het eiland zijn het verschil tussen de totale volumeverandering van 23,2 miljoen m³ min de veranderingen onder de kustzone en bekkens, wat dus 9,7 miljoen m³ is.

Tabel Bijlage C-1: Overzicht van de oppervlakten en volumes. Voor de berekening van de volumeverandering per jaar is er van uit gegaan dat de bodemdalingsschotel berekend is over de periode 1986-2021.

Gebied	Oppervlakte [km ²]	Volume [10 ⁶ m ³]	Volume [10 ⁶ m ³ /jr.]
1. Actieve zone Ameland	13,5	2,26	0,06
2. Diepe Vooroever Ameland	47,75	2,49	0,07
3. Buitendelta Friesche Zeegat	90,0	2,89	0,08
4. Bekken Amelander Zeegat	47,5	0,59	0,02
5. Pinkegat bekken	48,5	3,75	0,11
6. Zoutkamperlaag bekken	12,6	1,47	0,04
Totaal 1, 2, 3	151,25	7,63	0,22
Totaal 1 - 6	259,85	13,45	0,60
Totaal hele vak	727,25	23,17	0,66

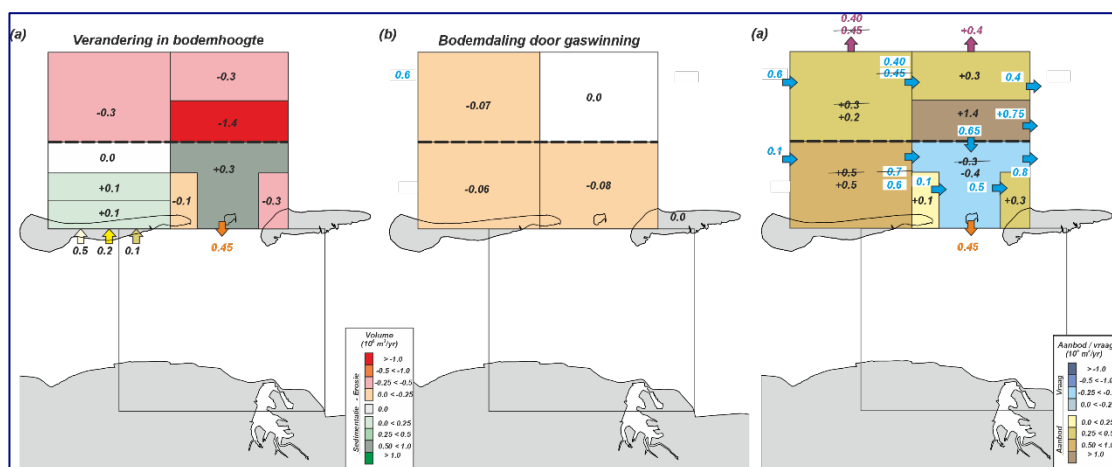


Figuur bijlage C-4 (boven): Vergridding van de bodemdalingsschotel op een 500x500m grid, getoonde waarden zijn de bodemdaling in cm. Onder: ligging van de verschillende balansvakken van de Actieve zone Ameland, Diepe vooroever Ameland, en buitendelta van het Friesche Zeegat.

C.4 Uitwerking in de sedimentbalans

Uitgedrukt in verandering in miljoen m³/jr., waarbij de aanname gedaan is dat de gegevens van de bodemdalingsschotel gebaseerd zijn op de periode 1986-2021 zijn de veranderingen beperkt. De sedimentbalans zoals gepresenteerd in Elias et al. (2024) vertoont daarom slechts een kleine verandering. Er is een afname van de langtransporten richting de eilandkust van Schiermonnikoog met 0,2 miljoen m³/jr. en er is een kleine afname (< 0.1 miljoen m³/jr.) van de zeewaartse verliezen (Figuur bijlage C-5).

De afname van 0,2 miljoen m³/jr. in de actieve zone betekent ook een afname van de toevoer richting de eilandstaart van Schiermonnikoog, waardoor hier de balans niet meer sluitend is. Hier zou dus een extra toevoer van 0,2 miljoen m³/jr. moeten optreden. Vanuit het mondingsgebied van de Eems was er al een uitwisseling van 0,65 miljoen m³/jr. richting het Groninger Wad, deze neemt dus toe tot 0.85 miljoen m³/jr. met de extra bijdrage van 0,2 miljoen m³/jr. richting de eilandstaart. De verliezen richting de Duitse kust nemen dan af van 0,6 miljoen m³/jr. naar 0,4 miljoen m³/jr.



Figuur bijlage C-5: Invloed van bodemdaling door gaswinning op de sedimentbalans van Elias et al. (2024).

C.5 Conclusies bodemdaling Ameland

- Bodemdaling door gaswinning geeft een relatief groot sedimentvolumeverlies in de kustzone en vooroever van Ameland en op de buitendelta van het Friesche Zeegat.
- Het berekende volumeverlies op basis van de 2021 bodemdalingsschotel bedraagt 7,63 miljoen m³.
- De invloed van deze verliezen op de sedimentbalans zijn beperkt, doordat de jaarlijkse verliezen slechts 0,2 miljoen m³/jaar bedragen.
- De daling van het eiland is aanzienlijk, overeenkomend met een volume van 0,4 miljoen m³/jaar, maar dit deel bevindt zich niet in de actieve zone.

C.6 Referenties bodemdaling Ameland

De Vos, D., 2010. Determination and visualization of the expected surface subsidence due to onshore gas production in the Netherlands. Internship report, TNO.

Elias, E., Quataert, Q., Taal, M., Vermeer, N., (2024). Sedimentbalans Nederlandse Kust. Rapport 11207897-002-ZKS-0007, Deltares, Delft, 209 p.

Hijma, M. en Kooi, H., (2018). Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens Door geologische processen en menselijke activiteiten. Rapport 11200538-008, Deltares, Delft, 63 p.

Ketelaar, G. W. van der Veen, D. Doornhof, 2011, Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost 2005-2010 – Hoofdstuk 1-Bodemdaling. Rapportage Begeleidingscommissie bodemdaling (bron: http://www.waddenzee.nl/Rapportage_2011.2785.0.html)

NAM, 2017. Ensemble based subsidence application to the Ameland gas field - long term subsidence study part two (LTS II). NAM. [beschikbaar via nam-feitenencijfers.data-app](#)

Schuttenhelm, R., 2017. De toekomst van de Waddenzee - Een stijgende zeespiegel over een dalende bodem. In opdracht van de Waddenvereniging, Harlingen.

Vermaas, T., Marges, V.C., 2015. Detailanalyse volumeveranderingen rondom Ameland. Deltares, The Netherlands, 39 pp.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl