

Technisch Advies Mogelijkheid voor een Alternatieve Zeewaartse Grens van het Kustfundament

Ten behoeve van het beleidsadvies Kustgenese 2.0



Technisch Advies Mogelijkheid voor een Alternatieve Zeewaartse Grens van het Kustfundament

Ten behoeve van het beleidsadvies Kustgenese 2.0

Auteurs

Ad van der Spek

Jebbe van der Werf

Bart Grasmeyer

Heleen Vreugdenhil

Claire van Oeveren - Theeuwes

Arno Nolte

Technisch Advies Mogelijkheid voor een Alternatieve Zeewaartse Grens van het Kustfundament

Ten behoeve van het beleidsadvies Kustgenese 2.0





Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving-
Contactpersoon	Carola van Gelder & Harry de Looff
Referenties	Kustgenese 2.0 met zaaknummer 31123135
Trefwoorden	Kustgenese 2.0, Diepe vooroever, Morfologie, Sedimenttransport, Kustfundament

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	10-03-2020
Projectnummer	1220339-009
Document ID	1220339-009-ZKS-0013
Pagina's	32
Status	definitief

Auteurs

	Ad van der Spek	
	Jebbe van der Werf	
	Bart Grasmeijer	
	Heleen Vreugdenhil	
	Claire van Oeveren-Theeuwes	
	Arno Nolte	

Doc. Versie	Auteurs	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Ad van der Spek 	Marcel Taal 	Toon Segeren 	
	Jebbe van der Werf	Jelmer Cleveringa (Arcadis) 		
	Bart Grasmeijer			
	Heleen Vreugdenhil			
	Claire van Oeveren-Theeuwes			
	Arno Nolte			

Samenvatting

De huidige zeewaartse grens van het kustfundament ligt op de doorgaande NAP -20 m lijn. Rond deze diepte gaat de kusthelling over in het continentaal plat. Rijkswaterstaat heeft behoefte aan een betere onderbouwing van de zeewaartse afbakening van het kustfundament. Daarvoor is door Deltares binnen het Kustgenese 2.0 project onderzoek uitgevoerd om kennis te ontwikkelen van de morfologische processen en dynamiek op de diepe vooroever tussen NAP -8 m en -20 m. De opgedane inzichten zijn in dit Technisch Advies ingezet om de volgende beleidsvraag te beantwoorden: **“Is een andere zeewaartse grens mogelijk voor het kustfundament?”**

Niet-morfologische aspecten zoals de grens voor zeezandwinning en de Natura2000 begrenzing (beide nu de doorgetrokken NAP -20 m lijn) zijn niet meegenomen in dit advies.

Uitgangspunt voor het vaststellen van de zeewaartse grens van het kustfundament is het (theoretisch) principe dat er een dieptecontour is te bepalen zeewaarts waarvan de bodemligging niet significant verandert en waarover geen significant netto zandtransport plaatsvindt. Deze grens is afhankelijk van een gekozen tijdschaal. Dit Technisch Advies hanteert twee tijdschalen: 50 jaar en 200 jaar.

Hiervan uitgaand zijn er drie criteria mogelijk om de zeewaartse grens van het kustfundament op te baseren:

- de vorm van het kustprofiel,
- netto zandtransport over een dieptecontour, en,
- de variatie in bodemligging van het kustprofiel.

De overgang van de diepe vooroever naar de vlakke zeebodem is vaak niet eenduidig te bepalen, waardoor de vorm van het kustprofiel niet geschikt is als criterium. Het berekende netto landwaartse zandtransport op de diepe vooroever is niet verwaarloosbaar en bovendien nog niet voldoende zeker. Dit maakt het netto zandtransport evenmin geschikt als criterium voor de zeewaartse grens van het kustfundament.

De variatie in de bodemligging van het kustprofiel neemt in zeewaartse richting af tot een diepte tussen NAP -10 m en -15 m. Bij verder toenemende waterdiepte blijft de variatie vrijwel constant. De diepte waarop de variabiliteit in bodemligging stabiliseert kan gebruikt worden als uitgangspunt voor de zeewaartse grens van het kustfundament op een tijdschaal van 50 jaar. Voor een tijdschaal van 200 jaar moet een grens op dieper water aangehouden worden.

De keuze van een zeewaartse grens voor het kustfundament omvat twee deelaspecten: 1. keuze tussen een grens met één uniforme dieptewaarde voor de hele Nederlandse kust of een regionaal gedifferentieerde dieptewaarde, en 2. het wel of niet toepassen van een onzekerheidsmarge.

Geadviseerd wordt om tot 2035 uit te gaan van de 50 jaar tijdschaal. De gevonden dieptewaarden voor deze 50 jaar tijdschaal bevatten onzekerheid. Om dit te ondervangen kan een onzekerheidsmarge aangehouden worden door een grotere diepte te kiezen. De dieptewaarden voor de 200 jaar variant worden als een ruime marge gezien. Daarom wordt aanvullend een tussenvariant voorgesteld met dieptewaarden tussen de 50 jaar en 200 jaar grens.

Dit rapport dient als volgt gerefereerd te worden:

Deltares (2020): Technisch advies mogelijkheid voor een alternatieve zeewaartse grens van het kustfundament; ten behoeve van het beleidsadvies voor Kustgenese 2.0, auteurs Ad van der Spek, Jebbe van der Werf, Bart Grasmeijer, Heleen Vreugdenhil, Claire van Oeveren en Arno Nolte, Deltares rapport 1220339-009-ZKS-00013, in opdracht van Rijkswaterstaat WVL, maart 2020.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Algemene achtergrond Kustgenese 2.0	6
1.2	Vraagstuk van dit Technisch Advies	6
1.3	Leeswijzer	6
2	Achtergrond zeewaartse grens van het kustfundament	8
2.1	Definitie van het kustfundament	8
2.2	Sedimentbehoefte kustfundament: introductie van de rekenregel	9
2.3	Introductie van de diepe vooroever	10
2.4	Beleidsmatige historie van de huidige zeewaartse grens van het kustfundament	12
3	Criteria voor de keuze van de zeewaartse grens van het kustfundament	13
3.1	Inleiding: criteria voor het vaststellen van een zeewaartse grens	13
3.2	De vorm van het kustprofiel	13
3.3	De variatie in bodemligging over het kustprofiel	15
3.4	Netto zandtransport over een dieptecontour	17
3.4.1	Methode	17
3.4.2	Resultaten zandtransporten	18
3.4.3	Discussie zandtransport als criterium voor keuze zeewaartse grens	19
3.5	Conclusie: selectie van criterium	22
4	Alternatieven voor de zeewaartse grens van het kustfundament	23
4.1	Inleiding	23
4.2	Keuze van een zeewaartse grens voor het kustfundament	24
4.2.1	Een kustlangs uniforme grens	24
4.2.2	Regionale grenswaarden	24
4.2.3	Zeespiegelstijging	25
4.3	Aandachtspunten bij de keuze van een zeewaartse grens voor het kustfundament	25
5	Technisch advies betreffende de zeewaartse grens van het kustfundament	27
6	Referenties	30

1 Inleiding

1.1 Algemene achtergrond Kustgenese 2.0

Het Nederlandse kustbeleid heeft als doelstelling een veilige, economisch sterke en aantrekkelijke kust (Deltaprogramma Kust, 2013). Om dit te bereiken worden de basiskustlijn en het kustfundament op orde gehouden met zandsuppleties.

In 2020 wil het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat het huidige kustbeleid herijken, waarbij klimaatverandering meegewogen wordt. Om dit besluit te ondersteunen en te onderbouwen wordt in het programma Kustgenese 2.0 de kennis van de kust verder ontwikkeld.

1.2 Vraagstuk van dit Technisch Advies

Dit Technisch Advies geeft antwoord op de volgende beleidsvraag:

“Is een andere zeewaartse grens mogelijk voor het kustfundament?”

De rekenregel uit Rijkswaterstaat (2016) is het uitgangspunt voor het bepalen van de sedimentbehoefte van het kustfundament. De ligging van de zeewaartse grens bepaalt de grootte van het kustfundament en is daarmee een belangrijk onderdeel van deze rekenregel. Het kustfundament en de rekenregel worden beschreven in de paragrafen 2.1 en 2.2.

Dit Technisch Advies is gericht op een morfologische beschouwing en onderbouwing van de keuze voor de zeewaartse grens. Een reflectie op de invloed van (versnelde) zeespiegelstijging is onderdeel van de beschouwing. De uiteindelijke keuze hangt af van meer factoren. Niet-morfologische aspecten zijn bijvoorbeeld beschreven in Deltares (2019). Op basis van alle factoren, waaronder de onderbouwing in dit technisch advies, wordt door Rijkswaterstaat een beleidsadvies voor de ligging van de zeewaartse grens van het kustfundament opgesteld.

De huidige grens is vastgesteld op de doorgetrokken NAP -20 m lijn, gebaseerd op de overgang van de kusthelling naar het continentaal plat en op basis van de landwaartse grens van de zandwinning. In de rekenregel (Rijkswaterstaat, 2016) is geen netto zandtransport over de zeewaartse grens opgenomen.

Om een beter onderbouwde keuze voor de zeewaartse afbakening van het kustfundament en het netto zandtransport over de zeewaartse grens te kunnen maken, is meer inzicht nodig in de processen op de diepe vooroever (de zeebodem tussen NAP -8 m en -20 m) en de daardoor veroorzaakte morfologische dynamiek. In Kustgenese 2.0 is daar onderzoek naar gedaan. Meetcampagnes bij Noordwijk, Terschelling en Ameland en modelonderzoek maken hiervan deel uit.

1.3 Leeswijzer

Dit Technisch Advies is een slotstuk van het uitgevoerde onderzoek Lange Termijn Kustontwikkeling dat Deltares heeft uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat in het kader van het Kustgenese 2.0 programma. Van februari 2017 tot februari 2020 zijn samenhangende deelonderzoeken uitgevoerd om de systeemkennis te vergroten door een combinatie van beschikbare data en kennis, nieuwe monitoring en nieuwe modellering. Voor een overzicht van het uitgevoerde onderzoek wordt verwezen naar de integrale synthese van het Kustgenese 2.0 project (Deltares, 2020b) en de Kustgenese 2.0 Atlas van de Diepe Vooroever (Van der Spek *et al.*, 2020). Dit technisch advies beperkt zich tot het beantwoorden van de beleidsvraag in paragraaf 1.2.

Hoofdstuk 2 bevat een beknopte beschrijving van het kustfundament en de rekenregel voor de sedimentbehoefte van het kustfundament, waarvan de zeewaartse grens een onderdeel is. Zij vormen het uitgangspunt voor het uitgevoerde onderzoek en zijn daarom essentieel voor de zelfstandige leesbaarheid van de rest van dit Technisch Advies.

In hoofdstuk 2.3 wordt de diepe vooroever gedefinieerd en wordt een conceptueel model voor de morfologische ontwikkeling van de diepe vooroever geïntroduceerd.

In hoofdstuk 3 worden mogelijke criteria voor de positie van de zeewaartse grens voorgesteld en afgewogen. Vervolgens worden mogelijkheden gepresenteerd en onderbouwd in Hoofdstuk 4.

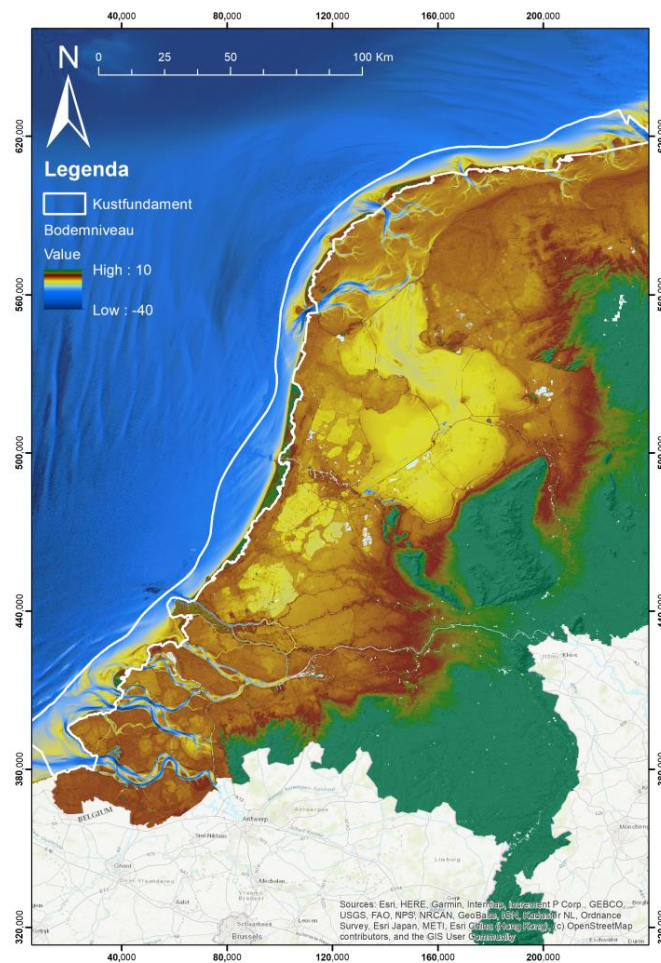
Ten slotte wordt in Hoofdstuk 5 antwoord gegeven op de beleidsvraag, inclusief overwegingen en aanbevelingen.

2 Achtergrond zeewaartse grens van het kustfundament

2.1 Definitie van het kustfundament

Het kustfundament is gedefinieerd in de Nota Ruimte (VROM, 2004):

"Het kustfundament omvat het gehele zandgebied, nat én droog, dat als geheel van belang is als drager van functies in het kustgebied. Het rijk waarborgt voor de realisatie van een duurzame veiligheid tegen overstromingen vanuit zee, dat in het kustfundament voldoende ruimte beschikbaar is en blijft voor de versterking van de zeewering."



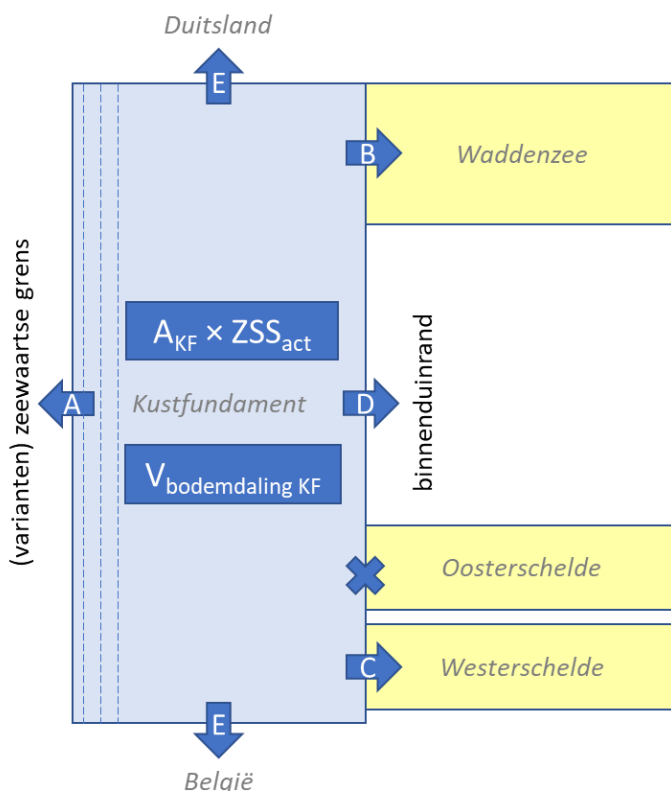
Het kustfundament wordt als volgt begrensd (Figuur 2.1):

- De zeewaartse grens bestaat uit de doorgaande NAP-20 m lijn (20 meter onder Normaal Amsterdams Peil)
- Aan de landzijde omvat het kustfundament alle duingebieden én alle daarop gelegen harde zeeweringen. De landwaartse grens valt bij smalle duinen en dijken samen met de grens van de waterkering uitgebreid met de ruimtereservering voor tweehonderd jaar zeespiegelstijging en omvat daar waar de duinen breder zijn dan de waterkering het gehele duingebied.
- De zuidelijke en noordoostelijke grens vallen samen met de staatsgrenzen met respectievelijk België en Duitsland.
- Tussen de Waddeneilanden wordt de landwaartse grens van het kustfundament gevormd door de denkbeeldige lijnen over de kelen van de zeegaten.

Figuur 2.1 Het kustfundament

2.2 Sedimentbehoefte kustfundament: introductie van de rekenregel

Voor dit Technisch Advies is de sedimentbehoefte van het kustfundament gedefinieerd als de hoeveelheid zand die nodig is om het kustfundament te laten meegroeien met de zeespiegelstijging en om verliezen uit het kustfundament te compenseren (Rijkswaterstaat, 2016). Ten behoeve van de opbouw van dit Technisch Advies wordt de rekenregel breder uitgeschreven dan in Rijkswaterstaat (2016), zodat alle componenten als eigen term herkenbaar zijn. Het zandtransport over de zeewaartse grens is als term toegevoegd.



Figuur 2.2 Visualisatie van de termen van de rekenregel die in dit Technisch Advies worden beschouwd. Alle pijlen zijn per definitie in de exporterende richting getekend.

Figuur 2.2 geeft een schematische weergave van de uitgeschreven rekenregel. Het kustfundament wordt daarin als een box gepresenteerd waar zand in- en uitgaat over de verschillende randen. De hoeveelheid zand wordt bepaald door de volgende rekenregel:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{sedimentbehoefte}} = & (A_{\text{KF}} \times ZSS_{\text{act}}) && \text{Pijl A in Figuur 2.2} \\
 & + V_{\text{export zeewaartse grens KF}} && \text{Pijl B} \\
 & + V_{\text{export Waddenzee}} && \text{Pijl C} \\
 & + V_{\text{export Westerschelde}} && \\
 & + V_{\text{bodemdaling KF}} && \\
 & + V_{\text{export landwaartse grens}} && \text{Pijl D} \\
 & + V_{\text{export landsgrenzen}} && \text{Pijlen E}
 \end{aligned}$$

Met:

$V_{\text{sedimentbehoefte}}$

Zandbehoefte van het kustfundament (m^3/jaar)

A_{KF}

Oppervlakte van het kustfundament (m^2)

ZSS _{act}	Actuele relatieve zeespiegelstijging (m/jaar)
V _{export zeewaartse grens KF}	Netto zeewaartse zanduitwisseling over de zeewaartse grens (m ³ /jaar)
V _{export Waddenzee}	Netto zandtransport van kustfundament naar de Waddenzee (m ³ /jaar)
V _{export Westerschelde}	Netto zandtransport van kustfundament naar de Westerschelde (m ³ /jaar)
V _{bodemdaling KF}	Bodemdaling in het kustfundament door delfstofwinning (m ³ /jaar)
V _{export landwaartse grens}	Netto zandtransport over de landwaartse grens (m ³ /jaar)
V _{export landsgrenzen}	Netto zanduitwisseling over de landsgrenzen richting België en Duitsland (m ³ /jaar)

Het oppervlak A_{KF} van het kustfundament is een belangrijke factor in de sedimentbehoefte. De landwaartse grens van het kustfundament en de grenzen met België en Duitsland staan niet ter discussie. Dit Technisch Advies beschrijft de mogelijkheden voor eventuele aanpassing van de zeewaartse grens.

2.3 Introductie van de diepe vooroever

De onderwateroever van de kust vormt het onderwater gelegen deel van het kustfundament. Het ligt voor de hand de zeewaartse grens van het kustfundament te baseren op een natuurlijke grens op de onderwateroever. De technische term voor onderwateroever is *vooroever*. De grens tussen de vooroever en het continentaal plat is nu aangenomen als zeewaartse grens van het kustfundament. Waar die grens precies ligt is niet op voorhand duidelijk.

De kust is de overgangszone van open zee naar land. Deze zone wordt gekenmerkt door een, over het algemeen, in zeewaartse richting toenemende waterdiepte en afnemende intensiteit van sedimentverplaatsing en daarmee afnemende morfodynamiek van de zeebodem.

De onderwateroever van de kust, van de laagwaterlijn tot aan het continentaal plat, kan worden onderverdeeld in de ondiepe vooroever, de brandingszone tot een diepte van 5 a 8 m onder gemiddeld zeeniveau en een gemiddelde helling van 1:50 tot 1:200, en de diepe vooroever (Figuur 2.3). De diepe vooroever is de zone onder circa NAP -8 m met typische bodemhellingen tussen 1:200 en 1:1000. In dit bereik kunnen zandruggen aanwezig zijn. Verder zeewaarts gaat de diepe vooroever over in het continentaal plat waar de helling over het algemeen minder dan 1:1000 is. Zandribbels, zandgolven en zandbanken komen hier voor.



Figuur 2.3 Schematische weergave van een typisch Nederlands kustprofiel (niet op verticale schaal)

Ondiepe vooroever

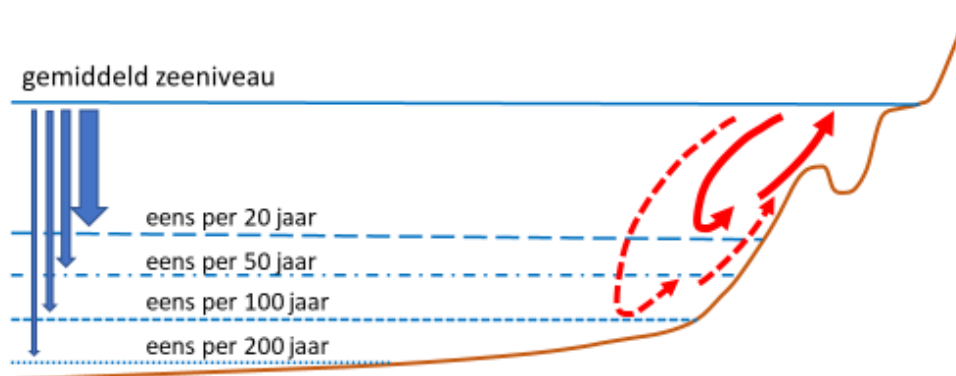
De ondiepe vooroever wordt gedomineerd door golven. De golven veroorzaken een landwaarts zandtransport. Zeewaarts zandtransport kan voorkomen door retourstroming aan de bodem, met name bij hoge golven, en in muien. In deze zone komen brandingsbanken voor. De zeebodem in deze zone reageert snel op veranderingen in de golfwerking: op een termijn van dagen past de morfologie zich aan. De omwerking van de zeebodem is intensief.

Diepe vooroever

De diepe vooroever wordt het grootste deel van de tijd gedomineerd door getijstroming. Deze stroming bouwt megaribbels en transporteert zand evenwijdig aan de kust. Residuele transporten door kleine netto stromingen, bijvoorbeeld als gevolg van dichtheidsverschillen en wind, spelen een bijrol. Tijdens storm, als de golven hoger en langer dan normaal zijn, dringt de golfwerking tot grotere waterdiepte door en kan een rol gaan spelen in het zandtransport. Golven veroorzaken een heen en weer gaande beweging aan de bodem die zand in kustwaartse richting verplaatst. Daarnaast kunnen golven zand opwervelen dat vervolgens door de stroming (tijdens storm een combinatie van getijstroom en wind- en golfgedreven stroming) verplaatst wordt. Zeewaarts zandtransport tijdens stormen is niet direct waargenomen, al zijn aanwijzingen hiervoor op de binnen Kustgenese 2.0 verzamelde multibeambeelden te zien. Over de grootte van deze transporten en hun frequentie van optreden is op dit moment weinig tot niets bekend.

Relatie tijdschaal-diepte

Er is een relatie tussen het energieniveau van stormgolven en hun kans van optreden: hoe zwaarder de storm, hoe kleiner de kans van optreden. Dit betekent dat hogere en langere golven, die dus dieper reiken, minder vaak voorkomen. Omgekeerd geldt dat als een langer tijdsinterval beschouwd wordt, de kans toeneemt dat een zwaardere storm werkelijk optreedt. Dit betekent dat de kans op omwerking van de zeebodem door stormgolven afneemt met toenemende waterdiepte en dat bij beschouwing van een langer tijdsinterval rekening gehouden moet worden met een grotere maximale diepte van golfwerking. Figuur 2.4 illustreert dit principe: de horizontale lijnen geven de maximale diepte weer voor golfwerking die bij een bepaald tijdsinterval hoort. Hoe langer het tijdsinterval, hoe groter de maximale diepte waarop de golfwerking doordringt.



Figuur 2.4 Principeschets van de diepte van omwerking van het kustprofiel door (storm-)golven. De hoogte en lengte van stormgolven is omgekeerd evenredig met hun kans op optreden. Dit betekent dat de kans op omwerking van de zeebodem door stormgolven (eens per 20 jaar, eens per 50 jaar, etc.) afneemt met toenemende diepte. De horizontale lijnen illustreren dit. De rode pijlen geven de bijbehorende zeewaartse zandtransporten door stormgolven en landwaarts transport onder rustiger condities weer. Zand dat naar grotere diepte afgevoerd wordt, doet er langer over om weer terug naar de kust gevoerd te worden.

2.4 Beleidsmatige historie van de huidige zeewaartse grens van het kustfundament

Om te kunnen overwegen of een andere zeewaartse grens van het kustfundament mogelijk is, is het relevant de overwegingen voor de huidige zeewaartse grens op de doorgetrokken NAP-20 m lijn te weten.

De NAP-20 m dieptelijn wordt al genoemd als belangrijke grens in de Beleidsnota Kustverdediging na 1990 (VenW, 1990). Daarin staat dat zand buiten de NAP -20 meter dieptelijn moet worden gewonnen omdat is gebleken dat zandwinning in zee landwaarts van de NAP -20 meter dieptelijn een achteruitgang van de kust kan veroorzaken.

Het begrip *kustfundament* werd in de Nota Ruimte (VROM, 2004) geformaliseerd, na te zijn geïntroduceerd in de voorbereidende Beleidsagenda voor de Kust (VenW, 2002). In dit laatste rapport valt te lezen dat er geen discussie is over de zeewaartse grens: “bij de doorgaande NAP - 20 m lijn begint het gebied dat rechtstreeks aan het zandvolume van het kustfundament bijdraagt”.

Uit de aangehaalde passages uit een twintigtal andere beleidsdocumenten en technische rapporten sinds 1989 (zie Cleveringa (2016), Van der Werf *et al.* (2017) en Löffler (2019) voor overzichten) zijn twee conclusies te trekken die van belang zijn bij het opstellen van dit Technisch Advies:

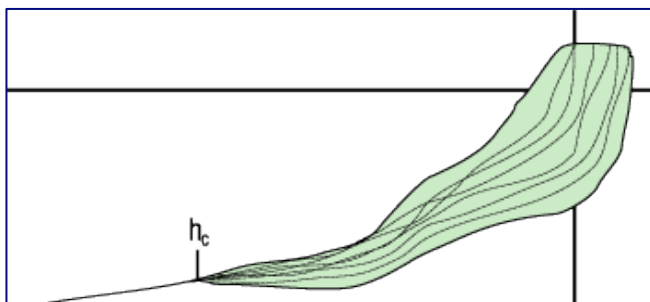
1. De zeewaartse grens van NAP -20 m is sinds 1990 formeel nooit ter discussie gesteld ofwel is altijd (impliciet) als uitgangspunt genomen.
2. De ligging van de zeewaartse grens is grotendeels op expert judgement gebaseerd, onder andere omdat meetgegevens op de diepe vooroever schaars zijn. Als voorbeeld een typische passage: “In het algemeen wordt aangenomen dat processen beneden de 20 meter dieptelijn geen rechtstreekse invloed hebben op de kustontwikkeling”.

3 Criteria voor de keuze van de zeewaartse grens van het kustfundament

3.1 Inleiding: criteria voor het vaststellen van een zeewaartse grens

Het uitgangspunt voor het vaststellen van de zeewaartse grens van het kustfundament is het (theoretische) principe dat voor een kustvak een diepte te bepalen is waar, op een gegeven tijdschaal, de bodemligging zeewaarts van die diepte niet significant verandert en er geen significant zandtransport over deze dieptecontour plaatsvindt. Dit uitgangspunt heet het “depth of closure” concept (Kraus *et al.* 1998; zie Figuur 3.1).

Dit concept houdt in dat er geen netto zanduitwisseling van betekenis is tussen de zeebodem en de kustzone. De aldus te bepalen grenswaarde is dus afhankelijk van een vast te stellen tijdschaal: bij toenemende lengte van de tijdschaal komt de grenswaarde dieper te liggen (zie paragraaf 2.3). Bij de definitie van het kustfundament wordt een tijdschaal van 200 jaar gehanteerd, al heeft die tijdschaal met name betrekking op de landwaartse grens. In technische documenten wordt veelal een tijdschaal van 50 jaar gehanteerd (zie Van der Werf *et al.* 2017). Bij de keuze van een zeewaartse grens dient eerst een tijdschaal vastgesteld te worden.



Figuur 3.1 Illustratie van de ‘depth of closure’ h_c aan de hand van het principe van de morfologische bandbreedte. De bandbreedte geeft de uitersten van de variatie in profielligging aan en neemt af met de diepte.

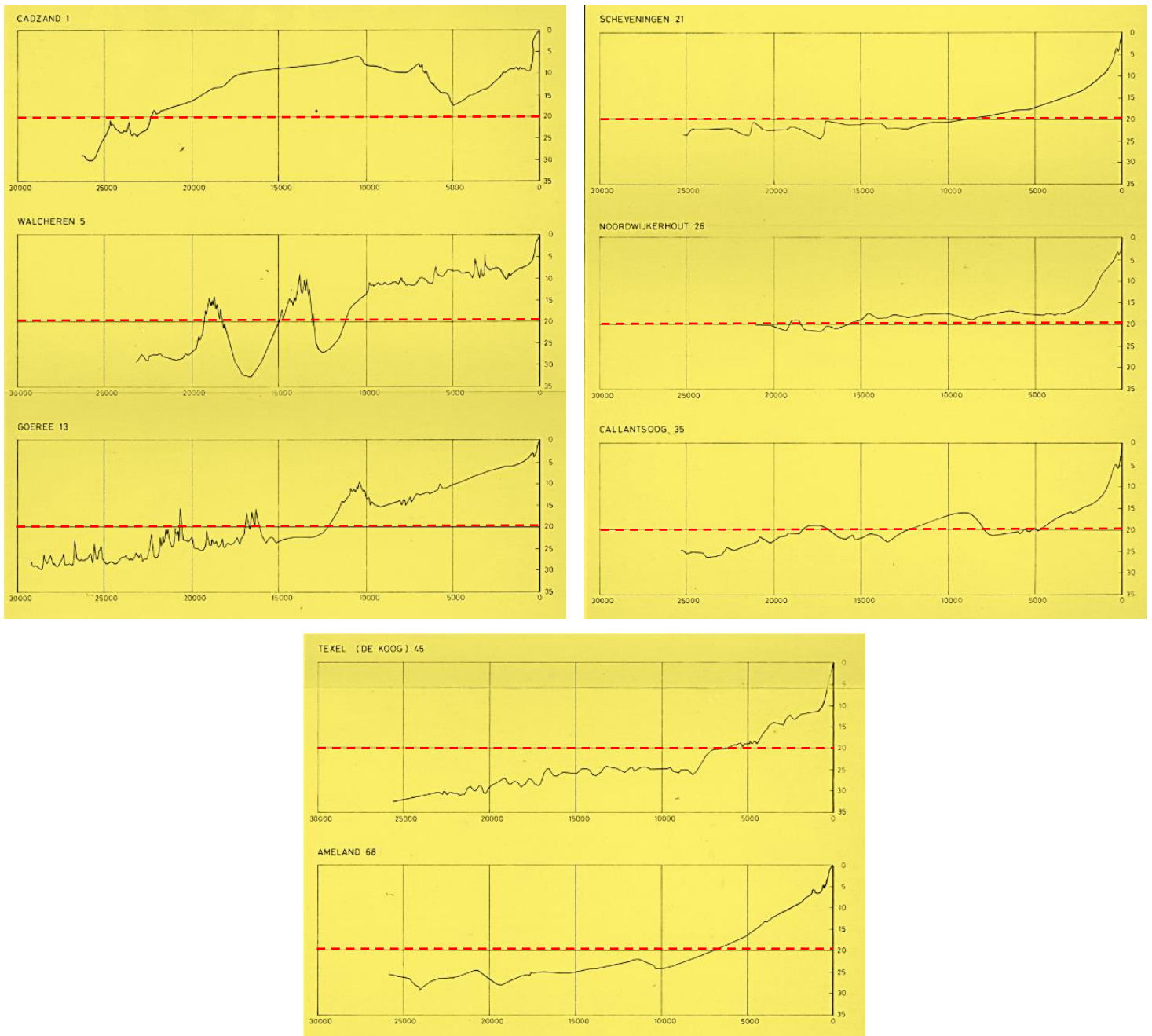
Uitgaand van bovenstaand principe kan de grens tussen vooroever en continentaal plat op drie mogelijke criteria worden gebaseerd:

- (1) de vorm van het kustprofiel,
- (2) de variatie in bodemligging over het kustprofiel, en
- (3) netto zandtransport over een dieptecontour.

Deze criteria worden in de volgende paragrafen toegelicht en uitgewerkt.

3.2 De vorm van het kustprofiel

Zoals beschreven in paragraaf 2.3 neemt de helling van het kustprofiel af naarmate de afstand tot de kustlijn toeneemt. De geomorfologische kaart van de Nederlandse kust (Van Alphen en Damoiseaux, 1987; 1989) legt de zeewaartse grens van de vooroever, waar de kusthelling overgaat in het continentaal plat, bij een helling van 1:1000. Deze ondergrens van het kustprofiel werd verondersteld om het gebied te markeren waarin golfinvloed belangrijk wordt voor sedimenttransportprocessen (Wiersma en Van Alphen, 1988). Van der Werf *et al.* (2017) geven aan dat er geen duidelijke onderbouwing is gevonden of de verandering in kusthelling een indicator is voor golfinvloed. Bovendien worden andere processen voor sedimenttransport (zie conceptueel model in paragraaf 2.3) niet beschouwd.



Figuur 3.2 Kusthelling van de Nederlandse kust. Op de horizontale as staat de afstand uit de kust (in m), op de verticale as de diepte (in m). De 20 m dieptelijn is met rood aangegeven. (Profielen uit Van Alphen en Damoiseaux, 1987.)

Van Alphen en Damoiseaux (1989) schrijven dat voor de meeste kustvakken de kusthelling in de zeewaartse richting afvlakt tot ca. 1:1000 op waterdiepten van ongeveer 20 m. Voor het centrale deel van de kust van Holland ligt de overgang op een waterdiepte van ongeveer NAP -16 m. Analyse van de profielen van de vooroever langs de Nederlandse kust laat zien dat de variatie in profielvorm groot is. Deze variatie is niet alleen veroorzaakt door recente processen op de diepe vooroever, maar is deels ook het gevolg van verschillen in geologische opbouw, een erfenis van ontwikkelingen in het verleden.

Figuur 3.2 toont een selectie uit 77 kustprofielen die ten tijde van het eerste Kustgenese programma zijn opgemeten. In de meeste kustprofielen is de overgang naar een 1:1000 helling niet eenduidig aan te geven. Het is moeilijk om de hellingen van met name het diepere deel van de vooroever en de zeebodem vast te stellen, waardoor het overgangspunt niet bepaald kan worden. Als er wel sprake is van een duidelijke, geleidelijke overgang dan varieert de diepte daarvan tussen NAP -16 m en NAP -25 m.

De conclusie uit bovenstaande analyse is dat er op basis van de profielvorm van de kusthelling géén uniforme of eenduidige grens valt te definiëren. Hierdoor is dit criterium minder geschikt om de zeewaartse grens van het kustfundament op te baseren.

3.3 De variatie in bodemligging over het kustprofiel

Het tweede criterium is gebaseerd op de variatie in bodemligging van de vooroever over een bepaald tijdsinterval. Het diepteverloop van het profiel van de vooroever kan door de tijd veranderen door de aan- en afvoer van zand. Op een tijdschaal van decennia zal het profiel daardoor rond een gemiddeld profiel variëren.

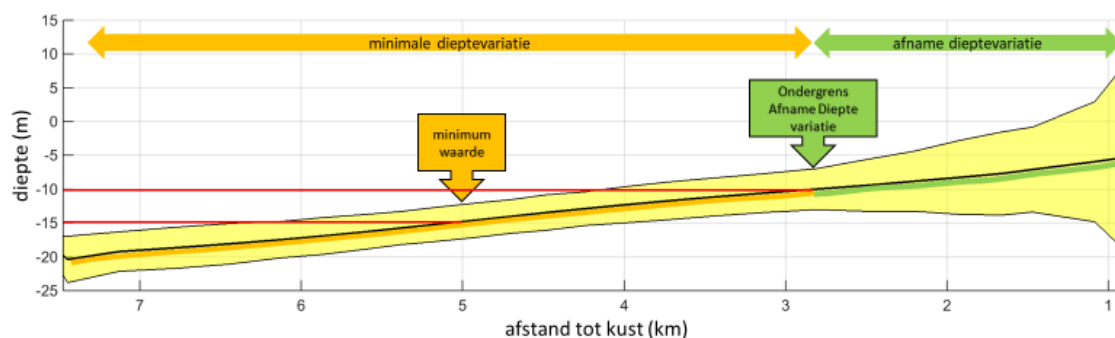
Vermaas en Van der Spek (2016) hebben de kust opgedeeld in vakken en de dieptevariatie rond een gemiddeld vooroeverprofiel per kustvak over de periode 1964-2013 vastgesteld aan de hand van vaklodgingen. Voor iedere gridcel werden de gemiddelde diepte, standaarddeviatie, het verschil tussen de maximale en de minimale diepte en de lineaire trends berekend. Voor de Delta en Wadden beslaat de meetreeks circa 50 jaar, voor Holland circa 30 jaar. De gevonden dieptevariëaties horen dus bij deze tijdschaal.

Variatie bodemligging

Uit de voorgaande paragrafen 2.3 en 3.1 volgt dat de variatie in bodemligging als gevolg van aan- en afvoer van zand zal afnemen met de diepte. Echter, gezien het voorkomen van zich verplaatsende structuren op de zeebodem zoals bijvoorbeeld megaribbels, wordt de variatie in de bodemligging nooit gelijk aan nul. Het afnemen van de grootte van de variatie met de diepte geeft inzicht in de maximale diepte tot waar aan- en afvoer van zand het kustprofiel verandert.

Figuur 3.3 illustreert dit. De verticale variatie om het gemiddelde profiel van een kustvak, de standaarddeviatie, wordt weergegeven door de geelgekleurde band rond het kustprofiel. (NB: De breedte van de band is 10x overdreven in vergelijking met de waterdiepte.) In zeewaartse richting gaand neemt de breedte van de band af; dit is het groene deel van het kustprofiel. Vanaf een bepaalde diepte, de "Ondergrens Afname Dieptevariatie" (OAD), verandert de variatie om het gemiddelde profiel nog slechts marginaal met toenemende waterdiepte. Dit deel van het kustprofiel is in oranje weergegeven. In het oranje traject kan een minimumwaarde voor de dieptevariatie bepaald worden, al is de afname in de bandbreedte tot de minimumwaarde nog slechts gering, in de orde van centimeters.

NB: De geelgekleurde band geeft alleen de standaarddeviatie van de waargenomen dieptes weer, trendmatige ontwikkelingen kunnen er niet uit afgeleid worden.



Figuur 3.3 Voorbeeld van de dieptevariabiliteit rond een kustprofiel: het gemiddeld profiel en de standaarddeviatie (NB 10 keer overtrokken!) over de periode 1964-2013. Het groene traject geeft het deel van het profiel weer waar de dieptevariatie afneemt in zeewaartse richting, de ondergrens wordt aangegeven met de groene pijl. Zeewaarts van deze ondergrens (het oranje traject) neemt de dieptevariatie nauwelijks nog af met toenemende waterdiepte.

Tabel 3.1 geeft voor een aantal kustvakken van de Nederlandse kust de diepte tot waar de verticale variatie afneemt, de OAD, zoals die is vastgesteld aan de hand van dieptegegevens uit vaklodingen. Deze waarde ligt tussen 10 m en 15 m onder gemiddeld zeeniveau. Vanaf die diepte is dieptevariatie slechts gering. De minimumwaarde in de dieptevariatie ligt voor de Hollandse kust tussen -17 m en -19 m. Voor kustvak Texel ligt de waarde op -17 m, voor de andere Waddeneilanden ligt de waarde op -11 m a -15 m. Voor de kustvakken in het Deltagebied kon geen minimumwaarde vastgesteld worden. De gegevens van de Westerscheldemonding leverden voor deze analyse geen bruikbare informatie. NB: De actieve buitendelta's langs de Waddenkust en Oosterschelde zijn niet meegenomen in deze waarden. Buitendelta's zijn actief tot een diepte van -18 m a -20 m.

Tabel 3.1 Dieptes per kustvak, in m NAP, van de Ondergrens Afname Dieptevariatie OAD, de diepte tot waar de dieptevariatie rond het gemiddelde kustprofiel afneemt, en de dieptes waarop de minimale dieptevariatie gevonden wordt voor een aantal kustvakken langs de Nederlandse kust. Voor de kustvakken Haringvliet, Grevelingen en Westerschelde konden niet alle waarden vastgesteld worden.

Kustvak	1. Ondergrens Afname Dieptevariatie (m NAP)	2. Diepte minimumwaarde dieptevariatie (m NAP)
Ameland	-10	-15
Terschelling	-10	-11/-17
Texel	-13	-17
Noord-Holland	-15	-17
Zuid-Holland	-15	-19
Haringvliet	-11	-
Grevelingen	-11	-
Westerschelde	-	-

De OAD neemt langs de kust van zuid naar noord toe van -11 m in het Deltagebied naar -15 m langs de Hollandse kust. Langs de Waddeneilanden neemt de OAD af van -13 m bij Texel naar -10 m bij Ameland. Zeewaarts van de OAD blijft de dieptevariatie vrijwel constant bij toenemende diepte. De bijbehorende tijdschaal is circa 50 jaar voor Delta- en Waddenkust en circa 30 jaar voor Holland.

Uit bovenstaande analyse blijkt dat de voor de kustvakken vastgestelde OAD voldoet aan het criterium “diepte waar, op een gegeven tijdschaal, de bodemligging zeewaarts niet significant verandert”. Het tweede deel van het principe, “geen significant zandtransport over deze dieptecontour”, wordt besproken in paragraaf 3.4.

3.4 Netto zandtransport over een dieptecontour

Het derde criterium gaat uit van een diepte waar het netto kustwaartse zandtransport over een bepaalde periode verwaarloosbaar klein is. Netto zandtransport is niet direct te meten en wordt daarom met een model ingeschat. Deze modellering is in het kader van het Kustgenese 2.0 onderzoek lange termijn kustontwikkeling uitgevoerd (Grasmeijer *et al.*, 2019). De methode en modelresultaten worden hieronder samengevat.

3.4.1 Methode

In het kader van het Kustgenese 2.0 onderzoek is het *Dutch Lower Shoreface Model* (DLSM) ontwikkeld. Dit model berekent op iedere locatie op de diepe vooroever het zandtransport met een 1DV (eendimensionaal, verticaal) model. Invoer voor het 1DV model bestaat uit:

- de lokale condities voor stroming uit het 3D Dutch Continental Shelf Model met de nieuwste “Flexible Mesh” software (3D DCSM-FM) voor een periode van 5 jaar (2013-2017) inclusief effecten van getij, wind, dichtheid, rivierafvoer en temperatuur, en
- de lokale condities voor golven uit een golftransformatietool, dat het gemeten offshore golfklimaat voor dezelfde periode, 2013-2017, op basis van windrichting en bodemligging omrekent naar lokale golfcondities op iedere gewenste locatie langs de kust.

Golven, stromingen en transporten zijn onafhankelijk van elkaar berekend om rekentijd te besparen. Dit betekent dat golf-stroom-interactie niet volledig is meegenomen, onder de aanname dat deze op diep water relatief onbelangrijk is voor het zandtransport.

De resolutie van het stromingsmodel is met ongeveer 900 m relatief beperkt. Door deze resolutie is de uitwisseling met de Waddenzee bij de zeegaten minder nauwkeurig. Deze relatief lage resolutie is waarschijnlijk een belangrijke oorzaak voor de onderschatting van de netto landwaartse stroming rondom de buitendelta van het Amelandse Zeegat tijdens stormcondities (zie Grasmeijer *et al.*, 2019). Onder kalmere wind- en golfcondities is de overeenkomst met de metingen wel goed. Dit betekent dat de berekende zandtransporten hier een onderschatting geven van de landwaartse component. Hiermee wordt bij de vertaling van de modelresultaten naar het advies over het netto zandtransport over de zeewaartse grens rekening gehouden (zie het Technisch Advies Sedimentbehoefte, Deltares (2020a)).

Consistent met Van Rijn (1997) zijn de basissimulaties uitgevoerd met een mediane korrelgrootte D_{50} van 250 μm . Daarnaast zijn gevoeligheidssimulaties gedaan met $D_{50} = 275 \mu\text{m}$. Het effect van dichtheidsverschillen is onderzocht door deze in het 3D stromingsmodel aan en uit te schakelen en de resultaten te vergelijken. De effecten van een zeewaartse, golfgedreven retourstroom zijn onderzocht door deze in het 1DV transportmodel aan en uit te schakelen en de resultaten te vergelijken. De effecten van een extreme storm zijn onderzocht door de golven (i.e. hoogte en periode) van de zware ZW-/NW-storm van 5 en 6 december 2013 (Sinterklaasstorm) te vergroten tot die van een 1/100 jaar storm. Hierbij is uit praktische overwegingen geen nieuwe 3D DCSM-FM stromingsberekening gedaan. Dit betekent dat naast het effect van golven ook het effect van de wind op de stroming niet is meegenomen. De mogelijke zeewaartse stroming en zandtransportcomponent ontbreken hierdoor, waardoor waarschijnlijk de berekende netto zandtransporten onder de Sinterklaasstorm te veel landwaarts zijn. Ook hiermee wordt bij de beoordeling van de modelresultaten rekening gehouden.

De berekende transporten kunnen worden ontbonden in een kustdwarse en kustlangse richting. Het kustdwarse transport is gevoelig voor de definitie van de kusthoek. Er zijn berekeningen gemaakt

uitgaande van de hoek van de JARKUS-raaien en van het M2-getij. Beide variëren sterk in kustlangse richting, vooral bij de Zeeuwse eilanden en de Waddeneilanden. De richting van het M2-getij varieert bij de zeegaten ook in kustdwarse richting. Om deze gevoeligheid te elimineren is ervoor gekozen de jaarlijkse transporten te bepalen loodrecht op drie doorgaande contourlijnen, namelijk de doorgaande NAP-20 m, NAP-18 m en NAP-16 m contour. Deze contourlijnen zijn tevens in 19 kustlangse vakken verdeeld, zodat de variatie van het kustdwarse transport in kustlangse richting inzichtelijk kan worden gemaakt.

3.4.2 Resultaten zandtransporten

De Figuur 3.4 tot en met 3.6 laten de netto kustdwarse zandtransporten over de doorgaande NAP -20 m, NAP -18 m en NAP -16 m contouren zien. Het betreft de resultaten van een modelsimulatie zonder retourstroming, met een uniforme korrelgrootte van 250 µm en met effecten van dichtheidsverschillen. Dit is de referentiesom. De kustlangs geïntegreerde zandtransporten van alle modelsommen worden getoond in Tabel 3.2

De Figuur 3.4 - 3.6 en Tabel 3.2 laten zien dat de berekende zandtransporten op de diepe vooroever landwaarts gericht zijn. Dit is in overeenstemming met de resultaten van Van Rijn (1997). Wanneer het door Van Rijn berekende jaarlijks kustdwarse transport op een diepte van NAP -20 m voor de vier gebruikte locaties langs de Noord- en Zuid-Hollandse kust wordt gemiddeld, dan komt het landwaarts transport op ongeveer 8 m³/m/jaar. Bij het toepassen op de totale lengte van de NAP -20 m contour van ongeveer 350 km komt het totaal jaarlijks transport op ca. +2,8 miljoen m³/jaar. Dit is van dezelfde grootteorde als de hier bepaalde transporten.

Tabel 3.2 Netto landwaartse zandtransporten voor verschillende modelinstellingen. Positieve getallen geven landwaarts transport weer. Getoond worden gemiddeldes over 5 jaar, inclusief de standaard deviatie. De oranje rij geeft het gemiddelde van de eerste drie modelberekeningen.

Modelberekening	Netto landwaarts zandtransport (miljoen m ³ /jaar)		
	NAP-20 m	NAP-18 m	NAP-16 m
1. Referentie (D ₅₀ = 250 µm, zonder retourstroming)	+3,6 ± 0,9	+5,0 ± 1,4	+7,1 ± 2,0
2. Met retourstroming	+3,0 ± 0,8	+4,3 ± 1,2	+6,4 ± 1,9
3. Met D ₅₀ = 275 µm	+3,5 ± 1,0	+4,9 ± 1,4	+7,1 ± 2,1
Gemiddelde (1., 2., en 3.)*	+3,4 ± 0,9	+4,7 ± 1,3	+6,9 ± 2,0
4. Zonder dichtheidseffecten	+1,3 ± 0,9	+3,1 ± 1,3	+6,2 ± 2,1
5. Met Sinterklaas-storm tot 1/100 verhoogd**	+5,5 ± 1,7	+7,6 ± 2,2	+11,4 ± 3,0

* De berekeningen zonder dichtheidseffecten (4.) en met de verhoogde Sinterklaasstorm (5.) zijn niet meegenomen bij het bepalen van het gemiddelde, omdat deze als niet-representatief worden beschouwd. Zij geven wel een aanvullende maat voor de gevoeligheid van het zandtransport voor de genoemde processen en (model)instellingen.

** Deze waarden zijn een gemiddelde over 5 jaar, waarbij alleen in het eerste jaar (2013) de 1/100 storm voorkomt.

De landwaartse transporten worden onder andere veroorzaakt door dichtheidsverschillen die een landwaartse stroming bij de bodem aandrijven. Wanneer de dichtheidseffecten niet worden meegenomen in de berekeningen, is het totale landwaartse zandtransport 0,9-2,3 miljoen m³/jaar lager (vergelijk berekening nr. 4 met nr. 1; Tabel 3.2). Het dichtheidseffect is in verhouding sterker op NAP -20 m dan op NAP -16 m.

Golven zorgen voor landwaarts transport door twee effecten. Ten eerste door de *skewness* of scheefheid van de golfvorm met hogere landwaartse dan zeewaartse orbitaalsnelheden. Ten tweede door een kleine landwaartse stroming bij de bodem (*Longuet-Higgins-streaming*). Dit golfeffect is in verhouding sterker op NAP -16 m dan op NAP -20 m.

Het breken van golven kan zorgen voor een zeewaarts transport door retourstroming. Wanneer deze wordt meegenomen in de berekeningen wordt het totale landwaartse transport 0,6-0,7 miljoen m³/jaar lager (vergelijk berekening nr. 2 met nr. 1; Tabel 3.2).

Het effect van stormen kan gedeeltelijk worden afgeleid uit de standaarddeviatie van de transporten over de vijf berekende jaren. Op de NAP -20 m contour is deze standaarddeviatie 0,9 miljoen m³/jaar. Voor de referentiesimulatie betekent dit dat het totale kustdwarse transport over die contourlijn het ene jaar 3,6 miljoen m³/jaar kan zijn, het volgende jaar 2,7 miljoen m³/jaar en het jaar daarop 4,5 miljoen m³/jaar. Dit ligt onder andere aan de stormachtigheid van het betreffende jaar. Op de NAP -16 m contour is de standaarddeviatie 2 miljoen m³/jaar en dus groter dan op de NAP -20 m contour, omdat golven op ondieper water een groter effect hebben.

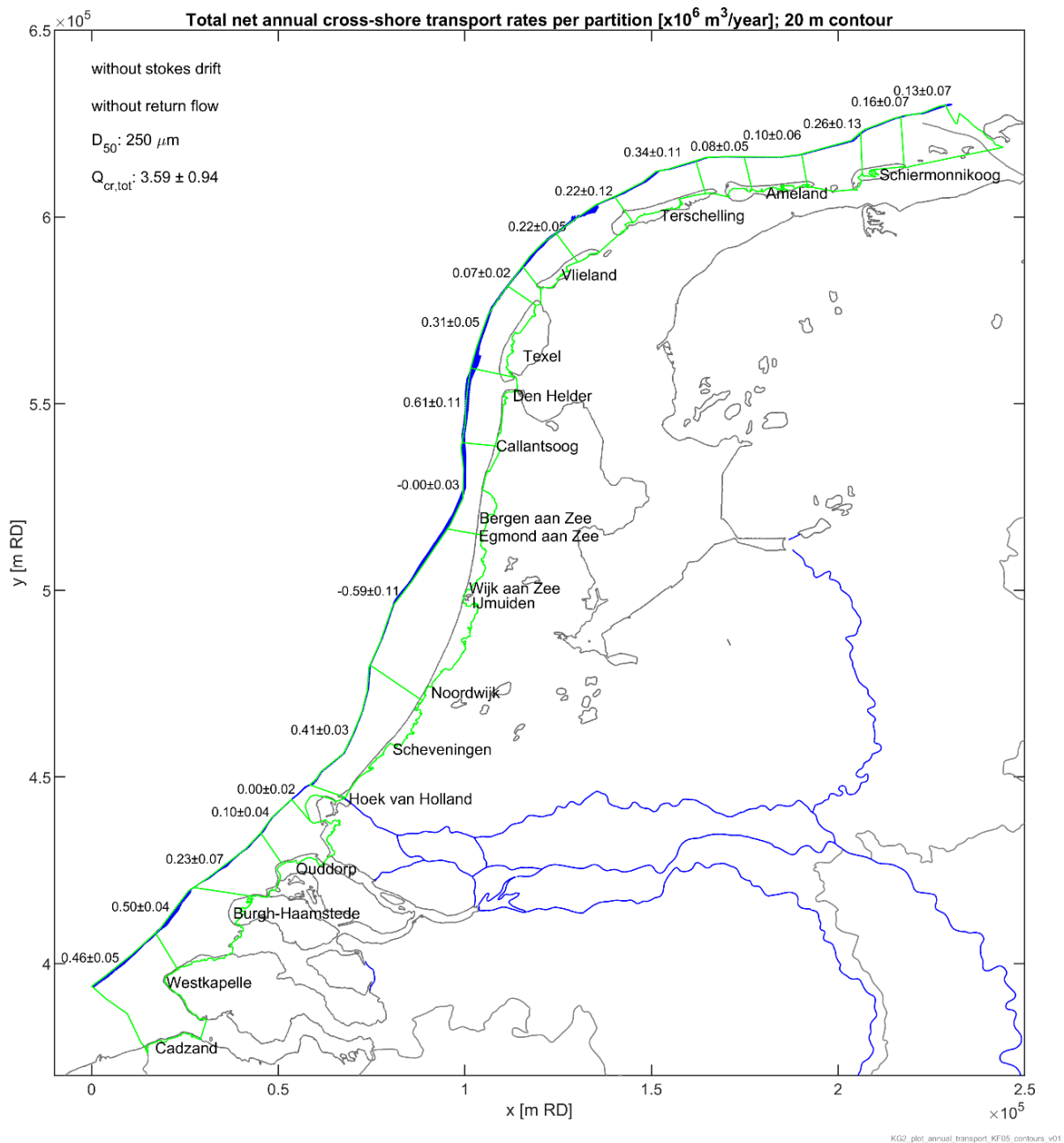
Het effect van stormen is ook zichtbaar in de resultaten van de simulatie met de Sinterklaasstorm van 5-6 december 2013 die kunstmatig is verzaamd tot een 1/100 jaar storm. Hierdoor worden de berekende gemiddelde jaarlijkse transporten 2-4 miljoen m³/jaar groter (vergelijk berekening nr. 5 met nr. 1; Tabel 3.2). Dit is dus het gemiddelde over een periode van 5 jaar (2013-2017), waarbij alleen in het eerste jaar (2013) de 1/100 jaar storm is gesimuleerd. Er is dus gemiddeld over 5 jaar, terwijl de kans van voorkomen van de verzaarde storm eens per 100 jaar is. Het effect van deze storm is daardoor in deze getallen te groot. Aan de andere kant is het effect van de golven en de wind op de stroming niet meegenomen. Mogelijkerwijs zorgt deze storm voor een zeewaartse stroming en dito zandtransport. Het precieze effect van een (zeer) zware storm is dus niet helemaal helder, maar het is wel duidelijk dat stormen een sterk effect hebben op de netto zandtransporten op diep water.

De zandtransporten zijn iets lager (< 5%) voor een 10% grovere korrel (vergelijk berekening nr. 3 met nr. 1; Tab. 3.2). Dit effect is klein in vergelijking met de andere variaties op de modelinstellingen.

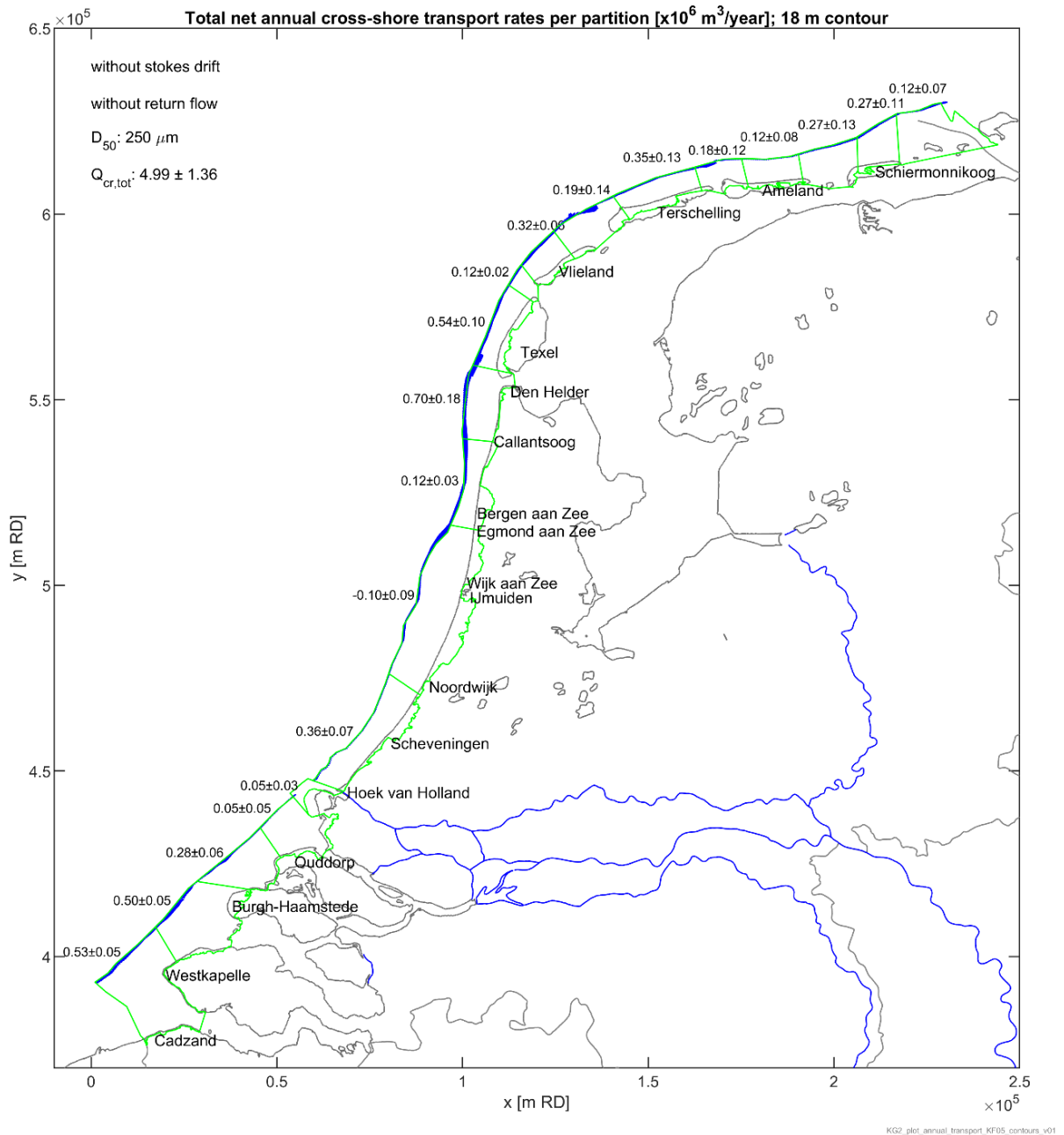
De gemiddelde landwaartse transporten op basis van de modelberekeningen bedragen 3, 5 en 7 miljoen m³ per jaar voor de NAP -20 m, NAP -18 m en NAP -16 m dieptelijn, respectievelijk. Bij het bepalen van dit gemiddelde zijn de berekeningen zonder dichtheidseffecten en met de verzaarde Sinterklaasstorm niet meegenomen omdat deze als niet-representatief worden beschouwd.

3.4.3 **Discussie zandtransport als criterium voor keuze zeewaartse grens**

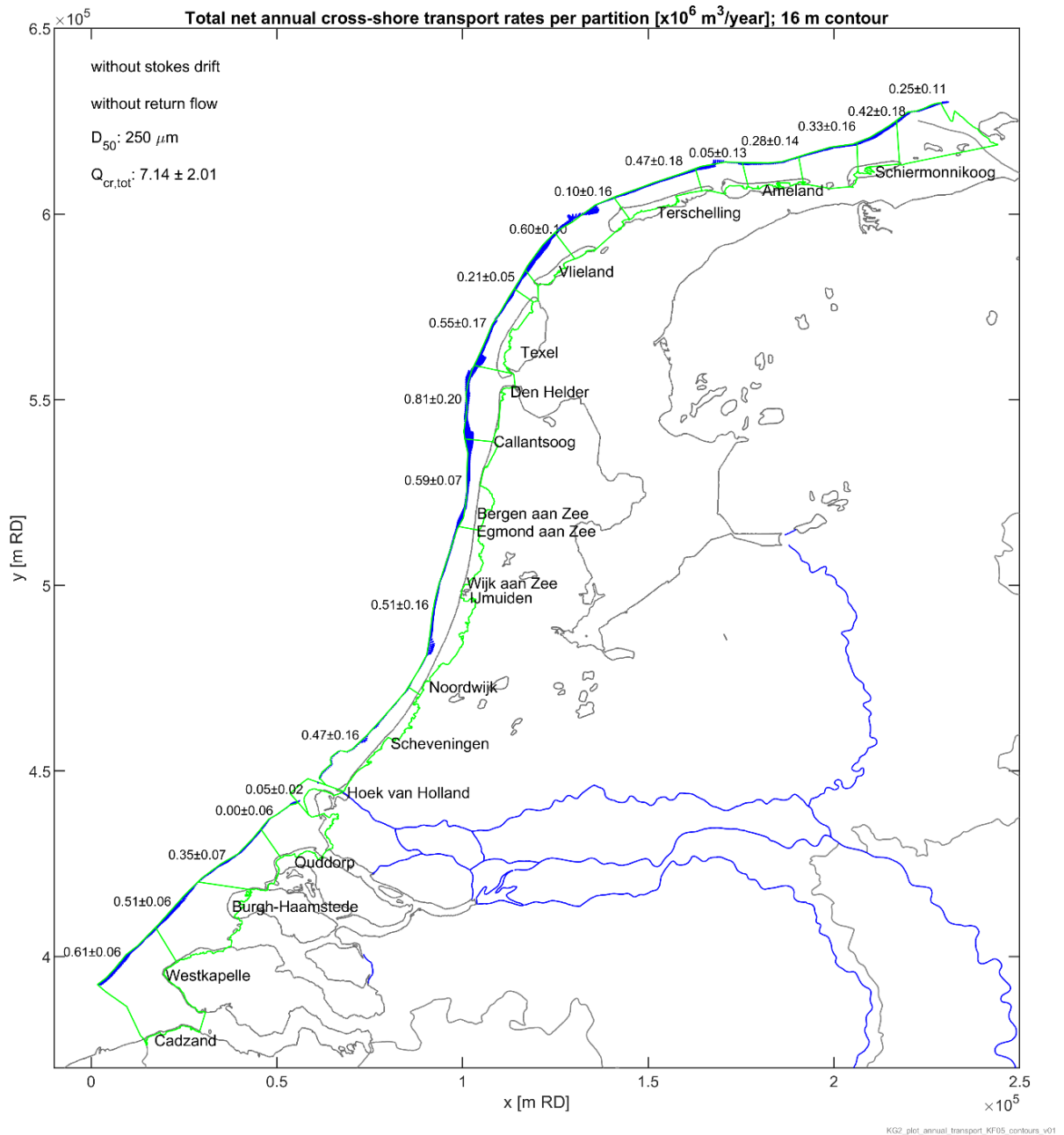
De berekende kustwaarts gerichte netto zandtransporten op de diepere vooroever zijn niet verwaarloosbaar klein. Het totale berekende zandtransport over een aantal dieptecontouren langs de Nederlandse kust is in de orde van miljoenen kubieke meters per jaar in landwaartse richting. Hierdoor is er geen grens met de Noordzeebodem aan te wijzen waarover de uitwisseling verwaarloosbaar klein is. Dit maakt netto zandtransport op basis van de gebruikte modellen minder geschikt als criterium voor de definitie van de zeewaartse grens van de vooroever.



Figuur 3.4 Netto kustdwars zandtransport over de NAP-20 m contour. Positieve getallen: landwaarts transport; negatieve getallen: zeewaarts transport. De transporten worden getoond per deelgebied; het betreft zowel het gemiddelde over de periode 2013-2017 als de standaardafwijking. Het totale kustlangs geïntegreerde zandtransport is linksboven te vinden. Het betreft de resultaten van een modelsimulatie zonder retourstroming en een uniforme korrelgrootte van 0,25 mm (referentieberekening).



Figuur 3.5 Netto kustdwars zandtransport over de NAP-18 m contour. Positieve getallen: landwaarts transport; negatieve getallen: zeewaarts transport. De transporten worden getoond per deelgebied; het betreft zowel het gemiddelde over de periode 2013-2017 als de standaardafwijking. Het totale kustlangs geïntegreerde zandtransport is linksboven te vinden. Het betreft de resultaten van een modelsimulatie zonder retourstroming en een uniforme korrelgrootte van 0,25 mm (referentieberekening).



Figuur 3.6 Netto kustdwars zandtransport over de NAP-16 m contour. Positieve getallen: landwaarts transport; negatieve getallen: zeewaarts transport. De transporten worden getoond per deelgebied; het betreft zowel het gemiddelde over de periode 2013-2017 als de standaardafwijking. Het totale kustlangs geïntegreerde zandtransport is linksboven te vinden. Het betreft de resultaten van een modelsimulatie zonder retourstroming en een uniforme korrelgrootte van 0,25 mm (referentieberekening).

3.5 Conclusie: selectie van criterium

Uit bovenstaande discussie blijkt dat – op basis van de thans beschikbare kennis – alleen de langjarige variatie in bodemligging over het kustprofiel een geschikt criterium is voor het bepalen van de zeewaartse grens. De andere criteria zijn hooguit als aanvullende argumenten mee te nemen.

4 Alternatieven voor de zeevaartse grens van het kustfundament

4.1 Inleiding

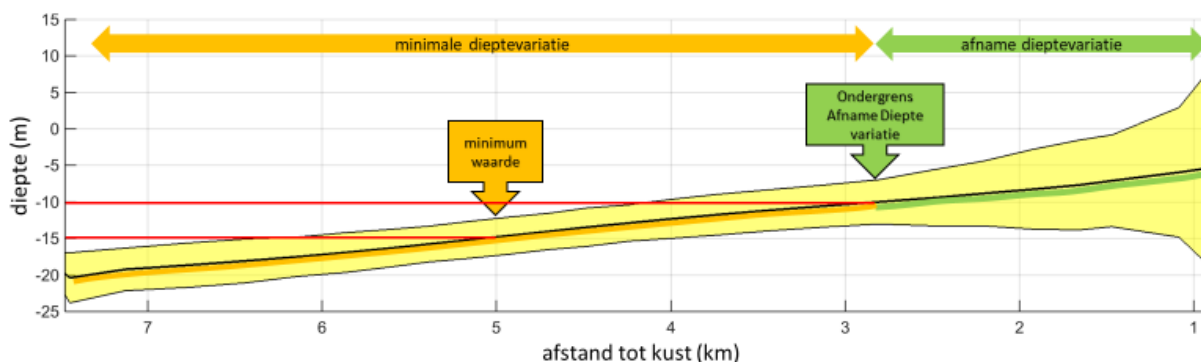
Op basis van de voorgaande analyse blijkt alleen de langjarige variatie in bodemligging van het kustprofiel een geschikt criterium voor het bepalen van een zeevaartse grens voor het kustfundament. Op basis van de gevonden dieptevariatie kunnen grenswaarden voor de zeevaartse grens gekozen worden. Grenswaarden voor een korte periode liggen ondieper dan waarden voor een langere periode.

Aan de hand van de geanalyseerde dieptegegevens zijn per kustvak twee waarden vastgesteld (Figuur 4.1 en Figuur 3.1):

1. De OAD, de waterdiepte waarvan zeewaarts de variatie in bodemligging nauwelijks meer afneemt, en
2. De diepte waarop de variatie in bodemligging minimaal is, de Minimum Waarde (MW).

Beide dieptewaarden zijn gebruikt als uitgangspunt voor de keuze van waarden voor een zeevaartse grens van het kustfundament. De OAD wordt beschouwd als een realistische waarde die de ondergrens van de dieptevariatie van de vooroever op een tijdschaal van maximaal 50 jaar weergeeft.

Bij een langere tijdschaal hoort een grotere waterdiepte voor de ondergrens van de dieptevariatie (zie Figuur 2.4). Hoeveel dieper is niet goed te onderbouwen, omdat de meetgegevens niet verder reiken dan 50 jaar. Voorgesteld wordt om de waterdiepte van met minimale variatie van het profiel MW uit Tabel 3.1 als richtgetal te gebruiken voor een grenswaarde met een grotere onzekerheidsmarge, die aan een langere tijdschaal jaar gekoppeld is.



Figuur 4.1 Dieptevariatie van de zeebodem rond een gemiddeld profiel gebaseerd op vaklodings-data die over een periode van maximaal 50 jaar verzameld zijn. De dieptevariatie is weergegeven als een geel gekleurde band rond het gemiddeld profiel (NB de verticale schaal van de band is 10x overdreven!). In de eerste 3 km vanaf de kustlijn (profiel groengekleurd) neemt de dieptevariatie sterk af. Vanaf de Ondergrens Afname Dieptevariatie (OAD, in dit profiel op -10 m) neemt de dieptevariatie slechts marginaal verder af met toenemende diepte (profiel oranjegekleurd) tot een minimumwaarde bereikt wordt. Op basis van de gevonden dieptevariatie kunnen grenswaarden voor de zeevaartse grens gekozen worden. Grenswaarden voor een korte periode liggen ondieper dan waarden voor een langere periode. (NB Deze figuur is identiek aan Figuur 3.3.)

4.2 Keuze van een zeewaartse grens voor het kustfundament

Bij de keuze van een zeewaartse grens op basis van de variatie in het kustprofiel moet allereerst vastgesteld worden waarmee rekening gehouden moet worden. De variatie op een tijdschaal van decennia is direct te bepalen op basis van de data. De effecten van een zeer zware storm met een (zeer) kleine kans van voorkomen, zijn groot (zie berekening nr. 5 in Tabel 3.1). Deze effecten zitten niet in de gebruikte meetreeks¹. Om rekening te houden met de gevolgen van een dergelijke zeldzame maar ingrijpende gebeurtenis, moet een grotere dieptewaarde gekozen worden. Deze waarde representeert dan een langere tijdschaal. De op data gebaseerde tijdschaal is representatief voor 50 jaar, de vastgestelde OAD is een goede indicator voor de bijbehorende diepte. De tijdschaal welke hoort bij een zeldzame zeer zware storm wordt gesteld op 200 jaar. De vastgestelde diepte van de Minimum Waarde (MW) is gekozen als de bijbehorende grenswaarde.

NB De hier gebruikte termijnen van 50 en 200 jaar zijn een indicatie van de zwaarte van de stormgolven waarmee rekening gehouden wordt. Ze zeggen niets over de termijn waarover de gekozen dieptewaarden in de toekomst houdbaar zijn.

De zeewaartse grens kan kustlangs uniform worden gedefinieerd of regionaal variërend. Beide opties worden hieronder uitgewerkt.

4.2.1 Een kustlangs uniforme grens

Tijdschaal 50 jaar

De diepte van de vastgestelde OAD past bij de tijdschaal van 50 jaar. De diepte van deze ondergrens varieert van -10 m bij Ameland en Terschelling tot -15 m voor de Hollandse kust (kolom 1 in Tabel 3.1). Een diepte van -15 m kan worden beschouwd als representatieve waarde, waarin ook de actieve buitendelta's opgenomen zijn (Tabel 4.1). De buitendelta's in het Waddengebied zijn weliswaar actief tot op een diepte van -18 a -20 m, maar een gemiddelde waarde van -15 m is voor de tussenliggende Waddeneilanden erg ruim. De overmaat bij de eilanden wordt geacht de te krappe grens bij de buitendelta's te compenseren.

Tijdschaal 200 jaar

Bij de keuze voor een langere tijdschaal, 200 jaar in dit geval, hoort een grotere dieptewaarde. De diepte van de MW is daarvoor een goede optie. Het gemiddelde van deze waarden voor de Hollandse kust is -18 m, welke diepte als representatief beschouwd mag worden (Tabel 4.1).

4.2.2 Regionale grenswaarden

Gezien de variatie tussen de verschillende kustvakken in de gevonden OAD-dieptewaarden, kan ook voor een regionaal variërende zeewaartse grens gekozen worden. Deze kustvakken zijn, van zuid naar noord, Delta, Holland, Texel, overige Waddeneilanden en buitendelta's Waddengebied. Het valt op dat de vastgestelde OAD bij de Waddeneilanden ondieper ligt dan langs de Hollandse kust (Tabel 3.1). De ondergrens van actieve buitendelta's ligt op -18 m tot -20 m. Voor het Deltagebied konden geen bruikbare getallen vastgesteld worden. De voor dit gebied gebruikte waarden zijn gelijk aan die voor de Hollandse kust, aangezien het verloop van het diepste deel van de vooroever in het Deltagebied het meest op die van de Hollandse kust lijkt.

Tijdschaal 50 jaar

Voor deze tijdschaal worden weer de OAD-dieptewaarden gebruikt. Voor Holland en het Deltagebied ligt deze waarde op -15 m, voor Texel op -13 m, voor de overige Waddeneilanden wordt hij op -10 m gelegd. De grens voor de buitendelta's ligt op -18 m (zie verder Tabel 4.1).

¹ Dit is overigens niet expliciet nagegaan.

Tijdschaal 200 jaar

Voor deze tijdschaal worden weer de dieptewaarden voor de minimale waarde MW van de dieptevariatie-band gebruikt. De gemiddelde waarde voor Holland ligt op -18 m, voor het Deltagebied wordt dezelfde waarde aangehouden. Het minimum ligt bij Texel op -17 m en bij de overige Waddeneilanden op -15 m. De grens voor de buitendelta's ligt op -20 m (zie verder Tabel 4.1).

Tabel 4.1 Dieptewaarden (in m NAP) voor de zeewaartse grens van het kustfundament, rekening houdend met op verschillende tijdschalen (50 jaar op basis van de OAD, 200 jaar op basis van de MW) te verwachten hoogenergetische events. Voor beide tijdschalen worden kustlangs uniforme waarden en regionaal variërende waarden gegeven. Zie de tekst voor verdere toelichting.

		Variant: 50 jaar	Variant: 200 jaar
Uniform		-15	-18
Regionaal	Delta	-15	-18
	Holland	-15	-18
	Texel	-13	-17
	Overige waddeneilanden	-10	-15
	Buitendelta's Waddengebied	-18	-20

4.2.3 Zeespiegelstijging

Alle gegeven dieptewaarden zijn ten opzichte van NAP, maar kunnen direct vertaald worden naar dieptes ten opzichte van gemiddeld zeeniveau. De gegeven grensdieptes kunnen in principe meegroeien met een stijgende zeespiegel.

Tot 2035 speelt (versnelde) zeespiegelstijging geen rol van betekenis. Uitgaande van de huidige zeespiegelstijging van 1,86 mm/jaar betreft het 2,8 cm stijging tot 2035, wat verwaarloosbaar is gezien de andere onzekerheden en qua morfodynamiek op de diepe vooroever niet meetbaar of onderscheidbaar zal zijn.

Op lange tijdschaal tot 2100 en verder speelt versnelde zeespiegelstijging wel een rol. Het concept van een meegroeïend kustfundament gaat ervan uit dat zo veel zand aan het kustfundament toegevoegd wordt dat het zandvolume gelijk blijft. Echter, op de positie van de zeewaartse grens zal de zeebodem waarschijnlijk niet in gelijke mate meegroeien met de stijging van het gemiddelde zeeniveau. Afhankelijk van de suppletie strategie en aannemende dat de basiskustlijn onderhouden en dus op dezelfde positie blijft, zal het kustprofiel op termijn waarschijnlijk steiler worden. Of dit onwenselijk is dan wel wat de risico's zijn, is op dit moment niet bekend. Gezien deze onzekerheden op langere termijn, zal het concept van een meegroeïend kustfundament in samenhang met het handhaven van de kustlijn door aanvulling van de basiskustlijn met zand opnieuw bezien moeten worden.

4.3 Aandachtspunten bij de keuze van een zeewaartse grens voor het kustfundament

Bij een keuze voor een ondiepere zeewaartse begrenzing van het kustfundament voor de centrale Hollandse kust dan de huidige, gebaseerd op de dynamiek van het kustprofiel, moet er rekening mee gehouden worden dat in dit kustvak zandbanken voorkomen die doorlopen tot aan de vooroever, de zogenaamde 'shoreface-connected ridges'. Het is op dit moment niet duidelijk of, en zo ja, hoe, deze zandbanken het gedrag van de vooroever in dit kustvak beïnvloeden.

Multibeam sonarbeelden van de diepe vooroever, verzameld tijdens het Kustgenese 2.0 project, laten tussen ca. NAP -10 m en NAP -18 m bodemvormen zien die duiden op zeewaarts transport, met name tijdens perioden met hoge golven (stormen). Dit suggereert dat er op de diepe vooroever naast landwaarts zandtransport, lokaal ook zeewaarts zandtransport kan optreden. Hoe groot deze transporten zijn en onder welke condities ze optreden is op dit moment onbekend. Afgewogen moet worden of het nodig is bij de keuze van de zeewaartse grens rekening te houden met (incidentele) zeewaartse zandverliezen.

5 Technisch advies betreffende de zeewaartse grens van het kustfundament

Dit hoofdstuk bevat het technisch advies van Deltares over de zeewaartse grens van het kustfundament op basis van de in de vorige hoofdstukken gepresenteerde resultaten.

Advies 1: De variatie in bodemligging over het kustprofiel is de (enige) geschikte indicator voor het bepalen van de zeewaartse grens van het kustfundament

Mogelijke morfologische indicatoren voor de zeewaartse grens van het kustfundament zijn 1) de vorm van het kustprofiel, 2) de variatie in bodemligging over het kustprofiel, en 3) zandtransport op de diepe vooroever. Niet-morfologische aspecten zoals de grens voor zeezandwinning en de Natura2000 begrenzing (beide nu de doorgetrokken NAP -20 m lijn) blijven buiten beschouwing in dit advies.

In kustprofielen is de overgang van de diepe vooroever naar de vlakke zeebodem vaak niet eenduidig aan te geven. De vorm van het kustprofiel is daarom niet geschikt als indicator voor de zeewaartse grens van het kustfundament. De berekende netto landwaartse zandtransporten op de diepe vooroever zijn niet verwaarloosbaar en bovendien nog niet voldoende zeker. Dit maakt het netto zandtransport niet geschikt als indicator voor de zeewaartse grens van het kustfundament.

De bodemligging van de diepe vooroever is variabel, zoals blijkt uit beschikbare metingen op een tijdschaal van maximaal 50 jaar. Uit de gemeten kustprofielen is af te leiden dat deze variabiliteit in zeewaartse richting afneemt tot een diepte tussen NAP -10 m en -15 m, waarna de variabiliteit min of meer constant blijft bij verder toenemende waterdiepte. Bij zeegaten ligt deze grens op circa NAP -18 m en bij de centrale delen van de Waddeneilanden ligt deze overgang rond NAP -10 m. De diepte waarop de variabiliteit in bodemligging stabiliseert (de "Ondergrens Afname Dieptevariatie" of OAD) kan gebruikt worden als zeewaartse grens van het kustfundament op een tijdschaal van 50 jaar.

Voor een tijdschaal van 200 jaar moet een grens op dieper water aangehouden worden. Hiervoor wordt de waterdiepte waarop de minimale bodemvariatie in de metingen voorkomt, als maat genomen.

Advies 2: Een netto landwaarts zandtransport op de diepe vooroever is aannemelijk

De berekende netto zandtransporten op de diepe vooroever zijn landwaarts gericht. Dit stemt overeen met eerdere bevindingen. Dit komt met name door golfeffecten en door dichtheidsverschillen die een netto landwaartse stroming veroorzaken. De berekende netto zandtransporten variëren sterk van jaar tot jaar als gevolg van verschillen in de optredende wind- en golfcondities. Met name zware stormen hebben een grote invloed. De berekende zandtransporten zijn onzeker door modelbeperkingen zoals het ontbreken van een aantal potentieel zeewaarts gerichte deelprocessen en door het niet meenemen van (waarschijnlijk zeer relevante) stormstatistiek. Dit maakt de *grootte* van de zandtransporten onzeker. De landwaartse *richting* van het zandtransport, daarentegen, is vrij zeker. Bovendien worden landwaartse zandtransporten groter bij afnemende waterdiepte. Dit ondersteunt een verschuiving van de zeewaartse grens naar een meer landwaartse positie. Gezien de onzekerheid in de grootte van het transport kan deze (nog) niet meegenomen worden in de rekenregel.

Advies 3: Het is mogelijk om – uniform langs de Nederlandse kust – de zeewaartse grens landwaarts te verplaatsen voor een tijdschaal van zowel 50 jaar als 200 jaar.

De huidige zeewaartse grens van het kustfundament op de doorgetrokken NAP -20 m lijn wordt als ruim beoordeeld. Uitgaand van een tijdschaal van 200 jaar wordt een landwaartse verplaatsing naar NAP -18 m als haalbaar gezien. Bij een tijdschaal van 50 jaar is een landwaartse verplaatsing mogelijk naar NAP -15 m (zie Tabel 5.1).

Advies 4: Bij een keuze voor een regionaal gedifferentieerde zeewaartse grens kan de diepe vooroever worden ingedeeld in 5 regio's: Delta, Holland, Texel, overige Waddeneilanden en buitendelta's Waddengebied.

De variatie in de bodemligging van de diepe vooroever vertoont regionale verschillen. De ontwikkeling van de buitendelta's in het Deltagebied varieert sterk, bovendien is hier geen sprake van een duidelijke vooroever. Daarom worden hier de waarden voor Holland aangehouden. De vooroever van de Waddeneilanden met uitzondering van Texel, heeft een flauwe helling. Voor deze gebieden kan daarom een ondiepere waarde als ondergrens gekozen worden. Texel valt qua ondergrens tussen Holland en de overige Waddeneilanden in. De buitendelta's in het Waddengebied zijn actief tot diepten van -18 tot -20 m (zie Tabel 5.1).

Advies 5: Ga tot 2035 uit van de 50 jaar variant, eventueel met een onzekerheidsmarge

Geadviseerd wordt om tot 2035 uit te gaan van de 50 jaar tijdschaal. Hiervoor zijn drie redenen:

- De 50 jaar variant is morfologisch goed onderbouwd op basis van metingen en kennis.
- Een 50 jaar tijdschaal past goed bij een 15 jaar periode van kustbeheer tot 2035, waarin op klimaatverandering gebaseerde scenario's voor versnelde zeespiegelstijging nog geen rol spelen.
- De 200 jaar tijdschaal is morfologisch zwak onderbouwd. Bovendien moet op een tijdschaal van 200 jaar wel rekening gehouden worden met scenario's voor versnelde zeespiegelstijging die een aanzienlijke mate van onzekerheid bevatten.

Het is niet mogelijk absoluut zeker te zijn van de uit metingen afgeleide 50 jaar variant. Ten eerste omdat voor de Hollandse kust maar 30 jaar metingen beschikbaar zijn. Ten tweede omdat niet duidelijk is of de meetreeks representatief is voor een stormklimaat dat voor een periode van 50 jaar verwacht mag worden. Om dit te ondervangen kan bij de keuze van een zeewaartse grens een onzekerheidsmarge aangehouden worden. De 200 jaar variant wordt door Deltares als een ruime marge gezien. Als gekozen wordt voor een onzekerheidsmarge, wordt daarom een variant geadviseerd tussen de 50 jaar en 200 jaar varianten ligt. Deze tussenvariant is niet op morfologische gronden gebaseerd, maar hanteert een gemiddelde marge bovenop de 50 jaar variant. Tabel 5.1 vat alle opties voor de zeewaartse grens samen.

Tabel 5.1 Opties voor kustlangs uniforme en regionaal gedifferentieerde posities van de zeewaartse grens van het kustfundament (in m NAP), rekening houdend met te verwachten hoogenergetische events op een tijdschaal van 50 jaar en op een tijdschaal van 200 jaar. De tussenvariant bestaat uit de 50 jaar variant met een onzekerheidsmarge ter grootte van het gemiddelde tussen de 50 en 200 jaar varianten.

		Variant: 50 jaar	Tussenvariant: 50 jaar met onzekerheidsmarge	Variant: 200 jaar
Uniform		-15	-16,5	-18
Regionaal	Delta	-15	-16,5	-18
	Holland	-15	-16,5	-18
	Texel	-13	-15	-17
	Overige waddeneilanden	-10	-12,5	-15
	Buitendelta's waddengebied	-18	-19	-20

De mogelijke verplaatsing van de zeewaartse grens van het kustfundament is gebaseerd op morfologische argumenten. Niet-morfologische aspecten zoals de grens voor zandwinning en de Natura2000 begrenzing (beide nu de doorgetrokken NAP -20 m lijn) zijn niet meegenomen in dit advies.

Advies 6: Kennisleemtes die Kustgenese 2.0 niet heeft kunnen invullen of tijdens het onderzoek heeft geïdentificeerd

- (1) Wat is de verklaring voor de toename van het landwaarts zandtransport in landwaartse richting in het gebruikte model en waar komt dit sediment terecht? Maak een update van de sedimentbalans van de Nederlandse kust.
- (2) Wat is de invloed van de stormstatistiek op het sedimenttransport over de zeewaartse grens van het kustfundament en op de diepe vooroever? Wat zijn de onzekerheden in de berekening van zandtransport op diep water en hoe kunnen die verkleind worden?
- (3) Wat is de rol van de shoreface-connected ridges voor de centrale Hollandse kust in de ontwikkeling van de diepe vooroever?
- (4) Onderzoek het voorkomen van zeewaarts gerichte zandtransporten over de diepe vooroever tijdens storm, met name grootte en frequentie, en de daaropvolgende verspreiding van het zand.

6 Referenties

- van Alphen, J.S.L.J., Damoisiaux, M.A. (1987). A morphological map of the Dutch shoreface and adjacent part of the continental shelf (1:250.000). Nota NZ-N-87.21, Rijkswaterstaat Directie Noordzee.
- van Alphen, J.S.L.J., Damoisiaux, M.A. (1989). A geomorphological map of the Dutch shoreface and adjacent part of the continental shelf. *Geologie en Mijnbouw* 68, 433-443.
- Cleveringa, Jelmer (2016). Kennisvraagspecificatie zeewaartse grens kustfundament, Arcadis, Zwolle, 27 september 2016.
- Deltaprogramma Kust (2013). Nationale Visie Kust; Kompas voor de kust, september 2013. <http://publicaties.minienm.nl/documenten/nationale-visie-kust-kompas-voor-de-kust>
- Deltares (2019). Technisch advies Niet-morfologische Aspecten Zeewaartse Grens kustfundament. Memo 1220339-000-ZKS-0063, Bert van der Valk en Claire van Oeveren, december 2019.
- Deltares (2020a): Technisch advies sedimentbehoefte kustfundament; ten behoeve van het beleidsadvies voor Kustgenese 2.0, auteurs Arno Nolte, Claire van Oeveren, Edwin Elias, Jebbe van der Werf, Pieter Koen Tonnon, Bart Grasmeyer, Heleen Vreugdenhil, Zheng Wang en Ad van der Spek, Deltares rapport 1220339-009-ZKS-0004, in opdracht van Rijkswaterstaat WVL, januari 2020.
- Deltares (2020b): Kustgenese 2.0 - Integrale synthese, Belangrijkste conclusies uit drie jaar onderzoek naar de langetermijn kustontwikkeling, auteurs Claire van Oeveren en Albert Oost, Deltares rapport 1220339-009-ZKS-0008, in opdracht van Rijkswaterstaat als onderdeel van Kustgenese 2.0, maart 2020.
- Grasmeyer, B., Schrijvershof, R., van der Werf, J. (2019). Modelling Dutch Lower Shoreface Sand Transport, Deltares rapport 1220339-005-ZKS-0008, in opdracht van Rijkswaterstaat als onderdeel van Kustgenese 2.0, september 2019.
- Kraus, N.C., Larson, M., Wise, R.A. (1998). Depth of Closure in Beach-fill Design. Coastal Engineering Technical Note CETN II-40, 3/98, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, USA.
- Löffler, M. (2019). Over zandverliezen en verstelling van de diepe vooroever en suppleties in dieper water, voor RWS WVL, Concept, 20 maart
- Rijkswaterstaat (2016). Memo Rekenregel suppletievolume, versie 1.0, 11 december 2016.
- van Rijn, L.C. (1997). Sediment transport and budget on the central coastal zone of Holland. *Coastal Engineering* 32, 61–90.
- VenW (1990). Nota Kustverdediging na 1990. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- VenW (2002). Naar integraal kustzonebeleid. Beleidsagenda voor de kust. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Vermaas, T., van der Spek, A. (2016). Profielen dynamiek kustfundament. Deltares presentatie als onderdeel van het project KPP Beheer & Onderhoud Kust, projectnummer 1230043.

- van der Spek, A., van der Werf, J., Grasmeyer, B., Oost, A., Schrijvershof R., Vermaas, T. (2020): The Kustgenese 2.0 Atlas of the Dutch Lower Shoreface, Deltares Rapport 1220339-000-ZKS-0068, in opdracht van Rijkswaterstaat als onderdeel van Kustgenese 2.0, februari 2020.
- van der Werf, J., Grasmeyer, B., Hendriks, E., van der Spek, A., Vermaas, T. (2017). Literature study Dutch lower shoreface, Deltares rapport 1220339-004-ZKS-0001, in opdracht van Rijkswaterstaat als onderdeel van Kustgenese 2.0, Oktober 2017.
- VROM (2004). Nota Ruimte, Ruimte voor ontwikkeling. Ministeries van VROM, LNV, VenW en EZ.
- Wiersma, J., van Alphen, J.S.L.J. (1988). The morphology of the Dutch shoreface between Hook van Holland and Den Helder (The Netherlands). In: P.L. de Boer et al. (eds), Tide-Influenced Sedimentary Environments and Facies, p. 101-111.

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