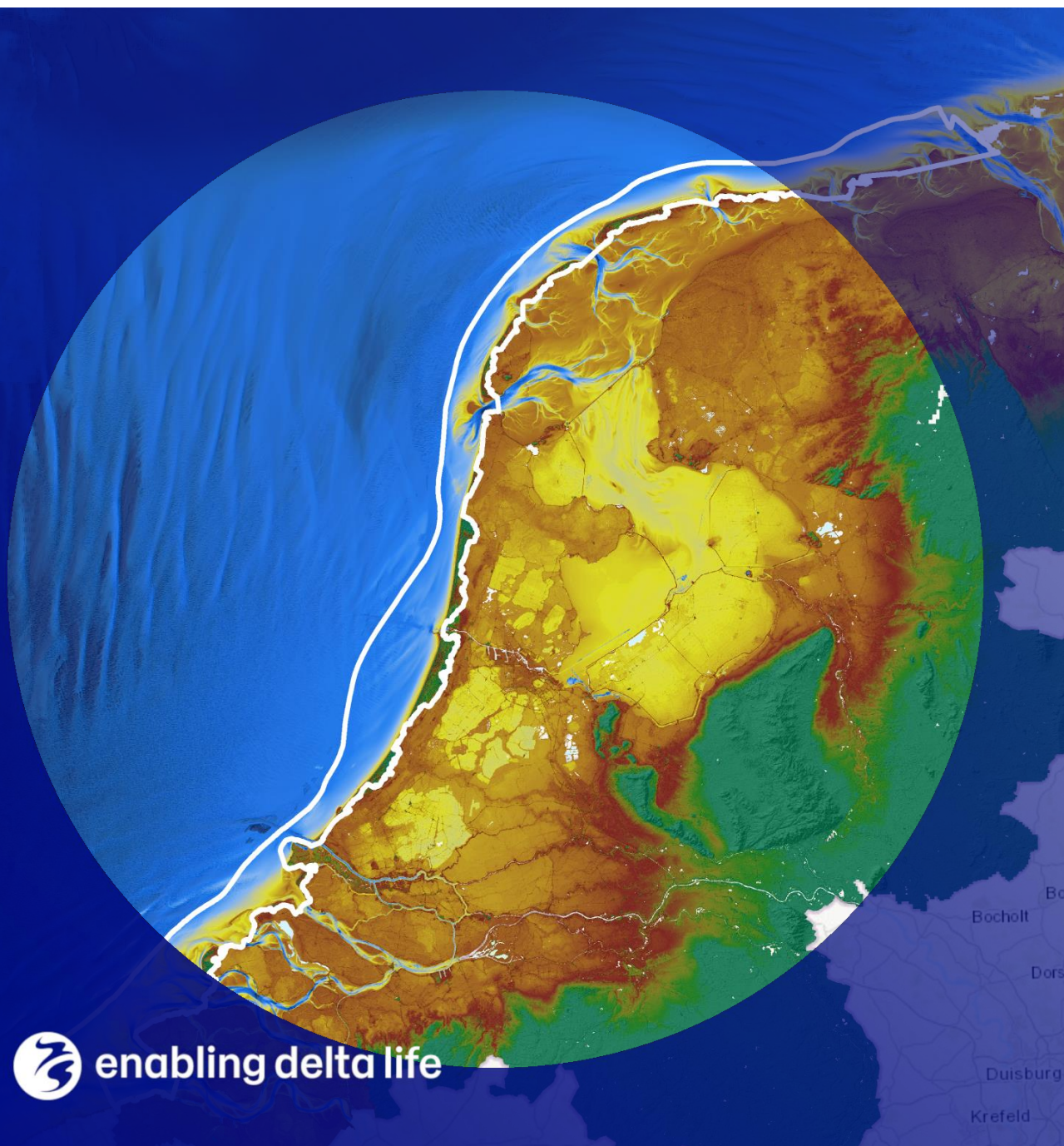


Technisch Advies Sedimentbehoefte Kustfundament

Ten behoeve van het beleidsadvies Kustgenese 2.0



Technisch Advies Sedimentbehoefte Kustfundament

Ten behoeve van het beleidsadvies Kustgenese 2.0

Auteurs

Arno Nolte

Claire van Oeveren-Theeuwes

Jebbe van der Werf

Pieter Koen Tonnon

Bart Grasmeijer

Ad van der Spek

Edwin Elias

Zheng Wang





Technisch Advies Sedimentbehoefte 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, Kustfundament, Kustbeheer, Sedimenttransport, Diepe vooroever, Wadden

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	24-03-2020
Projectnummer	1220339-009
Document ID	1220339-009-ZKS-0014
Pagina's	49
Status	definitief

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Arno Nolte 	Marcel Taal 	Toon Segeren 	
	Claire van Oeveren-Theeuwes	Jelmer Cleveringa (Arcadis) 		
	Jebbe van der Werf			
	Pieter Koen Tonnon			
	Bart Grasmeijer			
	Ad van der Spek			
	Edwin Elias			
	Zheng Bing Wang			

Samenvatting

Belangrijk doel van Kustgenese 2.0 is beantwoording van de beleidsvraag: **“Wat is de sedimentbehoefte van het kustfundament om mee te kunnen groeien met de zeespiegelstijging?”**. Dit rapport geeft het antwoord op deze beleidsvraag voor twee tijdvakken, voor de periode van nu tot 2035 en voor 2035-2100. Voor de periode tot 2035 wordt de huidige zeespiegelstijging ($1,86 \pm 0,12$ mm/j) aangehouden. Voor 2035-2100 is met verschillende scenario's voor de snelheid van zeespiegelstijging gerekend.

Het Kustgenese 2.0 onderzoek omvat vier termen van de rekenregel voor het bepalen van de sedimentbehoefte van het kustfundament. Die vier termen zijn (i) de mogelijke positie van de zeewaartse grens van het kustfundament (bepalend voor het oppervlakte van het kustfundament), (ii) het netto zandtransport over de zeewaartse grens, (iii) het netto zandtransport van kustfundament naar de Waddenzee inclusief Eems-Dollard en (iv) bodemdaling in het kustfundament. Voor de overige drie termen van de rekenregel worden resultaten en aannamen uit andere onderzoeken gebruikt.

Mogelijke positie van de zeewaartse grens

De zeewaartse grens van het kustfundament is de dieptecontour waarvan zeewaarts de bodemligging niet significant verandert. Dit is afhankelijk van een gekozen tijdschaal. Dit rapport hanteert twee tijdschalen: 50 jaar en 200 jaar.

De dieptecontour is bepaald uit de variatie van de bodemligging van het kustprofiel over de afgelopen 50 jaar. Dichtbij de kust varieert de bodemligging veel. De variatie neemt af verder van de kust. Op een zekere dieptecontour neemt de variatie niet verder af en blijft nagenoeg constant. Deze dieptecontour is gebruikt als zeewaartse grens van het kustfundament op een tijdschaal van 50 jaar (variant “50 jaar”). Bij een tijdschaal van 200 jaar hoort een grens op dieper water. Daarvoor is de dieptecontour gebruikt waar de variatie van de bodemligging minimaal is (variant “200 jaar”). De positie van de zeewaartse grens kan zowel uniform langs de Nederlandse kust als regionaal gedifferentieerd worden bepaald, voor beide varianten.

Geadviseerd wordt om tot 2035 uit te gaan van de 50 jaar tijdschaal. Indien gewenst kan vanwege onzekerheid een extra marge gehanteerd worden. Hiervoor is de variant “50 jaar met onzekerheidsmarge” opgenomen.

Transport over de zeewaartse grens

Het transport over de zeewaartse grens is bepaald met het *Dutch Lower Shoreface Model*. Dit model is speciaal ontwikkeld om inzicht te krijgen in de zandtransporten op de diepe vooroever. De berekeningen geven aan dat het zandtransport over de zeewaartse grens landwaarts is gericht. De onzekerheid over landwaartse richting van het zandtransport is gering. Over de grootte van dit transport wordt vanwege de grote onzekerheden geen uitspraak gedaan, onder andere door het niet volledig in beeld hebben van het effect van stormen.

Transport naar de Waddenzee en Eems-Dollard

Voor de periode tot 2035 is het zandtransport naar de Waddenzee afgeleid uit de bodemdata en daaruit afgeleide sedimentbalansen. De aanname is dat het zandtransport representatief is tot 2035. Het bepaalde netto zandtransport naar de Waddenzee is 4,8 miljoen m³/jaar. Voor het Eems-Dollard estuarium volgt uit een literatuuranalyse een netto transport van 1,2 miljoen m³/jaar .

Voor de periode 2035-2100 is een modelvoorspelling gedaan voor meerdere zeespiegelstijgingsscenario's. Bij zeespiegelstijging gelijk aan de huidige snelheid daalt het netto zandtransport naar de Waddenzee in 2100 licht. Bij een snelheid van 8 mm/jaar wordt een toename

van het netto zandtransport naar de Waddenzee (exclusief Eems-Dollard) van 40% berekend in 2100. Voor het bepalen van het zandtransport naar de Eems-Dollard is aanvullend onderzoek nodig.

Bodemdaling door winning van delfstoffen en grondwater

De bodemdaling is bepaald op basis van literatuur, per component ervan (natuurlijke, geologische componenten en menselijke bijdragen). Voor de bodemdaling door winningen is gebruik gemaakt van projecties over de periode 2018-2050. Het totaalresultaat is een verwachte sedimentbehoefte door bodemdaling van 0,5 miljoen m³/per jaar.

Overige termen (aannamen vanuit andere trajecten)

Het transport naar de Westerschelde wordt afgeleid uit trends in het sedimentvolume van de Westerschelde. De huidige trend volgt uit consistente observaties sinds 2000. Of de huidige trend representatief is voor de periode tot 2035 is onzeker. Ten behoeve van het gebruik in de rekenregel wordt aanbevolen om voor de periode tot 2035 uit te gaan van een zandverlies uit het kustfundament naar de Westerschelde van 0,5 miljoen m³/jaar. In de periode 2035-2100 neemt bij versnelde zeespiegelstijging het zandverlies mogelijk af.

Voor het transport over de staatsgrenzen wordt voor het beleidsadvies met de bestaande aanname 'geen zandtransport' gerekend. Het is bekend dat er wel degelijk sedimenttransport is over de staatsgrenzen, maar wat deze waarde wel moet zijn, is niet bekend. Ook voor het transport over de landwaartse grens is met de bestaande aanname 'geen zandtransport' gerekend. Dit volume is beperkt en daarmee is het effect van deze aanname zeer beperkt op de uitkomst.

Sedimentbehoefte kustfundament tot 2035

Met de resultaten van dit onderzoek geeft de rekenregel de sedimentbehoefte van het kustfundament. Voor de periode tot 2035 is dit gedaan in verschillende varianten. De uitkomsten hiervan variëren van 12,6 ± 2,8 miljoen m³/jaar (variant "Regionaal 50 jaar") tot 14,2 ± 2,9 miljoen m³/jaar (variant "Uniform 200 jaar").

Doorkijk sedimentbehoefte kustfundament tot 2100

Bij ongewijzigde toepassing van de rekenregel neemt de sedimentbehoefte toe tot maximaal 40 miljoen m³/jaar in de variant "Uniform 200 jaar" bij een relatieve zeespiegelstijging van 8 mm/jaar. De toename wordt vrijwel geheel bepaald door de lineaire relatie in de rekenregel tussen het oppervlakte van het kustfundament en de relatieve zeespiegelstijging.

De validiteit van ongewijzigde toepassing van de rekenregel voor sedimentbehoefte van het kustfundament bij versnelde relatieve zeespiegelstijging is niet getoetst. Het is de aanbeveling de validiteit van de rekenregel te toetsten voor gebruik bij versnelde zeespiegelstijgingsscenario's, welke meer en meer waarschijnlijk worden.

Dit rapport dient als volgt gerefereerd te worden:

Deltares (2020): Technisch advies sedimentbehoefte kustfundament; ten behoeve van het beleidsadvies voor Kustgenese 2.0, auteurs Arno Nolte, Claire van Oeveren, Jebbe van der Werf, Pieter Koen Tonnon, Bart Grasmeijer, Ad van der Spek, Edwin Elias en Zheng Wang, Deltares rapport 1220339-009-ZKS-00014, in opdracht van Rijkswaterstaat WVL, maart 2020.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Algemene achtergrond Kustgenese 2.0	8
1.2	Vraagstuk dit Technisch Advies	8
1.3	Leeswijzer	8
2	Achtergrond sedimentbehoefte kustfundament	10
2.1	Definitie van het kustfundament	10
2.2	Sedimentbehoefte kustfundament: introductie van de rekenregel	11
2.3	Zeewaartse grens van het kustfundament	12
2.4	De Waddenzee en Waddenkustzone	14
3	Kwantificeren van de termen van de rekenregel	16
3.1	Relatieve zeespiegelstijging	16
3.1.1	Samenvatting van de aanpak	16
3.1.2	Resultaat periode tot 2035	16
3.1.3	Resultaat periode 2035-2100	16
3.1.4	Onzekerheden	17
3.2	Positie van de zeewaartse grens van het kustfundament	17
3.2.1	Samenvatting van de aanpak	17
3.2.2	Resultaat periode tot 2035	18
3.2.3	Resultaat periode 2035-2100	20
3.2.4	Onzekerheden	20
3.3	Transport over de zeewaartse grens	20
3.3.1	Samenvatting van de aanpak	20
3.3.2	Resultaat periode tot 2035	21
3.3.3	Resultaat periode 2035-2100	22
3.3.4	Onzekerheden	22
3.4	Transport naar de Waddenzee	22
3.4.1	Samenvatting van de aanpak	22
3.4.2	Resultaat periode tot 2035	24
3.4.3	Resultaat periode 2035-2100	25
3.4.4	Onzekerheden	26
3.5	Uitwisseling met de Westerschelde	26
3.5.1	Samenvatting van de aanpak	26
3.5.2	Resultaat periode tot 2035	26
3.5.3	Resultaat periode 2035-2100	29
3.5.4	Onzekerheden	30
3.6	Bodemdaling door winning van delfstoffen en grondwater	30
3.6.1	Samenvatting van de aanpak	30
3.6.2	Resultaat periode tot 2035	30
3.6.3	Resultaat periode 2035-2100	31
3.6.4	Onzekerheden	31
3.7	Transport over de landwaartse grens	31
3.8	Transporten over de staatsgrenzen met België en Duitsland	31
4	Sedimentbehoefte kustfundament	32
4.1	Overzicht termen sedimentbehoefte kustfundament tot 2035	32

4.2	Varianten sedimentbehoefte kustfundament tot 2035	37
4.3	Onzekerheden tot 2035	39
4.4	Doorkijk sedimentbehoefte kustfundament met versnelde zeespiegelstijging tot 2100	40
5	Technisch advies sedimentbehoefte kustfundament	44
6	Referenties	47

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 wordt de kustlijn gehandhaafd en wordt 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 dit Technisch Advies

Dit Technisch Advies geeft antwoord op de volgende beleidsvraag:

“Wat is de sedimentbehoefte van het kustfundament om mee te kunnen groeien met de zeespiegelstijging?”

Merk op dat de vraag gaat over de sedimentbehoefte en niet over het suppletievolume. Op basis van (onder andere) de sedimentbehoefte wordt door Rijkswaterstaat een advies voor het suppletievolume opgesteld. Toelichting over deze begrippen volgt in hoofdstuk 2.

De beleidsvraag wordt beantwoord voor de tijdsperiode tot 2035 en voor de periode 2035-2100. Voor de periode tot 2035 wordt de huidige snelheid van zeespiegelstijging aangehouden. Voor de periode 2035-2100 wordt met verschillende scenario's voor de snelheid van zeespiegelstijging gerekend.

1.3 Leeswijzer

Dit Technisch Advies is een slotstuk van het uitgevoerde onderzoek Lange Termijn Kustontwikkeling dat Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat in het kader van het Kustgenese 2.0 programma heeft uitgevoerd. Van februari 2017 tot december 2019 zijn vele samenhangende onderdelen uitgevoerd om de systeemkennis te vergroten door een combinatie van beschikbare data en kennis, nieuwe monitoring en nieuwe modellering. Dit technisch advies beperkt zich tot de kennis die nodig is om de beleidsvraag in paragraaf 1.2 te beantwoorden.

Hoofdstuk 2 bevat een beknopte beschrijving van het kustfundament en de rekenregel voor de sedimentbehoefte van het kustfundament. Zij vormen het uitgangspunt voor het uitgevoerde onderzoek en zijn daarom essentiële context voor de zelfstandig leesbaarheid van dit Technisch Advies.

Hoofdstuk 3 beschrijft systematisch de individuele termen van de rekenregel.

In Hoofdstuk 4 wordt vervolgens de sedimentbehoefte van het kustfundament afgeleid door combinatie van de individuele termen en worden alternatieven opgesteld.

Tenslotte wordt in Hoofdstuk 5 antwoord gegeven op de beleidsvraag inclusief overwegingen en aanbevelingen.

Tenslotte worden twee terminologische leeswijzers meegegeven:

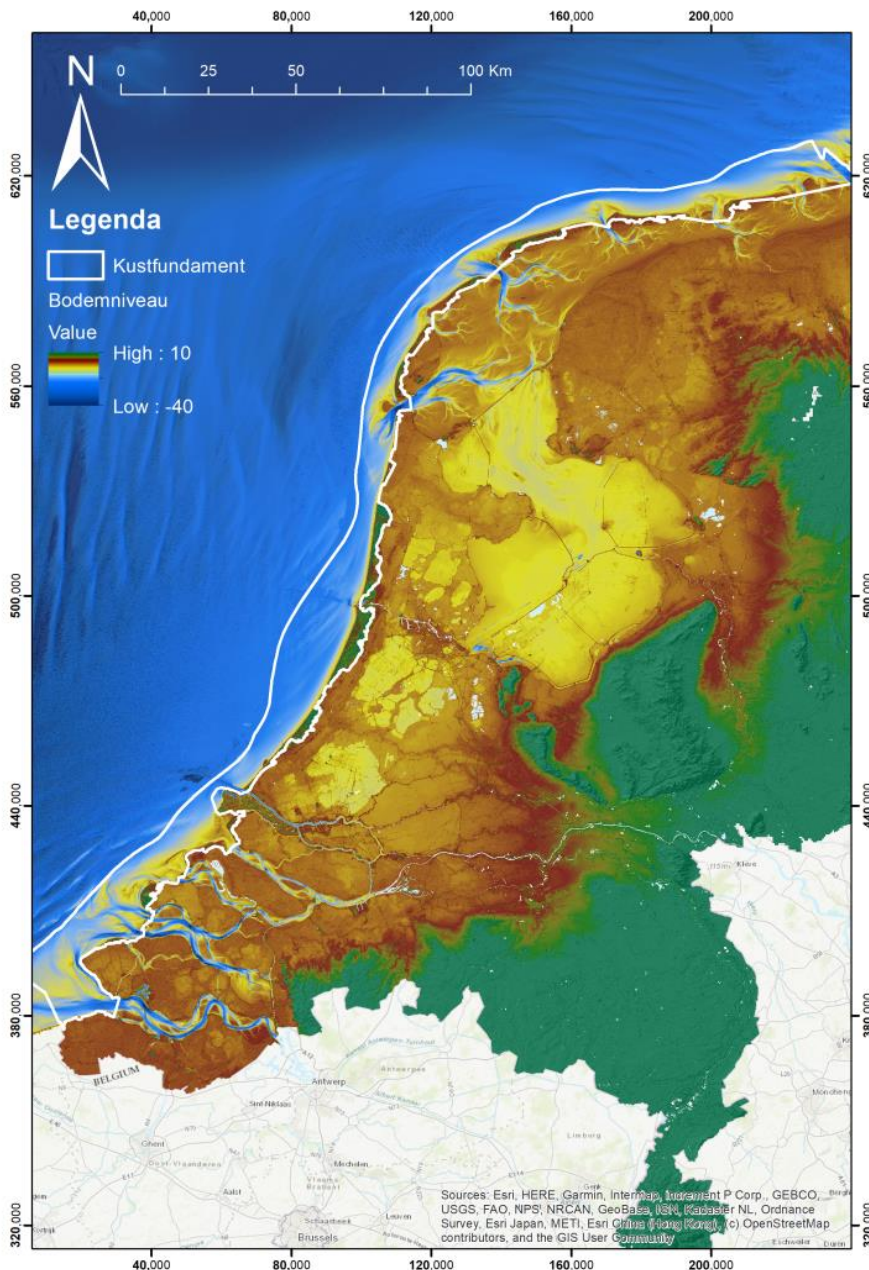
- Sediment is de combinatie van zand en slib. De sedimentbehoefte van het kustfundament is feitelijk de zandbehoefte, omdat slib vanwege het lage gehalte niet bijdraagt aan het volume. Tenzij expliciet vermeldt staat “sediment” in dit Technisch Advies gelijk aan “zand”.
- Dit Technisch Advies kwantificeert de sedimentbehoefte en gaat in op de onzekerheid. Daar waar de onzekerheid gekwantificeerd kan worden, wordt de term “bandbreedte” gebruikt meestal in de vorm van een getal met een “±” teken ervoor. Daarnaast wordt ook een kwalitatief oordeel en dus expert judgement over de onzekerheid gegeven.

2 Achtergrond sedimentbehoefte kustfundament

2.1 Definitie van het kustfundament

Het kustfundament is gedefinieerd en beschreven 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."



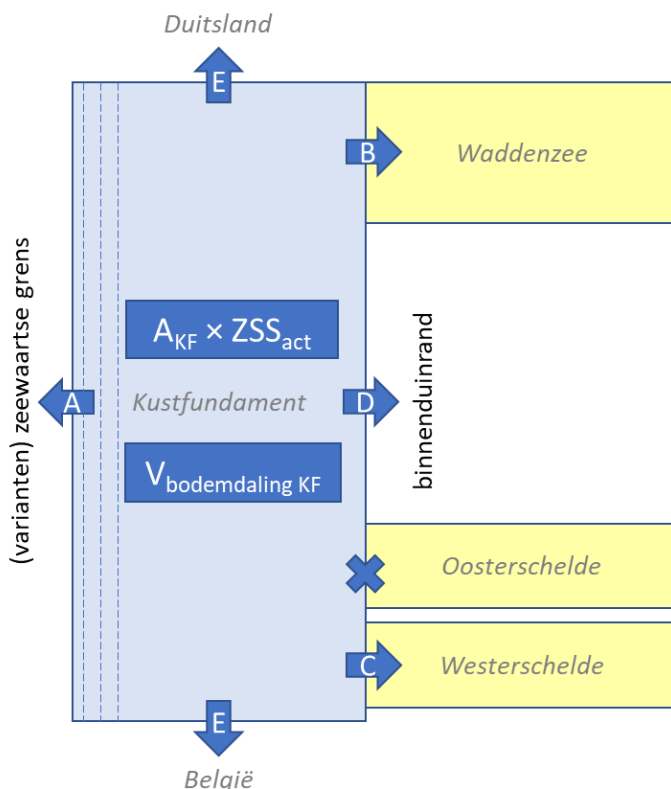
Het kustfundament wordt als volgt begrensd (Figuur 2.1):

- 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 conform de rekenregel, 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:

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

Met:

$V_{\text{sedimentbehoefte}}$	Sedimentbehoefte van het kustfundament (m ³ /jaar)
A_{KF}	Oppervlakte van het kustfundament (m ²)
ZSS_{act}	Actuele relatieve zeespiegelstijging (m/jaar)
$V_{\text{export zeewaartse grens KF}}$	Netto zandtransport over de zeewaartse grens (m ³ /jaar)
$V_{\text{export Waddenzee}}$	Netto zandtransport van kustfundament naar de Waddenzee (m ³ /jaar)

$V_{\text{export Westerschelde}}$	Netto zandtransport van kustfundament naar de Westerschelde (m^3/jaar)
$V_{\text{bodemdaling KF}}$	Bodemdaling in het kustfundament door delfstofwinning (m^3/jaar)
$V_{\text{export landwaartse grens}}$	Netto zandtransport over de landwaartse grens (m^3/jaar)
$V_{\text{export staatsgrenzen}}$	Netto zandtransport over de staatsgrenzen richting België en Duitsland (m^3/jaar)

De termen die met (*) zijn aangeduid in bovenstaande uitgesplitste formule vormen de kern van het onderzoek binnen Kustgenese 2.0 (Rijkswaterstaat, 2016). De diepe vooroever, bepalend voor het oppervlak van het kustfundament en voor het netto sedimenttransport over de zeewaartse grens (2.3), en de Waddenzee en Waddenzeekustzone (2.4) worden in de volgende paragrafen kort geïntroduceerd.

2.3 Zeewaartse grens van het kustfundament

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, waar golven een belangrijke, maar geen dominante rol spelen (van der Spek *et al.*, 2020). 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

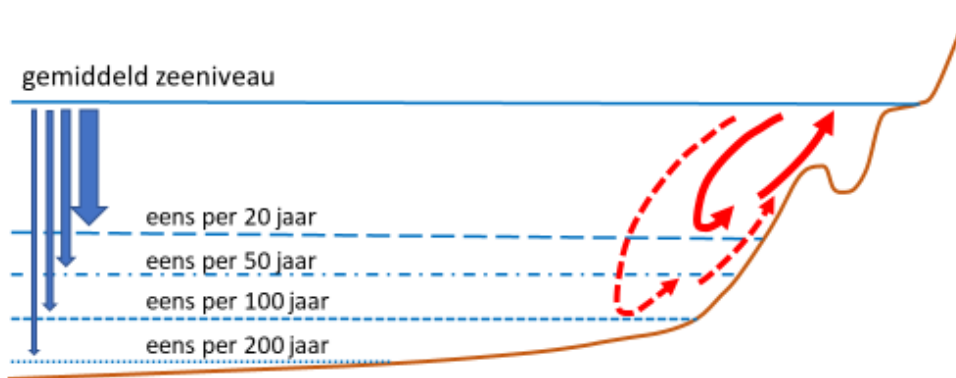
De ondiepe vooroever wordt gedomineerd door golven. De golven veroorzaken een landwaarts zandtransport. Zeewaarts zandtransport kan voorkomen door retourstroming aan de bodem, met name bij hoge golven, en in muien. In deze zone komen brandingsbanken voor. De zeebodem in deze zone reageert snel op veranderingen 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.



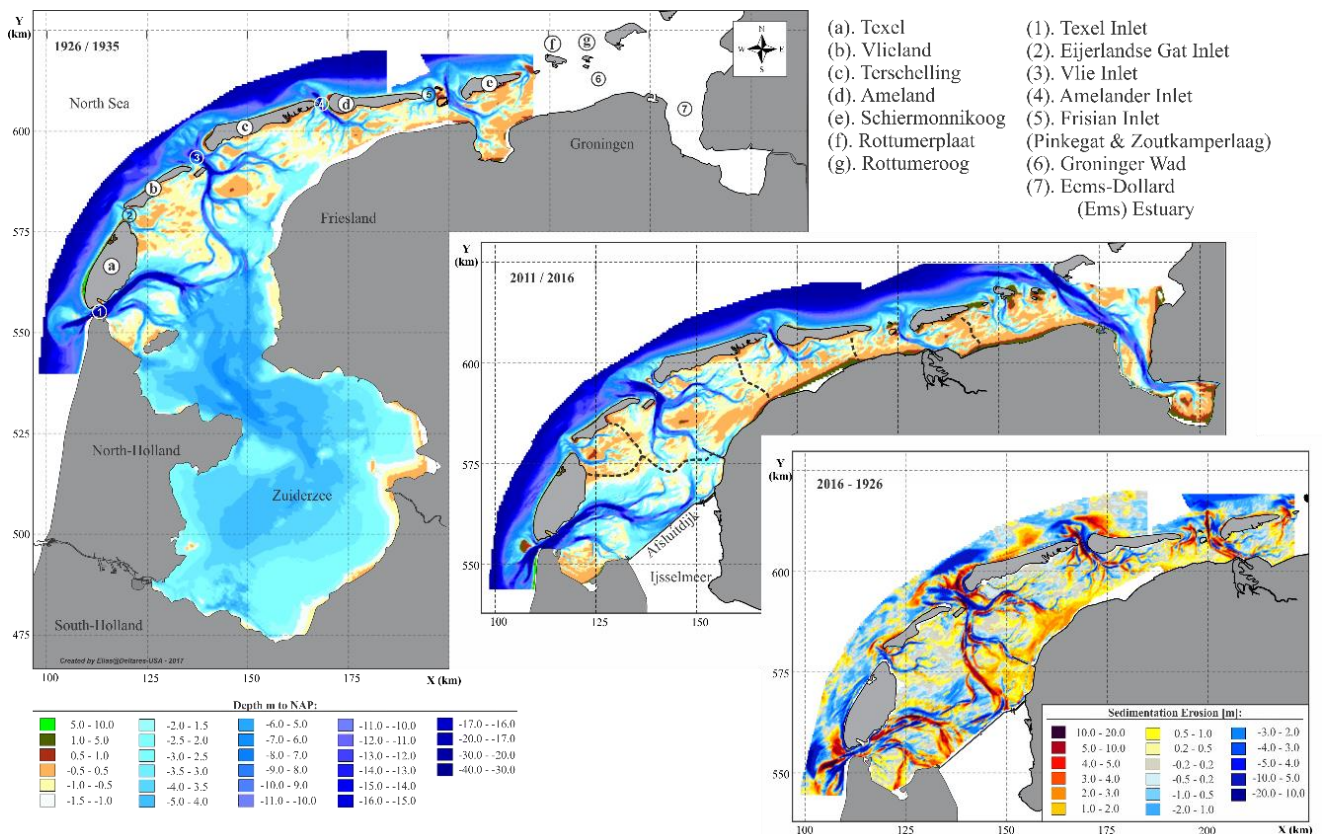
Figuur 2.4 Principeschets van de diepte van omwerking van het kustprofiel door (storm-)golven. De hoogte en lengte van stormgolven is omgekeerd evenredig met hun kans op optreden. Dit betekent dat de kans op omwerking van de zeebodem door stormgolven (eens per 20 jaar, eens per 50 jaar, etc.) afneemt 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.

Op basis van studies langs met name de Hollandse kust, blijkt dat 1) het diepwatertransport episodisch van aard is, dat wil zeggen vooral bij stormen optreedt, 2) bodemtransport de meest voorkomende transportwijze is en 3) hoge (storm)golven het netto jaarlijkse transport bepalen ook door suspensietransport Van der Werf *et al.* (2017).

2.4 De Waddenzee en Waddenkustzone

De Waddenzee is geologisch gezien een jong gebied. Over een periode van 7000 jaar heeft zich een uniek landschap gevormd, dat bestaat uit een opeenvolging van diepe en ondiepe platen, grote en kleine geulen, kweldergebieden, zeegaten en eilanden. Aan de noordoostzijde vormt het Eems-Dollard estuarium een scheiding met het Duitse deel van de Waddenzee.

De Waddenzee wordt vaak gezien als een ongestoord gebied waar de natuurlijke processen relatief vrij hun gang kunnen gaan zonder dat de mens daar een grote invloed op heeft. De studie van Elias *et al.* (2012) laat zien dat natuurlijke processen ongestoord hun gang kunnen gaan, maar wel binnen een begrenzing die door menselijke ingrepen is gevormd. Gedurende de laatste eeuwen zijn de grenzen van de Waddenzee vrijwel vastgelegd. De waddenkusten van Noord-Holland, Friesland en Groningen worden beschermd door dijken en zeekeringen. De Afsluitdijk heeft in 1932 de voormalige Zuiderzee afgescheiden van de Waddenzee. De Lauwerszee is in 1969 afgesloten. De kustlijn van de eilandkusten wordt door strekdammen (Texel, Vlieland) en zandsuppleties op de 1990 ligging gehouden. Ondanks deze ingrepen blijft het karakteristieke Waddenlandschap behouden. Zowel in de oude (1926/1935) bodem als in een recente (2011/2016) weergave zijn overeenkomstige morfologische kenmerken te zien (Figuur 2.1).



Figuur 2.1 Een overzicht van de bodem van de Waddenzee voor de periode 1926/1935, 2011/2016 en de morfologische veranderingen (1926-2016). De geel-rode kleuren geven sedimentatie weer, de blauwe kleuren erosie (Wang *et al.* 2018).

Van west naar oost wordt de Waddenzee gevormd door de volgende kombergingsgebieden:

- het Zeegat van Texel (ook wel Marsdiep genoemd)
- het Eierlandse Gat
- het Zeegat van het Vlie
- het Zeegat van Ameland (ook wel Borndiep genoemd)

- het Friesche Zeegat, bestaande uit Pinkegat en Zoutkamperlaag
- het Groninger Wad
- het Eems-Dollard estuarium.

Met uitzondering van het Friesche Zeegat hebben alle zeegaten een duidelijke, diepe hoofdgeul die verbinding maakt met het achterliggende geulenstelsel. Het Friesche Zeegat heeft twee relatief grote hoofdgeulen gescheiden door de Engelsmanplaat. Het wat kleinere Pinkegat vormt het westelijke deel van het Zeegat en maakt verbinding met het achterliggende bekken. Ten oosten van de Engelsmanplaat is de grotere en diepere geul Zoutkamperlaag. Beide geulen dragen bij aan de vorming van de gezamenlijke, voorliggende buitendelta.

Figuur 2.1 laat duidelijk zien dat er zich over de periode 1926-2016 grote morfologische veranderingen hebben voorgedaan in de Waddenzee en langs de aanliggende kust. Eerdere studies (Elias *et al.* 2012; Wang *et al.* 2018) geven aan dat het sedimentvolume in de Waddenzee met ruwweg 650 miljoen m³ is toegenomen. Het merendeel van dit sediment is geleverd door de buitendelta's die sterk in volume afnamen. Elias *et al.* (2012) concluderen ook dat de grootste volumeverandering, ongeveer 75%, plaatsvindt in het westelijke deel van de Waddenzee (Texel, Eierlandse Gat en Vlie). Hier vulden de afgesloten geulen zich op en vond er grote sedimentatie plaats langs de kust van Friesland en Noord-Holland (zie Figuur 2.1). Deze sedimentatie lijkt dan ook in belangrijke mate het gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee en niet primair een respons op bijvoorbeeld de stijging van de zeespiegel. De geobserveerde stabiliteit van de bekkens van het Friesche Zeegat en Groninger Wad laten wel zien dat er voldoende sediment aanwezig is om relatieve bodemdaling, door zeespiegelstijging maar ook gas- en zoutwinning, te compenseren.

3 Kwantificeren van de termen van de rekenregel

In dit hoofdstuk worden de termen van de rekenregel individueel behandeld. Per term worden de onderliggende bronnen vermeld en wordt kort de aanpak beschreven om tot kwantificering te komen. Vervolgens wordt per term de kwantitatieve waarde inclusief bandbreedte aangegeven, uitgesplitst naar de periode tot 2035 en de periode van 2035 tot 2100 met scenario's voor zeespiegelstijging. Tenslotte wordt per term van de rekenregel een beoordeling gegeven van de mate van zekerheid of onzekerheid van de kwantitatieve waarde inclusief bandbreedte. In hoofdstuk 4 worden de individuele termen gecombineerd, inclusief de beoordeling hoe de combinatie of cumulatie van onzekerheid wordt meegenomen.

3.1 Relatieve zeespiegelstijging

3.1.1 Samenvatting van de aanpak

Voor de zeespiegelstijging wordt gebruik gemaakt van beschikbare literatuur.

3.1.2 Resultaat periode tot 2035

Eén van de indicatoren in de Zeespiegelmonitor, waarin jaarlijks over de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust wordt gerapporteerd (Baart *et al.*, 2018), is de zeespiegelstijging die berekend wordt uit de waterstandsmetingen van de zes Nederlandse hoofdgetijdstations. Baart *et al.* (2018) presenteert het resultaat van drie jaar onderzoek, waarin is gewerkt aan een beter begrip van de zeespiegelstijging. Zo is gekeken naar de verklaring van de variaties in tijd en ruimte van de zeespiegelstijging, of dit goed is gevat in de rekenmethode voor de zeespiegelstijging en of metingen en voorspellingen valide en reproduceerbaar zijn.

Baart *et al.*(2018) geeft de volgende hoofdconclusie: “De waterstandsmetingen van de zes Nederlandse hoofdgetijdstations over de periode 1890 tot en met 2017 laten een constante stijging van de jaargemiddelde zeespiegel van $18,6 \pm 1,2$ cm per eeuw zien. Dit betreft de relatieve stijging van de zeespiegel ten opzichte van de diep gefundeerde meetpaal waar het getijdenstation aan vast zit. Doordat de diepe ondergrond van grote delen van Nederland op een tijdschaal van eeuwen daalt, wordt circa 4,5 cm van de opgetreden relatieve zeespiegelstijging veroorzaakt door bodemdaling. De absolute opgetreden zeespiegelstijging wordt daarom geschat op $18,6 - 4,5 = 14,1$ cm. Voor waterveiligheid en kustlijnhandhaving wordt de relatieve zeespiegelstijging gebruikt.”

De bovenstaande 4,5 cm is bepaald aan de hand van modelverwachtingen en wordt onderbouwd in Hijma en Kooi (2018). Daarin staat: “De gemiddelde geologische bodemdaling over de zes hoofdgetijdenstations bedraagt $4,5 \pm 0,95$ cm/eeuw met een range van 2,4 cm/eeuw (Vlissingen) tot 6,0 cm/eeuw (Harlingen).”

Op basis van de geanalyseerde metingen en de meest recente inzichten in het kader van het Deltaprogramma wordt op de korte termijn nog geen versnelling van de zeespiegelstijging verwacht. Voor de rekenregel wordt daarom voor de periode tot 2035 de huidige zeespiegelstijging geëxtrapoleerd en wordt uitgegaan van een relatieve zeespiegelstijging van **$18,6 \pm 1,2$ cm per eeuw** ofwel **$1,86 \pm 0,12$ mm per jaar** waarin de geologische bodemdaling is meegenomen.

3.1.3 Resultaat periode 2035-2100

Voor de periode 2035-2100 worden de klimaatscenario's KNMI'14 als basis gebruikt (KNMI, 2015). Voor 2050 wordt een maximale zeespiegelstijging van 40 cm ten opzichte van 1981-2010 voorzien

(KNMI, 2015). Voor 2085 wordt berekend dat de zeespiegel tussen de 25 en 80 cm zal zijn gestegen. Voor 2100 is een bovenwaarde van 100 cm berekend.

Voor de rekenregel wordt gewerkt met de volgende zeespiegelstijgingen vanaf 2020, die de spreiding van de klimaatscenario's omvatten:

- 2 mm/jaar
- 4 mm/jaar
- 6 mm/jaar
- 8 mm/jaar

Voor de ASMITA berekeningen voor het zandtransport naar de Waddenzee in de periode 2035-2100 is een aanname gedaan voor de snelheid van toename van zeespiegelstijging (paragraaf 3.4, Wang en Lodder 2019).

3.1.4 Onzekerheden

Voor de periode tot 2035 is de onzekerheid klein. De extrapolatie van de metingen sinds 1870 die een constante stijging van de zeespiegel laten zien, wordt betrouwbaar geacht (Baart *et al.*, 2018). Er is geen reden om aan te nemen dat de zeespiegelstijging de komende 15 jaar drastisch zal veranderen. Afgeleid van de metingen wordt de bandbreedte ook als betrouwbaar gezien.

Bij de aanname voor de zeespiegelstijging tot 2035 hoort de kanttekening dat er nog nader onderzoek uitgevoerd gaat worden naar de in het verleden uitgevoerde – lokale en landelijke – NAP-correcties. De uitkomst zou nog tot nieuwe inzichten kunnen leiden. In de bovenstaande benadering wordt uitgegaan dat de referentiehoogtes van de nulpalen niet in de tijd zijn aangepast. De NAP herziening van 2005 is daarmee terug gecorrigeerd. Deze aanpak geeft het beste de relatieve zeespiegelstijging weer langs de kust.

Voor de periode 2035-2100 wordt gewerkt met klimaatscenario's. Daarmee wordt de onzekerheid van toekomstige zeespiegelstijging inclusief de bandbreedte ondervangen. Scenario's voor een mogelijk versnelde zeespiegelstijging boven de 100 cm in 2100 zijn niet meegenomen in dit onderzoek.

3.2 Positie van de zeewaartse grens van het kustfundament

3.2.1 Samenvatting van de aanpak

De mogelijke positie van de zeewaartse grens van het kustfundament is onderwerp van een zelfstandig Technisch Advies (Deltares, 2020). Niet-morfologische aspecten zoals de grens voor zeezandwinning en de Natura2000 begrenzing zijn niet meegenomen in dit Technisch Advies. Een samenvatting van het advies is hier overgenomen.

De keuze van de zeewaartse grens kan op één van de volgende drie criteria gebaseerd worden: (1) de vorm van het profiel van de onderwateroever (morfologie), (2) de grootte van het netto zandtransport op de diepe vooroever, (3) de variabiliteit van het profiel van de onderwateroever (morfodynamiek).

Profielvorm

In theorie is de bodem van de Noordzee relatief vlak in vergelijking met de helling van het kustprofiel. Hierbij zou de gemiddelde helling van de zeebodem kleiner dan 1:1000 zijn en de helling van het kustprofiel groter. Het punt waarop de helling 1:1000 bedraagt kan dan als zeewaartse grens van de diepe vooroever beschouwd worden.

Netto zandtransport

Als een kustprofiel in dynamisch evenwicht is, is er netto weinig tot geen zandtransport. De locatie waar het netto zandtransport gelijk aan nul is, kan als zeewaartse grens van de diepe vooroever aangenomen worden.

Dynamiek van het profiel

De vorm van het profiel van de onderwateroever 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. De locatie met de kleinste variatie in de tijd kan dan als zeewaartse grens van de diepe vooroever gekozen worden.

3.2.2 Resultaat periode tot 2035

Profielvorm

Analyse van de profielen van de onderwateroever langs de Nederlandse kust laat zien dat de variatie in profielvormen groot is. De zeebodem is verre van vlak. Er komen diverse beddingvormen als megaribbels, zandgolven en zandbanken voor. Hierdoor is het moeilijk tot onmogelijk om hellingen van met name het diepere deel van de onderwateroever en de zeebodem vast te stellen en kan het overgangspunt niet bepaald worden. Daar waar wel sprake is van een duidelijk overgangspunt varieert de diepte daarvan tussen NAP -16 m en -25 m. De conclusie is dat er op basis van de profielvorm van de kusthelling géén eenduidige grens is te definiëren.

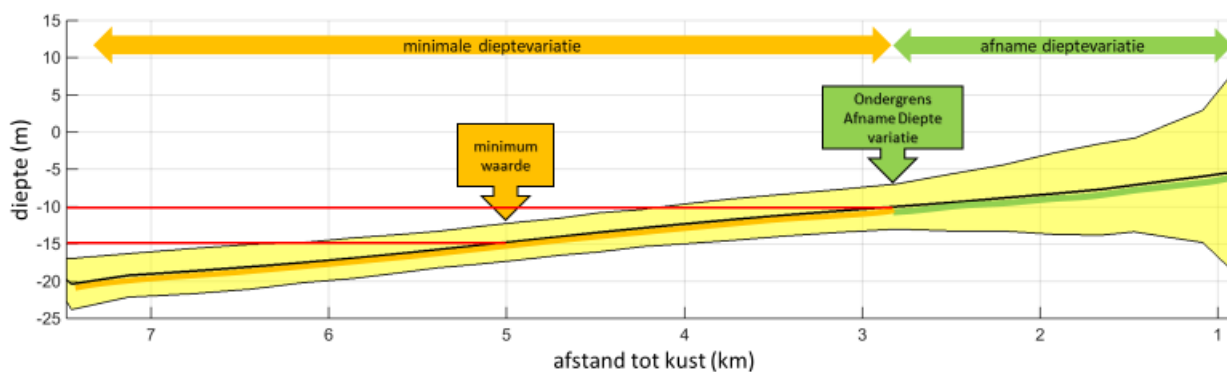
Netto zandtransport

De berekende kustwaarts gerichte netto zandtransporten op de diepere vooroever zijn niet verwaarloosbaar klein (Grasmeijer *et al.*, 2019). 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 op de Noordzeebodem aan te wijzen waarover de uitwisseling verwaarloosbaar klein is. Dit maakt netto zandtransport op basis van de gebruikte modellen niet geschikt als criterium voor de definitie van de zeewaartse grens van de vooroever.

Dynamiek van het profiel

De variatie in bodemligging rond het gemiddelde profiel neemt af met toenemende diepte. 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. Deze dieptegrens is afhankelijk van een gekozen tijdschaal. Dit Technisch Advies hanteert twee tijdschalen: 50 jaar en 200 jaar. De 50 jaar tijdschaal wordt gehanteerd in technisch-inhoudelijke documenten waar over “decennia” gesproken wordt en sluit aan bij zowel de beschikbare data als bij de periode van het huidige kustbeleid (sinds 1990). De 200 jaar tijdschaal komt voort uit de beleidsmatige definitie van het kustfundament, al heeft die tijdschaal met name betrekking op de reserveringsstrook voor 200 jaar van de duinwaterkering.

Figuur 3.1 illustreert de gemeten variatie van het bodemprofiel. 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 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.



Figuur 3.1 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.

Uit de variatie in de bodemligging voor een aantal kustvakken van de Nederlandse kust is af te leiden dat deze variabiliteit in zeewaartse richting afneemt tot een diepte tussen NAP -10 m en -15 m. Bij verder toenemende waterdiepte blijft de variabiliteit vrijwel constant, al is er wel een minimumwaarde (MW) in de variatie vast te stellen. Dit is gebaseerd op gegevens over een periode van maximaal 50 jaar. 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, conform de duur van periode waarvoor metingen beschikbaar zijn. Voor een tijdschaal van 200 jaar moet een grens op dieper water aangehouden worden. Hiervoor wordt de waterdiepte van de minimumwaarde MW als maat genomen.

Mogelijke positie zeewaartse grens van het kustfundament

Uit bovenstaande volgt dat alleen de langjarige dynamiek van het profiel een geschikt criterium is. De positie van de zeewaartse grens van het kustfundament kan zowel uniform langs de Nederlandse kust als regionaal gedifferentieerd worden voor de 50 jaar variant en de 200 jaar variant. Omdat het niet mogelijk is absoluut zeker te zijn van de uit metingen afgeleide 50 jaar variant, kan – om de onzekerheid te ondervangen – bij de keuze van een zeewaartse grens een onzekerheidsmarge aangehouden worden. De 200 jaar variant wordt als een ruime marge gezien. Daarom wordt een variant toegevoegd tussen de 50 jaar en 200 jaar varianten. Deze tussenvariant is niet op morfologische gronden gebaseerd, maar hanteert een gemiddelde marge bovenop de 50 jaar variant. Tabel 3.1 vat de opties samen.

Tabel 3.1 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

3.2.3 Resultaat periode 2035-2100

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 van 2020 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 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.

3.2.4 Onzekerheden

Bij een ondiepere zeewaartse grens komen de shoreface-connected ridges voor de centrale Hollandse kust deels buiten het kustfundament te liggen. Het is op dit moment niet duidelijk of, en zo ja, hoe, deze zandbanken het gedrag van de vooroever in dit kustvak beïnvloeden.

3.3 Transport over de zeewaartse grens

3.3.1 Samenvatting van de aanpak

Omdat jaarlijkse zandtransporten niet gemeten kunnen worden, zeker niet over de lengte van de zeewaartse grens van het kustfundament, worden de zandtransporten met een modelberekening bepaald. 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 op basis van de lokale condities voor stroming en golven.

De 3D stroomsnelheden zijn berekend in voor een periode van 5 jaar (2013-2017) inclusief effecten van getij, wind, dichtheid, rivierafvoer en temperatuur. De resolutie van het stromingsmodel is met ongeveer 900 m relatief beperkt, wat bij de uitwisseling met de Waddenzee door de zeegaten

onnauwkeurigheid oplevert. Daarnaast wordt de interactie tussen golven en stroming niet meegenomen. Door deze modelbeperkingen worden de zandtransporten onderschat.

De gemeten golfcondities over dezelfde periode 2013-2017 worden op basis van windrichting en bodemligging getransformeerd naar ieder locatie langs de Nederlandse kust.

3.3.2 Resultaat periode tot 2035

Met het DLSP zijn de jaarlijkse netto kustdwarse zandtransporten over de NAP -20 m, NAP -18 m en NAP -16 m contouren berekend voor de vijf jaren in de periode 2013-2017. Van de vijf jaarwaarden is het gemiddelde bepaald en de standaarddeviatie. De jaarlijkse transporten zijn bepaald voor de hele kust en voor de 19 onderscheiden deelgebieden. In deze paragraaf worden alleen de waarden voor de hele kust getoond. De waarden voor de deelgebieden worden in het overzicht in paragraaf 4.1 getoond.

De referentiesimulatie is een simulatie met een uniforme mediane korrelgrootte van 0,25 mm en zonder het meenemen van retourstroming door het breken van golven. Op deze referentie zijn enkele gevoeligheidsvariaties toegepast zoals een 10% grotere uniforme mediane korrelgrootte van 0,275 mm, het wel meenemen van retourstroming en een representatieve 1 in 100 jaar storm. De netto kustdwarse zandtransporten van alle modelsommen worden getoond in Tabel 3.2.

De tabel laat zien dat de berekende netto zandtransporten op de Nederlandse diepe vooroever landwaarts zijn. Dit is vergelijkbaar met Van Rijn (1997). De landwaartse transporten worden onder andere veroorzaakt door dichtheidsverschillen die bij de bodem een landwaartse stroming aandrijven. Wanneer de dichtheidseffecten niet worden meegenomen is totale landwaartse zandtransport lager, maar nog steeds landwaarts gericht. Verwezen wordt naar Deltares (2020) voor een uitgebreidere beschrijving van de modelresultaten.

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

3.3.3 Resultaat periode 2035-2100

Zeespiegelstijging heeft geen effect op de morfodynamiek van de diepe vooroever en daarom kan voor de periode 2035-2100 dezelfde analyse als voor de periode tot 2035 worden aangehouden.

Een verandering in het stormklimaat kan van invloed zijn. Dit is hier buiten beschouwing gelaten.

3.3.4 Onzekerheden

De *grootte* van het landwaartse zandtransport op de diepe vooroever kan niet gegeven worden vanwege grote onzekerheden:

- De gemiddelde landwaartse transporten en bandbreedtes zijn bepaald op basis van een beperkt aantal modelberekeningen. Zo is bijvoorbeeld het effect van de gehanteerde zandtransportformulering of bodemruwheid niet onderzocht. Een vuistregel voor de onzekerheid van berekende zandtransporten is een factor 2 (zie Van Rijn, 2007a,b). Van Rijn (1997) geeft zelfs een bandbreedte van $\pm 100\%$ op zijn kustwaartse zandtransporten op 20 m waterdiepte.
- Een praktische onzekerheid zit in de definitie van de kusthoek, ofwel het ontbinden van het zandtransport in een kustlangse en kustdwarse richting. Omdat het kustlangse transport veel groter is dan het kustdwarse transport, kan een iets andere definitie van de kusthoek tot wel tientallen procenten schelen in het kustdwarse transport.
- De multibeamopnames die in het kader van Kustgenese 2.0 zijn gemaakt, laten lokaal sporen van zeewaarts transport zien tot circa NAP -18 m. Dergelijke sporen waren tot nu toe onbekend en ook de oorzaak is niet bekend.
- Tenslotte zorgen zware noordwesterstormen met een mogelijk sterke zeewaartse stroming voor grote zeewaartse zandtransporten. Deze stormen zijn niet meegenomen in de berekening.

De landwaartse *richting* van het zandtransport is vrij zeker. Net als in dit onderzoek berekende Van Rijn (1997) voor vier raaien langs de Hollandse kust een netto landwaarts transport. Ook analyse van langjarige vaklodingendata geeft een erosieve trend van de diepe onderwateroever van ~ 1 cm/jaar (Vermaas *et al.*, 2015).

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 wanneer ze optreden is nog onbekend.

Vanwege de onmogelijkheid de grootte van de zandtransporten vast te stellen wordt geadviseerd om in de rekenregel geen rekening te houden met netto zandtransport over de grens van het kustfundament.

3.4 Transport naar de Waddenzee

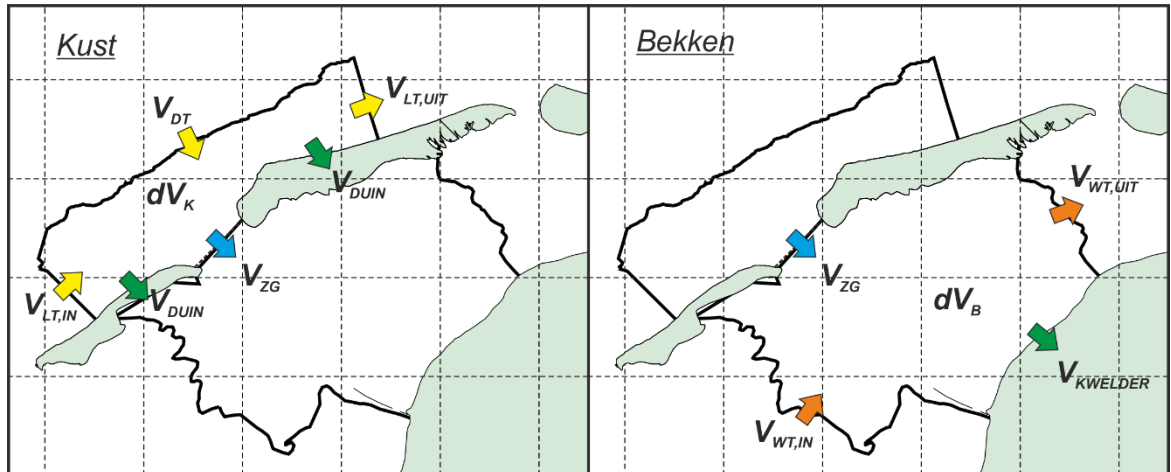
3.4.1 Samenvatting van de aanpak

Voor de periode tot 2035 wordt uitgegaan van voortzetting van de huidige zeespiegelstijging. Het zandtransport naar de Waddenzee wordt daarom afgeleid uit een op data gebaseerd sedimentbalansmodel onder de aanname dat het recente zandtransport zich zal voortzetten tot

2035. Voor de periode 2035-2100 wordt een modelvoorspelling met ASMITA gedaan inclusief scenario's voor versnelde zeespiegelstijging tot 2100. Beide aanpakken worden hieronder nader toegelicht. Zie Elias en Wang (2020) voor een volledige beschrijving.

Sedimentbalansmodel voor de periode tot 2035

Een geschematiseerde weergave van het "sediment-delend systeem" wordt gegeven in Figuur 3.2 en vormt de basis voor de sedimentbalansmodellen. Het conceptueel model geeft een samenvatting van alle winst- en verliesposten per zeegat. De blauwe pijl geeft het sedimenttransport door het zeegat weer. Dit is de term waarnaar het Kustgenese 2.0 onderzoek op zoek is.



Figuur 3.2 Conceptuele uitwerking van een sedimentbalansmodel voor de kust (links) en voor het bekken (rechts)

De gemeten bodemverandering in het bekken (dV_B) is in principe een simpele optelsom van de verschillende winst- en verliesposten zoals samengevat in onderstaande vergelijking:

$$dV_B = (dV_{SUB} + dV_{SUB_GAS/ZOUT}) + V_{IN} - V_{UIT}$$

met

$$V_{IN} = V_{INLET} + V_{WT,IN} + V_{STORTEN}$$

$$V_{UIT} = V_{WT,UIT} + V_{BAGGEREN} + V_{ZANDWINNING} + V_{SCHELPEWINNING} + V_{KWELDER}$$

Hierin is:

dV_B	= gemeten volumeverandering van het bekken
dV_{SUB}	= natuurlijke bodemdaling in het bekken
$dV_{SUB_GAS/ZOUT}$	= bodemdaling door de winning van gas en zout
V_{INLET}	= netto transport door het zeegat
$V_{WT,IN / UIT}$	= netto transport (in of uit) over de wantijen
$V_{STORTEN}$	= volumetoename door storten van sediment
$V_{BAGGEREN}$	= volumeverlies door baggeren van sediment
$V_{ZANDWINNING}$	= volumeverlies door zandwinning
$V_{SCHELPEWINNING}$	= volumeverlies door schelpenwinning
$V_{KWELDER}$	= volumeverlies door netto transport naar de kwelders

Het sedimentbalansmodel deelt de Waddenzee op in morfologische eenheden. De wantijen worden als afbakening van een kombergingsgebied beschouwd. Voor ieder zeegat kan de sedimentbalans voor het bekken worden beschreven en het transport door het zeegat worden bepaald (Figuur 3.2).

Voor de Eems-Dollard kan deze aanpak niet gevolgd worden, omdat onvoldoende (betrouwbare) data beschikbaar zijn. Voor het Eems-Dollard estuarium wordt daarom gebruik gemaakt van beschikbare literatuurbronnen.

ASMITA voor de periode 2035-2100

Een voorspelling van de toekomstige sedimentbehoefte van de Waddenzee is verkregen door toepassing van het ASMITA model (Stive *et al.*, 1998; Stive en Wang, 2003; Townend *et al.*, 2016). ASMITA is een geaggregeerd morfodynamisch model voor zeegatsystemen. Het gebruikt geaggregeerde parameters zoals getijslag en getijprisma en empirische relaties om het morfologische evenwicht te bepalen. Een zeegatsysteem is geschematiseerd in drie morfologische elementen: de buitendelta, de geulen binnen het bekken en de platen in het bekken.

De ASMITA modellen zijn geoptimaliseerd volgens de laatste inzichten. Voor de zeegaten Marsdiep, Eierlandse Gat, Zeegat van het Vlie, Amelander Zeegat, en de zeegaten Zoutkamplaag en Pinkegat zijn ASMITA modelschematisaties gemaakt en afgeregeld (Wang en Lodder, 2019). Voor het Groninger Wad en de Eems-Dollard is geen ASMITA model beschikbaar.

Modelsimulaties zijn uitgevoerd over de periode 2000-2100 onder vier zeespiegelstijgingsscenario's: 2, 4, 6 en 8 mm/j. Het 2 mm/j scenario komt overeen met voortzetting van de huidige zeespiegelstijging. In de drie andere scenario's begint de versnelling vanaf 2020. De versnelling is lineair en bereikt de eindsnelheid in respectievelijk 2050, 2060 en 2070.

Het ASMITA modelresultaat voor de periode 2000-2020 wordt vergeleken met de sedimenttransporten uit het sedimentbalansmodel. Omdat het sedimenttransport op basis van de gemeten volumeverandering en afgeleid met het sedimentbalans als betrouwbaarder wordt gezien, wordt deze waarde als uitgangspunt genomen voor de huidige situatie. Uit het ASMITA model wordt daarom alleen de trend van verandering overgenomen. De absolute waarde uit het ASMITA model wordt gecorrigeerd op basis van de trend van verandering (Elias en Wang, 2020).

3.4.2 Resultaat periode tot 2035

De huidige volumeverandering van de kombergingsgebieden is afgeleid van de trendlijnen uit bathymetriemetingen. Alle winst- en verliesposten zijn bepaald op basis van data of expert judgement. Het sedimenttransport naar de Waddenzee is vervolgens bepaald door de volumebalans van het bekken op te lossen. Tabel 3.3 geeft de resulterende sediment- en zandtransporten door de zeegaten zoals afgeleid met het sedimentbalansmodel.

Uitwerking van de volumebalans geeft tot 2035 een netto sedimentexport vanuit het kustfundament naar de Waddenzee (exclusief Eems-Dollard) van +5,2 miljoen m³/jaar. Gecorrigeerd voor het percentage slib, waarvoor 8% is aangenomen als midden van de gevonden range van 5% tot 10%¹ (Oost *et al.*, 2018), komt de netto zandimport door de zeegaten van de Waddenzee exclusief Eems-Dollard uit op 4,8 miljoen m³/jaar. Voor de Eems-Dollard is geen volumebalans opgesteld, maar is beschikbare literatuur gebruikt om een geschat zandtransport van +1,2 miljoen m³/jaar af te leiden.

Het grootste zandtransport treedt op door het Zeegat van Texel (+1,9 miljoen m³/jaar). Het Eierlandse Gat transporteert zand van de Waddenzee naar het kustfundament (-0,3 miljoen m³/jaar). Zandtransport door het Zeegat van het Vlie wordt geschat op +1,1 miljoen m³/jaar, door het Zeegat van Ameland op +1,1 miljoen m³/jaar en door het Friesche Zeegat op +0,4 miljoen m³/jaar, en richting het Groninger Wad tenslotte op +0,6 miljoen m³/jaar.

¹ Oost *et al.* (2018) heeft een range van 8% tot 37% bijdrage van slib aan het sedimentatievolume afgeleid voor de Waddenzee inclusief Eems-Dollard. De bijdrage van de Eems-Dollard tikt zwaar aan in de berekening door de aangenomen totale sedimentatie in de Waddenzee (waarvan 50% in de Eems-Dollard) en het slibrijke oppervlak (waarvan 35% in de Eems-Dollard). Dezelfde berekening exclusief de Eems-Dollard en met de in dit Technisch Advies gehanteerde waarde van zeespiegelstijging komt uit op een range van 5 tot 10%. 8% is het midden van deze range.

De bandbreedte rond de zandtransporten (exclusief Eems-Dollard) is bepaald op 18% door voor alle termen van de volumebalans een boven- en een ondergrens in te schatten en vervolgens de volumebalans op te lossen. Dit levert 81 uitkomsten voor het zandtransport door de zeegaten. De range van uitkomsten heeft een standaarddeviatie van 18%, ofwel $\pm 0,9$ miljoen m^3 /jaar. Het zandtransport naar de Eems-Dollard heeft een grote onzekerheid, omdat de sedimentbalans in het estuarium erg complex is door de interactie van zand en slib, de bagger- en stortactiviteiten en de zandwinning, en de Nederlands-Duitse grens. Een grove raming op basis van een spreiding rondom het aangenomen slibpercentage en de verhouding tussen transport uit de Nederlandse en Duitse kustzone komt uit op $\pm 0,8$ miljoen m^3 /jaar.

Tabel 3.3 Overzicht van de zandtransporten door de zeegaten op basis van volumebalansen en aangevuld met Groninger Wad en Eems-Dollard op basis van expert judgement; onder de aanname van een slibpercentage in het bekken van 0% en 8% van de volumes. De standaarddeviatie is 18%. Let op de afwijkende aanname voor de Eems-Dollard.

Zeegat	Zand transport [miljoen m^3 /jaar] 0% slib		Zand transport [miljoen m^3 /jaar] 8% slib	
Texel	+1,98	$\pm 0,35$	+1,88	$\pm 0,34$
Eierlandse Gat	-0,32	$\pm 0,06$	-0,29	$\pm 0,05$
Vlie	+1,18	$\pm 0,21$	+1,07	$\pm 0,19$
Ameland	+1,23	$\pm 0,22$	+1,11	$\pm 0,20$
Frische Zeegat	+0,45	$\pm 0,08$	+0,42	$\pm 0,08$
Groninger Wad	+0,63	$\pm 0,11$	+0,58	$\pm 0,10$
Totaal	+5,15	$\pm 0,93$	+4,75	$\pm 0,85$
Eems-Dollard	-*	-	1,2*	$\pm 0,8^*$

* Afwijkende benadering en hoger slibpercentage

3.4.3 Resultaat periode 2035-2100

Tabel 3.4 geeft de resultaten van de ASMITA modellering gecorrigeerd op basis van de vergelijking met het sedimentbalansmodel voor de verschillende kombergingsgebieden, exclusief Groninger Wad en Eems-Dollard estuarium. Uit de analyse volgt dat bij voorzetting van de huidige zeespiegelstijging het zandtransport naar de Waddenzee (exclusief Groninger Wad en Eems-Dollard) daalt naar 3,3 miljoen m^3 /jaar in 2100. De transportcapaciteit is voldoende om deze zeespiegelstijging bij te houden, waardoor de Waddenzee langzaam gemiddeld iets ondieper wordt.

Bij het hoogste zeespiegelstijgingsscenario van 8 mm per jaar wordt in 2100 een toename van 40% verwacht tot 5,8 miljoen m^3 /jaar ten opzichte van de huidige zandtransport naar de Waddenzee (exclusief Groninger Wad en Eems-Dollard). De toename is relatief gering, omdat de zeegatsystemen vertraagd reageren op de verandering van zeespiegelstijging. De vertraging is groter voor de zeegaten met grotere bekkens en met een sedimenttekort door ingrepen in het verleden (afsluiting Zuiderzee en Lauwerszee). Door de lange morfologische tijdschaal is het morfologisch evenwicht in 2100 nog niet bereikt en zal de zandimport na 2100 nog verder toenemen. Hoeveel en hoe lang nog is niet in deze studie onderzocht.

De versnelling van de zeespiegelstijging is in de modelscenario's vanaf 2020 opgelegd. De modelresultaten laten zien dat verschillen in zandtransport door de zeegaten pas merkbaar worden in 2030 in de kleine systemen van het Pinkegat en Eierlandse Gat en pas aan het eind van de eeuw in het grote zeegatsysteem van het Zeegat van Texel, waarvan bekend is dat de zandimport

transport-gelimiteerd is. De veranderingen van de zandimport ten opzichte van de huidige situatie zijn relatief klein. Voor de Waddenzee als geheel (exclusief Groninger Wad en Eems-Dollard) neemt voor alle zeespiegelstijgingsscenario's de totale zandimport eerst af in de tijd door het dempen van de verstoringen door de ingrepen in het verleden. De versnelling van zeespiegelstijging buigt deze afnemende trend om, maar niet vóór 2050. Tot 2060 zijn de verschillen niet significant.

Tabel 3.4 Overzicht van de zandtransporten door de zeegaten (in miljoen m³/j; exclusief Groninger Wad en Eems-Dollard estuarium) in 2100 voor verschillende zeespiegelstijgingsscenario's gebaseerd op de door ASMITA berekende trend en de huidige trend uit de sedimentbalans. Positief = sedimenttransport naar de Waddenzee en Negatief = sedimenttransport naar de kustzone.

Zeegat	Huidig	Zandtransport in 2100 (miljoen m ³ /jaar)			
		2 mm/j	4 mm/j	6 mm/j	8 mm/j
Texel	1,9	1,3	1,4	1,5	1,6
Eierlandse Gat	-0,3	-0,4	-0,1	0,1	0,3
Vlie	1,1	0,8	1,1	1,2	1,3
Ameland	1,1	1,2	1,4	1,6	1,7
Friesche Zeegat (Pinkegat + Zoutkamp)	0,4	0,4	0,5	0,7	0,9
Totaal	4,2	3,3	4,3	5,1	5,8

3.4.4 Onzekerheden

De op metingen en trendanalyses gebaseerde sedimentbalans van de Waddenzee laat een consistent en betrouwbaar beeld zien. De onzekerheid voor de periode tot 2035 is klein en komt tot uitdrukking in de gehanteerde bandbreedte. De onzekerheid van de bijdrage van slib is eveneens klein met uitzondering van de Eems-Dollard, waar de onzekerheid groot is.

Voor de periode 2035-2100 geven de ASMITA simulaties een begrijpelijk inzicht in het gedrag in reactie op versnelde zeespiegelstijging. Het inzicht dat sedimenttransport naar de Waddenzee traag reageert op zeespiegelstijging door de lange morfologische tijdschaal, wordt goed begrepen. Daarom is er tot de periode 2100 relatief weinig onzekerheid. De simulaties laten echter ook zien dat het morfologisch evenwicht in 2100 niet bereikt is als de zeespiegel stijgt of blijft versnellen.

3.5 Uitwisseling met de Westerschelde

3.5.1 Samenvatting van de aanpak

Voor deze term is gebruik gemaakt van beschikbare literatuur en van (in afronding zijnd) onderzoek in het kader van VNSC Onderzoek en Monitoring (Elias *et al.*, in voorbereiding).

3.5.2 Resultaat periode tot 2035

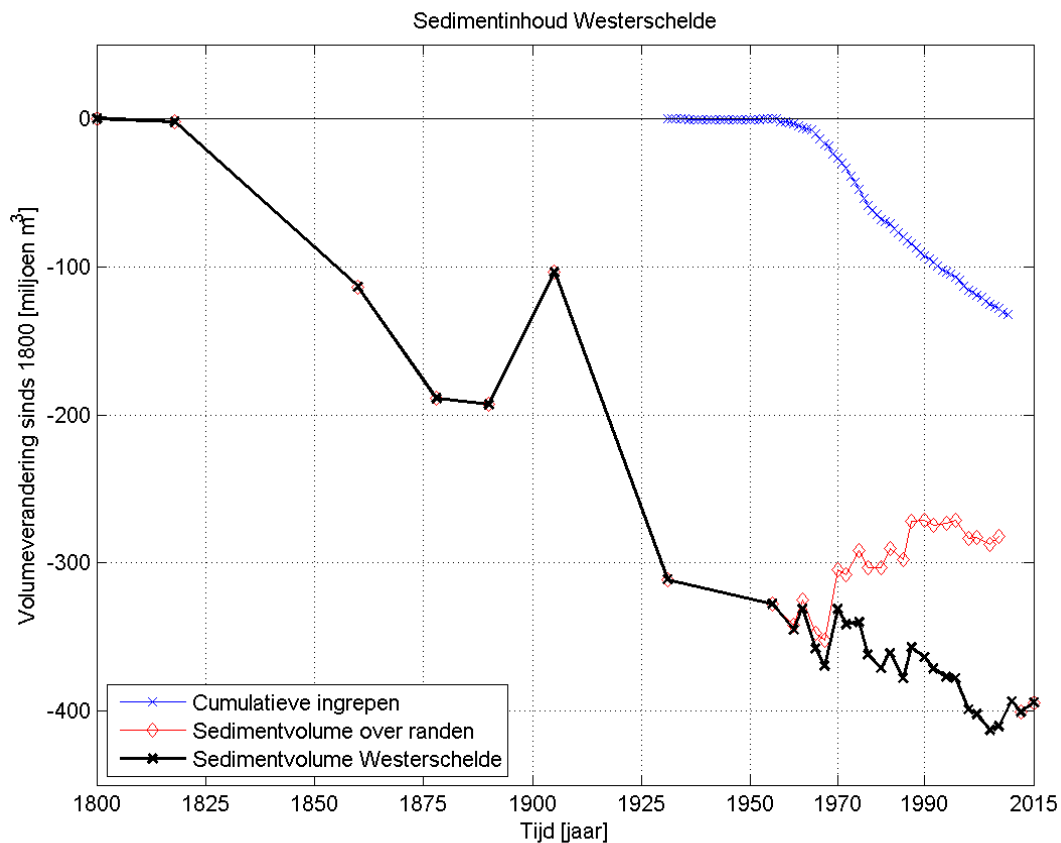
De zanduitwisseling tussen het kustfundament en de Westerschelde wordt afgeleid uit beschikbare sedimentbalansstudies, met onderscheid tussen zand en slib. Dergelijke studies zijn gebaseerd op (een combinatie van) metingen van de bodemligging en sedimenttransportberekeningen met numerieke modellen.

Figuur 3.1 toont de ontwikkeling van de sedimentinhoud van de Westerschelde binnen de huidige contouren van 1800 tot 2015 (Dam, 2017). Figuur 3.2 toont dezelfde ontwikkeling over een kortere periode tot en met 2017 met 1970 als referentiejaar (Elias *et al.*, in voorbereiding). Uit Figuur 3.1

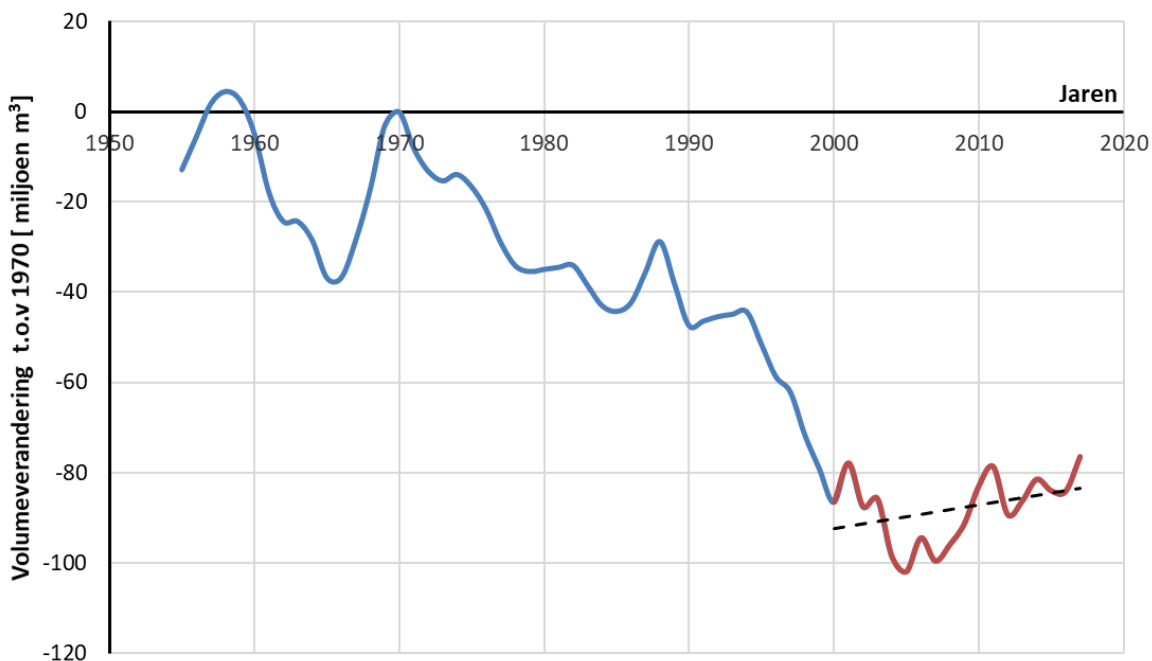
blijkt dat de Westerschelde over een termijn van ruim twee eeuwen uitruimt, ofwel dat de sedimentinhoud afneemt. Voor een verwachting tot 2035 wordt de beschouwing beperkt tot de recentere periode, aannemende dat die representatiever is voor het vaststellen van de huidige trend.

Dam (2017) leidde af dat tussen 1955 en 2013 de uitruiming circa 1 miljoen m³/jaar bedroeg (zwarte lijn in Figuur 3.1), terwijl in deze periode ongeveer 2 miljoen m³/jaar zandwinning plaatsvond (blauwe lijn in Figuur 3.1). Van de 2 miljoen m³/jaar zandwinning is dus maar 1 miljoen m³/jaar terug te zien in de afname van de sedimentinhoud. Om dit gat te dichten, moet er over de periode 1955-2013 gemiddeld sprake zijn van een sedimenttransport van het kustfundament naar de Westerschelde van circa 1 miljoen m³/jaar.

Figuur 3.2 laat zien dat er geen constante verandering van sedimenthoud is; er is variatie van jaar tot jaar. De keuze van het begin- en eindjaar is relevant voor het bepalen van de trend. Vanaf begin jaren 2000 lijkt er sprake van een trendbreuk: het sedimentvolume vertoont een stijgende trend (zie Figuur 3.2). Tussen 2000 en 2017 sedimenteerde de Westerschelde met ongeveer 0,5 M m³/jaar, afwijkend van eerdere periodes die consequent een verruiming van de Westerschelde laten zien. Als bovenop deze sedimenttoename in de Westerschelde wordt uitgegaan van (a) een sedimentverlies naar de Zeeschelde van 1 miljoen m³/jaar (vergelijkbaar met Consortium Deltares *et al.*, 2013a), (b) geen zandwinning (deze is in 2011 stopgezet) en (c) het volledig terugstorten van het gebaggerde sediment in de Westerschelde, is er een gemiddelde sedimenttransport van 1,5 miljoen m³/jaar van het kustfundament naar de Westerschelde. Dit is zand en slib samen.



Figuur 3.1 Ontwikkeling sedimentvolume (zand en slib) binnen de huidige contour van de Westerschelde ten opzichte van 1800. Het sedimentvolume over de randen volgt door de cumulatieve ingrepen (zandwinning) van de gemeten sedimentvolumes af te trekken. Figuur afkomstig uit Dam (2017).



Figuur 3.2 Ontwikkeling sedimentvolume van de Westerschelde vanaf 1955 met 1970 als referentiejaar (= nul). Tussen 2000 en 2017 is er sprake van een licht sedimenterende trend van 0,5 miljoen m^3 /jaar (Elias et al., in voorbereiding).

Tabel 3.5 inventariseert sedimentbalansstudies waarin de sedimentuitwisseling tussen kustfundament en Westerschelde is bepaald. De sedimentbalansen laten een zekere variatie zien, waarbij de beschouwde periode relevant is. De twee beschikbare periodes met onderscheid tussen zand en slib resulteren in slibimport en zandexport (Tabel 3.5). Echter, voor de recente periode na 2000 is het onderscheid tussen slib en zand niet beschikbaar.

Tabel 3.5 Slib- en zanduitwisseling over de grens Vlissingen-Breskens in verschillende sedimentbalansstudies (positief is import van Voordelta naar Westerschelde)

Studie	Periode	Sedimentuitwisseling (miljoen m ³ /jaar)	Slibuitwisseling (miljoen m ³ /jaar)	Zanduitwisseling (miljoen m ³ /jaar)
Consortium Deltares <i>et al.</i> (2013a)	1955-1976	+1 tot +5	niet bekend	niet bekend
	1976-1994	+3 tot +5	niet bekend	niet bekend
	1992-2000	+0,2	+0,7	-0,5
	1994-2010	+0,7	niet bekend	niet bekend
Dam (2017)	1860-1955	-0,8/-0,9	+0,6/+1,5	-1,4/-2,4
Elias <i>et al.</i> (in voorb.)	2000-2017	+1,5	niet bekend	niet bekend

Voor de periode tot 2035 wordt de recente trend vanaf 2000 als meest representatief gezien. Dat betekent dat uitgegaan wordt van een voortzetting van de trendbreuk. Uitgaande van een verwachte slibtransport van 0,5-1,5 miljoen m³/jaar gelijk aan de range uit beschikbare sedimentbalansstudies hoewel deze van periodes voor 2000 zijn, wordt voor de periode 2035 een zandtransport van kustfundament naar Westerschelde verwacht van 0 tot 1 miljoen m³/jaar.

3.5.3 Resultaat periode 2035-2100

De sedimentuitwisseling verandert bij een versnelde zeespiegelstijging en bij aanpassingen in het sedimentbeheer, zowel van het Schelde-estuarium als de kusten van Walcheren en Zeeuws-Vlaanderen. Het gedrag van de Westerschelding-monding, zeewaarts van Vlissingen, is daarbij belangrijk. De aanname daarvoor die past binnen de rekenregel is dat deze evenredig meegroeit met de zeespiegelstijging. Daarnaast is duidelijk dat er flinke bruto transporten over de grens Vlissingen-Breskens mogelijk zijn en dat herverdeling van zand tussen Westerschelde en monding plaatsvindt. Omdat de oppervlakte van de monding veel groter is dan het westelijke deel van de Westerschelde is de sedimentvraag in de monding door (snellere) zeespiegelstijging groter en is een netto transport van Westerschelde naar monding een aannemelijke hypothese. Dit is bevestigd door modelonderzoeken (Consortium Deltares, IMDC, Svašek & Arcadis, 2013c; Rübke *et al.*, in prep.). Door het intensieve sedimentbeheer en de aanpassingen van de Westerschelde op veranderingen in het verleden is het effect van zeespiegelstijging op het netto transport tussen Westerschelde en monding tot nu toe nauwelijks zichtbaar geweest.

Dit alles in ogenschouw nemend gaat Deltares er voor de periode na 2035 van uit dat de sedimentuitwisseling tussen kustfundament en Westerschelde richting kustfundament zal verschuiven. Dit betekent, afhankelijk van de mate van versnelling van de zeespiegelstijging, minder netto zand richting Westerschelde, dan wel geen netto uitwisseling van zand of veranderend in netto zand richting kustfundament. De aanname hierbij is dat er geen majeure veranderingen zijn in het sedimentbeheer, in de vorm van kustsuppleties bij de monding en de stortstrategie in de Westerschelde. Met het sedimentbeheer kan veel invloed worden uitgeoefend. Zeker op de lange termijn moeten sedimentbeheer van kustzone en Westerschelde in samenhang beschouwd en uitgevoerd te worden.

3.5.4 Onzekerheden

De langjarige ontwikkeling van het sedimentvolume lijkt rond 2000 een trendbreuk te laten zien. Een verklaring voor de trendbreuk is er nog niet. De aanname dat een voortzetting van de trendbreuk als meest representatief voor de periode tot 2035 wordt gezien, kan niet onderbouwd worden en is daarmee onzeker. Deltares acht dit desalniettemin minder onzeker dan uitgaan van de langjarige ontwikkeling. Ten behoeve van de term in de rekenregel wordt aanbevolen om voor de periode tot 2035 uit te gaan van een zandverlies uit het kustfundament van 0,5 miljoen m³/jaar met een bandbreedte van ±0,5 miljoen m³/jaar.

3.6 Bodemdaling door winning van delfstoffen en grondwater

3.6.1 Samenvatting van de aanpak

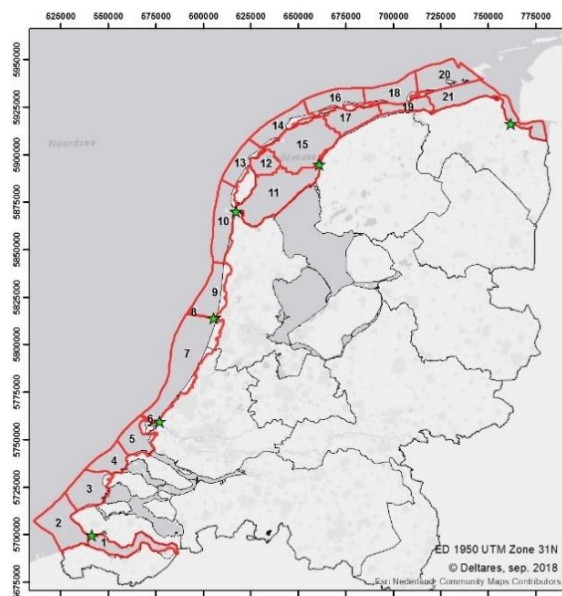
Om de bodemdaling te bepalen, is alle beschikbare informatie, voornamelijk literatuurbronnen, op een rij gezet en geanalyseerd. De verschillende componenten die bijdragen aan bodemdaling zijn uitgesplitst naar natuurlijke, geologische componenten en naar menselijke bijdragen. De beschouwde geologische componenten zijn tektoniek en glacio-isostasie. De beschouwde menselijke bijdrage aan de bodemdaling wordt veroorzaakt door de grootschalige winning van delfstoffen (gas, olie en zout) en van grondwater. De geologische bodemdaling is al meegenomen in de (gemeten) zeespiegelstijging (zie paragraaf 3.1).

3.6.2 Resultaat periode tot 2035

Tabel 3.6 geeft per deelgebied de bodemdaling in het kustfundament door winning van delfstoffen en grondwater. Er is uitgegaan van het huidige oppervlakte van het kustfundament. Uitgaande van de jaarlijkse gemiddelde bodemdalingsvolumes in het kustfundament door winning over de periode 2018-2050 wordt voor de $V_{\text{bodemdaling KF}}$ 0,51 Mm³ per jaar ± 0,26 miljoen m³/jaar aangehouden.

Tabel 3.6 Jaarlijks gemiddelde bodemdalingsvolumes door winning van delfstoffen voor de periode 2018-2050 (Tabel 3.8 uit Hijma en Kooi, 2018)

Gebied	Bodemdalingsvolume door winning ± onzekerheid (miljoen m ³ /jaar)
Westerschelde delta (2)	0 ± 0
Oosterschelde delta (3)	0 ± 0
Grevelingen delta (4)	0 ± 0
Haringvliet delta (5)	0,001 ± 0,001
Maasgeul (6)	0,002 ± 0,001
Zuid-Holland (7)	0,03 ± 0,015
IJgeul (8)	0 ± 0
Noord-Holland (9)	0,091 ± 0,045
Zeegat van Texel (10)	0,015 ± 0,007
Eierlandse Gat (13)	0,004 ± 0,002
Vliestroom (14)	0,038 ± 0,019
Amelander Zeegat (16)	0,028 ± 0,014
Friesche Zeegat (18)	0,295 ± 0,147
Eems Dollard (20)	0,009 ± 0,005
Kustfundament totaal	0,51 ± 0,26



3.6.3 Resultaat periode 2035-2100

Bodemdaling is onafhankelijk van de (scenario's voor) zeespiegelstijging.

Hijma en Kooi (2018) hebben de bodemdaling geraamd voor de periode 2018-2050. Er is geen onderzoek gedaan naar de bodemdaling voorbij 2050.

Het is aannemelijk dat olie- en gaswinning na 2050 (veel) verder afgenomen zullen zijn. Andere winning zoals zout en grondwater is nu een beperkte bijdrage aan de bodemdaling onder het kustfundament. Onbekend is hoe deze bijdrage in de toekomst zal veranderen. Al met al is het een redelijke aanname dat bodemdaling door delfstofwinning onder het kustfundament zal afnemen.

3.6.4 Onzekerheden

De onzekerheid van de term bodemdaling is beperkt. De afzonderlijke componenten van bodemdaling zijn redelijk goed tot goed bekend. De bandbreedte rondom het gemiddelde is op zichzelf vrij groot met circa 50%, maar is in absolute termen ten opzichte van bijvoorbeeld het huidige suppletievolume klein (0,26 miljoen m³/jaar vs. 7 miljoen m³/jaar).

3.7 Transport over de landwaartse grens

Deltares heeft geen onderzoek gedaan naar deze uitwisseling. De huidige aanname dat er geen netto uitwisseling is over de landwaartse grens wordt daarom ongewijzigd overgenomen. Deze aanname wordt betrouwbaar geacht.

3.8 Transporten over de staatsgrenzen met België en Duitsland

Deltares heeft geen onderzoek gedaan naar deze transporten. De huidige aanname dat er geen netto transport is over de gecombineerde staatsgrenzen met België en Duitsland wordt daarom ongewijzigd overgenomen.

Het is zeker dat deze aanname onjuist is, maar kennis ontbreekt voornamelijk voor het kwantificeren van deze transporten.

4 Sedimentbehoefte kustfundament

In dit hoofdstuk wordt een kwantitatief overzicht gegeven van alle termen van de rekenregel voor de sedimentbehoefte voor de periode tot 2035. Vervolgens worden varianten voor de sedimentbehoefte – conform de definitie van de rekenregel - gepresenteerd en worden de onderliggende keuzes onderbouwd en van een reflectie op (on)zekerheid voorzien. Tenslotte wordt een doorkijk gegeven naar 2100 waarbij de afhankelijkheid van de zeespiegelstijging centraal staat.

4.1 Overzicht termen sedimentbehoefte kustfundament tot 2035

Om de sedimentbehoefte van het kustfundament te berekenen moet de rekenregel ingevuld worden. Dit invullen kan zowel voor de verwachte, meest waarschijnlijke waarde als voor de waarde plus of minus de bandbreedte gedaan worden. Voor de duidelijkheid wordt de rekenregel hier nogmaals gegeven:

$$V_{\text{sedimentbehoefte}} = (A_{\text{KF}} \times ZSS_{\text{act}}) + \begin{array}{l} \text{Oppervlakte kustfundament} \times \\ \text{Relatieve Zeespiegelstijging} \\ \text{Zandtransport over de zeewaartse grens} \\ \text{Zandtransport zeegaten Waddenzee} \\ \text{Zandtransport Westerschelde} \\ \text{Bodemdaling gas-/zoutwinning} \\ \text{Zandtransport over landwaartse grens} \\ \text{Zandtransport over landgrenzen België en Duitsland} \end{array} + \begin{array}{l} V_{\text{export zeewaartse grens KF}} \\ V_{\text{export Waddenzee}} \\ V_{\text{export Westerschelde}} \\ V_{\text{bodemdaling KF}} \\ V_{\text{export landwaartse grens}} \\ V_{\text{export landsgrenzen}} \end{array}$$

De zeven termen van de rekenregel zijn onder te verdelen in vier categorieën:

1. Termen waarvoor een waarde van 0 miljoen m³/jaar gebruikt wordt; de bandbreedte is niet bekend:
 - Zandtransport over landwaartse grens
 - Zandtransport over landgrenzen België en Duitsland

Toelichting: Deltares heeft geen onderzoek gedaan naar deze termen. De huidige aanname voor deze termen wordt daarom ongewijzigd overgenomen.

2. Term waarvoor Deltares adviseert een waarde van 0 miljoen m³/jaar aan te nemen, ook al blijkt uit dit rapport dat ze een positieve bijdrage zouden kunnen leveren:
 - Zandtransport over de zeewaartse grens

Toelichting: Er is nog te grote onzekerheid over het netto zandtransport over de zeewaartse grens om een kwantitatieve waarde mee te nemen, onder andere door het niet volledig in beeld hebben van het effect van grote stormen. De landwaartse richting van het transport over de zeewaartse grens is vrij zeker.

3. Termen met een waarde en bandbreedte ongelijk aan 0 miljoen m³/jaar, waarvan Deltares adviseert deze mee te nemen, en waarvan slecht één variant is:
 - Zandtransport zeegaten Waddenzee
 - Bodemdaling gas-/zoutwinning
 - Zandtransport Westerschelde
4. Termen met een waarde en bandbreedte ongelijk aan 0 miljoen m³/jaar waarvan Deltares adviseert deze mee te nemen, en waarvan meerdere varianten zijn:
 - Oppervlakte kustfundament x Zeespiegelstijging

In Tabel 4.1 is alle informatie bij elkaar gezet. Omdat dat een complexe matrix met veel informatie oplevert, volgt hieronder een leeswijzer van Tabel 4.1.

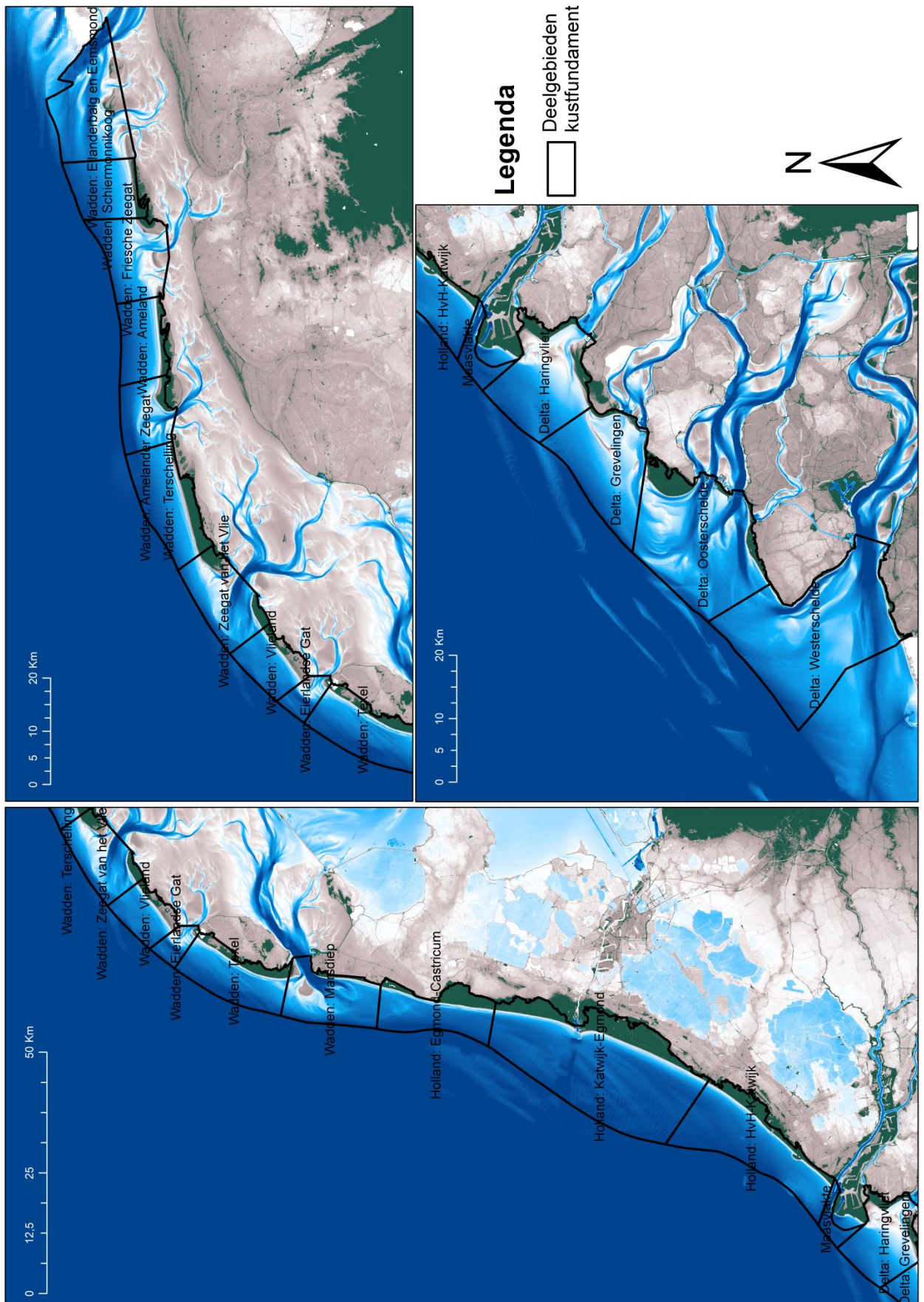
- In de linkerbovenhoek met **grijze arcering** staat de zeespiegelstijging en bandbreedte tot 2035. De bandbreedte is tweezijdig.
- In de eerste kolom staan de individuele termen van de rekenregel genoemd. De omschrijving van de term is **dikgedrukt**. Er wordt altijd een verwachting aangegeven in de 2^e kolom. Waar relevant wordt een tweezijdige *bandbreedte* gegeven.
- De term “Oppervlakte kustfundament × Zeespiegelstijging” is opgebouwd uit een positie van de zeewaartse grens en een (gemodelleerd) transport over de zeewaartse grens. Er worden zes varianten gepresenteerd naast de huidige situatie.
- Bij de overige termen van de rekenregel worden geen varianten gegeven.
- In de overige kolommen worden de bijdrages aan de sedimentbehoefte per deelgebied gegeven, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen:
 - Totale sedimentbehoefte met **paarse arcering**, en
 - Regionale sedimentbehoefte uitgesplit in 19 deelgebieden die voor visuele hulp zijn onderverdeeld in Delta met **blauwe arcering**, Hollandse Kust met **oranje arcering** en Waddenkust met **groene arcering**.
- De deelgebieden voor het kustfundament worden aangehouden (Figuur 4.1). Deze komen niet altijd overeen met de deelgebieden voor bodemdaling. Omdat de bijdrage van bodemdaling klein is, wordt dit als een acceptabele afwijking gezien.
- Negatieve getallen betekenen een sedimentimport naar het kustfundament. Positieve getallen betekenen een sedimentexport uit het kustfundament.
- Een ‘-’ betekent dat de betreffende term niet van toepassing is.
- Een leeg veld betekent dat de betreffende term niet bekend is.
- Getallen zijn zoveel mogelijk met 1 decimaal gegeven. Daar waar te veel informatie of herkenbaarheid wegvalt, worden 2 decimalen gegeven. Dit heeft verder geen betekenis voor de nauwkeurigheid van deze waarde.

Figuur 4.1 toont de gebruikte indeling in deelgebieden langs de Nederlandse kust.

Tabel 4.1 Overzicht van sedimentbehoefte per term van de rekenregel (totaal en regionale uitsplitsing) voor de periode tot 2035 (in miljoen m³/jaar)

			DELTA				HOLLANDSE KUST				WADDENKUST											
Term van de rekenregel	Type	TOTAAL	Westerschelde delta	Oosterschelde delta	Grevelingen delta	Haringvliet delta	Maasgeul	Zuid-Holland Hoek van Holland - Katwijk	Holland Katwijk - Egmond	Noord-Holland Egmond - Callantssoog	Zeegat van Texel Marsdiep	Texel	Eierlandse Gat	Vlieland	Vliestroom	Terschelling	Ameland Zeegat	Ameland	Friesche Zeegat	Schiermonnikoog	Groninger Wad en Eems-Dollard	
Zeespiegelstijging = 1,86 mm/jaar Bandbreedte = ± 0,12 mm/jaar																						
Oppervlakte kustfundament x Zeespiegelstijging																						
	Huidig: Grens NAP -20 m	Verwachting	8,2	0,81	0,66	0,38	0,40	0,07	0,70	1,44	0,39	0,39	0,40	0,09	0,21	0,33	0,37	0,22	0,24	0,33	0,26	0,50
	Bandbreedte		±0,5	0,05	0,04	0,02	0,03	0,00	0,05	0,09	0,03	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
	Transport over zeewaartse grens	Verwachting	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Variant Uniform "200 jaar": Grens NAP -18 m	Verwachting	7,2	0,78	0,64	0,37	0,38	0,07	0,54	1,11	0,32	0,36	0,32	0,08	0,21	0,33	0,30	0,18	0,21	0,31	0,24	0,50
	Bandbreedte		±0,5	0,05	0,04	0,02	0,02	0,00	0,04	0,07	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
	Transport over zeewaartse grens	Verwachting	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Variant Uniform "50 jaar met onzekerheidsmarge": Grens NAP -16,5 m	Verwachting	6,4	0,77	0,63	0,35	0,36	0,07	0,42	0,71	0,28	0,35	0,28	0,07	0,20	0,31	0,27	0,17	0,19	0,29	0,20	0,49
	Bandbreedte		±0,4	0,05	0,04	0,02	0,02	0,00	0,03	0,05	0,02	0,02	0,02	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03
	Transport over zeewaartse grens	Verwachting	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Variant Uniform "50 jaar": Grens NAP -15 m	Verwachting	5,8	0,74	0,63	0,32	0,34	0,07	0,35	0,48	0,23	0,33	0,25	0,06	0,18	0,29	0,25	0,16	0,17	0,28	0,18	0,48
	Bandbreedte		±0,4	0,05	0,04	0,02	0,02	0,00	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03
	Transport over zeewaartse grens	Verwachting	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Variant Regionaal "200 jaar"	Verwachting	7,1	0,78	0,64	0,37	0,38	0,07	0,54	1,11	0,32	0,39	0,28	0,09	0,18	0,33	0,25	0,22	0,17	0,33	0,18	0,50
	Bandbreedte		±0,5	0,05	0,04	0,02	0,02	0,00	0,04	0,07	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03
	Transport over zeewaartse grens	Verwachting	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Variant Regionaal "50 jaar met onzekerheidsmarge"	Verwachting	6,3	0,77	0,63	0,35	0,36	0,07	0,42	0,71	0,28	0,37	0,25	0,09	0,13	0,32	0,21	0,19	0,14	0,32	0,14	0,50
	Bandbreedte		±0,4	0,05	0,04	0,02	0,02	0,00	0,03	0,05	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03
	Transport over zeewaartse grens	Verwachting	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Variant Regionaal "50 jaar"	Verwachting	5,6	0,74	0,63	0,32	0,34	0,07	0,35	0,48	0,23	0,36	0,23	0,08	0,08	0,33	0,17	0,18	0,11	0,31	0,12	0,50
	Bandbreedte		±0,4	0,05	0,04	0,02	0,02	0,00	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00
	Transport over zeewaartse grens	Verwachting	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Term van de rekenregel	Type	TOTAAL	Westerschelde delta	Oosterschelde delta	Grevelingen delta	Haringvliet delta	Maasgeul	Zuid-Holland Hoek van Holland - Katwijk	Holland Katwijk - Egmond	Noord-Holland Egmond - Callantsoog	Zeegat van Texel Marsdiep	Texel	Eierlandse Gat	Vlieland	Vlietstroom	Terschelling	Amelander Zeegat	Ameland	Friesche Zeegat	Schiermonnikoog	Groninger Wad en Eems-Dollard
Transport Zeegaten Waddenzee (excl. Eems-Dollard)	Verwachting	4,8	-	-	-	-	-	-	-	-	1,88	-	-0,29	-	1,07	-	1,11	-	0,42	-	0,58
	<i>Bandbreedte</i>	$\pm 0,86$	-	-	-	-	-	-	-	-	0,34	-	-0,05	-	0,19	-	0,20	-	0,08	-	0,10
Transport Eems-Dollard	Verwachting	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,2
	<i>Bandbreedte</i>	$\pm 0,8$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8
Bodemdaling delfstofwinning	Verwachting	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,09	0,02	-	0,00	-	0,04	-	0,03	-	0,30	-	0,01
	<i>Bandbreedte</i>	$\pm 0,26$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,05	0,01	-	0,00	-	0,02	-	0,01	-	0,15	-	0,01
Transport Westerschelde	Verwachting	0,5	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Bandbreedte</i>	$\pm 0,5$	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Landsgrens België	Verwachting	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Landsgrens Duitsland	Verwachting	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Landwaartse grens	Verwachting	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0



Figuur 4.1 Verdeling van het kustfundament in deelgebieden

4.2 Varianten sedimentbehoefte kustfundament tot 2035

Figuur 4.2 toont de totale sedimentbehoefte opgebouwd uit de vier termen van de rekenregel met een waarde en bandbreedte ongelijk aan 0 miljoen m³/jaar. Voor de term “Oppervlakte kustfundament x Zeespiegelstijging” worden de zes varianten getoond naast de huidige situatie. De term Transport Zeegaten Waddenzee is inclusief de Eems-Dollard. Figuur 4.2 laat ook de bandbreedte zien, waarbij de bandbreedtes van de individuele termen eenvoudigweg bij elkaar zijn opgeteld. Alle waarden staan in Tabel 4.2.

Figuur 4.2 en Tabel 4.2 leren het volgende:

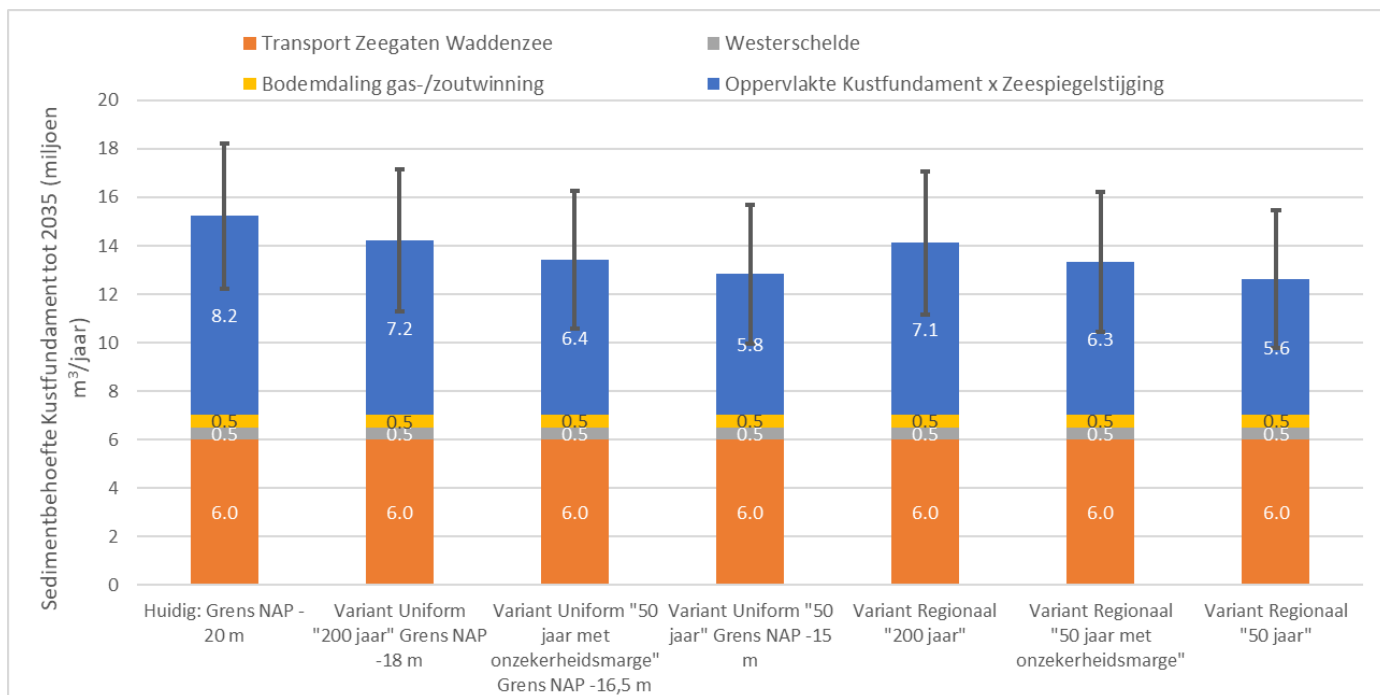
1. De term “Oppervlakte kustfundament x zeespiegelstijging” levert meestal de grootste bijdrage aan de sedimentbehoefte van het kustfundament tot 2035. Bij een kleinere oppervlakte van het kustfundament is de bijdrage van het transport naar de Waddenzee van gelijke grootte.
2. De term “Oppervlakte kustfundament x zeespiegelstijging” heeft tot 2035 de kleinste bandbreedte, gelijk aan de bandbreedte rondom de relatieve zeespiegelstijging.

De bandbreedte van de term Zeegaten Waddenzee zorgt voor ongeveer de helft van de totale bandbreedte en levert daarmee de grootste bijdrage aan de totale bandbreedte. De bandbreedte rondom het transport naar de Eems-Dollard is daarbinnen weer het grootst, want is ongeveer even groot als de bandbreedte voor de andere zeegaten samen.

De bandbreedte van de term Bodemdaling is met 50% relatief groot, maar is in absolute zin relatief klein. De bandbreedte voor de term Westerschelde bepaalt eveneens een kwart van de totale bandbreedte, hoewel de term zelf maar een klein deel is van de totale sedimentbehoefte.

3. De totale bandbreedte is rond 20% van de totale sedimentbehoefte, wat als klein gezien wordt.
4. Het verschil in sedimentbehoefte tussen de hoogste en laagste variant voor het kustfundament tot 2035 is 1,6 miljoen m³/jaar (variant uniform “200 jaar” vs. variant Regionaal “50 jaar”).

In Hoofdstuk 5 geeft Deltares technisch advies over de toepassing van deze uitkomsten.



Figuur 4.2 Sedimentbehoefte van het kustfundament tot 2035 (in miljoen m³/jaar). De balken geven de verwachte bijdrage per term. De zwarte lijn geeft de tweezijdige bandbreedte aan voor de vier termen gecombineerd.

Tabel 4.2 Sedimentbehoefte van het kustfundament en bandbreedte tot 2035 (in miljoen m³/jaar).

Sedimentbehoefte en bandbreedte in miljoen m ³ /jaar	Variant (Oppervlakte kustfundament x Zeespiegelstijging)						
	Huidig: Grens NAP -20 m	Variant Uniform "200 jaar" Grens NAP -18 m	Variant Uniform "50 jaar met onzekerheidsmarge" Grens NAP -16,5 m	Variant Uniform "50 jaar" Grens NAP -15 m	Variant Regionaal "200 jaar"	Variant Regionaal "50 jaar met onzekerheidsmarge"	Variant Regionaal "50 jaar"
Oppervlakte kustfundament x Zeespiegelstijging	8,2 ± 0,5	7,2 ± 0,5	6,4 ± 0,4	5,8 ± 0,4	7,1 ± 0,5	6,3 ± 0,4	5,6 ± 0,4
Transport Zeegaten Waddenzee	6,0 ± 1,7 (waarvan 1,2 ± 0,8 voor Eems-Dollard)						
Bodemdaling delfstoffen / grondwater	0,5 ± 0,3						
Transport zeewaartse grens	0						
Transport Westerschelde	0,5 ± 0,5						
Transport landsgrenzen België en Duitsland	0						
Transport landwaartse grens	0						
TOTAAL	15,2 ± 3,0	14,2 ± 2,9	13,4 ± 2,9	12,8 ± 2,9	14,1 ± 3,0	13,3 ± 2,9	12,6 ± 2,8

4.3 Onzekerheden tot 2035

In hoofdstuk 3 is per term van de rekenregel de (on)zekerheid aangegeven. In de vorige paragraaf is aangegeven dat de bandbreedte rondom de totale sedimentbehoefte van het kustfundament tot 2035 als klein gezien wordt. Deze paragraaf bespreekt de onzekerheden rondom de totale sedimentbehoefte.

Het oppervlakte van het kustfundament is een geografische afbakening en levert daarmee geen onzekerheid op. De oppervlakte is afhankelijk van de keuze voor de positie van de zeewaartse grens. Op deze keuze wordt in Hoofdstuk 5 teruggekomen.

De relatieve zeespiegelstijging en het transport naar de Waddenzee (exclusief Eems-Dollard) zijn bepaald aan de hand van langjarige metingen. In beide gevallen laten de metingen over een periode van tientallen jaren een consistente trend zien. Dit technisch advies stelt dat deze trend gehanteerd kan worden voor de komende vijftien jaar. Klimaatverandering zal op deze termijn nog niet voor substantiële afwijkingen kunnen zorgen. Door de langjarige metingen kan ook de bandbreedte goed vastgesteld worden. Zowel de meest waarschijnlijke waarde als de bandbreedte van deze twee termen worden daarom als voldoende zeker beoordeeld.

De zandtransporten naar de estuaria Westerschelde en Eems-Dollard zijn onzeker. Voor de Westerschelde gaven eerdere studies zandtransport van Westerschelde naar kustfundament aan. De meest recente studie (Elias *et al.*, in voorbereiding) wijst op zandtransport van kustfundament naar Westerschelde. Voor de Eems-Dollard is het zandtransport gebaseerd op beperkte gegevens en grote aannames (verhouding zand:slib, verhouding Nederland:Duitsland). In beide gevallen is het opgenomen zandtransport de best mogelijke schatting op basis van de huidige inzichten, maar beide zijn met grote onzekerheid omgeven. Dit geldt in sterkere mate voor de Eems-Dollard dan voor de Westerschelde.

De bijdrage van bodemdaling door delfstofwinning en grondwateronttrekking is grotendeels op modelresultaten gebaseerd. Onder het kustfundament is de bodemdaling niet te meten, omdat de daling (op zijn minst deels) opgevuld wordt met sediment. Op het land is bodemdaling wel te meten en deze metingen worden gebruikt om de modellen te toetsen. De verwachte waarde wordt daarom als voldoende zeker beoordeeld. De zekerheid wordt daarnaast ook als voldoende beschouwd, omdat de bijdrage van bodemdaling maximaal 5% van de totale sedimentbehoefte tot 2035 is.

Van drie termen in de rekenregel wordt de bijdrage aan de sedimentbehoefte van het kustfundament tot 2035 gelijkgesteld aan 0 m³/jaar: Transport over de zeewaartse grens, Transport over de staatsgrenzen en Transport over de landwaartse grens.

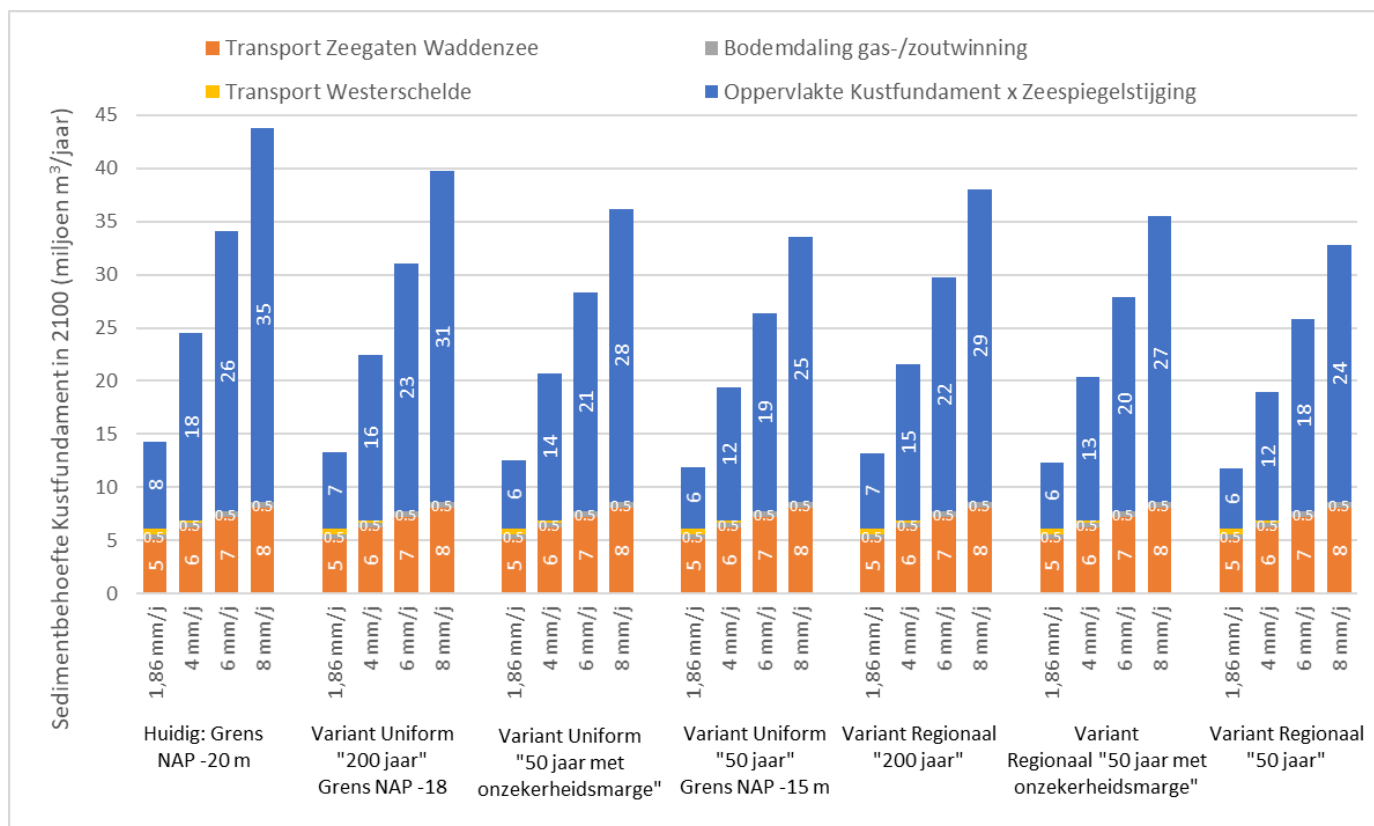
Van deze drie termen zit de grootste onzekerheid bij de grootte van het Transport over de zeewaartse grens. De landwaartse richting van dit transport wordt als aannemelijk beoordeeld. Anders gezegd, er zijn geen aanwijzingen voor een netto zeewaarts verlies van sediment uit het kustfundament. Het wordt daarom als voldoende zeker beschouwd dat er geen onderschatting van de sedimentbehoefte van het kustfundament tot 2035 optreedt door het gelijkstellen aan 0 m³/jaar.

De overige twee termen, Transport over de staatsgrenzen en Transport over de landwaartse grens, zijn niet door Deltares onderzocht. Van het transport over de staatsgrenzen kan met vrij grote zekerheid aangenomen worden, dat deze geen nul is. Wat de grootte van het netto zandtransport over de staatsgrenzen wel moet zijn, is niet bekend.

Samenvattend geldt dat zowel de meest waarschijnlijke waarde als de bandbreedte voor de sedimentbehoefte van het kustfundament tot 2035 voldoende zeker is. De kans van onderschatting van de sedimentbehoefte is klein.

4.4 Doorkijk sedimentbehoefte kustfundament met versnelde zeespiegelstijging tot 2100

Figuur 4.3 toont de sedimentbehoefte van het kustfundament in 2100 voor vier scenario's voor zeespiegelstijging. Uitgangspunt is ongewijzigde toepassing van de rekenregel in alle scenario's. In Tabel 4.3 staan de waarden inclusief regionale uitsplitsing.



Figuur 4.3 Sedimentbehoefte van het kustfundament in 2100 (in miljoen m³/jaar) voor verschillende zeespiegelstijgingsscenario's bij ongewijzigde berekeningswijze. De balken geven de verwachte bijdrage per term.

Figuur 4.3 en Tabel 4.3 leren het volgende:

- De term "Oppervlakte kustfundament x zeespiegelstijging" is dominant in de scenario's. De absolute bijdrage neemt lineair toe met de zeespiegelstijging. De relatieve bijdrage van deze term neemt toe tot 80%-85% van de totale sedimentbehoefte van het kustfundament in 2100.
 - Bij deze berekening is uitgegaan van ongewijzigde wijze van berekenen van de sedimentbehoefte. De validiteit van extrapolatie van (ongewijzigde) toepassing van de rekenregel, bij zeespiegelstijgingsscenario's is niet getoetst of getest. Sterk aanbevolen wordt dergelijke toetsing uit te voeren.
- Het Transport door de zeegaten naar de Waddenzee neemt toe met hogere zeespiegelstijging. De toename is circa 60% ten opzichte van de huidige bijdrage bij 8 mm/j zeespiegelstijging. Transport naar de Eems-Dollard is hierbij gelijk verondersteld, bij gebrek aan kennis. Bij voortzetting van de huidige zeespiegelstijging neemt de relatieve bijdrage af. Dit komt door het verder uitdempen van de effecten van de afsluitingen van Zuiderzee en Lauwersmeer.
- De bijdrage van bodemdaling blijft constant en wordt verwaarloosbaar ten opzichte van een sterk versnelde zeespiegelstijging.

Bij versnelde zeespiegelstijging is de bijdrage van de term “oppervlakte van het kustfundament \times zeespiegelstijging” dominant. Daarom is de sedimentbehoefte van het kustfundament in 2100 ook als zeker te beoordelen binnen de huidige rekenregel en voorbijgaand aan de onzekerheid rondom de mate van zeespiegelstijging. De representativiteit van de rekenregel na 2035 is ook een belangrijke onzekerheid. De bijdrages van Transport naar de Waddenzee en Bodemdaling spelen nauwelijks een rol in de onzekerheid bij (sterk) versnelde zeespiegelstijging.

Tabel 4.3 Overzicht van sedimentbehoefte in 2100 (in miljoen m3/jaar) per zeespiegelstijgingsscenario voor vier termen van de rekenregel (totaal en regionale uitsplitsing). Uitgegaan wordt van ongewijzigde wijze van berekenen van de behoefte (rekenregel blijft geldig).

Term van de rekenregel	Zeespiegelstijging	TOTAAL	DELTA				HOLLANDSE KUST				WADDENKUST												
			Westerschelde delta	Oosterschelde delta	Grevelingen delta	Haringvliet delta	Maasgeul	Zuid-Holland Hoek van Holland - Katwijk	Holland Katwijk - Egmond	Noord-Holland Egmond - Callantssoog	Zeegat van Texel Marsdiep	Texel	Eierlandse Gat	Vlieland	Vliestroom	Terschelling	Amelander Zeegat	Ameland	Friesche Zeegat	Schiermonnikoog	Groninger Wad en Eems-Dollard		
Oppervlakte kustfundament x Zeespiegelstijging																							
	Huidig: Grens NAP -20 m	1,86 mm/j	8,2	0,8	0,7	0,4	0,4	0,1	0,7	1,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,2	0,3	0,3	0,5
	4 mm/j	17,6	1,7	1,4	0,8	0,9	0,1	1,5	3,1	0,8	0,8	0,9	0,2	0,4	0,7	0,8	0,5	0,5	0,7	0,6	1,1		
	6 mm/j	26,4	2,6	2,1	1,2	1,3	0,2	2,3	4,7	1,3	1,3	1,3	0,3	0,7	1,1	1,2	0,7	0,8	1,1	0,8	1,6		
	8 mm/j	35,2	3,5	2,8	1,6	1,7	0,3	3,0	6,2	1,7	1,7	1,7	0,4	0,9	1,4	1,6	1,0	1,0	1,4	1,1	2,1		
	Variant Uniform "200 jaar": Grens NAP -18 m	1,86 mm/j	7,2	0,8	0,6	0,4	0,4	0,1	0,5	1,1	0,3	0,4	0,3	0,1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,5	
	4 mm/j	15,6	1,7	1,4	0,8	0,8	0,1	1,2	2,4	0,7	0,8	0,7	0,2	0,4	0,7	0,6	0,4	0,5	0,7	0,5	1,1		
	6 mm/j	23,3	2,5	2,1	1,2	1,2	0,2	1,8	3,6	1,0	1,2	1,0	0,3	0,7	1,0	1,0	0,6	0,7	1,0	0,8	1,6		
	8 mm/j	31,1	3,3	2,8	1,6	1,6	0,3	2,3	4,8	1,4	1,6	1,4	0,3	0,9	1,4	1,3	0,8	0,9	1,3	1,0	2,1		
	Variant Uniform "50 jaar met onzekerheidsmarge": Grens NAP -16,5 m	1,86 mm/j	6,4	0,8	0,6	0,3	0,4	0,1	0,4	0,7	0,3	0,4	0,3	0,1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,5	
	4 mm/j	13,8	1,6	1,4	0,8	0,8	0,1	0,9	1,5	0,6	0,8	0,6	0,2	0,4	0,7	0,6	0,4	0,4	0,6	0,4	1,1		
	6 mm/j	20,7	2,5	2,0	1,1	1,2	0,2	1,3	2,3	0,9	1,1	0,9	0,2	0,6	1,0	0,9	0,5	0,6	0,9	0,7	1,6		
	8 mm/j	27,6	3,3	2,7	1,5	1,6	0,3	1,8	3,1	1,2	1,5	1,2	0,3	0,8	1,3	1,2	0,7	0,8	1,2	0,9	2,1		
	Variant Uniform "50 jaar": Grens NAP -15 m	1,86 mm/j	5,8	0,7	0,6	0,3	0,3	0,1	0,4	0,5	0,2	0,3	0,3	0,1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,5	
	4 mm/j	12,5	1,6	1,3	0,7	0,7	0,1	0,8	1,0	0,5	0,7	0,5	0,1	0,4	0,6	0,5	0,3	0,4	0,6	0,4	1,0		
	6 mm/j	18,7	2,4	2,0	1,0	1,1	0,2	1,1	1,6	0,7	1,1	0,8	0,2	0,6	0,9	0,8	0,5	0,5	0,9	0,6	1,6		
	8 mm/j	24,9	3,2	2,7	1,4	1,4	0,3	1,5	2,1	1,0	1,4	1,1	0,2	0,8	1,3	1,1	0,7	0,7	1,2	0,8	2,1		
	Variant Regionaal "200 jaar"	1,86 mm/j	7,1	0,8	0,6	0,4	0,4	0,1	0,5	1,1	0,3	0,4	0,3	0,1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,5	
	4 mm/j	14,7	1,7	1,4	0,8	0,8	0,1	1,2	2,4	0,7	0,8	0,0	0,2	0,4	0,7	0,5	0,5	0,4	0,7	0,4	1,1		
	6 mm/j	22,1	2,5	2,1	1,2	1,2	0,2	1,8	3,6	1,0	1,3	0,0	0,3	0,6	1,1	0,8	0,7	0,5	1,1	0,6	1,6		
	8 mm/j	29,4	3,3	2,8	1,6	1,6	0,3	2,3	4,8	1,4	1,7	0,0	0,4	0,8	1,4	1,1	1,0	0,7	1,4	0,8	2,1		
	Variant Regionaal "50 jaar met onzekerheidsmarge"	1,86 mm/j	6,3	0,8	0,6	0,3	0,4	0,1	0,4	0,7	0,3	0,4	0,3	0,1	0,1	0,3	0,2	0,2	0,1	0,3	0,1	0,5	
	4 mm/j	13,5	1,6	1,4	0,8	0,8	0,1	0,9	1,5	0,6	0,8	0,5	0,2	0,3	0,7	0,5	0,4	0,3	0,7	0,3	1,1		
	6 mm/j	20,2	2,5	2,0	1,1	1,2	0,2	1,3	2,3	0,9	1,2	0,8	0,3	0,4	1,0	0,7	0,6	0,5	1,0	0,5	1,6		
	8 mm/j	26,9	3,3	2,7	1,5	1,6	0,3	1,8	3,1	1,2	1,6	1,1	0,4	0,6	1,4	0,9	0,8	0,6	1,4	0,6	2,1		
	Variant Regionaal "50 jaar"	1,86 mm/j	5,6	0,7	0,6	0,3	0,3	0,1	0,4	0,5	0,2	0,4	0,2	0,1	0,1	0,3	0,2	0,2	0,1	0,3	0,1	0,5	
	4 mm/j	12,1	1,6	1,3	0,7	0,7	0,1	0,8	1,0	0,5	0,8	0,5	0,2	0,2	0,7	0,4	0,4	0,2	0,7	0,3	1,1		
	6 mm/j	18,1	2,4	2,0	1,0	1,1	0,2	1,1	1,6	0,7	1,2	0,7	0,3	0,3	1,0	0,5	0,6	0,3	1,0	0,4	1,6		
	8 mm/j	24,2	3,2	2,7	1,4	1,4	0,3	1,5	2,1	1,0	1,6	1,0	0,3	0,3	1,4	0,7	0,8	0,5	1,3	0,5	2,1		

Term van de rekenregel	Zeespiegelstijging	TOTAAL	Westerschelde delta				Oosterschelde delta				Grevelingen delta				Haringvliet delta				Maasgeul				Zuid-Holland Hoek van Holland - Katwijk				Holland Katwijk - Egmond				Noord-Holland Egmond - Callantsoog				Zeegat van Texel Marsdiep				Texel				Eierlandse Gat				Vlieland				Vlietstroom				Terschelling				Ameland				Ameland				Friesche Zeegat				Schiermonnikoog				Groninger Wad en Eems-Dollard			
			Westerschelde delta	Oosterschelde delta	Grevelingen delta	Haringvliet delta	Maasgeul	Zuid-Holland Hoek van Holland - Katwijk	Holland Katwijk - Egmond	Noord-Holland Egmond - Callantsoog	Zeegat van Texel Marsdiep	Texel	Eierlandse Gat	Vlieland	Vlietstroom	Terschelling	Ameland	Ameland	Friesche Zeegat	Schiermonnikoog	Groninger Wad en Eems-Dollard																																																									
Transport Zeegaten Waddenzee	1,86 mm/j	5,1	-	-	-	-	-	-	-	-	1,3	-	-0,4	-	0,8	-	1,2	-	0,4	-	1,8																																																									
<i>Inclusief Eems-Dollard 1,2 miljoen m³/jaar</i>	4 mm/j	6,2	-	-	-	-	-	-	-	-	1,4	-	-0,1	-	1,1	-	1,4	-	0,5	-	1,9																																																									
	6 mm/j	7,2	-	-	-	-	-	-	-	-	1,5	-	0,1	-	1,2	-	1,6	-	0,7	-	2,1																																																									
	8 mm/j	8,1	-	-	-	-	-	-	-	-	1,6	-	0,3	-	1,3	-	1,7	-	0,9	-	2,3																																																									
Bodemdaling delfstofwinning	1,86 mm/j	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,09	0,02	-	0,00	-	0,04	-	0,03	-	0,30	-	0,01																																																									
	4 mm/j	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,09	0,02	-	0,00	-	0,04	-	0,03	-	0,30	-	0,01																																																									
	6 mm/j	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,09	0,02	-	0,00	-	0,04	-	0,03	-	0,30	-	0,01																																																									
	8 mm/j	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,09	0,02	-	0,00	-	0,04	-	0,03	-	0,30	-	0,01																																																									
Transport Westerschelde	1,86 mm/j	0,5	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																																																									
	4 mm/j	0,2	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																																																									
	6 mm/j	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																																																									
	8 mm/j	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																																																									

5 Technisch advies sedimentbehoefte kustfundament

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

Advies 1: Tot 2035 is de sedimentbehoefte van het kustfundament met voldoende zekerheid vast te stellen

Dit onderzoek heeft de aannames en onderbouwing van drie termen van de rekenregel – te weten Positie van en Transport over de zeewaartse grens, Transport naar de Waddenzee en Bodemdaling – getoetst door een combinatie van beschikbare kennis en nieuwe monitoring en modellering. Uit het onderzoek komt een consistent en betrouwbaar inzicht naar voren. Het denkmodel dat voorafgaand aan Kustgenese 2.0 bestond, samengevat in de rekenregel, blijft voor de periode tot 2035 voldoende geldig. Er is geen fundamenteel ander inzicht over dominante processen gekomen. De systeemkennis van het morfologisch gedrag van het kustfundament als geheel is verstevigd.

De sedimentbehoefte van het kustfundament tot 2035 is met de huidige zeewaartse grens op NAP -20 m vastgesteld op $15,2 \pm 2,2$ miljoen m^3 /jaar. Deze hoeveelheid is vergelijkbaar met Rijkswaterstaat (2016) en daarin gerefereerde voorgaande onderzoeken. De bijdrages van “Oppervlakte kustfundament x relatieve Zeespiegelstijging” en van Bodemdaling zijn gelijk aan Rijkswaterstaat (2016), omdat van dezelfde aannames en resultaten wordt uitgegaan. Het Transport naar de Waddenzee is hoger dan in Rijkswaterstaat (2016), 6,0 versus 2,9 miljoen m^3 /jaar voor de meest waarschijnlijke waarde. De reden voor de hogere waarde komt voort uit een herziening en verbetering van de sedimentbalans van de Waddenzee en door het meenemen van het transport naar het Eems-Dollard estuarium, dat wordt geschat op 1,2 miljoen m^3 /jaar.

Dit onderzoek heeft geleid tot een kleinere bandbreedte. Waar in Rijkswaterstaat (2016) een bandbreedte van -2 tot +8 miljoen m^3 /jaar wordt aangehouden, is de bandbreedte nu vastgesteld op $\pm 3,0$ miljoen m^3 /jaar. Ook is er meer inzicht over de landwaartse richting van het zandtransport over de zeewaartse grens.

Advies 2: Voor de sedimentbehoefte van het kustfundament tot 2035 kan van de meest waarschijnlijke waarde uitgegaan worden.

De sedimentbehoefte van het kustfundament tot 2035 is voor zes varianten van de positie van de zeewaartse grens vastgesteld door invullen van de rekenregel. Voor iedere variant is een meest waarschijnlijke waarde en een bandbreedte gegeven. Deltares adviseert van de meest waarschijnlijke waarde uit te gaan en geen extra bandbreedte aan te nemen. Hiervoor zijn drie redenen:

1. De bandbreedte is tweezijdig. Er zijn evenveel argumenten om de bandbreedte op te tellen bij als af te trekken van de meest waarschijnlijke waarde. Er zijn geen redenen om voor de een (optellen) of de ander (aftrekken) te kiezen.
2. Van de term die niet meegenomen wordt in de sedimentbehoefte – Transport over de zeewaartse grens – wordt het aannemelijk geacht dat zij sediment toevoegt aan het kustfundament. Vanwege onzekerheid over de grootte van de bijdrage wordt de term toch niet meegenomen en in de rekenregel gelijkgesteld aan 0 m^3 /jaar. Desalniettemin wordt door deze keuze de kans op *onderschatting* van de sedimentbehoefte van het kustfundament kleiner, waardoor het optellen van de bandbreedte bij de meest aannemelijke waarde onnodig lijkt.

3. De bandbreedte is met 20% relatief klein. Het continue bijhouden van de kennis van de kust en het kustfundament biedt voldoende garantie voor bijstelling in de toekomst – indien nodig.

Advies 3: Het is mogelijk om – uniform langs de Nederlandse kust of regionaal gedifferentieerd – de zeewaartse grens van het kustfundament 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 vanuit morfologisch oogpunt als ruim beoordeeld. Bij een tijdschaal van 50 jaar is een landwaartse verplaatsing mogelijk naar NAP -15 m. Voor een tijdschaal van 200 jaar is landwaartse verplaatsing naar NAP -18 m mogelijk.

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.

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.

Advies 4: Ga tot 2035 voor de zeewaartse grens van het kustfundament 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. Daarom is een variant toegevoegd tussen de 50 jaar en 200 jaar varianten. Deze tussenvariant is niet op morfologische gronden gebaseerd, maar hanteert een gemiddelde marge bovenop de 50 jaar variant.

Advies 5: Tot 2050 hoeft voor het zandtransport naar de Waddenzee geen rekening te worden gehouden met zeespiegelstijgingsscenario's.

Dit onderzoek heeft het inzicht vergroot in hoe het sedimenttransport naar de Waddenzee reageert op zeespiegelstijging. Het blijkt dat het sedimenttransport naar de Waddenzee tot 2050 nog niet reageert op een hogere snelheid van zeespiegelstijging. Dit komt door de lange morfologische tijdschaal. Na 2050 wordt het effect van snellere zeespiegelstijging merkbaar. Ook bij 8 mm/j zeespiegelstijging is de toename nog relatief beperkt, tot 5,8 miljoen m³/jaar, een stijging van 40%. Omdat de Waddenzee bij hogere zeespiegelstijging uit morfologisch evenwicht is gebracht, neemt het sedimenttransport na 2050 en ook na 2100 nog toe.

Advies 6: Een snellere zeespiegelstijging vraagt om toetsing van aannamen van de rekenregel

Bij snellere zeespiegelstijging neemt de sedimentbehoefte toe, waarbij de bijdrage van de term “Oppervlakte kustfundament x Zeespiegelstijging” dominant is. De stijging van het Transport naar de Waddenzee is beperkt en tot in ieder geval 2050 niet onderscheidbaar tussen de verschillende zeespiegelstijgingsscenario's. Bij het scenario van 8 mm/j neemt de sedimentbehoefte in 2100 bij gebruik van de rekenregel toe tot 38 miljoen m³/jaar (variant Uniform “200 jaar”). De validiteit van extrapolatie van (ongewijzigde) toepassing van de rekenregel bij zeespiegelstijgingsscenario's is niet getoetst of getest. Voor dergelijke scenario's adviseert Deltares sterk een toetsing op de haalbaarheid en handhaafbaarheid van gebruik van de rekenregel.

Advies 7: Kennisleemtes die Kustgenese 2.0 heeft geïdentificeerd of niet heeft kunnen invullen:

- Onderzoek naar hoe (via de rekenregel) berekende sedimentbehoefte zich in de toekomst gaat verhouden tot suppletiebehoefte (Advies 6; relevantie groot)
- Uitwisseling Eems-Dollard inclusief transport over staatsgrens Duitsland (paragraaf 3.4 en 3.8; relevantie groot)
- Uitwisseling Westerschelde inclusief transport over staatsgrens België (paragraaf 3.5 en 3.8; relevantie groot)

- Inzicht in hoe NAP peilen in relatie tot geologische bodemdaling in de gemeten (dus relatieve) zeespiegelstijging is opgenomen. (paragraaf 3.6; relevantie middelgroot)
- Verklaring voor toename berekend landwaarts transport op de diepe vooroever en waar het sediment blijft (paragraaf 3.3; relevantie middelgroot)
- Invloed van de stormstatistiek op het sedimenttransport over de zeewaartse grens (paragraaf 3.3; relevantie middelgroot)

6 Referenties

- Baart, F., Rongen, G., Hijma, M. Kooi, H., De Winter, R., Nicolai, R. (2018). Zeespiegelmonitor 2018. De stand van zaken rond de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Rapport 11202193-000-ZKS-0004, Deltares & HKV.
- Consortium Deltares, IMDC, Svašek & Arcadis (2013a). Grootschalige sedimentbalans van de Westerschelde. LTV rapport G-2.
- Consortium Deltares, IMDC, Svašek & Arcadis (2013b). Influence morphology on tide and sand transport. LTV rapport G-4. (in Engels)
- Consortium Deltares, IMDC, Svašek & Arcadis (2013c). Morfologische lange termijn simulaties, . LTV rapport G-11.
- Dam, G. (2017). Lange-termijn sedimentbalans van de Westerschelde. Rapport 1778/U16516/D/GD, Svašek Hydraulics.
- 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 (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 Grasmeyer, Heleen Vreugdenhil, Claire van Oeveren en Arno Nolte, Deltares rapport 1220339-009-ZKS-00013, in opdracht van Rijkswaterstaat WVL, maart 2020.
- Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., Wang Z.B. en de Ronde, J. (2012). Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. Netherlands Journal of Geosciences, Geologie en Mijnbouw, 91–3: 293-310.
- Elias, E.P.L., (2019). Een actuele sedimentbalans van de Waddenzee. Rapport 11203683-002, Deltares, Delft.
- Elias, Edwin en Zheng Wang (2020). Sedimentbalans Waddenzee; Synthese ten behoeve van Technisch Advies Kustgenese 2.0, Deltares rapport 1220339-007-ZKS-0010, in opdracht van Rijkswaterstaat als onderdeel van Kustgenese 2.0, februari 2020.
- Grasmeyer, Bart, Reinier Schrijvershof en Jebbe van der Werf (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.
- Hijma, M. en H. Kooi (2018). Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens (deel 2); Een update, case IJmuiden en kwantificering onzekerheden. Deltares rapport 11202190-001-ZKS-0001, in opdracht van Rijkswaterstaat, December 2018.
- KNMI (2015). KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie, KNMI, De Bilt, 34 pp.
- Oost, A.P., van der Spek, A.J.F., van Oeveren – Theeuwes, C., Tonnon, P.K. (2018). The contribution of mud to the net yearly sedimentation volume in the Dutch Wadden Sea. Rapport 1220339-006-ZKS-009, Deltares, Delft.
- Rijkswaterstaat (2016). Memo Rekenregel suppletievolumen, versie 1.0, 11 december 2016.
- Röbke B. en Taal M.D. (in prep). Presentatie 'LT evolutie Westerschelde, Modelonderzoek naar reactie op zeespiegelstijging', samenwerkingsdag BenO Kust 4 maart 2020.
- Stive, M.J.F. & Eysink, W.D., (1989). Voorspelling Ontwikkeling Kustlijn 1990-2090. Fase3. Deelrapport 3.1: Dynamisch Model van het Nederlandse Kuststelsel. Rapport H825, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, 66 pp.

- Stive M J F, Capobianco M, Wang Z B, Ruol P and Buijsman M C (1998). Morphodynamics of a tidal lagoon and adjacent coast, Dronkers J and Scheffers M B a M(eds), Physics of Estuaries and Coastal Seas: 8th International Biennial Conference on Physics of Estuaries and Coastal Seas, 1996, pp. 397-407, A A Balkema.
- Stive M J F en Wang Z B (2003). Morphodynamic modelling of tidal basins and coastal inlets, In: Advances in coastal modelling, Series, Vol, Lakkhan C (ed), pp. 367-392, Elsevier Sciences, Amsterdam.
- Townend I H, Wang Z B, Stive M J E and Zhou Z (2016). Development and extension of an aggregated scale model: Part 1 – background to asmita. China Ocean Engineering, 30 (4), 482-504.
- Van der Spek, A.J.F., Elias, E., Lodder, Q.J., Hoogland, R. (2015). Toekomstige Suppletievolumes - Eindrapport. Deltares report 1208140-005-ZKS-0001.
- 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, Jebbe, Bart Grasmeyer, Erik Hendriks, Ad van der Spek en Tommer Vermaas (2017): Literature study Dutch lower shoreface, Deltares rapport 1220339-004-ZKS-0001, in opdracht van Rijkswaterstaat als onderdeel van Kustgenese 2.0, Oktober 2017.
- Van Rijn, L.C. (1997). Sediment transport and budget on the central coastal zone of Holland. Coastal Engineering, 32, 61–90. VROM (2004). Nota Ruimte, Ruimte voor ontwikkeling. Ministeries van VROM, LNV, VenW en EZ.
- Van Rijn, L.C. (2007a). Unified view of sediment transport by currents and waves, I: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. Journal of Hydraulic Engineering 133: 649-667.
- Van Rijn, L.C. (2007b). Unified view of sediment transport by currents and waves, II: Suspended transport. Journal of Hydraulic Engineering 133: 668-689. Walburg, L., (2001). De Zandbalans van het Zeegat van Texel bepaald met Verschillende Buitendelta-Definities. Rapport RIKZ/OS 2001. Rijkswaterstaat, National Institute for Coastal and Marine Management RIKZ, Den Haag, 51 pp.
- Vermaas, T., Van Dijk, T., Hijma, M. (2015). Bodemdynamiek van de diepe onderwateroever met oog op de -20 m NAP lijn. Rapport 1220034-003-ZKS-0002, Deltares, Nederlands.
- 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.
- Wang, Z.B. en Q.J. Lodder (2019). Sediment exchange between the Wadden Sea and North Sea Coast. Modelling based on ASMITA. Rapport 1220339-008-ZKS-006, Deltares, Delft.

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