

Meegroeivermogen gerelateerd aan kritische zeespiegelstijgingsnelheid voor verdrinking in de Nederlandse Waddenzee



Meegroeivermogen gerelateerd aan kritische zeespiegelstijgingssnelheid voor verdrinking in de Nederlandse Waddenzee

Auteur(s)

Zheng Bing Wang

Ad van der Spek

Edwin Elias

Meegroeivermogen gerelateerd aan kritische zeespiegelstijgingssnelheid voor verdrinking in de Nederlandse Waddenzee

Opdrachtgever	Ministerie van Klimaat en Groene Groei, Directie Transitie Diepe Ondergrond.
Contactpersoon	Mevr. Dr. K. van Thienen-Visser
Referenties	
Trefwoorden	Meegroeivermogen, Zeespiegelstijging, Bodemdaling, Intergetijdeplaten, Waddenzee, Kritische zeespiegelstijgingssnelheid

Documentgegevens

Versie	3.0
Datum	24-06-2025
Projectnummer	11206960-016
Document ID	11206346-002-BGS-0004
Pagina's	40
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Zheng Bing Wang, Ad van der Spek Edwin Elias	

Samenvatting

Dit rapport is geschreven voor de Directie Transitie Diepe Ondergrond van het Ministerie van Klimaat en Groene Groei, als onderdeel van de programmasubsidie Deltares-EZK, en behandelt het *meegroeivermogen* en de *kritische snelheid van zeespiegelstijging voor verdrinking* van de Waddenzee. Deze begrippen worden gebruikt in de beschouwing van de ontwikkeling van de Waddenzee onder invloed van relatieve zeespiegelstijging (ZSS). Relatieve ZSS is de optelsom van bodemdaling en absolute ZSS.

Het *meegroeivermogen* van een bekken geeft aan hoeveel relatieve ZSS per tijdseenheid nog gecompenseerd kan worden door de natuurlijke aanvoer van sediment, zonder dat de morfologische karakteristieken van het bekken veranderen. De belangrijkste karakteristiek is het oppervlak van de droogvallende wadplaten.

De *kritische snelheid voor verdrinking* is de snelheid van relatieve ZSS die bij een aanhoudende overschrijding onomkeerbaar leidt tot verdrinking van het bekken. De aanvoer van sediment is dan niet voldoende om de ZSS bij te houden waardoor de gemiddelde diepte in het bekken toeneemt en de wadplaten in hoogte en omvang afnemen en op langere termijn verdwijnen. De *kritische snelheid voor verdrinking* is dus per definitie groter dan de snelheid van ZSS die het meegroeivermogen nog kan compenseren. De *kritische snelheid voor verdrinking* van een waddenbekken kan worden uitgerekend met het model ASMITA.

In tegenstelling tot de berekening van de *kritische snelheid voor verdrinking* van een waddenbekken is er geen eenduidige methode gedefinieerd voor de bepaling van het *meegroeivermogen*. De waarden van de *meegroeivermogens* van de verschillende waddenbekkens in het 'Hand aan de Kraan'-principe voor gas- en zoutwinning zijn in het verleden gebaseerd op veldwaarnemingen. Uitgaand van het voorzorgsprincipe is er een marge aangehouden. Recente analyses van geologische gegevens van de Nederlandse kust en van de morfologische ontwikkelingen in de Waddenzee sinds de afsluitingen van de Zuiderzee en Lauwerszee laten zien dat de nu gehanteerde waarden voor het *meegroeivermogen* in het 'Hand aan de Kraan'-principe lager zijn dan de waargenomen maximale sedimentatiesnelheden. Dat wil zeggen dat de recente data een groter *meegroeivermogen* laten zien dan nu gehanteerd wordt.

Dit roept de vraag op of er een meer objectieve methode voor het bepalen van het *meegroeivermogen* van een Waddenzeebekken ontwikkeld kan worden. Uit recente modelstudies blijkt dat de morfologische ontwikkeling van een bekken onder invloed van relatieve ZSS bepaald wordt door (1) de verhouding tussen de snelheid van relatieve ZSS en de *kritische snelheid voor verdrinking* en (2) door de ontwikkelingsfase van het bekken ten opzichte van morfologisch evenwicht. Morfologisch evenwicht is de toestand welke een bekken zou kunnen bereiken op een tijdschaal van decennia tot eeuwen bij gelijkblijvende randvoorwaarden. De ontwikkelingsfase ten opzichte van morfologisch evenwicht varieert per bekken in de Waddenzee.

De resultaten van het vorige rapport (Wang & van der Spek, 2021) laten zien dat op basis van dit inzicht het mogelijk is een numerieke methode voor het bepalen van het *meegroeivermogen* van een getijbekken te ontwikkelen. Daarbij wordt het *meegroeivermogen* bepaald als een fractie van de *kritische snelheid voor verdrinking*. De grootte van die fractie is afhankelijk van de morfologische toestand ten opzichte van het morfologische evenwicht in het betreffende bekken. Dit rapport is een update van het vorige rapport.

Als uitbreiding wordt deze methode toegepast voor het bepalen van het meegroeivermogen in de verschillende getijdebekkens / kombergingsgebieden van de Nederlandse Waddenzee. Daarbij is de berekening van de *kritische snelheid van zeespiegelstijging voor verdrinking* met de gebruikte modellen (ASMITA) aangepast aan de meest recente inzichten, en is de ontwikkelingsfase van de verschillende bekkens in de Waddenzee ten opzichte van het morfologische evenwicht vastgesteld. Verder zijn de *meegroeivermogens* die worden bepaald met de nieuwe methode vergeleken met de meetgegevens en systeemkennis van de betreffende bekkens. Op basis hiervan is het mogelijk een eerste aanpassing te doen van de waarden van het meegroeivermogen in de vier bekkens waarin mijnbouwactiviteiten plaatsvinden.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
2	Definities	9
2.1	Meegroeivermogen	9
2.2	Kritische snelheid van zeespiegelstijging voor verdrinking	9
2.3	Overeenkomsten en verschillen	11
3	Nieuwe inzichten in maximale snelheden van sedimentatie in getjbeekens	12
3.1	Inleiding	12
3.2	Basisbegrippen	12
3.3	Hoeveel kan er maximaal aangevoerd en afgezet worden?	13
3.4	Nieuwe gegevens over snelheid van opvulling getjbeekens	14
3.4.1	Midden-Holocene getjbeekens	14
3.4.2	De Waddenzee in de laatste eeuw	17
4	Berekeningen van de geldende waarden voor meegroeivermogen en kritische snelheid voor verdrinking	19
4.1	Meegroeivermogen	19
4.2	Kritische snelheid van zeespiegelstijging voor verdrinking	20
5	Inzichten uit recent modelleringsonderzoek	25
6	Meegroeivermogens gerelateerd aan kritische snelheid van zeespiegelstijging voor verdrinking	30
6.1	Mogelijke relatie tussen meegroeivermogens en kritische snelheid van zeespiegelstijging voor verdrinking	30
6.2	Meegroeivermogen gebaseerd op kritische snelheid van zeespiegelstijging voor verdrinking	31
7	Conclusies en aanbevelingen	34
7.1	Samenvatting en conclusies	34
7.2	Aanbevelingen	35
8	Referenties	37

1 Inleiding

Dit rapport is geschreven voor de Directie Transitie Diepe Ondergrond van het Ministerie van Klimaat en Groene Groei (MKGG), als onderdeel van de programmasubsidie Deltares-EZK.

Deltares en zijn voorgangers hebben in verleden de effecten van bodemdaling door gas- en zoutwinning op de geomorfologie van de Waddenzee onderzocht, zie bijvoorbeeld de rapporten van Eysink (1993), Van Wirdum e.a. (2010) en Wang e.a. (2017). Om significante schade aan de natuur van de Waddenzee te voorkomen, is het Hand aan de Kraan principe ontworpen. De vooraf te bepalen maximaal toelaatbare bodemdaling door delfstofwinning wordt hierbij als grens gehandhaafd, bij dreigende overschrijding moet de productie teruggedraaid worden. Bij het vaststellen van de maximaal toelaatbare bodemdaling spelen de begrippen *meegroeivermogen* en de daaraan gekoppelde *kritische snelheid van zeespiegelstijging voor verdrinking* een belangrijke rol. De relatie tussen beide genoemde begrippen is onderzocht in een eerder rapport (Wang & van der Spek, 2021), nadat de huidige praktijk is vergeleken met de laatste inzichten in de sedimenthuishouding van de getijdebekken van de Nederlandse Waddenzee. Dit rapport maakt gebruik van deze relatie om tot een voorstel voor aanpassingen van de waarden van het meegroeivermogen voor de verschillende bekkens te komen. Daarvoor zijn de kritische sedimentatiesnelheden van de getijdebekken bepaald aan de hand van de laatste inzichten in de lange-termijn morfodynamische modellering aan de hand van het model ASMITA.

Het *meegroeivermogen* en de *kritische snelheid van zeespiegelstijging (ZSS) voor verdrinking* zijn dus twee begrippen die gebruikt worden in de beschouwing van de ontwikkeling van de Waddenzee onder invloed van relatieve ZSS. Beide begrippen definiëren een grenswaarde voor de snelheid van relatieve ZSS waarbinnen de wadplaten in een Waddenzeebekken nog mee kunnen groeien, maar zij zijn heel verschillend. De begrippen leiden tot verwarring en zij worden door elkaar gehaald in sommige discussies.

Het meegroeivermogen van de getijbekken in de Waddenzee is gebaseerd op de natuurlijke aanvoer van zand en slib uit de Noordzeekustzone. De grootte van deze aanvoer wordt bepaald door de voorraad sediment in de kustzone, de aanvoercapaciteit van het door het zeegat in- en uitstromende water en de netto invang van sediment in de verschillende delen van het bekken. Voor ieder van deze factoren is door Oost (1998) een inschatting gemaakt op grond van fysische, morfodynamische en geologische gegevens, waarna voor een aantal bekkens een meegroeivermogen is vastgesteld. Sindsdien zijn er nieuwe gegevens beschikbaar gekomen, met name over de maximale accumulatiesnelheid van sediment in getijbekken met een grote sedimentvraag. Deze gegevens worden in Hoofdstuk 3 gepresenteerd en bediscussieerd. Een meer gedetailleerde uitwerking van deze gegevens zal in een later stadium in een aparte notitie verschijnen. Op basis van deze nieuwe gegevens kunnen de huidige waarden voor de meegroeivermogens en de kritische snelheden voor verdrinking voor de waddenbekken opnieuw beschouwd worden.

Dit rapport is een update van het rapport van Wang en Van der Spek uit 2021. Eerst (Hoofdstuk 2) leggen wij de begrippen *meegroeivermogen* en *kritische snelheid van zeespiegelstijging voor verdrinking* uit om duidelijk te maken wat de verschillen tussen die twee zijn. Hoofdstuk 3 beschrijft in het kort de nieuwe inzichten in sedimentatiesnelheden uit recente geologische en morfodynamische analyses. Hoofdstuk 4 geeft een overzicht van de hiervoor gehanteerde waarden voor meegroeivermogen en kritische snelheid van zeespiegelstijging voor verdrinking en legt uit hoe zij zijn bepaald. Daarin zijn de waarden van de kritische ZSS snelheid voor de verschillende bekkens opnieuw bepaald op basis van de

laatste inzichten in de morfodynamische modellering. Hoofdstuk 5 vat de inzichten uit recent modelonderzoek, over hoe een Waddenzeebekken reageert op verschillende snelheden van ZSS, samen. Op basis van deze nieuwe inzichten wordt in Hoofdstuk 6 een voorstel gedaan hoe de twee begrippen kwantitatief aan elkaar kunnen worden gerelateerd.

Op basis van de informatie uit de hoofdstukken 2 tot en met 6 worden in Hoofdstuk 7 conclusies en aanbevelingen gepresenteerd.

2 Definities

2.1 Meegroeivermogen

Meegroeivermogen is een begrip uit het “Hand aan de Kraan” principe dat bij de verlening van vergunning tot gaswinning onder de Waddenzee vanuit de velden Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen is vastgesteld. Het “Hand aan de Kraan” (HadK) principe omvat (Ministerie van Economische Zaken [MEZ], 2006; De Waal e.a., 2012; Wang e.a., 2017):

- 1 Het vaststellen van het meegroeivermogen, veelal uitgedrukt als de maximale relatieve zeespiegelstijging (ZSS) snelheid in het kombergingsgebied van een zeegatsysteem die kan worden gecompenseerd door natuurlijke sedimentaanvoer van buitenaf, zonder significante milieuschade.
- 2 Het vaststellen van de gebruiksruimte; dit is het verschil dat overblijft van het meegroeivermogen na aftrek van ZSS snelheid. De vastgestelde gebruiksruimte is bedoeld als veilige grens, waar de bodemdaling door delfstoffenwinning binnen moet blijven. De gebruiksruimte wordt elke 5 jaar aangepast na vaststelling van een nieuw ZSS scenario.
- 3 Het vooraf vaststellen van de bodemdalingssnelheid (gemiddeld over het kombergingsgebied) die zodoende (na aftrek van die door eventuele andere winningen) kan worden bijgehouden per kombergingsgebied zonder dat wezenlijke veranderingen optreden aan de Waddenzee met schade aan de natuur.
- 4 Het uitvoeren van een winningsplan waarbij de verwachte bodemdalingssnelheid binnen de vastgestelde gebruiksruimte blijft.
- 5 Het via monitoring achteraf vaststellen van de daadwerkelijk opgetreden bodemdaling en het ontbreken van gevolgen voor de Waddenzee.
- 6 Het zo nodig bijsturen van de bodemdaling door de productie te beperken (“het dichtdraaien van de kraan”).

Omdat het voorzorgsprincipe geldt in de natuurwetgeving mogen er geen risico's worden genomen waarbij twijfel bestaat over de mogelijke schadelijke effecten voor het ecosysteem. Leidend voor de vaststelling van de gebruiksruimte was daarom dat er geen significante afname van het intergetijde plaatareaal gaat plaatsvinden ten gevolge van bodemdaling door gaswinning. De in punt 1 genoemde milieuschade heeft dus vooral betrekking op verlies van intergetijde plaatareaal.

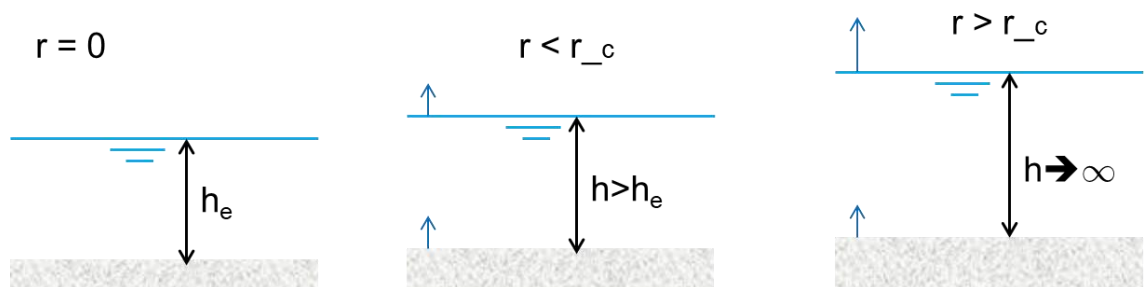
De officiële definitie van meegroeivermogen is gegeven in MEZ (2006): *Het meegroeivermogen van een getijdenbekken of kombergingsgebied is het natuurlijke vermogen van dat gebied, uitgedrukt in mm/jaar over het hele gebied, om de relatieve zeespiegelstijging op lange termijn bij te houden terwijl het geomorfologische evenwicht en de sedimentbalans in stand blijven (p.62). Het geomorfologische evenwicht is met betrekking tot de Waddenzee gedefinieerd als de duurzame aanwezigheid van sedimentatie- en erosieprocessen, waarbij de verschillende geomorfologische elementen, zoals geulen en platen met een verschillende diepteligging, binnen dezelfde variatiebreedte als de afgelopen 100 jaar in stand blijven (p.61). De sedimentbalans is de optelsom per deelgebied van de afzetting (sedimentatie) en erosie van zand en slib (incl. bodemdaling) (p.63).*

2.2 Kritische snelheid van zeespiegelstijging voor verdrinking

Voor verdrinking hanteren wij hier dezelfde definitie als in Van Goor e.a. (2003): het op den duur verdwijnen van alle intergetijdengebieden in een getijdebekken en het blijven toenemen

van de gemiddelde waterdiepte in een bekken met de tijd. Bij de definitie geldt dus het conceptuele model zoals in Figuur 2.1 is weergegeven:

- Zonder ZSS is er een morfologisch evenwicht met een bijbehorende gemiddelde waterdiepte in het bekken. Het bekken wisselt dan netto geen sediment uit met het buitenwereld (de kustzone, via de zeegat).
- ZSS heeft tot effect dat de waterdiepte in het bekken toeneemt en dus groter dan de evenwichtsdiepte wordt. De over-diepte (t.o.v. evenwicht) heeft tot gevolg dat er netto sedimentimport vanuit de buitenwereld optreedt, hoe groter de over-diepte hoe groter de sedimentimport.
- Door de sedimentimport treedt er netto sedimentatie in het bekken op, zodat de bodem in het bekken ook stijgt. Bij langzame ZSS ontstaat er een nieuw dynamisch evenwicht vanaf het moment dat de over-diepte zo groot geworden is dat de sedimentimport tot een even snelle stijging van het gemiddelde bodemniveau als de ZSS leidt. Bij te snelle ZSS is het bereiken van een dynamisch evenwicht niet mogelijk, de stijging van het bodemniveau verloopt langzamer dan de ZSS ondanks de toename van de over-diepte, zodat de gemiddelde waterdiepte in het bekken blijft toenemen in de tijd. Het bekken verdrinkt dus.
- De ZSS snelheid die deze twee situaties, wel of geen dynamisch evenwicht, scheidt, is de kritische ZSS snelheid voor verdrinking. Als de ZSS snelheid hoger wordt dan deze kritische waarde verdrinkt het bekken op termijn.



Figuur 2.1 Conceptueel model voor het effect van zeespiegelstijging. Links: evenwicht zonder ZSS (gemiddelde waterdiepte in een bekken h gelijk aan de evenwichtsdiepte h_e); midden: dynamisch evenwicht bij ZSS snelheid (r) onder de kritische grens (r_c); rechts: verdrinking bij ZSS snelheid boven de kritische grens.

Dit conceptuele model maakt ook duidelijk dat bij versnelling van ZSS, **ook als de toegenomen ZSS snelheid nog onder de kritische waarde is, de gemiddelde waterdiepte in het bekken eerst zal toenemen in de tijd om naar het nieuwe dynamische evenwicht te gaan**. In de praktijk komt dit tot uiting door afname van het (intergetijde) plaatareaal en toename in omvang van de geulen in het bekken.

Soms gebruikt men, ten onrechte, ook het woord “verdrinking” voor dit proces, vooral bij het presenteren van resultaten van proces-gebaseerde morfodynamische modellering. Op zich is dat wel begrijpelijk, vooral omdat het praktisch onmogelijk is met proces-gebaseerde morfodynamische modellering de hier gedefinieerde kritische grens te bepalen. Maar het is wel belangrijk deze verwarring te vermijden.

Van Goor e.a. (2003) gebruikten het drie-elementen ASMITA model voor een zeegatsysteem, waarbij binnen het Waddenzeebekken onderscheid tussen (intergetijde) platen en geulen is gemaakt. De kritische ZSS snelheid voor verdrinking is gedefinieerd als *de ZSS snelheid waarboven het plaatvolume op den duur naar nul gaat*.

2.3 Overeenkomsten en verschillen

Zowel het meegroeivermogen als de kritische snelheid voor verdrinking definiëren grenzen aan de snelheid van relatieve ZSS. Zij hebben dus dezelfde dimensie, beide worden uitgedrukt in mm/jaar. Beide grenzen zijn gerelateerd aan het wel of niet mee kunnen stijgen van de Waddenzeebodem met de zeespiegel. Deze overeenkomsten veroorzaken de verwarringen tussen de twee begrippen.

Het belangrijkste verschil tussen de twee is dat het **meegroeivermogen de grens vormt tussen wel of geen significante milieueffecten van relatieve ZSS** terwijl de **kritische snelheid voor verdrinking de grens vormt tussen het voortbestaan of op den duur verdwijnen van (intergetijde) wadplaten**. Bij het overschrijden van de kritische snelheid voor verdrinking weten wij dan dus zeker dat er op den duur significante effecten van de relatieve ZSS gaan optreden. Het meegroeivermogen is dus per definitie lager of gelijk aan de kritische snelheid voor verdrinking.

Het meegroeivermogen is een managementparameter. De woorden “zonder significante milieuschade” in de definitie ervan impliceren dat het een enigszins rekbaar begrip is. De kritische snelheid voor verdrinking is daartegen een eenduidig gedefinieerd fysisch begrip. Bij het bepalen van de waarde van het meegroeivermogen kan de interpretatie van “significante milieuschade” een bron van onzekerheid zijn. Onzekerheid bij het bepalen van de kritische snelheid voor verdrinking kan alleen van de gebruikte methode komen: nauwkeurigheden van de gebruikte modellen en data. Verder is meegroeivermogen een parameter die voor een komberging als geheel geldt. De kritische ZSS snelheid voor verdrinking kan in principe voor een komberging als geheel, maar ook voor een deelgebied daarbinnen worden bepaald.

Bij het bepalen van de tot nu toe gebruikte meegroeivermogens is er wel naar het werk over de kritische ZSS snelheid gekeken, maar de relatie tussen de twee is niet duidelijk en expliciet beschreven. Het bestaan van de kritische snelheid is meer als argument gebruikt voor het hanteren van meegroeivermogen als managementinstrument, maar de waarden zijn zeer verschillend: de waarde van de kritische snelheid is groter dan die van het meegroeivermogen.

3 Nieuwe inzichten in maximale snelheden van sedimentatie in getijbekkens

3.1 Inleiding

In dynamische landschappen, dat wil zeggen landschappen waar sedimenttransport optreedt, kunnen bodemdaling en zeespiegelstijging gecompenseerd worden door aanvoer en afzetting van sediment. In het Holoceen, het geologische tijdvak sinds de laatste ijstijd, is de zeespiegel sterk gestegen. Desondanks zijn een aantal getijdebekkens langs de Nederlandse kust opgevuld met zand, slib en veen en uiteindelijk land geworden. Door de snelheid van opvulling van deze bekkens vast te stellen en de relatie met de snelheid van zeespiegelstijging te bepalen, ontstaat een beeld vanaf welke snelheid van zeespiegelstijging een getijbekken kon opvullen met sediment. Als gevolg van de voorafgaande snelle zeespiegelstijging was er relatief weinig sediment in de bekkens afgezet, de accommodatieruimte was dus groot. Tevens was er als gevolg van de snelle terugtrekking van de kustlijn veel sediment beschikbaar in de ondiepe kustzone. Beide omstandigheden zijn gunstig voor de aanvoer en afzetting van sediment, de berekende accumulatiesnelheid kan daarom als een schatting voor de maximale accumulatiesnelheid van sediment beschouwd worden. Het doel van het hierna beschreven onderzoek is het vaststellen van maximale accumulatiesnelheden van sedimenten in opvullende getijdebekkens zoals opgetreden in het Holocene verleden.

3.2 Basisbegrippen

Sedimentdelend systeem

De Waddenzee is een sedimentdelend systeem, wat inhoudt dat de componenten van het systeem (eilanden, buitendelta's, bekkens), onderling sediment uitwisselen. Alle sedimenten in de bekkens zijn afkomstig uit de Noordzeekustzone en worden aangevoerd via de zeegaten tussen de eilanden. Het zand is afkomstig van de kusten van de eilanden, de buitendelta's en de bodem van de Noordzee. Zandsuppleties vullen de erosie van de Noordzeekust van de eilanden aan en spelen daarmee een rol in de huidige zandbalans. Slib wordt aangevoerd met de getijstrooming vanuit de zuidelijke Noordzee. De bruto transporten van zand en slib door de zeegaten en getijgeulen zijn groot, daarvan blijft (in de huidige situatie) netto slechts een klein deel achter in het bekken.

Vraag en aanbod

De ontwikkeling van een kust kan beschouwd worden als een balans tussen vraag en aanbod van sediment. Door stijging van het gemiddeld zeeniveau en daling van de bodem neemt de 'natte' inhoud van een bekken toe. Deze inhoudstoename kan in principe teniet gedaan worden door de aanvoer en afzetting van sediment. De inhoudstoename is te beschouwen als een 'vraag' naar sediment, de aanvoer en (netto) afzetting als 'aanbod'. De verhouding van vraag en aanbod bepaalt hoe het bekken zich gaat ontwikkelen (Figuur 3.1): is de vraag groot en de aanvoer klein dan neemt de gemiddelde diepte toe, het plaatoppervlak af en breidt het bekken zich uit. De kust zal zand verliezen naar het achterliggende bekken en achteruit gaan. Is de aanvoer groter dan de vraag, dan vult het bekken op waardoor de gemiddelde diepte en de omvang afnemen. De kustzone houdt zand over en kan in principe zelfs zeewaarts uitbouwen. Als vraag en aanbod elkaar opheffen dan verkeert het bekken in morfodynamisch evenwicht: netto verandert er niet veel ondanks dynamiek op kleinere schaal, zoals het verplaatsen van geulen en het eroderen en/of aangroeien van platen.

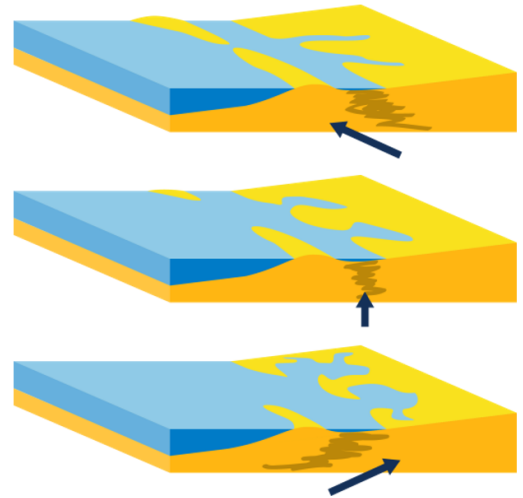
De belangrijkste factoren in deze balans tussen vraag en aanbod zijn de transportcapaciteit van de aanvoerende geulen (Kunnen ze snel genoeg voldoende zand aanvoeren?) en het sedimentvangend vermogen van het bekken (Blijft het aangevoerde materiaal ook achter?).

Kustontwikkeling - 'vraag en aanbod' van sediment

aanbod > vraag :
overschot! → **uitbouw**

aanbod = vraag : stabiel

aanbod < vraag :
tekort! → **terugtrekking**



naar Nichols, 1989

Figuur 3.1 De balans tussen vraag en aanbod van sediment. De balans kent op langere termijn twee eindstadia: (1) **tekort**: de vraag naar sediment is groter dan het aanbod (onderste situatie) en (2) **overschot**: het aanbod overtreft de vraag (bovenste situatie). Bij een tekort breiden de bekkens landwaarts uit en trekt de kustlijn zich terug, er zijn weinig intergetijdeplaten en de gemiddelde diepte is groot. Bij **overschot** vullen de bekkens op, is het oppervlak intergetijdeplaten groot en de gemiddelde diepte klein. Bij voortdurende van deze situatie kunnen bekkens sluiten en de kust zelfs uitbouwen. De middelste situatie illustreert evenwicht tussen vraag en aanbod: het bekken is min of meer stabiel in omvang en gemiddelde diepte. Blauw is water, geel is zand, bruin geeft de opeenvolging van wadafzettingen weer. NB al deze ontwikkelingstrajecten gaan uit van een (relatief) stijgend zeeniveau (zwarte pijlen). (naar Nichols, 1989).

De Waddenzee kan zich in de toekomst maar ten dele ontwikkelen op de hierboven beschreven wijze. Bij een sedimenttekort bij een stijgende zeespiegel kan de Waddenzee niet landwaarts uitbreiden vanwege de dijken die een harde bekkenrand vormen. Ook ligt het niet voor de hand dat landwaartse verplaatsing van de Waddeneilanden sediment kan leveren, aangezien het kustbeleid is de eilanden niet landwaarts te laten terugtrekken. Hiertoe worden de kusten van de eilanden indien nodig gesuppleerd met zand. Dit suppletiezand vervangt uit de kustzone verdwenen zand wat wel ten goede kan komen aan de Waddenzee.

3.3 Hoeveel kan er maximaal aangevoerd en afgezet worden?

Oost (1998) presenteert een aantal benaderingen om de aanvoer en afzetting van zand in te schatten. Hij beschouwt achtereenvolgens het zandleverend vermogen van de Noordzeekust, de transportcapaciteit van de zeegaten en het sedimentvangend vermogen van de wadplaten, en komt op basis hiervan tot een schatting van het meegroeivermogen van de waddenbekkens van 3 tot 6 mm per jaar. Een maximale waarde voor de aanvoer van sediment wordt geschat op basis van de landwaartse verplaatsing van de Waddeneilanden in het verleden. Indien al het hierbij vrijkomende zand naar de Waddenzee afgevoerd wordt, is de aanvoer maximaal.

Onder meer op basis van een reconstructie van de kustlijn in de 16^e eeuw kan de landwaartse verplaatsing van de kustlijn en het daarbij vrijkomende zandvolume berekend worden.

De huidige bruto sedimenttransporten door de zeegaten kunnen benaderd worden door het getijvolume, de hoeveelheid zeewater die per getij een zeegat in- en uittrekt, te vermenigvuldigen met de sedimentconcentratie. Beide grootheden zijn lastig vast te stellen, bovendien variëren de sedimentconcentraties sterk. De schattingen voor de bruto aanvoer lopen uiteen van 6 tot 9 miljoen kubieke meter (*mkm*) per jaar voor de grote zeegaten (Marsdiep, Vlie, Eems) tot 1 á 2 *mkm* per jaar voor de kleine zeegaten (Oost, 1998, en referenties daarin).

Op basis van het verloop van de opvulling van zandwinputten in de Waddenzee, zowel in geulen als op platen, kan het sedimentvangend vermogen geschat worden. Zandwinputten in geulen vullen snel weer op, als gevolg van de directe aanvoer van sediment. Zandwinputten op platen vullen slechts langzaam op. De zandaanvoer naar de platen verloopt in stappen, slechts een deel van het door de geulen getransporteerde zand bereikt de plaatrand, waarna de herverdeling van zand over de platen geheel afhankelijk is van lokale golven en windgedreven stroming. Deze laatste processen hebben een beperkte transportcapaciteit.

3.4 Nieuwe gegevens over snelheid van opvulling getijbekkens

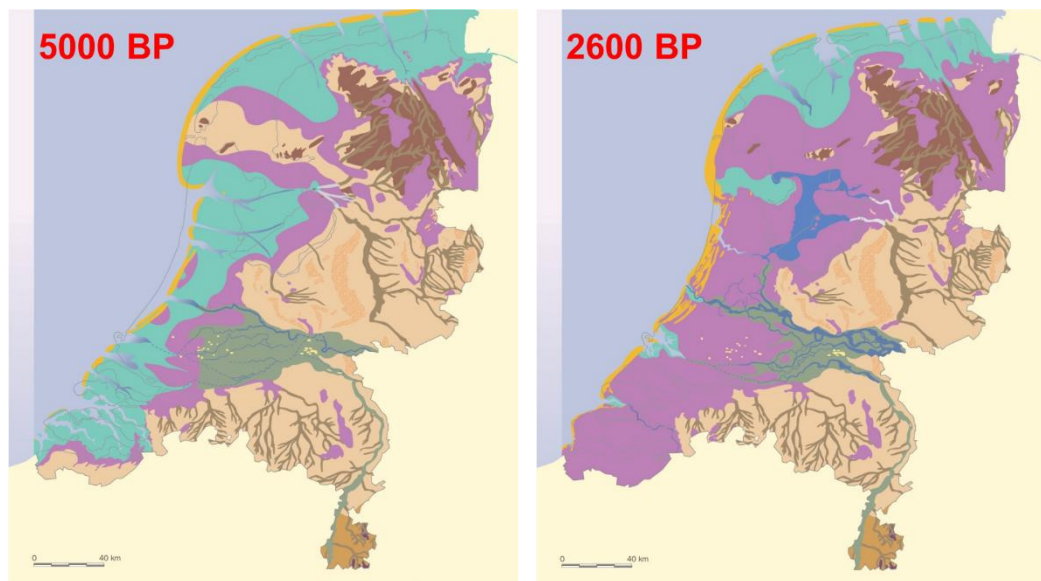
3.4.1 Midden-Holocene getijbekkens

Om de ontwikkeling van de getijbekkens in het Holocene beter te begrijpen volgt hier eerst een beschrijving van de langetermijntoewijziging van de Nederlandse kust in een notendop. Aan het einde van de laatste ijstijd verbeterde het klimaat wereldwijd, waardoor de landijskappen afsmolten en de zeespiegel zeer snel steeg, tot meer dan 10 mm/jaar. Door deze snelle stijging verdronk het landschap in de huidige Noordzee, breidde de Noordzee snel uit en tegelijkertijd trok de kust terug in landwaartse richting. De kustzone bestond uit getijdebekkens, gescheiden door hoger liggende ruggen van Pleistocene ouderdom, met langs de zeewaartse rand (smalle) barrière-eilanden (Figuur 3.2; situatie 5000 BP). Met het verdwijnen van de ijskappen nam de snelheid van zeespiegelstijging af waardoor de getijbekkens minder snel landwaarts uitbreidden en de kustlijn minder snel terugtrok. Vanaf een bepaald moment stopte de landwaartse uitbreiding helemaal en vulden de bekkens geleidelijk op met zand, slib en veen, waarbij de zeegaten langs de Hollandse en Zeeuwse kust steeds kleiner werden en uiteindelijk dichtgingen. Door aanpassing van het kustprofiel en het opruimen van restanten van de delta's van de Rijn-Maas tussen Den Haag en Monster en van de Oude Rijn bij Katwijk kwam nog steeds veel zand beschikbaar, waardoor langs de Hollandse kust een serie uitbouwende strandwallen gevormd werd (Figuur 3.2; situatie 2600 BP). De Waddenzee werd nooit helemaal opgevuld, al kende de ontwikkeling van het gebied wel fasen van overheersende accumulatie van sediment afgewisseld met fasen van overwegend erosie.

Tijdens de snelle zeespiegelstijging zagen de getijdebekkens er anders uit dan de Waddenzee van vandaag de dag. De aanvoer van zand was niet voldoende om het hele bekken te vullen, het zand werd direct langs de aanvoerende getijgeulen afgezet. Hierdoor werd een vloed- of binnendelta gevormd, alleen hier waren intergetijdeplaten aanwezig. De rest van het bekken was een lagune die niet droogviel tijdens laagwater en waar vooral slib werd afgezet. Naar de randen van het bekken toe ging de lagune over in moeras. Met de opvulling van de bekkens breidden de binnendelta's met de plaatgebieden uit, ten koste van de lagunes. Ook de moerassen rukten op waardoor, na terugtrekking van de zee (de zeegaten verzandden), het bekken uiteindelijk veranderde in één groot kustmoeras.

Bij de afleiding van het meegroeivermogen vergelijkt Oost (1998) de (tussen-) resultaten regelmatig met informatie die gebaseerd is op de Holocene kustontwikkeling. Aan de hand van de afzettingen in het midden-Holocene getijdebekken in west Nederland concludeerden Van der Spek en Beets (1992) dat dit grote bekken pas begon op te vullen toen de snelheid van zeespiegelstijging afgenomen was tot minder dan 30 a 40 cm per eeuw. Deze waarde van 3 tot 4 mm per jaar werd gekozen als de kritische lange-termijn gemiddelde grens voor het meegroeien van grote getijdebekken in Nederland.

Sinds de analyse van Oost zijn er nieuwe gegevens verzameld waarmee ook delen van de bekkenopvulling te dateren zijn en rekening gehouden kan worden met ruimtelijke variatie. Boringen uit verschillende getijdebekken, waarvan de locaties variëren in afstand tot de (voormalige) zeegaten en hoofdgeulen, laten een variatie in sedimentopeenvolgingen zien, welke inzicht geven in de variatie in snelheid van sedimentaccumulatie over kortere intervallen (van der Spek, 2004).



Figuur 3.2 Vereenvoudigde paleogeografische kaarten van Nederland voor 5000 BP (Before Present – voor heden) en 2600 BP. De situatie van 5000 BP laat zien hoe Nederland er aan het einde van een periode van snelle zeespiegelstijging bijlag: de kust bestond uit grote getijdebekken (groen), welke van de Noordzee gescheiden werden door een gordel van eilanden (geel) en die landwaarts overgingen in uitgestrekte kustmoerassen (paars). De kustlijn van West-Nederland lag landwaarts van de huidige kustlijn. Tijdens de snelle zeespiegelstijging was de aanvoer van sediment niet voldoende om de toenemende accommodatieruimte te vullen en breidden de bekkens landwaarts uit. De kustlijn verloor continu sediment aan het bekken en schoof mee landwaarts. In deze situatie is de vraag naar sediment groter dan het aanbod. De situatie in 2600 BP geeft een heel ander beeld. De getijdebekken in west- en zuidwest Nederland zijn vrijwel geheel opgevuld, slechts rond de riviermondingen is de kust nog open. Hier bouwt de kustlijn ook zeewaarts uit vanwege de grote zandaanvoer (parallele strandwallen, met geel aangegeven). Het aanbod van sediment is groter dan de vraag. In het noorden van Nederland is de situatie anders. Hier vinden we de voorloper van de Waddenzee, de sedimentaanvoer was hier niet voldoende om de getijdebekken op te vullen.

Opvulling bekkens

Het resultaat van bovengenoemde ontwikkeling is een verticale opeenvolging van zand, slib en veen. Voor deze studie zijn met name de opeenvolgingen van zand en slib, gevormd door

de opvulling van het bekken, van belang omdat we hieruit de snelheden van verticale sedimentaccumulatie kunnen bepalen. Door uit een sedimentopeenvolging op verschillende niveaus dateerbaar materiaal te bemonsteren en de ouderdom daarvan te bepalen, is het tijdsinterval waarin het tussenliggend sedimentpakket werd afgezet bekend. Door de afstand tussen 2 gedateerde niveaus te delen door dit tijdsinterval kan de gemiddelde verticale accumulatiesnelheid berekend worden, uit te drukken in mm per jaar.

Voor Zeeland ligt de gemiddelde verticale accumulatiesnelheid over de periode van 8200 BP tot 5600 BP tussen 3 en 9 mm per jaar. In Zuid-Holland ligt deze snelheid in de periode van 6800 BP tot 5900 BP op 3 - 16 mm per jaar, in Noord-Holland op 5 - 15 mm per jaar, tussen 7700 BP en 5500 BP. Ook is er onderscheid te maken tussen de sedimentatiesnelheden op de zandige platen langs de geulen en in de lagunes. Op de zandige platen waren de snelheden gemiddeld 5 mm per jaar en maximaal 6 mm per jaar. Voor de lagunes gelden waarden van respectievelijk 9 mm per jaar en 16 mm per jaar. NB dit zijn resultaten per gehele boring, kortere intervallen laten soms hogere snelheden zien (zie hieronder bij punt 3).

Deze getallen geven de range waarbinnen de snelheid waarmee het bekken opvult kan liggen. Er moeten echter een aantal kanttekeningen bij gemaakt worden:

1. Afzettingen met een ouderdom van 5000 tot 8000 jaar zijn in de loop van de tijd gecompacteerd, wat wil zeggen dat ze door het gewicht van bovenliggende afzettingen enigszins in elkaar geperst zijn. Dat betekent dat de afstand tussen twee gedateerde niveaus kleiner is dan kort na afzetting en dat de berekende accumulatiesnelheid dus lager is en conservatief geschat wordt.
2. De ouderdomsbepalingen zijn uitgevoerd met AMS radioactief koolstof metingen aan organisch materiaal (de schelpen van juveniele mollusken). Datering aan de hand van radioactief koolstof levert een ouderdom met een standaarddeviatie. Dat houdt in dat de werkelijke ouderdom ergens tussen de minimum- en maximumwaarde van de opgegeven range ligt. De gepresenteerde snelheden zijn gebaseerd op de mediane waarde van deze ouderdomsrange.
3. Sedimentatie is geen continu proces. Tijdens de vorming van een afzetting worden korte perioden van sedimentafzetting afgewisseld met intervallen waarin geen sediment wordt afgezet of waarin zelfs sediment wordt geërodeerd en afgevoerd. Hoe langer de periode waarover een sedimentpakket is gevormd, hoe meer intervallen van non-depositie het interval omvat en hoe groter de kans dat een deel van het eerder afgezette sediment is verdwenen. Hierdoor wordt de gemiddelde (netto) accumulatiesnelheid over het hele interval lager. Dit staat in de sedimentaire geologie bekend als het Sadler-effect.
4. De configuratie van het bekken tijdens de snelle zeespiegelstijging in het Holoceen, een binnendelta omringt door een lagune, is effectiever in het invangen van zand en slib dan een bekken met veel intergetijdegebied. In de laatste situatie is de kans op opwerveling en afvoer van sediment, met name door golven, aanzienlijk groter.
5. Tenslotte, de randvoorwaarden voor de opvulling van de getijdebekken in west en zuidwest Nederland tijdens het midden-Holoceen verschillen van die van de Waddenzee in de huidige situatie. De midden-Holocene bekkens waren relatief leeg wat sedimentinhoud betreft, er was dus een grote sedimentvraag. Tegelijkertijd was er ook een groot volume sediment beschikbaar in de vorm van oude kustafzettingen. Door de grote vraag naar en het grote aanbod van sediment, zal de netto accumulatie van

sediment ook groot geweest zijn. De huidige Waddenzee is grotendeels gevuld met sediment en zal, naar verwachting, een groeiende sedimentvraag kennen als gevolg van versnellende zeespiegelstijging. Of dit zal gaan leiden tot accumulatiesnelheden zoals in het midden-Holoceen is op dit moment niet te voorspellen. De midden-Holocene waarden moeten dan ook met de nodige voorzichtigheid gebruikt worden.

Op basis van deze kanttekeningen moeten de berekende accumulatiesnelheden beschouwd worden als conservatieve schattingen (wegens het ontbreken van een correctie voor compactie) van de maximale accumulatiesnelheden over een lange termijn (maximaal wegens de grote vraag naar sediment, een effectieve configuratie om sediment in te vangen en een grote beschikbaarheid van sediment).

Conclusie

De langetermijn gemiddelde waarde voor verticale accretie van zandige wadplaten bedraagt, onder optimale omstandigheden, 5 a 6 mm per jaar. De verticale accretie in een meer lagunaire setting, dat wil zeggen een situatie waarin droogvallende platen grotendeels ontbreken en waarin relatief veel slib wordt afgezet, ligt hoger: 9 tot 16 mm per jaar. Over korte intervallen kunnen deze snelheden hoger liggen.

3.4.2 De Waddenzee in de laatste eeuw

De sedimentbalans van het Nederlandse deel van de Waddenzee is positief. Wang e.a. (2018) vermelden dat het sedimentvolume tussen 1927 en 2012 met 550 miljoen m³ (*mkm*) is toegenomen. Als er rekening gehouden wordt met zandwinning, waarbij zand onttrokken is aan de Waddenzee, en baggeren en storten van sediment worden meegerekend, loopt dit volume op tot 650 *mkm*. Dit volume is aanzienlijk groter dan voor de compensatie van de waargenomen zeespiegelstijging van 2 mm per jaar¹ nodig is: dat volume bedraagt slechts ca. 280 *mkm*. Het afgezette zand is grotendeels afkomstig van erosie van de Noordzeekusten van Noord-Holland en de Waddeneilanden en van de buitendelta's. Slib wordt vanuit het zuiden aangevoerd door de stroming langs de kust.

De grootste sedimentatie is opgetreden in de bekkens van de Zeegaten van Texel en het Vlie (4,69 mm per jaar) en de bekkens van het Friesche Zeegat (6,66 mm per jaar; NB het grootste deel van deze sedimentatie komt voor rekening van het bekken van de Zoutkamperlaag). Dit is het gevolg van de aanpassing van deze bekkens aan de afsluitingen van respectievelijk de Zuiderzee en de Lauwerszee. De aanleg van de Afsluitdijk blokkeerde de diepe getijgeulen die naar de Zuiderzee liepen, die vervolgens snel met vooral slib opvulden. De getijdebieten van deze zeegaten bleven vrijwel gelijk waardoor de aanpassing van de overige geulen in het bekken geleidelijk verliep. Door de afsluiting van de Lauwerszee nam het getijdebiet van de Zoutkamperlaag aanzienlijk af, waardoor de geul een veel te grote doorsnede had voor het resterende debiet. In combinatie met een groot zandoverschot op de buitendelta leidde dit tot een zeer sterke sedimentatie in het bekken, waarbij er veel zand en slib in de geul werd afgezet. In bekkens waar geen grote ingrepen plaatsvonden waren de sedimentatiesnelheden aanzienlijk lager. Zo bedraagt de sedimentatie in het bekken van het Zeegat van Ameland slechts 2,57 mm per jaar.

In de westelijke Waddenzee (dat wil zeggen, ten westen van het wantij van Terschelling) is tussen 1935 en 2005 zo'n 450 *mkm* zand en slib afgezet (Elias e.a., 2012). Toch is de accommodatieruimte (het volume dat in potentie nog met sediment opgevuld kan worden) in dit gebied nog aanzienlijk. Ondanks dat er aanzienlijke volumes zand aanwezig zijn in de kust (die onderhouden wordt met zandsuppleties) en de buitendelta's, is de netto import van sediment beperkt. Waarschijnlijk is het sedimenttransporterend vermogen van de zeegaten

¹ De gemiddelde zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust over de periode 1890-2017 bedroeg 18,6 cm per eeuw (Zeespiegelmonitor 2018; Baart e.a., 2019).

niet voldoende om de achterstand in opvulling in te lopen. Dit deel van de Waddenzee is transport-gelimiteerd.

De over de periode 1935-2005 waargenomen verticale accretiesnelheid van 4,69 mm per jaar komt dicht in de buurt van de in dit hoofdstuk beredeneerde lange termijn gemiddelde waarde voor verticale accretie van zandige wadplaten van 5 a 6 mm per jaar.

De oostelijke Waddenzee bevat grote oppervlaktes intergetijdeplaten, waardoor de accommodatieruimte hier beperkt is. Deze getijdebekkens zijn niet ver van morfologisch evenwicht. Een toename van de accommodatieruimte, bijvoorbeeld door bodemdaling door gaswinning, wordt snel weer gecompenseerd door de import van sediment. De sedimentbalansen van deze bekkens zijn accommodatie-gelimiteerd. Uiteraard is de aanvulling van een groeiende accommodatieruimte niet oneindig: als de vraag te snel toeneemt zullen ook deze bekkens achter gaan lopen in sedimentatie.

De ontwikkeling van het bekken van de Zoutkamperlaag na afsluiting van de Lauwerszee illustreert hoe dit werkt. De afsluiting leidde tot een toename van de accommodatieruimte in het bekken (de geulen waren te ruim, ze waren immers in evenwicht met een veel groter getijdebiet), wat in combinatie met een groot zandoverschot op de buitendelta tot een snelle verticale accretie leidde. Elias e.a. (2012; p. 305) vermelden dat hier tijdens de aanpassing van het bekken tussen 1969 en 1985 bijna 70 *mkm* sediment afgezet werd, wat een verticale accretie van gemiddeld 8,25 mm per jaar betekent.

Bij toenemende sedimentvraag door zeespiegelstijging of bodemdaling is er geen groot zandoverschot in de kustzone voorhanden, het meegroeivermogen ligt daarom lager dan de berekende gemiddelde accretiesnelheid.

4 Berekeningen van de geldende waarden voor meegroeivermogen en kritische snelheid voor verdrinking

4.1 Meegroeivermogen

In deze paragraaf wordt beknopt weergegeven hoe de vigerende getallen voor het meegroeivermogen in de Waddenzee tot stand zijn gekomen. De vijf belangrijkste documenten voor de gaswinning onder de Waddenzee met betrekking tot het meegroeivermogen zijn:

- 1998 Integrale Bodemdalingstudie Waddenzee (Oost e.a., 1998);
- 2004 Bodemdalingstudie Waddenzee 2004 (Hoeksema e.a., 2004);
- 2006 MER Aardgaswinning Waddenzeegebied vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen (NAM, 2006);
- 2006 Passende beoordeling van het rijksprojectbesluit gaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen (Ministerie van Economische Zaken [MEZ], 2006).
- 2010 Meegroeivermogen en gebruiksruimte in de getijdebekkens Vlie en Marsdiep; Grootschalige morfologische ontwikkelingen westelijke Waddenzee (Cleveringa & Grasmeijer, 2010).

De Integrale Bodemdalingstudie Waddenzee (Oost e.a., 1998) is het basisdocument voor het vaststellen van het meegroeivermogen van de Waddenzee. Bij de bepaling van het meegroeivermogen is gekeken naar vier potentiële knelpunten die beperkingen kunnen opleveren voor de sedimentatie in kombergingsgebieden, te weten:

1. de zandlevering door de Noordzeekust;
2. de aanvoer van sediment via het zeegat;
3. sedimentatie in het kombergingsgebied en
4. de sedimentatie op platen.

Uit de studie kwam naar voren dat over perioden van meer dan 19 jaar de sedimentatie op de wadplaten en de erosie van de Noordzeekust uiteindelijk bepalend zijn voor het meegroeivermogen: deze bepalen de verticale sedimentatiesnelheid op langere termijn in de kombergingsgebieden (afsluitingen en dergelijke buiten beschouwing latend waarbij vooral geulen zich moeten aanpassen).

Oost (1998) kwam op basis van een uitgebreide beschouwing van de sedimentbalans van de Nederlandse Waddenzee tot de conclusie dat wadplaten kunnen meegroeien door aanvoer van sediment van buitenaf. De terugschrijding van de Waddeneilanden werd als primaire zandbron beschouwd. "Voor de verdeling van sediment over de platen lijkt een relatieve zeespiegelstijging (bodemdaling) van 3 tot 6 mm per jaar direct datzelfde jaar gecompenseerd te kunnen worden." (Oost, 1998; p. 192).

Deze range in (maximale) sedimentatiesnelheden van 3 tot 6 mm per jaar wordt in Bijlage C bij de passende beoordeling van het Rijksprojectbesluit over de Gaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen (MEZ, 2006, p. 86-87) gekoppeld aan de grootte van getijdebekkens: kleine bekkens kunnen relatief snel reageren op veranderingen, dit in tegenstelling tot grote bekkens.

De laagste waarde van 3 mm per jaar wordt gekoppeld aan grote bekkens als Marsdiep en Vlie, het meegroeivermogen van de kombergingsgebieden Zoutkamperlaag en Pinkegat wordt geschat op “minstens circa 5, repectievelijk 6 mm/jaar over gemiddeld 19-jaarlijkse perioden” (MEZ, 2006, p. 21).

In het rapport Meegroeivermogen en gebruiksruimte in de getijdebekkens Vlie en Marsdiep; Grootschalige morfologische ontwikkelingen westelijke Waddenzee (Cleveringa & Grasmeijer, 2010) wordt het meegroeivermogen van de grote bekkens opnieuw beschouwd met behulp van:

1. De sedimentatie in de getijdebekkens van de westelijke Waddenzee;
2. Simulaties met het ASMITA-model;
3. Een update van de sedimentbalans uit de Integrale bodemdalingsstudie (Oost, 1998); en
4. Een beschouwing van de kennisontwikkeling rond de argumenten voor de ondergrens aan de maximale sedimentatiesnelheid uit de Integrale Bodemdalingsstudie (Oost e.a., 1998)

De uitkomst van de verschillende berekeningen en overwegingen is dat het meegroeivermogen van de grote bekkens tenminste 5 mm/jaar bedraagt.

Tabel 4.1. Meegroeivermogen voor de verschillende bekkens in de Waddenzee zoals bepaald in verschillende studies.

bekken	Marsdiep	Eierlandse Gat	Vlie	Borndiep	Pinkegat	Zoutkamp -erlaag.
grootte	groot		groot		klein	middel
Oost, 1998 & MEZ, 2006	3 mm/j	Niet bepaald	3 mm/j	Niet bepaald	6 mm/j	5 mm/j
Cleveringa & Grasmeijer, 2010	5 mm/j	Niet bepaald	5 mm/j	Niet bepaald	Niet bepaald	Niet bepaald

In Tabel 4.1 zijn de meegroeivermogens uit de vermelde studies samengevat. Voor het Pinkegat en de Zoutkamperlaag worden nog steeds de resultaten uit MEZ (2006) gehanteerd voor gaswinning en voor het Vlie en Marsdiep worden de resultaten van Cleveringa en Grasmeijer (2010) gehanteerd. Het valt dus op dat de waarden voor de grote bekkens zijn aangepast en voor de kleine en middelgrote bekkens niet.

4.2 Kritische snelheid van zeespiegelstijging voor verdrinking

Van Goor e.a. (2003) onderzochten het effect van ZSS op het Eierlandse Gat en het Amelandse Zeegat met behulp van een ASMITA-model waarin het zeegatsysteem in drie morfologische elementen is geschematiseerd: wadplaten in het bekken, geulen in het bekken en de buitendelta. Dezelfde schematisering is gebruikt voor het opstellen van ASMITA-modellen voor de andere zeegatsystemen in de Nederlandse Waddenzee (Kragtwijk e.a., 2004; Bijsterbosch, 2003; Hinkel e.a., 2013). Volgens dit drie-elementenmodel kan de kritische snelheid van ZSS als volgt worden berekend (Bijsterbosch, 2003; Hinkel e.a., 2013):

$$R_c = \frac{C_E}{\frac{1}{w_{sf}} + \frac{S_f + S_c + S_d}{\delta_{od}} + \frac{S_f + S_c}{\delta_{dc}} + \frac{S_f}{\delta_{cf}}} \quad (4-1)$$

Hierin:

R_c	=	Kritische snelheid van ZSS voor verdrinking
C_E	=	Globale evenwichtsconcentratie sediment
w_{sf}	=	Verticale uitwisselingscoëfficiënt voor het element 'plaat'
S_f	=	Horizontale oppervlakte plaat element
S_c	=	Horizontale oppervlakte geul element
S_d	=	Horizontale oppervlakte buitendelta
δ_{od}	=	Horizontale uitwisselingscoëfficiënt tussen buitenwereld en buitendelta
δ_{dc}	=	Horizontale uitwisselingscoëfficiënt tussen buitendelta en geul
δ_{cf}	=	Horizontale uitwisselingscoëfficiënt tussen geul en plaat

Voor elk van de zeegaten in de Nederlandse Waddenzee is een ASMITA-model opgesteld. Op basis van de toenmalige (2018) "up-to-date" parameterinstellingen zijn de kritische snelheden van ZSS voor deze zeegatsystemen berekend door Wang e.a. (2018), zie Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Parameterinstellingen van de ASMITA modellen voor de zeegatsystemen in de Nederlandse Waddenzee en de berekende kritische ZSS snelheid voor verdrinking R_c met 1- σ en 30% onzekerheidsbanden² (Wang e.a., 2018).

Bekken	Marsdiep	Eierlandse Gat	Vlie	Borndiep	Pinkegat	Zoutkamperlaag
C_E (-)	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
w_{sf} (m/s)	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
S_f (km ²)	133	105	328	178	38.1	65
S_c (km ²)	522	52.7	387	98.3	11.5	40
S_d (km ²)	92.53	37.8	106	74.7	34	78
δ_{od} (m ³ /s)	1550	1500	1770	1500	1060	1060
δ_{dc} (m ³ /s)	2450	1500	2560	1500	1290	1290
δ_{cf} (m ³ /s)	980	1000	1300	1000	840	840
R_c (mm/jr)	7,0	18,0	6,3	10,4	32,7	17,1
1- σ	4,5-9,5	11,6-24,4	4,1-8,5	6,7-14,1	21,1-44,3	11,1-23,1
30%	5,5-8,1	14,2-20,9	5,0-7,3	8,2-12,1	25,8-37,9	13,5-19,8

Formulering (4-1) bevat, naast de oppervlakten van de morfologische elementen, parameters die sedimenttransporten representeren. Door het geaggregeerde karakter van het model zijn deze parameters niet direct te meten in het veld. De parameterinstellingen voor de verschillende zeegaten zijn rondom de eeuwwisseling bepaald (Van Goor e.a., 2003; Kragtwijk e.a., 2004), en vooral gebaseerd op de kalibratie van het model voor één van de bekkens/kombergingen, Zoutkamperlaag, aan de hand van de ontwikkelingen na de afsluiting

² Van Goor e.a. (2003) beschouwden alle relevante modelparameters als stochastische variabelen en presenteerden de kans op verdrinking van het Amelander Zeegat en het Eierlandse Gat als functie van de snelheid van ZSS. Een vergelijkbare berekening kan ook voor de andere zeegaten uitgevoerd worden. Aan de hand van deze kansverdelingen is een onzekerheidsband voor de kritische snelheid van ZSS berekend. Tabel 4.2 presenteert een range met een onder- en bovengrens van één standaarddeviatie t.o.v. de gemiddelde waarde (1- σ). De ondergrens van de range geeft dus een kans op verdrinking van 15,87% aan. Echter, de waarden van de ondergrens voor de Zeegaten van Texel en het Vlie (respectievelijk 4,5 en 4,1 mm per jaar) zijn niet realistisch, aangezien ze lager zijn dan de in het verleden waargenomen sedimentatiesnelheid van 4,7 mm per jaar (zie 3.4.2). De opgetreden waarde correspondeert met een kans van ca. 30% op verdrinking, daarom wordt tevens een onzekerheidsband gebaseerd op een grenswaarde van 30% gepresenteerd.

van de Lauwerszee. Voor de andere zeegatsystemen is de kalibratie minder goed uitgevoerd, en is er dus meer onzekerheid over de gebruikte modelparameters.

Hoe de modelparameters gerelateerd zijn aan meetbare fysische parameters is later beschouwd door Wang e.a. (2008). Hieronder maken wij gebruik van deze beschouwing om te bepalen hoe eenzelfde parameter voor de verschillende zeegatsystemen zich verhoudt. Zo kunnen de verschillende parameters voor de andere zeegatsystemen beter worden geschat met komberging Zoutkamperlaag als referentie. Met de verbeterde modelparameters kunnen de kritische ZSS snelheden voor verdrinking voor de verschillende bekkens beter worden geschat.

De globale evenwichtsconcentratie van sediment C_E is gerelateerd aan het sedimentaanbod van buiten het systeem, dat afhangt van de sedimenteigenschappen en het golfklimaat. De verticale uitwisselingscoëfficiënt w_{sf} is ongeveer gelijk aan de valsnelheid van sediment. Voor deze parameters geldt dus dat ze hetzelfde zijn voor alle beschouwde zeegaten.

Voor de horizontale uitwisselingscoëfficiënt tussen twee elementen geldt:

$$\delta = \frac{DA}{L} \quad (4-2)$$

waarbij:

δ	=	horizontale uitwisselingscoëfficiënt
D	=	Dispersiecoëfficiënt
A	=	Oppervlakte dwarsprofiel waarover de uitwisseling plaatsvindt
L	=	Afstand tussen de twee elementen

Voor de dispersiecoëfficiënt is door Wang e.a. (2008) de volgende relatie afgeleid:

$$D \propto u \frac{uh}{w_s} \quad (4-3)$$

waarbij u is stroomsnelheid die de sterkte van de getijstroming weergeeft en h is waterdiepte. Voor de uitwisselingscoëfficiënt tussen geulen en platen δ_{cf} geldt: u is ongeveer gelijk voor alle zeegatsystemen; h (gerelateerd aan de getijslag) is ongeveer gelijk voor alle zeegatsystemen; dus D is ongeveer gelijk voor alle zeegatsystemen. A is evenredig met de totale lengte van alle geulen in het bekken, dus evenredig met wortel van de bekkenoppervlakte $S_b = S_f + S_c$; L is ongeveer gelijk voor alle zeegatsystemen; dus:

$$\delta_{cf} \propto \sqrt{S_b} \quad (4-4)$$

Voor de uitwisselingscoëfficiënt tussen geulen en buitendelta δ_{dc} geldt: A is de oppervlakte van het dwarsprofiel bij de keel van het zeegat, en evenredig met het getijprisma en dus evenredig met S_b . Waterdiepte h is evenredig met de wortel uit A en dus evenredig met de wortel uit S_b . Stroomsnelheid u is ongeveer gelijk voor alle zeegatsystemen; D is dus evenredig met wortel van S_b . L is evenredig met wortel van S_b . Dus:

$$\delta_{dc} \propto S_b \quad (4-5)$$

De uitwisselingscoëfficiënt tussen buitenwereld en buitendelta δ_{od} wordt niet aangepast met de volgende overwegingen: A is evenredig met de omtrek van de buitendelta, die net zoals L evenredig is met de wortel uit de oppervlakte van de buitendelta. Verder is A ook evenredig met de waterdiepte h die groter is voor grotere zeegaten. Maar sediment wisselt vooral uit in de ondiepere zone langs de kust. Dus, zowel A als D , en daarmee ook δ_{od} nemen toe met de grootte van het systeem, maar de relatie is minder goed te schatten dan bij de andere twee uitwisselingscoëfficiënten. In de bestaande parameterinstellingen geldt al dat deze coëfficiënt groter is voor grotere systemen.

Na de aanpassing geldt nog steeds dat de kritische ZSS snelheid voor verdrinking kleiner is voor grotere bekkens, maar de mate van gevoeligheid voor de bekkengrootte is minder geworden (zie Tabel 4.3). Voor de komberging Vlie is de nieuwe berekende kritische ZSS snelheid groter geworden, van 6,3 naar 8,8 mm/jr.

Tabel 4.3. *Parameterinstellingen van de ASMITA modellen voor de zeegatsystemen in de Nederlandse Waddenzee en de berekende kritische ZSS snelheid voor verdrinking R_c , aangepast aan de hand van de beschouwingen door Wang e.a. (2008). De 1- σ en 30% onzekerheidsbanden zijn eveneens aangegeven (zie Tabel 4.2 voor toelichting).*

Bekken	Marsdiep	Eierlandse Gat	Vlie	Borndiep	Pinkegat	Zoutkamperlaag
δ_{dc} (m ³ /s)	7317	1762	7987	3087	673	1290
δ_{cf} (m ³ /s)	2001	982	2090	1299	607	840
R_c (mm/jr)	9,7	18,7	8,8	13,4	25,6	17,1
1 $\pm\sigma$	6,3-13,1	12,1-25,3	5,7-11,9	8,7-18,1	16,5-34,6	11,1-23,1
30%	7,7-11,3	14,8-21,7	7,0-10,2	10,6-15,5	20,3-29,7	13,5-19,8

De waarden van R_c zijn modelmatig berekend en bevatten onzekerheden. Dit geldt ook voor de nieuw bepaalde waarden. Een belangrijke vraag is dan hoe groot de kans is dat de werkelijke waarden van R_c lager zijn dan deze waarden. Om deze vraag te beantwoorden kunnen veldwaarnemingen worden beschouwd.

De waarde van R_c voor een bekken is per definitie gelijk aan de sedimentatiesnelheid wanneer er in het bekken een dusdanig grote sedimentvraag is dat de sedimentimport van het bekken gelijk is aan de transportcapaciteit, waardoor de sedimentimport dus maximaal is. De opgetreden sedimentatiesnelheid in het bekken is theoretisch dus lager dan de waarde van R_c . Door de afsluiting van de Zuiderzee waren de bekkens Marsdiep en Vlie ver uit evenwicht geraakt en er trad snelle sedimentatie op. Dit geldt ook voor het bekken van Zoutkamperlaag na de afsluiting van de Lauwerszee. De historisch waargenomen sedimentatiesnelheden in deze bekkens geven dus een indicatie van de ondergrens van respectievelijke R_c waarden. In het Vlie lag deze sedimentatiesnelheid net onder de nu gehanteerde waarde voor het meegroeivermogen (5 mm/jaar). Maar het moet worden benadrukt dat het hier een gemiddelde sedimentatiesnelheid over 70 jaar betreft. De maximaal opgetreden sedimentatiesnelheid (net na de afsluiting van Zuiderzee) zal groter geweest zijn en zeker hoger dan 5 mm/j. In de komberging Zoutkamperlaag trad de snelste sedimentatie op direct na de afsluiting van de Lauwerszee in 1969. De gemiddelde sedimentatiesnelheid over het hele bekken van het Friesche Zeegat (Pinkegat + Zoutkamperlaag) en over de periode 1935-2005, 6,66 mm per jaar, is een forse onderschatting van de maximale sedimentatiesnelheid (8,25 mm/jr. tussen 1969 en 1985; zie

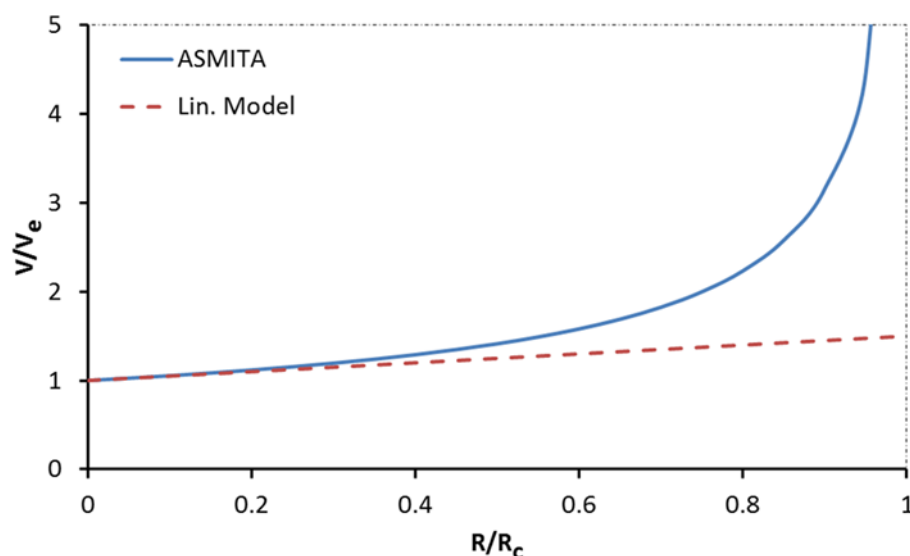
3.4.2). Samenvattend kan worden geconcludeerd dat de gehanteerde waarden voor het meegroeivermogen conservatief zijn.

Op basis van de veldwaarnemingen kan er worden geconcludeerd dat de kans dat de waarden van R_c , zoals bepaald in Tabel 4.3, verder naar beneden moeten worden bijgesteld klein is.

5 Inzichten uit recent modelleringsonderzoek

Veel inzichten in het effect van ZSS zijn verkregen door de analyse aan de hand van het ASMITA model waarin een getijbekken wordt beschouwd als één enkel element met het watervolume onder gemiddeld hoogwater als systeemvariabele (zie Stive & Wang, 2003; Townend et al., 2016a, 2016b). In het geval van een constante snelheid van ZSS, kan een 'nieuw' dynamisch evenwichtsvolume (verder aangeduid als *dynamisch evenwicht*) worden bereikt, dat groter is dan het oorspronkelijke evenwichtsvolume, zolang de ZSS-snelheid onder een kritische waarde blijft (zie ook het conceptueel model geïllustreerd in Figuur 2.1). Er is een permanent verschil tussen het (dynamische) evenwichtsvolume met ZSS en het (oorspronkelijke) evenwichtsvolume zonder ZSS (zie Figuur 5.1). Dit verschil is nodig om de sedimentbehoefte, die de sedimentimport naar het bekken drijft, in stand te houden zodat de bodem met de ZSS stijgt. Als de ZSS-snelheid de kritische waarde nadert of overschrijdt, wordt het dynamisch evenwichtsvolume oneindig groot (Figuur 5.1), wat tot verdrinking (hier gedefinieerd als de ontwikkeling waarbij de gemiddelde waterdiepte in de tijd blijft toenemen, met als consequentie dat op den duur alle droogvallende wadplaten zullen verdwijnen) zal leiden.

De analyse met het één-element model is verder uitgebreid en heeft tot meer inzichten over de respons van een Waddenzeebekken op relatieve ZSS geleid (zie Lodder e.a., 2019). Hier worden de inzichten die van belang zijn voor de relatie tussen de kritische ZSS snelheid voor verdrinking en het meegroeivermogen samengevat. Deze inzichten hebben betrekking op niet-lineair gedrag, toepasbaarheid van het lineair model, invloed van ZSS op de morfologische tijdschaal, de dimensieloze ZSS snelheid, en de invloed van relatieve ZSS van beperkte duur.

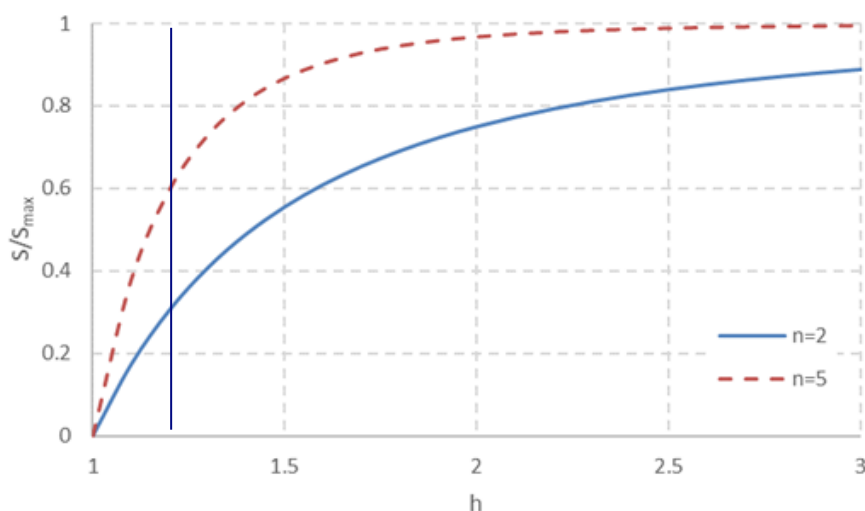


Figuur 5.1 Relaties tussen het dynamische evenwichtsvolume V (genormaliseerd door het oorspronkelijke evenwichtsvolume V_e) en de zeespiegelstijgingssnelheid R (genormaliseerd door de kritische snelheid R_c), volgens het één-element model en het lineaire (klassieke empirische) model.

Niet-lineair gedrag

Recente analyse (Wang e.a., 2017) heeft duidelijk gemaakt dat de niet-lineariteit van het ASMITA-model essentieel is om een kritische snelheid van ZSS te kunnen voorspellen. Volgens een lineair model, zoals het klassieke empirische model dat uitgaat van exponentiële

damping van verstoringen van het morfologische evenwicht, kan er altijd een dynamisch evenwichtsvolume worden gevonden (de rood gestreepte lijn in Figuur 5.1) en bestaat er geen kritische ZSS-snelheid. Fysisch gezien vertegenwoordigt de niet-lineariteit de beperking van de sedimenttransportcapaciteit. Netto sedimenttransport naar het bekken, ofwel import, treedt op als de diepte in het bekken groter is dan de evenwichtsdiepte. De import neemt toe met de diepte maar de toename kan niet oneindig doorgaan. Er is een maximale grootte van import, die kan worden bereikt wanneer de waterdiepte in het bekken oneindig groot wordt. Verdere toename van de diepte heeft weinig invloed op de sedimentimport. De beperkte transportcapaciteit wordt niet correct weergegeven in het klassieke empirische model waarin een verstoring van het morfologische evenwicht exponentieel in tijd afneemt omdat de snelheid van afname lineair toeneemt met de grootte van de verstoring. In het ASMITA model wordt de beperkte transportcapaciteit wel weergegeven (Figuur 5.2): de sedimentimport benadert een maximale waarde als de diepte in een waddenbekken erg groot wordt. Dit is de reden waarom het klassieke empirische model geen kritische snelheid voor ZSS voorspelt, terwijl het ASMITA-model dat wel doet.



Figuur 5.2 Relatie tussen sedimentimport ($S/S_{\max}$) en de morfologische toestand (h). De waarde $h = 1$ vertegenwoordigt het morfologische evenwicht zonder ZSS. De sedimentimport S benadert de maximale waarde voor grote waarden van h . Parameter n komt voor in de formulering voor sedimenttransport en is afhankelijk van de sedimentsoort (zand of slib).

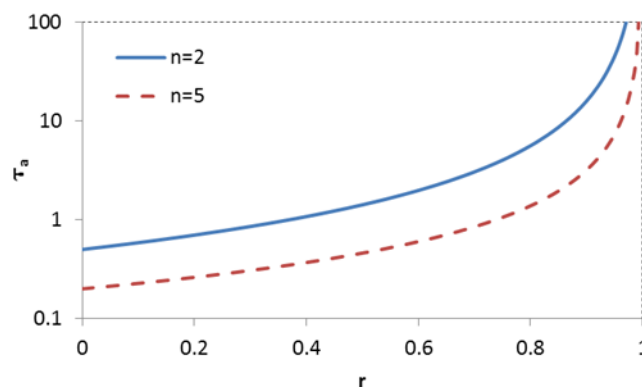
Geldigheid lineair model

Het probleem met het lineaire model is dat het beperkt geldig is. Het is alleen geldig als de morfologische toestand niet te ver afwijkt van het morfologische evenwicht. De exponentiële damping van een verstoring ten opzichte van het evenwicht geldt alleen als de verstoring niet te groot is. De vraag is hoe groot de verstoring mag zijn voordat het lineaire model niet meer geldig is. Het antwoord op deze vraag is belangrijk voor de beschouwing van effecten van relatieve ZSS van beperkte duur zoals bodemdaling door gas- of zoutwinning.

Figuur 5.1 laat zien dat het verschil tussen het lineaire model en het niet-lineaire model klein is totdat de ZSS-snelheid ongeveer 40% van de kritische waarde bereikt. Bij deze ZSS-snelheid is de afwijking van het watervolume t.o.v. de evenwichtswaarde ongeveer 20% van het evenwichtsvolume. Het betekent dus dat als de verstoring t.o.v. het evenwicht minder dan 20% is, het lineaire model als geldig kan worden beschouwd. Dit is ook te zien in Figuur 5.2: als de verhouding tussen de diepte en de evenwichtsdiepte minder dan ongeveer 1.2 is, stijgt de sedimentimport (bijna) lineair met de toename van de diepte.

Invloed van ZSS op morfologische tijdschaal

Eerdere studies (van Goor e.a., 2003) waren vooral gericht op het bepalen van het dynamisch morfologisch evenwicht en de kritische snelheid van ZSS voor verdrinking. Recente studies besteden meer aandacht aan het tijdproces van de morfologische ontwikkeling bij versnelling van ZSS (Wang e.a., 2017, 2018; Lodder e.a., 2019). De recente analyse leidt tot de conclusie dat de morfologische tijdschaal met betrekking tot het bereiken van het dynamisch morfologisch evenwicht sterk wordt beïnvloed door de ZSS-snelheid. De morfologische tijdschaal kan worden bepaald door het niet-lineaire model te lineariseren (zie Kragtwijk e.a., 2004). Maar het is belangrijk om te beseffen dat de linearisering ten opzichte van het dynamisch morfologisch evenwicht moet worden gedaan. Het is de morfologische tijdschaal met betrekking tot het dynamisch morfologisch evenwicht die bepaalt hoe lang het duurt voordat het nieuw dynamisch morfologisch evenwicht wordt bereikt bij versnelling van de ZSS. Deze morfologische tijdschaal verschilt van die met betrekking tot het morfologische evenwicht voor $R = 0$ (d.w.z. geen ZSS). Deze morfologische tijdschaal neemt meer dan lineair toe met toenemende ZSS snelheid (Figuur 5.3) en wordt oneindig groot als de ZSS-snelheid de kritische waarde nadert. Fysisch kan dit worden verklaard door de vertraagde reactie van het getijdenbekken op versnelling van de ZSS en de beperking van de sedimenttransportcapaciteit door de zeegat (Wang e.a., 2018). De vertraagde respons heeft tot gevolg dat het effect van versnelling in ZSS op de sedimentuitwisseling tussen het bekken en het kustgebied pas na langere tijd merkbaar zal zijn. De limiet die wordt opgelegd door de sedimenttransportcapaciteit houdt in dat ook op de lange termijn de sedimentimport naar het bekken niet evenredig met het ZSS-snelheid kan toenemen. Voor het getijdenbekken zelf betekent dit dat versnelling van ZSS verlies van droogvallende wadplaten zal veroorzaken, maar het totale verlies zal pas na lange tijd worden bereikt. Wanneer een bekken aan het verdrinken is, importeert het sediment met maximale snelheid en zullen de verdrinkingsprocessen erg traag verlopen.



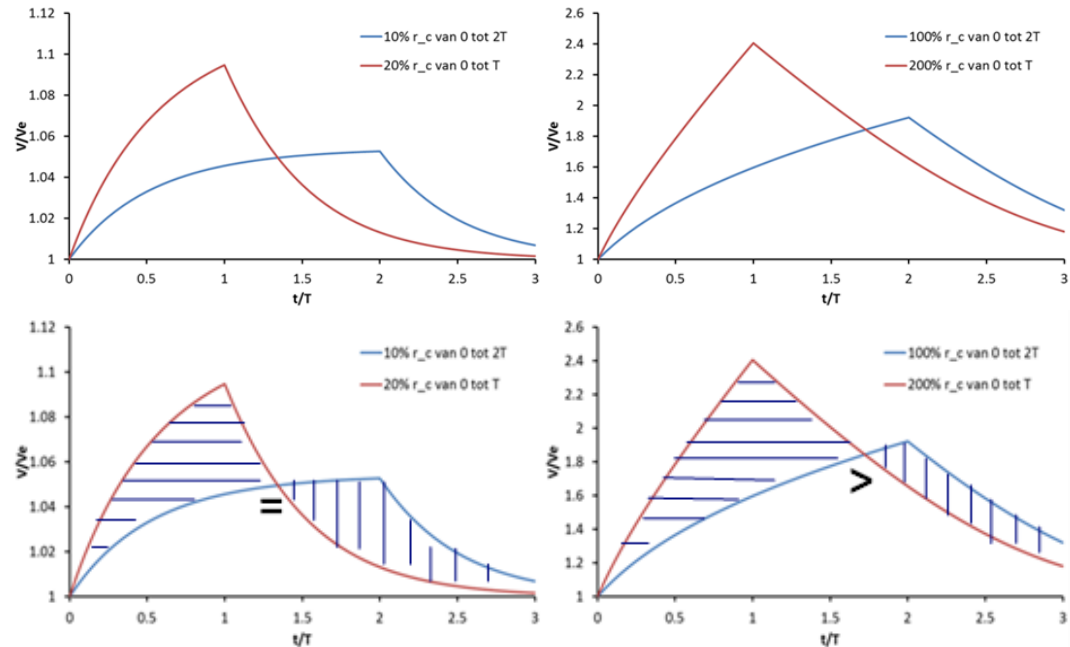
Figuur 5.3 Morfologische tijdschaal als functie van de zeespiegelstijgingssnelheid. Horizontale as: dimensieloze ZSS snelheid ($r=R/R_c$). Verticale as: morfologische tijdschaal, dimensieloos gemaakt met een parameter die betrekking heeft op de grootte van het bekken en de sedimenttransportprocessen (let op de logaritmische schaal). n komt voor in de formulering voor sedimenttransport en is afhankelijk van de sedimentsoort (zand of slib).

Dimensieloze ZSS snelheid

De analyse voor zowel het dynamische morfologische evenwicht als de daarbij behorende tijdschaal laat het belang van de verhouding tussen de ZSS-snelheid en de kritische snelheid voor verdrinking zien. Het is deze dimensieloze ZSS-snelheid die bepaalt hoe een getijdenbekken reageert. Dit betekent dat de morfologische reacties van de verschillende bekkens op toekomstige versnelde ZSS heel verschillend zullen zijn. Voor de grotere bekkens is de kritische ZSS snelheid lager en zullen de effecten van ZSS ernstig worden bij een lagere ZSS snelheid dan voor de kleinere bekkens waarvoor de kritische ZSS-snelheden hoog zijn.

Invloed van relatieve ZSS van beperkte duur

Bij het hanteren van HadK wordt de bodemdaling op dezelfde manier als ZSS beschouwd: bodemdaling plus ZSS is relatieve ZSS. Maar vergeleken met ZSS heeft bodemdaling door gas- of zoutwinning een veel beperktere duur. Daarom kan de vraag worden gesteld: hoe beïnvloedt het tijdsverloop van de bodemdaling de morfologische ontwikkeling? Specifieker: wat is het effect op de morfologische ontwikkeling als een bodemdaling van dezelfde omvang in de helft van de tijd optreedt (en dus twee keer zo snel verloopt)?



Figuur 5.4, boven: Verstoring t.o.v. morfologisch evenwicht veroorzaakt door een relatieve ZSS van beperkte duur. T is de morfologische tijdschaal t.o.v. morfologisch evenwicht zonder ZSS. Let verder op de verschillende schalen op de verticale assen van de twee plaatjes. Onder: cumulatieve grootte van de verstoringen. Zie tekst voor uitleg.

In Figuur 5.4 worden de resultaten van het ASMITA-model met één element getoond, waarin het tijdsverloop van de afwijking t.o.v. morfologisch evenwicht is weergegeven voor vier gevallen, twee met een lage snelheid van bodemdaling (lineair model geldig, linker plaatje) en twee met hoge snelheden (lineair model niet geldig, rechter plaatje). Alle berekeningen beginnen met het morfologische evenwicht als startwaarde. Voor de beoordeling van de effecten worden er twee dingen beschouwd: het maximale momentane effect, gedefinieerd als de maximale afwijking t.o.v. evenwicht (verschil met 1 in de grafiek), en het cumulatieve effect, gedefinieerd als de tijdsintegraal van de afwijking t.o.v. het evenwichtsvolume (oppervlakte tussen de grafiek en de horizontale as). Voor het maximale momentane effect geldt: hoe groter de snelheid van bodemdaling, hoe groter het effect. Concentreren van dezelfde totale bodemdaling in een kortere tijd leidt dus tot een groter maximaal momentaan effect, onafhankelijk of de snelheid van de bodemdaling binnen of buiten het geldigheidsgebied van het lineaire model ligt. Voor het cumulatieve effect geldt dat volgens het lineaire model het cumulatieve effect van bodemdaling alleen afhangt van de totale bodemdaling en niet van de verdeling van de bodemdaling in de tijd: bodemdaling met tweemaal de snelheid gedurende de helft van de tijd resulteert in hetzelfde cumulatieve effect. Dit geeft ook het niet-lineaire ASMITA model aan voor de gevallen waarbij het lineaire model van toepassing is (Figuur 5.4, linker plaatjes). Als de relatieve ZSS groter is dan 40% van de kritische snelheid, is het lineaire model niet meer van toepassing.

Dan laten de modelresultaten zien dat zowel het maximale momentane effect als het cumulatieve effect groter worden als de totale bodemdaling in een kortere periode wordt geconcentreerd (Figuur 5.4, rechter plaatjes).

6 Meegroeivermogens gerelateerd aan kritische snelheid van zeespiegelstijging voor verdrinking

6.1 Mogelijke relatie tussen meegroeivermogens en kritische snelheid van zeespiegelstijging voor verdrinking

Dat de verhouding tussen ZSS snelheid en de kritische ZSS snelheid voor verdrinking de morfologische effecten van ZSS bepaalt is een belangrijke reden om de kritische snelheid als uitgangspunt te nemen voor het bepalen van het meegroeivermogen. Omdat de kritische ZSS snelheid voor verdrinking een eenduidig en goed gedefinieerd begrip is, kan dan ook het meegroeivermogen duidelijk gedefinieerd worden.

Op basis van de beschouwing over de effecten van een relatieve ZSS van beperkte duur in Hoofdstuk 5, kan worden beargumenteerd dat 40% van de kritische ZSS snelheid voor verdrinking een bovengrens is voor de snelheid van relatieve ZSS bij het hanteren van HadK. Immers, onder deze limiet is het cumulatieve effect van bodemdaling niet afhankelijk van het tijdsverloop van de daling en wordt alleen door de totale omvang van de daling bepaald. De potentiële limiet van 40% is echter alleen van toepassing op bekkens / kombergingsgebieden waarvan de morfologische toestand niet te ver afwijkt van morfologisch evenwicht.

In bekkens waarvan de morfologie ver van het morfologisch evenwicht verwijderd is, is het lineaire model niet meer van toepassing en is het niet-lineaire model vereist. Voor een bekken dat praktisch al verdrongen is, zal de sedimentatie in het bekken niet afhangen van relatieve snelheid van ZSS. De sedimentatie wordt in die situatie beperkt door de capaciteit van de sedimentimport en is ongeveer gelijk aan de kritische ZSS-snelheid voor verdrinking. Dit betekent dat zo lang de relatieve ZSS onder de kritische snelheid voor verdrinking blijft, verandert er niet wezenlijk iets en zal er geen toegenomen negatief effect zijn. Het gevolg is dan alleen dat de groei van droogvallende wadplaten afneemt. De wadplaten verdwijnen echter niet; er blijft nog steeds groei.

Een mogelijke relatie tussen het meegroeivermogen G en de kritische snelheid voor verdrinking R_c is dus

$$G = \alpha R_c \quad (6-1)$$

waarbij de factor α afhankelijk is van de morfologische toestand van het bekken t.o.v. morfologisch evenwicht. Voor een bekken dat dicht bij morfologisch evenwicht is, zoals het Pinkegat, geldt de waarde 0,4 (40%) als bovenlimiet. Voor een bekken dat al een grote sedimenthonger heeft, zoals Marsdiep, kan een waarde van bijna 1 worden overwogen. Er is een grote overdiepte in deze bekkens maar deze is niet oneindig groot. De waarde 1 zou geldig zijn als de huidige toestand oneindig uit evenwicht is. Figuur 5.1 laat zien dat tot $R/R_c=0,8$ het dynamisch evenwichtsvolume langzaam toeneemt. Boven deze waarde manifesteert het exponentiële karakter van de verhouding zich: het evenwichtsvolume neemt zeer snel toe met toenemende R/R_c . Voor bekkens die ver van evenwicht zijn kan (zonder de toestand van de sedimentbalans van het bekken te willen verbeteren) op basis hiervan de waarde 0,8 worden gekozen als bovenlimiet.

Een voordeel van deze methode is dat hij goed gedefinieerd en transparant is. Ook maakt deze aanpak duidelijk waaraan verder moet worden gewerkt voor verbetering van de gebruikte getallen: verbetering van de berekening van de kritische snelheden van de

verschillende bekkens. Een ander voordeel is dat meer inzicht in de onzekerheden over de gehanteerde waarden kan worden gegeven.

Als eerste toets van de voorgestelde methode hebben Wang en Van der Spek (2021) de verhouding van de nu gehanteerde waarden van het meegroeivermogen en de kritische ZSS snelheid voor verdrinking uit Wang e.a. (2018) berekend, zie Tabel 6.1 (blauwe cellen). Voor de twee bekkens in het oostelijke deel van de Nederlandse Waddenzee is de verhouding minder dan 0,3 (=30%). Voor de bekkens Marsdiep en Vlie in het westelijke deel is de verhouding bijna 0,8, dit was minder dan 0,5 toen het meegroeivermogen voor het eerst werd bepaald (MEZ, 2006). Deze met de aangepaste kritische ZSS snelheden berekende waarden liggen allemaal onder de bovengrenzen zoals hierboven zijn voorgesteld.

Tabel 6.1. Verhouding tussen meegroeivermogen G en kritische ZSS snelheid voor verdrinking R_c , vóór (blauwe cellen) en na aanpassing van de kritische snelheid (Tab. 4.3) (oranje cellen).

Bekken	Marsdiep	Vlie	Pinkegat	Zoutkamperlaag
G (mm/j)	5 (3)*	5 (3)*	6	5
R_c (mm/j) uit Wang e.a. (2018)	7,0	6,3	32,7	17,1
Verhouding G/R_c (-)	0,71 (0,43)*	0,79 (0,48)*	0,18	0,29
Aangepaste R_c (mm/j)	9,7	8,8	25,6	17,1
Verhouding G/R_c (-)	0,52	0,57	0,23	0,29

*Het getal tussen haakjes gold vóór de aanpassing van het meegroeivermogen van de bekkens van Marsdiep en Vlie voor zoutwinning van 3 mm per jaar naar 5 mm per jaar door Cleveringa & Grasmeijer (2010), zie Tabel 4.1.

6.2 Meegroeivermogen gebaseerd op kritische snelheid van zeespiegelstijging voor verdrinking

Om tot de op kritische ZSS snelheid gebaseerde waarden van het meegroeivermogen voor de verschillende bekkens in de Nederlandse Waddenzee te komen, worden eerst een **bovengrens** ervan uitgerekend aan de hand van vergelijking (6-1), zie Tabel 6.2. Voor de coëfficiënt α wordt de waarde 0,8 gebruikt voor de twee bekkens (Marsdiep en Vlie) die ver van morfologisch evenwicht zijn en waarin nog een grote sedimentvraag aanwezig is, en 0,4 voor de andere bekkens die als dicht bij morfologisch evenwicht worden beschouwd. Vervolgens worden de berekende meegroeivermogens vergeleken met de huidige gehanteerde waarden.

Tabel 6.2. Meegroeivermogen G gerelateerd aan kritische ZSS snelheid voor verdrinking R_c .

Bekken	Marsdiep	Eierlandse Gat	Vlie	Borndiep	Pinkegat	Zoutkamperlaag
R_c (mm/jr)	9,7	18,7	8,8	13,4	25,6	17,1
α (-)	0,8	0,4	0,8	0,4	0,4	0,4
Berekende bovengrens meegroeivermogen G (mm/jr)	7,8	7,5	7,0	5,4	10,2	6,8

In een eerdere notitie (Wang e.a., 2024; zie ook de bovenstaande tekst) is het meegroeivermogen van het **Vlie** bekken al beschouwd en de conclusie bevestigd dat de gehanteerde waarde van 5 mm/jr conservatief (laag gekozen) is (Wang & van der Spek, 2021). Het aan de hand van de kritische ZSS snelheid voor verdrinking berekende meegroeivermogen voor het Vlie is aangepast van 6,3 naar 8,8 mm/jr. De nu geldende waarde voor het meegroeivermogen (5 mm/jr) is duidelijk lager dan de hier berekende bovengrenswaarde van 7 mm/jr. Dit betekent dat de nu gehanteerde waarde voor het meegroeivermogen in dit bekken nog veiliger/conservatiever is dan eerder werd gedacht.

Het bekken van het **Marsdiep** is van vergelijkbare grootte als het Vlie en de kritische ZSS snelheden voor verdrinking van de twee bekkens zijn ook ongeveer even groot. Ze behoren beide tot de categorie *grote bekkens* volgens MEZ (2006) en ze zijn beide sterk uit evenwicht door de afsluiting van de Zuiderzee. Het is dan logisch dat dezelfde waarde voor het meegroeivermogen wordt gehanteerd voor deze twee bekkens. Ook hier geldt dat de huidige waarde voor het meegroeivermogen aan de conservatieve kant is.

Het bekken van het **Pinkegat** behoort tot de categorie kleine bekkens. Voor het meegroeivermogen wordt er nog steeds de waarde 6 mm/jr zoals in MEZ (2006) bepaald gehanteerd. Na de aanpassing tijdens de MER studie voor zoutwinning (Cleveringa & Grasmeijer, 2010) is het verschil in meegroeivermogen tussen grote en kleine bekkens vrijwel verdwenen. De berekende bovengrens van het meegroeivermogen, 0,4 keer de kritische ZSS snelheid voor verdrinking, is gelijk aan 10,2 mm/jr. Dit biedt ruimte om het verschil in meegroeivermogen tussen grote en kleine bekkens te herstellen.

Voor het *middelgrote bekkens* van de **Zoutkamperlaag** geldt ook nog steeds de oorspronkelijke waarde voor het meegroeivermogen (5 mm/jr) zoals bepaald in MEZ (2006). Dit is nu even groot als de waarde voor de grote bekkens Marsdiep en Vlie. De berekende bovengrens van het meegroeivermogen, 0,4 keer de kritische ZSS snelheid voor verdrinking, is gelijk aan 6,8 mm/jr. Ook voor dit bekken kan het meegroeivermogen naar boven worden bijgesteld.

Voor de bekkens van het **Eierlandse Gat** en het **Borndiep** zijn tot nu toe geen waarden voor het meegroeivermogen bepaald omdat er in die bekkens geen mijnbouwactiviteiten zijn. Op basis van de kritische snelheden voor verdrinking zijn voor deze bekkens eveneens meegroeivermogens te bepalen.

Inhoudelijke overwegingen voor een bijstelling van de meegroeivermogens

De R_c waarden voor de bekkens zijn modelmatig berekend en bevatten onzekerheden. Dit geldt ook voor de nieuw bepaalde waarden. Opgetreden sedimentatiesnelheden in de bekkens van Marsdiep, Vlie en Zoutkamperlaag die ver uit evenwicht raakten na de afsluitingen van respectievelijk Zuiderzee en Lauwerszee, geven een indicatie van de ondergrens van de kritische snelheid R_c .

Bij de kritische ZSS snelheid voor verdrinking overstijgt de sedimentvraag in een bekken de maximale transportcapaciteit, waardoor het bekken maximaal sediment importeert. Hierdoor is de maximale sedimentatiesnelheid in het bekken ten hoogste gelijk aan de kritische snelheid van ZSS, de opgetreden sedimentatiesnelheid in het bekken is theoretisch dus lager dan de waarde van R_c . De waargenomen sedimentatiesnelheden in de bekkens van het Marsdiep, Vlie en Zoutkamperlaag direct na de afsluitingen lagen beduidend hoger dan de nu gehanteerde waarden voor de meegroeivermogens. Hieruit blijkt dat de nu gehanteerde waarden voor de meegroeivermogens relatief laag en dus conservatief zijn. Op basis van de veldwaarnemingen kan ook worden geconcludeerd dat het vrijwel zeker is dat de nieuw bepaalde waarden van R_c kleiner zijn dan de werkelijke waarden.

Op basis van de hand van de kritische snelheid van ZSS voor verdrinking berekende waarden (Tabel 6.2) kunnen de meegroeivermogens voor de bekkens van Marsdiep, Vlie Pinkegat en Zoutkamperlaag naar boven worden bijgesteld. Met toepassing van deze berekende waarden wordt het onderscheid tussen kleine, zich relatief snel aanpassende bekkens en grote bekkens die dat niet doen, weer hersteld.

Andere overwegingen voor een bijstelling van de meegroeivermogens

De modelberekeningen geven aan dat de waarden voor de meegroeivermogens van de bekkens Marsdiep, Vlie, Pinkegat en Zoutkamperlaag naar boven bijgesteld kunnen worden. De vraag is wat vanuit oogpunt van communicatie, consistentie van beleid en vergunningverlening hierbij de juiste keuze is. Die keuze is aan de beleidsverantwoordelijke en/of vergunningverlener. Hieronder worden een aantal overwegingen gegeven die een rol daarbij spelen.

Het is aannemelijk dat de beleidsverantwoordelijke en/of vergunningverlener bij de keuze van nieuw te hanteren waarden voor de meegroeivermogens een extra marge wil aanhouden. De bovengrenzen voor de meegroeivermogens in Tabel 6.2 zijn immers berekend met het model ASMITA, dat een vereenvoudiging van de werkelijkheid is en gemiddelde waarden voor het hele bekken geeft. Bovendien wordt het model verder ontwikkeld (meer ruimtelijke differentiatie, verfijnde morfologische evenwichtsrelaties), waaruit uiteraard ook lagere kritische snelheden voor ZSS kunnen volgen. Om een eventuele verlaging van de te hanteren meegroeivermogens voor de bekkens in de toekomst te voorkomen, zou bijvoorbeeld gekozen kunnen worden voor waarden die 80% van de waarden in Tabel 6.2 zijn. De rationale daarachter is dat dit een meer geleidelijke aanpassing van te hanteren waarden mogelijk maakt, bijvoorbeeld op het moment dat nieuw onderzoek de waarden in Tabel 6.2 bevestigt.

Met de bovengenoemde 80% en een afronding op 0,5 mm/jaar zou een eerste aanpassing voor de te hanteren meegroeivermogens voor de bekkens waarin mijnbouwactiviteiten de volgende kunnen zijn:

- Voor Marsdiep en Vlie van 5 naar 5,5 mm/jaar,
- Voor Pinkegat van 6 naar 8 mm/jaar,
- Voor Zoutkamperlaag van 5 naar 5,5 mm/jaar.

Merk op dat bij dit voorbeeld voor Marsdiep dezelfde (lagere) waarde als Vlie is gehanteerd, omdat de twee bekkens vergelijkbaar van grootte zijn en de grens ertussen (het wantij) beweegt in de tijd.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Samenvatting en conclusies

Het *meegroeivermogen* en de *kritische snelheid van zeespiegelstijging (ZSS)* voor *verdrinking* zijn twee begrippen die gebruikt worden in de beschouwing van de ontwikkeling van de Waddenzee onder invloed van relatieve ZSS (= bodemdaling + ZSS).

Meegroeivermogen is een begrip uit het “Hand aan de Kraan” (HadK) principe dat wordt gehanteerd bij de vergunningverlening en het toezicht houden op gas- en zoutwinning onder de Waddenzee. Het is gedefinieerd als de maximale relatieve ZSS snelheid in het kombergingsgebied van een zeegatsysteem die kan worden gecompenseerd door natuurlijke sedimentaanvoer van buitenaf, zonder significante milieuschade. Het verschil tussen het meegroeivermogen en de snelheid van relatieve ZSS is de gebruiksruimte, i.e. de maximale snelheid van bodemdaling die door gas- en/of zoutwinning mag worden veroorzaakt. Bij de studies naar de effecten van bodemdaling door gaswinning onder de Waddenzee zijn de waarden voor het meegroeivermogen in 2006 bepaald op 6 mm/j voor kleine bekkens zoals Pinkegat, 5 mm/j voor middelgrote bekkens zoals Zoutkamperlaag en 3 mm/j voor grote bekkens zoals Vlie. In 2010 is de waarde voor grote bekkens (Vlie en Marsdiep) aangepast naar 5 mm/j na de MER studie voor zoutwinning.

In tegenstelling tot de berekening van de kritische ZSS snelheid voor verdrinking is er geen eenduidige methode gedefinieerd voor de bepaling van het meegroeivermogen. Uit het voorzorgsprincipe zijn de waarden van de meegroeivermogens conservatief, dat wil zeggen voorzichtig, gekozen, vooral toen dit voor het eerst gebeurde. Vergelijking van de nu gehanteerde meegroeivermogens van 5 á 6 mm per jaar met de maximale, opgetreden accumulatiesnelheden na ingrepen laat zien dat deze waarden aan de lage kant van de berekende ranges liggen. Hieruit valt te concluderen dat de maximale accumulatiesnelheden voor sediment in de Waddenzee waarschijnlijk hoger liggen dan de huidige gebruikte waarden. Het gebruik van de nu gehanteerde waarden voor het meegroeivermogen voor de verschillende bekkens in HadK is dus in lijn met het voorzorgsprincipe.

De kritische ZSS snelheid voor verdrinking vormt een grens voor relatieve ZSS. Bij overschrijding ervan zal op langere termijn verdrinking optreden, waarbij met verdrinking wordt bedoeld het op den duur verdwijnen van alle intergetijdengebieden in een getidebekken en het blijven toenemen van de gemiddelde waterdiepte in een bekken met de tijd. Wang e.a. (2018) laten zien dat dit proces een tijdschaal van eeuwen heeft. Deze kritische snelheid kan per bekken modelmatig worden berekend. Volgens de bestaande ASMITA modellen voor de verschillende zeegatsystemen in de Nederlandse Waddenzee variëren de waarden van de kritische ZSS snelheid van 6 mm/j (voor Vlie) tot 33 mm/j (voor Pinkegat). Aan de hand van nieuwe inzichten zijn de parameters in deze ASMITA modellen aangepast in dit rapport, en de waarden van de kritische ZSS snelheid opnieuw berekend. De nieuw berekende waarden zijn lager geworden voor kleine bekkens (26 mm/j voor Pinkegat) en hoger voor grote bekkens (9 mm/j voor Vlie).

Beide grootheden zijn dus grenzen aan de snelheid van relatieve ZSS gerelateerd aan het wel of niet mee kunnen stijgen van de Waddenzeebodem met de zeespiegel. Maar ze zijn verschillend: het *meegroeivermogen* vormt de grens tussen wel of geen significante milieuschade terwijl de *kritische snelheid voor verdrinking* de grens vormt tussen het voortbestaan of op de lange duur verdwijnen van (intergetijde) wadplaten.

Het meegroeivermogen is dus per definitie lager of gelijk aan de kritische snelheid voor verdrinking. Het meegroeivermogen is een enigszins rekbaar begrip door de woorden “zonder significante milieuschade” in de definitie. De kritische snelheid voor verdrinking is

daartegen een eenduidig gedefinieerd wetenschappelijk begrip. De interpretatie van “significante milieuschade” is een bron van onzekerheid bij het bepalen van het meegroeivermogen. Onzekerheid bij het bepalen van de kritische snelheid voor verdrinking kan alleen van de nauwkeurigheden van de gebruikte modellen en data komen.

Recente analytische en numerieke analyses aan de hand van het ASMITA model hebben geconcludeerd dat de morfologische ontwikkeling van een Waddenzeebekken onder invloed van relatieve ZSS door twee factoren bepaald wordt, namelijk de dimensieloze ZSS snelheid en de toestand van het bekken zelf. De dimensieloze ZSS snelheid r is de verhouding tussen de snelheid van relatieve ZSS en de kritische ZSS snelheid voor verdrinking. De dimensieloze ZSS snelheid bepaalt niet alleen of verdrinking wel ($r > 1$) of niet ($r < 1$) optreedt, maar het bepaalt ook hoe het dynamische morfologische evenwicht eruitziet (voor $r < 1$), en het heeft grote invloed op de tijdschaal voor het bereiken van dit evenwicht. Met de toestand van het bekken wordt bedoeld in hoeverre het bekken van morfologische evenwicht (zonder ZSS) is verwijderd. Deze toestand heeft grote invloed op de gevoeligheid van de morfologie van het bekken voor veranderingen van relatieve ZSS snelheid. De sedimentatiesnelheid in een bekken dicht bij morfologisch evenwicht is laag, maar neemt snel en lineair toe met toename van de relatieve ZSS snelheid. De sedimentatiesnelheid in een bekken dat gemiddeld veel dieper is dan bij morfologische evenwicht, is hoog maar ongevoelig voor versnelling van de relatieve ZSS: de sedimentatiesnelheid zal nauwelijks verder toenemen. De toestand van het bekken heeft ook invloed op het cumulatieve effect van ZSS van beperkte duur (zoals bodemdaling door gas- of zoutwinning).

Op basis van de inzichten uit de analyses aan de hand van data en modellen wordt voorgesteld een relatie te leggen tussen het meegroeivermogen en de kritische ZSS snelheid voor verdrinking. Daarmee kan een duidelijke en transparante methode voor de bepaling van het meegroeivermogen worden gedefinieerd: meegroeivermogen is een fractie van de kritische ZSS snelheid, waarbij de grootte van de fractie afhankelijk is van de toestand van het betreffende bekken.

De in dit rapport berekende meegroeivermogens, gebaseerd op de kritische snelheid van zeespiegelstijging voor verdrinking, zijn voor de bekkens van Marsdiep, Vlie, Pinkegat en Zoutkamperlaag respectievelijk 7,8 mm/jr., 7,0 mm/jr., 10,2 mm/jr. en 6,8 mm/jr. Deze liggen alle boven de huidige waarden die in de Hand aan de Kraan-systematiek gebruikt worden. De conclusie is dat de in beleid en vergunningverlening gebruikte meegroeivermogens naar boven kunnen worden bijgesteld.

De mate waarin de meegroeivermogens naar boven worden bijgesteld is een keuze van de vergunningverlener. Als deze een extra marge wil aanhouden kan bijvoorbeeld gekozen kunnen worden voor waarden die 80% van de bovenstaande zijn. Bij een dergelijke voorzichtige ‘eerste aanpassing’ zouden de waarden bijvoorbeeld Marsdiep 5,5 mm/jaar, Vlie 5,5 mm/jaar, Pinkegat 8 mm/jaar, Zoutkamperlaag 5,5 mm/jaar kunnen zijn.

7.2 Aanbevelingen

Toekomstig onderzoek moet zich richten op de verdere verbetering van de nauwkeurigheid van de bepaling van de kritische ZSS snelheid en op de bepaling van de geldende fracties (van de kritische ZSS snelheid) voor de verschillende bekkens in de Waddenzee.

De volgende aanbevelingen worden gedaan:

A. Morfologisch-inhoudelijke aanbevelingen

- Verbeter de bepaling van de kritische ZSS snelheid voor de verschillende kombergingsgebieden door de ASMITA modellen verder aan te passen aan de nieuwe

inzichten in de morfodynamiek van de bekkens, en door gebruik te maken van andere modellen zoals het nieuw ontwikkelde hybride model Delft3D-ASMITA.

- De in het midden-Holoceen opgetreden maximale accumulatiesnelheden geven lange-termijn gemiddelde waarden, die naar locatie in een getijdebekken uitgesplitst kunnen worden. Deze waarden vormen een referentiekader voor de berekende waarden voor kritische snelheid van ZSS en meegroeivermogen. Documenteer de onderlinge verhouding tussen deze waarden, waarbij rekening wordt gehouden met deelgebieden binnen de getijbekkens.

B. Praktische aanbevelingen

- Verbeter het inzicht in de onzekerheden van de bepaalde kritische ZSS snelheid voor de verschillende kombergingsgebieden, door analyse van zowel de modellering als de veldwaarnemingen.
- Verbeter de bepaling van de verhouding tussen het meegroeivermogen en de kritische ZSS snelheid per kombergingsgebied.
- Vergelijk de meegroeivermogens die bepaald worden met de nieuwe methode met de meetgegevens en systeemkennis van de betreffende bekkens.

8 Referenties

- Baart, F., Rongen, G., Hijma, M., Kooi, H., de Winter, R. & Nicolai, R., 2019. Zeespiegelmonitor 2018. De stand van zaken rond de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Deltares rapport 11202193-000-ZKS-0004, 92 pp. met bijlagen.
- Bijsterbosch, L.W.W., 2003. Influence of relative sea level rise on tidal inlets. MSc. Thesis Delft Hydraulics & Delft University of Technology (maart 2003).
- Cleveringa, J. & Grasmeijer, B., 2010. Meegroeivermogen en gebruikruimte in de getijdebekkens Vlie en Marsdiep; Grootchalige morfologische ontwikkelingen westelijke Waddenzee. Arcadis rapport A2062R3r5, 108 pp.
- De Waal, J.A., Roest, J.P.A., Fokker, P.A., Kroon, I.C., Breunese, J.N. Muntendam-Bos, A.G., Oost, A.P. & van Wirdum, G., 2012. The effective subsidence capacity concept: How to assure that subsidence in the Wadden Sea remains within defined limits? Netherlands Journal of Geosciences 91(3), 385 - 399.
- Eysink, W.D., 1993. Bodemdaling door gaswinning in de Waddenzee; Effecten op zandhonger en platen volgens berekeningen met het Morfologisch Responsie-Model MORRES. Rapportage Waterloopkundig Laboratorium H 1948. Bijlage 7 in: Oost, A.P. & Dijkema, K.S. (red.), Effecten van bodemdaling door gaswinning in de Waddenzee. IBN-DLO-rapport 025.
- Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B. & de Ronde, J.G., 2012. Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. Netherlands Journal of Geosciences 91(3), 293–310.
- Hinkel, J., Nicholls, R.J., Tol, R.S.J., Wang, Z.B., Hamilton J.M., Boot, G., Vafeidis, A.T., McFadden, L., Ganopolski, A. & Klein, R.J.T., 2013. A global analysis of erosion of sandy beaches and sea-level rise: An application of DIVA. Global and Planetary Change 111, 150-158. (doi:10.1016/j.gloplacha.2013.09.002)
- Hoeksema, H.J., Mulder, H.P.J., Rommel, M.C., de Ronde, J.G. & de Vlas, J., 2004. Bodemdalingsstudie Waddenzee 2004: Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd. RIKZ-rapport 2004-025. 67 pp. + bijlagen.
- Kragtwijk, N.G., Zitman, T.J., Stive, M.J.F. & Wang, Z.B., 2004. Morphological response of tidal basins to human interventions. Coastal Engineering 51(3), 207-221.
- Lodder, Q.J., Wang, Z.B., Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., de Looff, H. & Townend, I.H., 2019. Future response of the Wadden Sea tidal basins to relative sea-level rise - An aggregated modelling approach. Water 2019, 11, 2198. (doi:10.3390/w11102198)
- Ministerie van Economische Zaken, 2006. Gaswinning binnen randvoorwaarden, Passende beoordeling van het Rijksbesluit over de aardgaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen.
- NAM, 2006. Startnotitie milieu effect rapportage: Aardgaswinning vanaf locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. NAM, Assen. 42 pp.

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

Oost, A.P., 1998. Sedimentbalans van het Waddensysteem & enkele empirische voorspellingen. In: Oost, A.P., Ens, B.J., Brinkman, A.G., e.a. (red.), *Integrale Bodemdalingstudie Waddenzee - "Gevolgen van aardgaswinning uit nieuwe velden"*, Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., Assen, p. 170-192.

Oost, A.P., Ens, B.J., Brinkman, A.G., Dijkema, K.S., Eysink, W.D., Beukema, J.J., Gussinklo, H.J., Verboom, B.M.J. & Verburgh, J.J. (red.), *Integrale Bodemdalingstudie Waddenzee - "Gevolgen van aardgaswinning uit nieuwe velden"*, Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., Assen, 372 pp.

Stive, M.J.F. & Wang, Z.B., 2003. Morphodynamic modelling of tidal basins and coastal inlets. In: Lakkhan, C. (red.), *Advances in Coastal Modelling*, Elsevier Sciences, p. 367-392.

Townend, I.H., Wang, Z.B., Stive, M.J.F. & Zhou, Z., 2016a. Development and extension of an aggregated scale model: Part 1 - Background to ASMITA. *China Ocean Engineering* 30(4), 483-504.

Townend, I.H., Wang, Z.B., Stive, M.J.F. & Zhou, Z., 2016b. Development and extension of an aggregated scale model: Part 2 - Extensions to ASMITA. *China Ocean Engineering* 30(5), 651-670.

Van der Spek, A.J.F., 2004.: Sediment accumulation in Atlantic back-barrier basins in the Netherlands; fine-grained infilling under high rates of sea-level rise. In: Bartholdy, J. & Torp Pederson, J.B. (red.), *Abstracts Tidalites 204*, 6th International Conference on Tidal Sedimentology, 2-5 aug. 2004 Copenhagen, Denmark.

Van der Spek, A.J.F. & Beets, D.J., 1992. Mid-Holocene evolution of a tidal basin in the western Netherlands: a model for future changes in the northern Netherlands under conditions of accelerated sea-level rise? *Sedimentary Geology* 80, 185-197.

Van Goor, M.A., Zitman, T.J., Wang, Z.B. & Stive, M.J.F., 2003. Impact of sea-level rise on the morphological equilibrium state of tidal inlets. *Marine Geology* 202(3-4), 211-227.

Van Wirdum, G., Vonhögen, L., van Heteren, S., Oost, A., Wang, Z. & van Maren, B., 2010. Het meegroeivermogen van de Westelijke Waddenzee. Advies aan het Ministerie van Economische Zaken. *Deltares rapport 1202685-000-BGS-0007*. (augustus 2010)

Wang, Z.B., de Vriend, H.J., Stive, M.J.F. & Townend, I.H., 2008. On the parameter setting of semi-empirical long-term morphological models for estuaries and tidal lagoons. In: Dohmen-Jansen, C.M. & Hulscher, S.J.M.H. (red.): *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, RCEM 2007. Taylor & Francis (London), p. 103-111.

Wang, Z.B., Cleveringa, J. & Oost, A., 2017. Morfologische effecten bodemdaling in relatie tot gebruiksruimte. *Deltares rapport 1230937-000-ZKS-0005*. (april 2017)

Wang, Z.B., Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., Lodder, Q., 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. (doi:10.1017/njg.2018.8)

Wang, Z.B. & van der Spek, A.J.F., 2021. Meegroeivermogen en kritische zeespiegelstijgingssnelheid voor verdrinking in de Nederlandse Waddenzee. Deltares rapport 11206346-002-BGS-002.

Wang, Z.B., van der Spek, A.J.F. & Elias, E.P.L., 2024. Het meegroeivermogen van het bekken van het Zeegat van het Vlie. Deltares Memo (21 maart 2024).

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl