

Modellering van verlandingsprocessen in de Waddenzee met het ASMITA- model



Modellering van verlandingsprocessen in de Waddenzee met het ASMITA-model

Auteur(s)

Ymkje Huismans

Zheng Wang

Edwin Elias

Modellering van verlandingsprocessen in de Waddenzee met het ASMITA-model

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Jurre de Vries
Projectreferenties	SITO-PS 2025 WVH07 Kennis voor Beheer en Onderhoud Waddenzee
Trefwoorden	Waddenzee, Asmita, Verlandingsprocessen, Middelzee, Baggeren en storten.

Documentgegevens

Versie	0.5
Datum	03-02-2026
Projectnummer	11211571-015
Document ID	11211571-015-ZKS-0002
Pagina's	43
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)

	Ymkje Huismans Zheng Wang Edwin Elias	

Samenvatting

De Waddenzee is een dynamisch systeem waarin geulen, platen en kwelders voortdurend veranderen onder invloed van natuurlijke processen en menselijke ingrepen. In verschillende delen treedt verlanding op: sedimentatie verloopt daar sneller dan de zeespiegelstijging, waardoor platen ophogen, geulen dichtslibben en kwelders uitbreiden. Dit kan een natuurlijk proces zijn, maar het proces wordt versterkt door ingrepen zoals bedijking, met als voorbeeld de afsluiting van de Middellzee, een binnenzee die verbonden was met het Amelandersgegat. Ook recent is verlanding zichtbaar. Bekkengemiddeld is de sedimentatie in het Amelandersgegat in de afgelopen decennia groter geweest dan de zeespiegelstijging, wat vragen oproept over de invloed van historische processen op de sedimentatie, de reactietijden van het systeem en de toekomstige ontwikkeling onder versnelde zeespiegelstijging.

Voor deze studie is het ASMITA-model gebruikt, dat werkt op geaggregeerde ruimtelijke en temporele schalen. Het model bepaalt per morfologisch element (buitendelta, geulen, platen) de benodigde sedimentatie of erosie om in evenwicht te blijven met de fysische omstandigheden. Hiermee kunnen langetermijnontwikkelingen worden onderzocht, zoals de effecten van zeespiegelstijging en bodemdaling. In dit project is onderzocht of ASMITA ook verlandingsprocessen adequaat kan simuleren en welke inzichten dit biedt voor beheer. Daartoe zijn zowel geïdealiseerde simulaties uitgevoerd – gericht op de effecten van baggeren en storten (in reactie op verlanding van geulen) en veranderingen in bekkenoppervlak – als hindcast-simulaties van de historische ontwikkeling door de bedijking van de Middellzee, waarbij de modelresultaten zijn vergeleken met historische sedimentatiegegevens.

Belangrijkste bevindingen

De berekeningen laten zien dat baggeren in een deel van de geulen zorgt voor extra sedimentvraag in de geul, waardoor de sedimentimport toeneemt. Bij terugstorten – het huidige beleid – is dit effect tijdelijk, al duurt het meer dan een eeuw voordat de sedimentimport terugkeert naar het niveau zonder baggeren. Zonder terugstorten zijn de veranderingen groter en blijvend. De niet-gebaggerde geulen reageren in beide gevallen permanent: met terugstorten worden ze bekken-gemiddeld ondieper en dragen ze bij aan de verlanding van geulen, terwijl ze zonder terugstorten juist bekken-gemiddeld dieper worden.

Wanneer het bekken kleiner wordt door verschuiving van het wantij of door uitbreiding van kwelders, verdwijnt een deel van de platen. Hierdoor is er relatief weinig plaatvolume en vindt er sedimentatie plaats op de resterende platen om in een nieuw evenwicht te komen. Door het afgenomen getijprisma gaan geulen sedimenteren en de buitendelta eroderen. De grootste aanpassing vindt in de eerste decennia plaats, maar het duurt honderden jaren voordat een nieuw evenwicht ontstaat. Wanneer door kwelderuitbreiding of het verschuiven van het wantij vooral hoge platen verdwijnen zijn de platen zover uit evenwicht dat er tijdelijk nog meer sediment nodig is, waardoor geulen eerst eroderen om de platen van extra sediment te voorzien, voordat ze gaan sedimenteren. Verlanding werkt daarbij als een zichzelf versterkend proces. Zonder verdere ingrepen vlakt de trend uiteindelijk af, maar elke extra verkleining – door mens of natuur – geeft opnieuw een impuls tot verdere verlanding.

Op de lange termijn kan een kleiner bekken beter meestijgen met zeespiegelstijging, omdat minder sediment nodig is om op hoogte te blijven. Tegelijkertijd gaat bij verkleining ook plaatvolume verloren (bijvoorbeeld doordat een deel van het bekken is afgesloten, of platen veranderd zijn in kwelder), waardoor grotere bekkens in de meeste scenario's meer totaal plaatvolume behouden.

Tot slot blijkt uit de berekeningen voor de afsluiting van de Middellzee dat het model het proces van versnelde sedimentatie na elke afsluiting en de bijbehorende responstijd van eeuwen en het verloop van de sedimentatie in het bekken over de afgelopen 800 jaar goed reproduceert. Gezien de lange responstijd is het aannemelijk dat een deel van de huidige sedimentatie nog steeds het gevolg is van historische afsluitingen, maar de exacte omvang daarvan is niet vast te stellen.

Beheerimplicaties

De bevindingen tonen aan dat zowel natuurlijke processen als beheerkeuzes morfologische veranderingen zoals de verlanding en sedimentverdeling in de Waddenzee langdurig kunnen beïnvloeden.

Onderhoudsbaggeren vergroot de sedimentimport, en bij terugstorten duurt het meer dan een eeuw voordat de sedimentimport weer op het oorspronkelijke niveau ligt. Het extra sediment belandt vooral in de geulen, die daardoor ondieper worden, terwijl de platen nauwelijks meeprofiteren. Sedimentonttrekking vermindert de baggerbehoefte slechts beperkt en is, mede gezien de versnellende zeespiegelstijging en de daarmee samenhangende extra sedimentvraag in de toekomst, geen duurzame optie. Er wordt daarom geadviseerd om met het oog op mogelijke toekomstige veranderingen te onderzoeken of (gedeeltelijk) storten op platen zowel gulverondieping kan remmen als plaatgroei kan stimuleren.

Ook kwelderbeheer vormt een sturingsmechanisme: beperking van kwelderuitbreiding kan gulverondieping tegengaan en helpen om plaatareaal te behouden. Door Natura 2000-doelstellingen en andere beheerdoelen is dit echter geen stuurknop waaraan zonder meer kan worden gedraaid.

Aanknopingspunten voor vervolgonderzoek

Naast deze beheersinzichten biedt het onderzoek ook aanknopingspunten voor vervolgonderzoek: (1) het met modellen verder verkennen van bagger- en stortscenario's, om het storten van gebaggerd sediment optimaal te benutten voor beheerdoelen (Het storten op de wadplaten is bijvoorbeeld in de huidige praktijk niet mogelijk vanwege de Natura 2000 regelgeving, maar er kan worden onderzocht of het wel gunstig kan zijn voor de behoud van ecologische waarden in de toekomst met versnelde ZSS.); (2) het afzonderlijk analyseren van procesbijdragen door ASMITA te combineren met recente observatiestudies; (3) het uitvoeren van gevoeligheidsanalyses voor variatie in getijslag; en (4) het modelleren op sub-bekkeniveau om verschillen binnen bekkens beter te begrijpen, eventueel aangevuld met het modelleren van zowel zand en slib.

Tot slot zijn er nog een aantal ideeën voor vervolgonderzoek die in samenwerking met de onderzoeksprogramma's van WadSed en PaRCA kunnen worden opgepakt, waaronder het onderzoeken van verschillende typen suppleties, zoals suppleties in de keel om plaatgroei te stimuleren en het verbeteren van ASMITA met meer realistische zand-slibmodellering, dynamische oppervlaktes en een betere representatie van kwelders. Aanbevolen wordt om de huidige modelleringsstudie voort te zetten met het verbeterde model zodra dit daarvoor geschikt is.

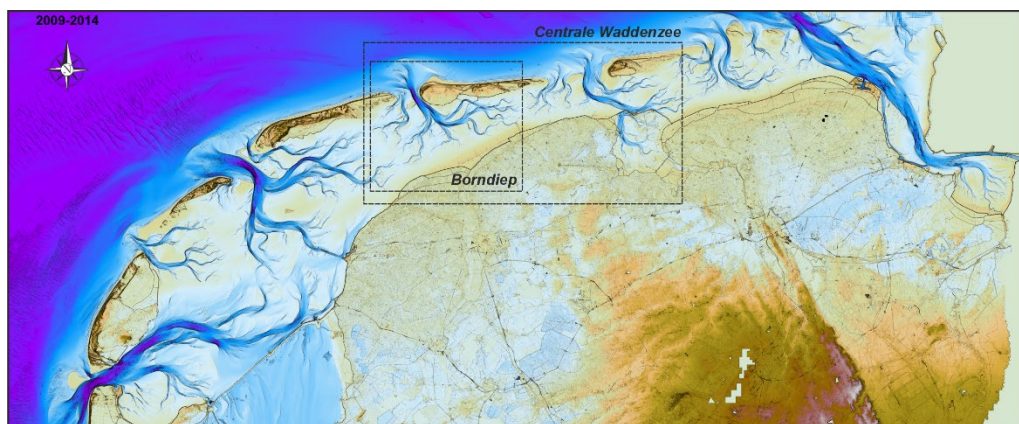
Inhoud

	Samenvatting	4
	Inhoud	6
1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding	7
1.2	Projectdoelen en onderzoeksvragen	8
1.3	Leeswijzer	9
2	Achtergrond en methodiek	10
2.1	Asmita-model	10
2.1.1	Concept op hoofdlijnen	10
2.1.2	ASMITA in formules	11
2.2	Morfologische ontwikkeling Amelanderveegat op verschillende tijd- en ruimteschalen	13
2.2.1	Eeuwen	13
2.2.2	Decennia	16
3	Resultaten	18
3.1	Geïdealiseerde casussen	18
3.1.1	Inleiding en onderzoeksvragen	18
3.1.2	Theoretische beschouwing	18
3.1.3	Effect van baggeren	22
3.1.4	Verlanding van bekkens	24
3.1.4.1	Modelkeuzes	25
3.1.4.2	Gevoeligheidsanalyse oppervlakvariaties	26
3.1.4.3	Gevoeligheidsanalyse plaatshoogte	28
3.1.4.4	Gevoeligheidsanalyse zeespiegelstijging	29
3.2	Historische verlanding	30
3.2.1	Inleiding en onderzoeksvragen	30
3.2.2	Modelkeuzes	31
3.2.3	Ontwikkeling Middellandse Zee	32
4	Duiding van de resultaten	34
4.1	ASMITA-resultaten in relatie tot observaties in de Waddenzee	34
4.1.1	Ontwikkeling van het bekken over de afgelopen eeuwen	34
4.1.2	Ontwikkeling van het bekken over de afgelopen decennia	34
4.2	Duiding, aannames en modelkeuzes	35
5	Conclusies en aanbevelingen	37
5.1	Conclusies	37
5.2	Aanbevelingen	40
	Referenties	42

1 Inleiding

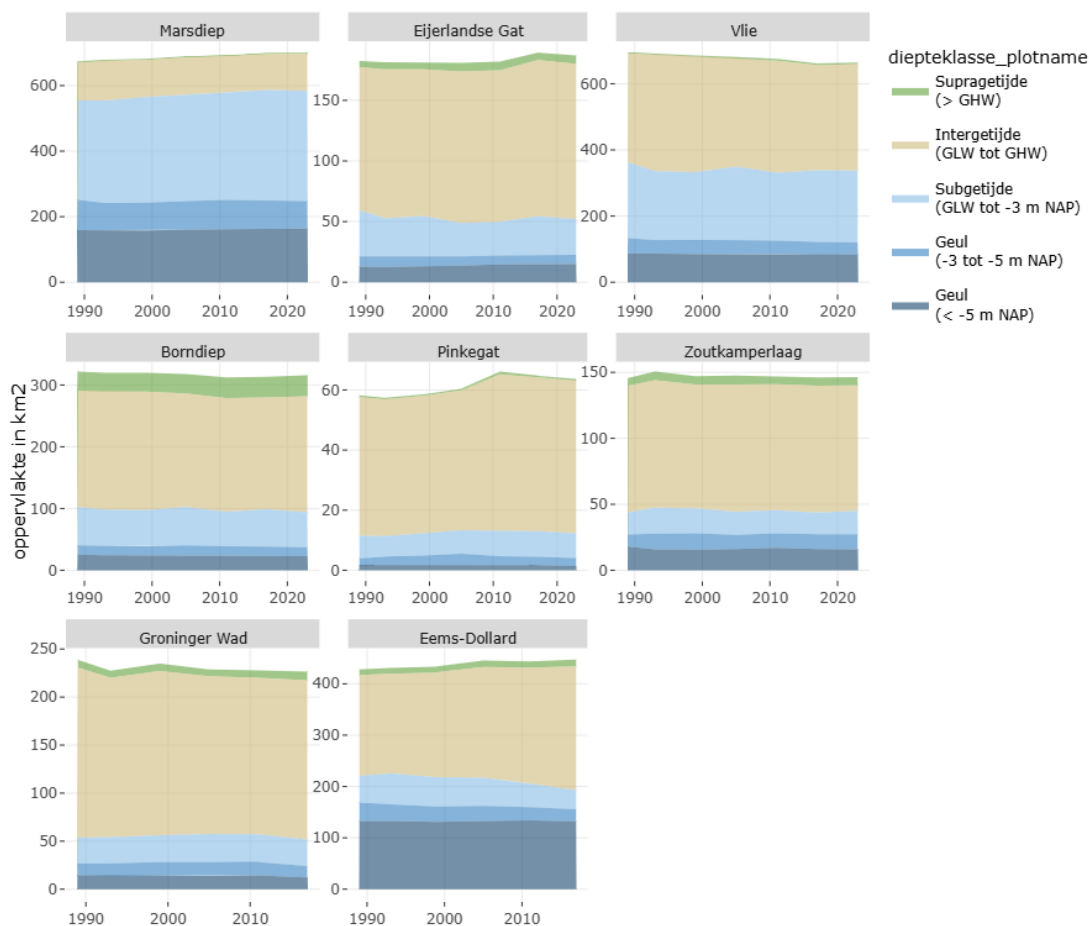
1.1 Aanleiding

De Waddenzee is een dynamisch en voortdurend veranderend landschap. Geulen verleggen zich, eroderen of verzanden, zandplaten groeien of verdwijnen en kwelders breiden zich uit, kalven af of veranderen in hoogte. Voornamelijk langs de kust treedt verlanding op: sedimentatie gaat daar sneller dan nodig is om de zeespiegelstijging bij te houden. Hierdoor kunnen platen ophogen, geulen dichtslibben en water geleidelijk in land veranderen. Dit proces kan natuurlijk verlopen, maar ook versneld worden door menselijke ingrepen zoals bedijking of inpoldering. Een historisch voorbeeld is de bedijking van de Middellzee, waardoor het Amelanderzeegat (Figuur 1-1) over een periode van eeuwen steeds kleiner is geworden. Door sedimentatie en bedijking van de hoger gelegen gebieden nam het kombergingsvolume af en vond er sedimentatie plaats in het resterende bekken, waarna opnieuw de hoger gelegen gebieden werden bedijkt en het proces zich herhaalde (Van der Spek, 1994).



Figuur 1-1 (boven): Een overzicht van de Waddenzee, Centrale Waddenzee en het kombergingsgebied van het Amelanderzeegat - het Borndiep. Bron: Elias & De Wilde (2026)

Ook recent zien we verlanding in het Amelanderzeegat: uitbreiding van kwelders, sedimentatie in ondiepe geulen (sublitoraal, tussen -3 en -1 m NAP) en op platen (Meijers, 2025), zie Figuur 1-2. Gemiddeld is sinds 1981 de sedimentatie (~6 mm/jaar) groter dan de zeespiegelstijging in de afgelopen decennia (~2 mm/jaar) (Elias & De Wilde, 2026). Dit roept vragen op: hoe beïnvloeden historische en recente verlandingsprocessen de bekken-dynamiek? Welke tijdschalen spelen hierbij een rol? Kunnen we dit modelleren en wat betekent dit voor het beheer op korte en lange termijn? En wat betekent het voor de toekomst, waarvoor de verwachting is dat onder invloed van versnelde zeespiegelstijging juist “verdrinking” op kan treden, dat wil zeggen dat de hoeveelheid sedimentatie niet voldoende is om de zeespiegelstijging bij te houden en een deel van de wadplaten onder gemiddeld laagwater terechtkomt (Wang et. al., 2018, Huismans et. al., 2022).



Figuur 1-2 Areaalontwikkeling van bekkens in de Waddenzee. Bron: digitale systeemrapportage van de Waddenzee, 2026.

Voor deze analyse gebruiken we het ASMITA-model. Dit model werkt op geaggregeerde ruimte- en tijdschalen en berekent per morfologisch element (buitendelta, geulen, platen) de sedimentbehoefte. Op basis van sedimentbeschikbaarheid, uitwisselingssnelheden en sedimentbehoefte per element bepaalt het model de resulterende sedimentatie of erosie. Doorat het model de fysische processen “op hoofdlijnen” beschouwt, is het geschikt om lange termijn systeemdynamiek te bestuderen op bekkenschaal. Het model wordt daarom gebruikt om te onderzoeken wat zeespiegelstijging en bodemdaling betekenen voor de lange termijn ontwikkeling van de Waddenzee. In dit project onderzoeken we of ASMITA ook verlandingsprocessen kan modelleren en inzicht kan geven in hun invloed op de bekken-dynamiek, de bijbehorende tijdschalen en wat dat betekent voor het beheer op korte en lange termijn.

1.2 Projectdoelen en onderzoeksvragen

Dit project heeft als doel:

- Te onderzoeken of verlandingsprocessen met het ASMITA-model kunnen worden gesimuleerd.
- Inzicht te krijgen in de invloed van verlanding op de bekken-dynamiek en de bijbehorende reactietijden.
- De resultaten te vertalen naar praktische handvatten voor het beheer van de Waddenzee.

Onderzoeksvragen hierbij:

- In hoeverre werken historische ingrepen, zoals bedijkingen en afsluitingen (Middelzee, Zuiderzee, Lauwerszee), nog door in de huidige dynamiek? Kunnen we een deel van de huidige veranderingen hieraan koppelen, en kan ASMITA deze processen reproduceren?
- Wat is het effect van menselijke ingrepen en natuurlijke processen (zoals baggeren, verkleining van bekkens door verschuivende wantijen of verlanding van platen) op het dynamische evenwicht van het bekken, op de ontwikkeling van plaat-, geul- en buitendeltavolumes, en wat zijn de bijbehorende aanpassingstijden?
- Hoe kunnen deze inzichten worden toegepast in het beheer van de Waddenzee, zowel op korte als lange termijn?

Dit project is onderdeel van het SITO-PS programma “Kennis voor Beheer en Onderhoud Waddenzee”. Relevante kennis uit andere onderzoeken van dit programma is meegenomen in deze studie.

1.3 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt het ASMITA-modelconcept toegelicht en achtergrond gegeven over de morfologische ontwikkeling van het Amelandezeegat. Vervolgens worden in Hoofdstuk 3 de resultaten van de modellering besproken, waarbij eerst de geïdealiseerde berekeningen ten aanzien van het effect van baggeren en het verkleinen van het bekkenoppervlak op de bekkenontwikkeling aan bod komen in §3.1, en vervolgens in §3.2 de modelresultaten van de verlanding van de Middelzee worden behandeld. In Hoofdstuk 4 worden de resultaten geduid en vertaald naar praktische handvatten voor het beheer van de Waddenzee. Tot slot volgen in Hoofdstuk 5 de conclusies en aanbevelingen.

2 Achtergrond en methodiek

2.1 Asmita-model

2.1.1 Concept op hoofdlijnen

Het ASMITA-model wordt toegepast om de langetermijn morfologische ontwikkeling van getjebekken te simuleren. Het model werkt op een geaggregeerde tijd- en ruimteschaal en beschouwt een zeegatsysteem als een set van volume-elementen, meestal verdeeld in drie morfologische eenheden, zie Figuur 2-1:

- Buitendelta (sedimentvolume in de buitendelta¹)
- Geulen (natte volume onder gemiddeld laagwater in het bekken)
- Wadplaten (sedimentvolume tussen gemiddeld laag- en hoogwater in het bekken)



Figuur 2-1 Schematisatie van een getjebekken in ASMITA met drie elementen: de buitendelta, geulen en platen (Lodder et al., 2023).

Voor elk element wordt het evenwichtsvolume bepaald met behulp van relaties die in de literatuur zijn vastgesteld op basis van fysische principes en empirische gegevens. Voor de buitendelta en de geulen hangt dit evenwichtsvolume vooral samen met het getijprisma, oftewel de hoeveelheid water die per getij het bekken instroomt. Is het getijprisma groot ten opzichte van het geulvolume, dan moet veel water door de geulen stromen en zullen deze neigen naar erosie. Is het getijprisma klein, dan treedt juist sedimentatie op.

Voor de platen is de getijslag (het verschil tussen hoog- en laagwater) en het bekkenoppervlak bepalend voor het evenwichtsvolume. Op basis hiervan wordt per volume-element (plaat, geul, buitendelta) vastgesteld of het wil eroderen of sedimenteren. Vervolgens wordt, afhankelijk van de uitwisselingsnelheid tussen elementen en bodem, de beschikbaarheid van sediment en de mate waarin het huidige volume afwijkt van het evenwicht, berekend hoeveel sediment wordt uitgewisseld en hoeveel erosie of sedimentatie plaatsvindt.

Het model biedt verschillende mogelijkheden, zoals het verkennen van ontwikkelingen onder versnellende zeespiegelstijging, het bepalen van de kritische stijgsnelheid waarbij op lange termijn verdrinking optreedt en het analyseren van snelle sedimentatie na ingrepen zoals de afsluiting van een deelbekken. Tegelijkertijd zijn er beperkingen waarmee rekening moet worden gehouden. De oppervlakken van de modelementen liggen vast, waardoor veranderingen in oppervlak moeten worden opgelegd in plaats van dat het model deze zelf berekent. Daarnaast gaat het model uit van een evenwichtssituatie zonder zeespiegelstijging, waardoor de gebruikte empirische relaties onzekerheden met zich brengen. Ook wordt er geen rekening gehouden met uitwisseling van water en sediment over de wantijen en het effect van wind. Verder is ervoor de eenvoud voor gekozen om het 1-fractiemodel te werken, waardoor er geen onderscheid mogelijk is tussen zand en slib en het effect van deze verschillende

¹ Gedefinieerd als het extra volume van de buitendelta ten opzichte van een doorgaande gesloten kustlijn.

fracties op de morfologische ontwikkeling niet wordt meegenomen. Tot slot kan bij een schematisatie met slechts drie elementen de lokale dynamiek en ruimtelijke variatie niet worden meegenomen.

2.1.2 ASMITA in formules

Om de morfodynamica van getijbekkens op een geaggregeerde tijd- en ruimteschaal te beschrijven, wordt de convectie-diffusievergelijking voor de concentratie van zwevend sediment geïntegreerd over de drie ruimtelijke dimensies (breedte, lengte en diepte) en over een getijcyclus. Zo ontstaat een volume- en getijgemiddelde formulering voor de sedimentbalans.

De resulterende formule is als volgt:

$$\sum_i S_i + F_B = 0 \quad 2-1$$

Deze formule geeft aan dat het sedimenttransport bij elke open grens van een volume-element (S_i) in evenwicht is met de sedimentuitwisseling tussen de bodem en de waterkolom binnen dat element (F_B). Hierbij geldt: S_i is positief bij import van sediment naar het element, en F_B is positief bij sedimentatie.

Het uitdrukken van de sedimentmassabalans per volume-element betekent dat het getijbekken of estuarium moet worden opgedeeld in volume-elementen. Deze schematisering gebeurt meestal per morfologische eenheid (bijvoorbeeld een kenmerkend morfologisch onderdeel zoals geulen of droogvallende platen). In Figuur 3-1 wordt een voorbeeld gegeven van een getijbekken waarin drie volume-elementen zijn onderscheiden: één voor de ebdelta (sedimentvolume), één voor de geulen (alle natte volumes onder gemiddeld laagwater) en één voor de droogvallende platen (alle sedimentvolumes tussen gemiddeld laag- en hoogwater).

Naast de massabalans zoals beschreven in vergelijking 3-1, moet ook de sedimentbeweging worden gespecificeerd. In een 2DH-model gaat dit om het bepalen van de evenwichtsconcentratie c_e in de volgende vergelijking voor de sedimentuitwisselingsflux tussen de bodem en de waterkolom:

$$f_b = \gamma w (c_e - c) \quad 2-2$$

Hierin is f_b de sedimentflux, w de valsnelheid [LT^{-1}], γ een dimensieloze coëfficiënt, c de sedimentconcentratie en c_e de evenwichtsconcentratie (beide dimensieloos). In procesgebaseerde modellen zoals Delft3D worden semi-empirische sedimenttransportformules gebruikt, waarbij het sedimenttransport (en dus ook c_e) meestal afhankelijk is van stroomsnelheid, bodemschuifspanning en sedimenteigenschappen zoals de mediane korrelgrootte (D_{50}).

Door de geaggregeerde aard van ASMITA is gedetailleerde informatie over lokale stromingscondities niet beschikbaar. Daarom wordt de evenwichtsconcentratie berekend als:

$$c_e = c_E \left(\frac{V_e}{V} \right)^n \quad 2-3$$

In deze formulering is V het volume van het element, V_e het evenwichtsvolume, c_E de globale (systeem-brede) evenwichtskoncentratie (gelijk aan de concentratie buiten het systeem) en n een exponent. De verhouding V_e/V geeft een indicatie van de stromingssterkte in het element ten opzichte van de evenwichtssituatie:

- **Neigt naar erosie** door relatief hoge stromingssterkte (nat volume kleiner dan evenwichtsvolume).
- **Neigt naar sedimentatie** door relatief lage stromingssterkte (nat volume groter dan evenwichtsvolume).

Deze formulering is vergelijkbaar met een machtswet voor sedimenttransportcapaciteit zoals gebruikt in Delft3D. Merk op dat de parameter n positief is wanneer de volumeverandering wordt uitgedrukt als nat volume (geulen) en negatief bij droog volume (buitendelta en platen).

De uitdrukkingen voor morfologisch evenwicht zijn empirisch onderbouwd en goed beschreven in de literatuur. Het evenwichtsvolume voor droogvallende platen (tussen gemiddeld laagwater (MLW) en hoogwater (MHW)) wordt bepaald als een combinatie van evenwichtsoppervlak A_{fe} en evenwichtshoogte h_{fe} (Renger & Partensky, 1974; Eysink & Biegel, 1992):

$$V_{fe} = A_{fe} \cdot h_{fe} \quad 2-4$$

Voor het evenwichtsoppervlak geldt:

$$\frac{A_{fe}}{A_b} = 1 - 2,5 \cdot 10^{-5} \sqrt{A_b} \quad 2-5$$

en voor de evenwichtshoogte:

$$h_{fe} = 2\alpha_{fe}a = \alpha_{fe}H \quad 2-6$$

Hierin is A_b de bekkenoppervlakte, a de getij-amplitude, H het getijverschil en

$$\alpha_{fe} = \alpha_f - 0,24 \cdot 10^{-9}A_b \quad 2-7$$

met een typische waarde voor $\alpha_f = 0,41$.

Het evenwichtsvolume van de platen kan dus worden uitgedrukt als een functie van bekkenoppervlakte en getij-amplitude:

$$V_{fe} = F(A_b, a) \quad 2-8$$

Voor de geulen geldt (Wang et al., 2024):

$$V_{ce} = \alpha_c P \quad 2-9$$

En voor de buitendelta (Eysink, 1990):

$$V_{de} = \alpha_d P^{1.23} \quad 2-10$$

Hierin zijn α_c en α_d evenwichtsparameters en P het getijprisma, waarvoor geldt:

$$P = 2A_b H - V_f \quad 2-11$$

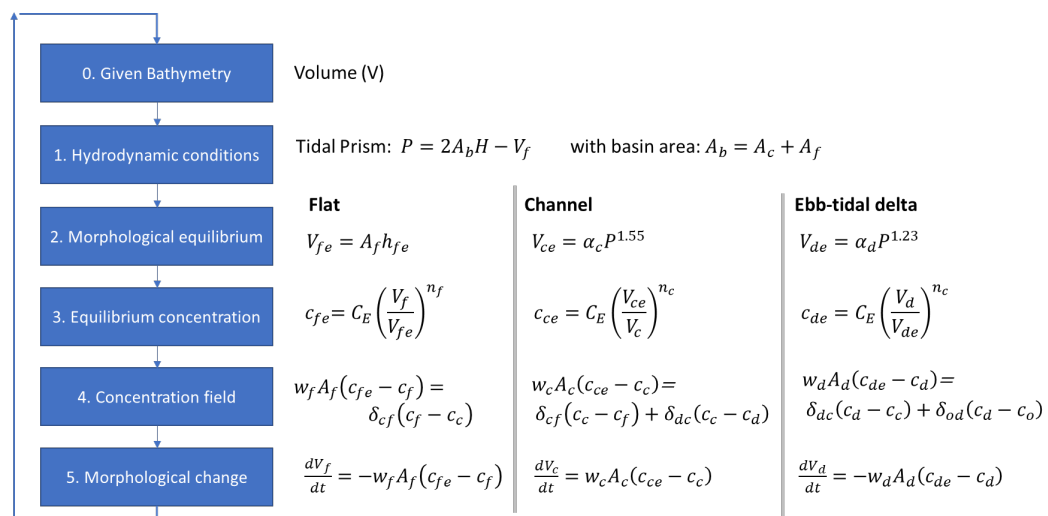
waarbij V_f het volume van de platen is.

Het resulterende modelschema van ASMITA wordt weergegeven in Figuur 2-2. Het volgt vergelijkbare stappen als proces-gebaseerde modellen. Op basis van de geometrie van het systeem (stap 0) en de hydrodynamische randvoorwaarden worden eerst de hydrodynamica bepaald (stap 1). Vanuit de hydrodynamica en de evenwichtsrelatie (stap 2) wordt de sedimentbeweging afgeleid (stappen 3 en 4). De resulterende bodemveranderingen (stap 5) leiden vervolgens tot een nieuwe geometrie (stap 0). In vergelijking met Delft3D is de enige extra stap in ASMITA de bepaling van het morfologische evenwicht (stap 2).

De stappen worden hieronder verder toegelicht:

0. De bathymetrie van elk element wordt gedefinieerd door het volume en het oppervlak van dat element (zie §2.1.1 voor de volumedefinities).
1. De hydrodynamica wordt beschreven op een volume- en getijgemiddeld niveau door het getijprisma.
2. Op basis van het getijprisma en de getijslag kan het evenwichtsvolume voor elk element worden geschat met behulp van evenwichtsrelaties.
3. Vanuit deze evenwichtsvolumes wordt de evenwichts-sedimentconcentratie per element afgeleid, die aangeeft welke concentratie het element zou hebben in een evenwichtssituatie. Deze benadering is vergelijkbaar met transportformules in Delft3D.
4. De werkelijke concentratie in elk element wordt bepaald uit de sedimentmassabalans en de evenwichtconcentraties. Dit is een balans tussen de actuele en evenwichtconcentratie in het element, inclusief uitwisseling met de bodem enerzijds en verschillen tussen elementen anderzijds.
5. Op basis van het concentratieveld en de uitwisselingsnelheid tussen water en bodem wordt de volumeverandering per element berekend.

Een volledige beschrijving van het model en de onderliggende formules is te vinden in onder andere Wang & Lodder (2019).



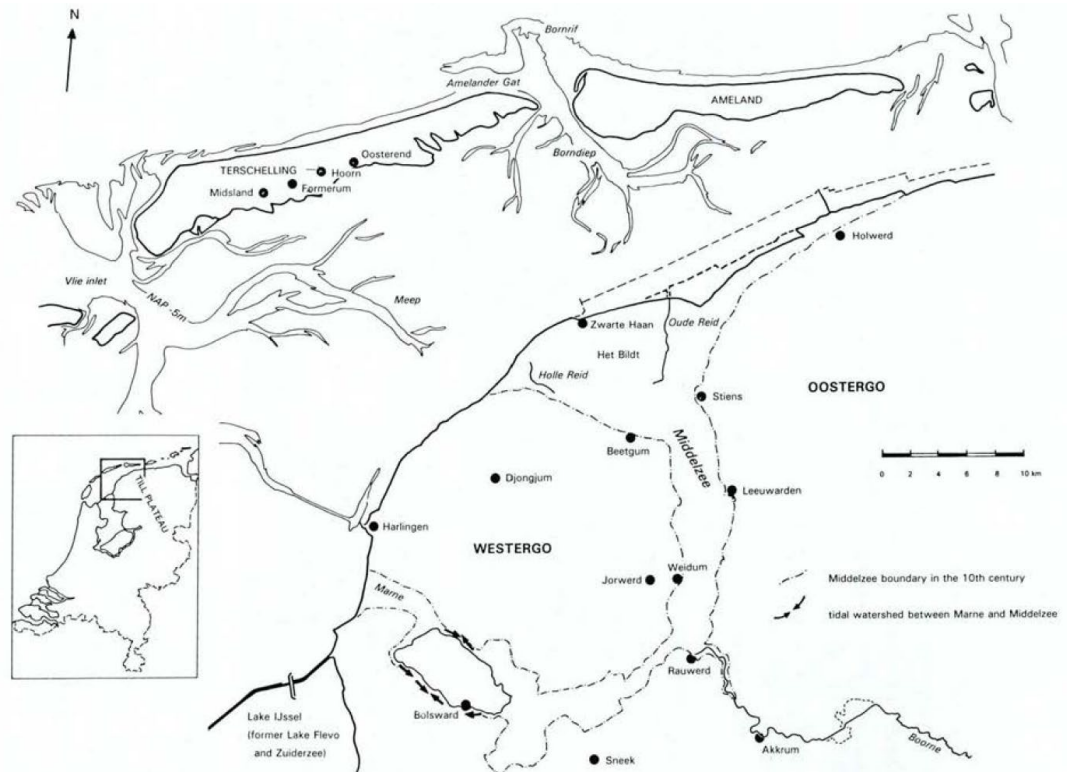
Figuur 2-2. The model scheme of ASMITA and associated formulations.

2.2 Morfologische ontwikkeling Amelanderzeegat op verschillende tijd- en ruimteschalen

2.2.1 Eeuwen

Oorspronkelijk was het Amelanderzeegat verbonden met de Middellzee, een langgerekte smalle zeearm die zich tot diep in Friesland uitstrekte (Figuur 2-3). Deze zeearm (de Boorne) ontstond geleidelijk tijdens het Holoceen onder invloed van zeespiegelstijging (van der Spek, 1994). Rond het jaar 800 breidde het bekken zich snel uit en trad diepe erosie van geulen op,

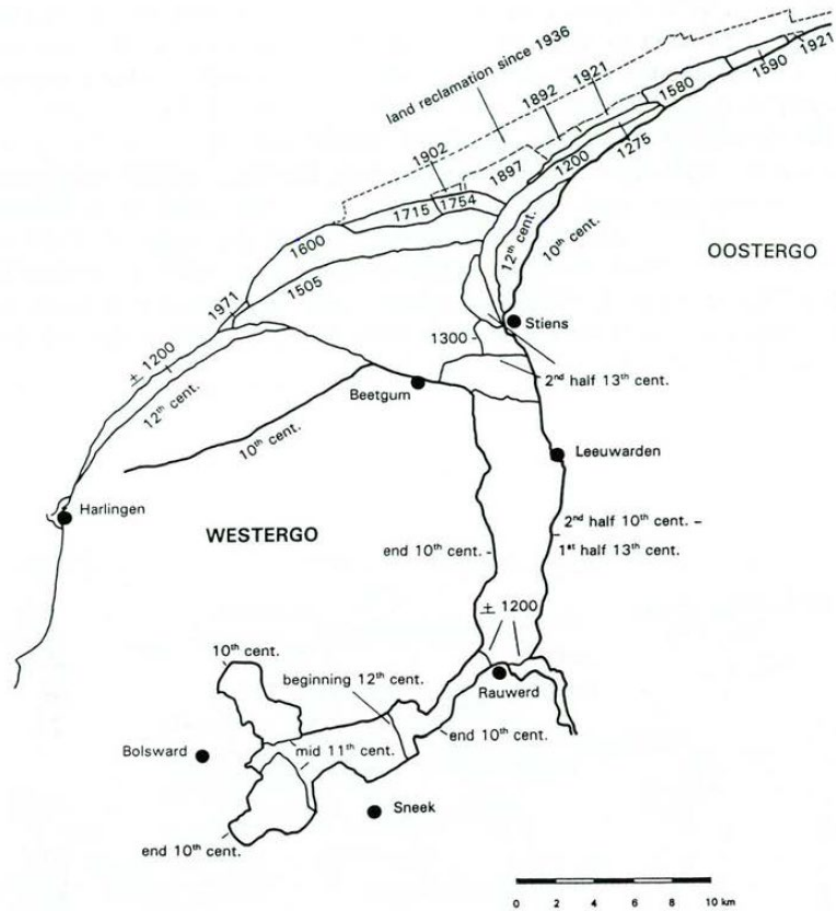
waarschijnlijk mede veroorzaakt door menselijke activiteiten zoals turfwinning. De Middelzee stond in die tijd in verbinding met de Zuiderzee via de Marne, een geul van de Zuiderzee, en ter hoogte van Bolsward bevond zich het wantij.



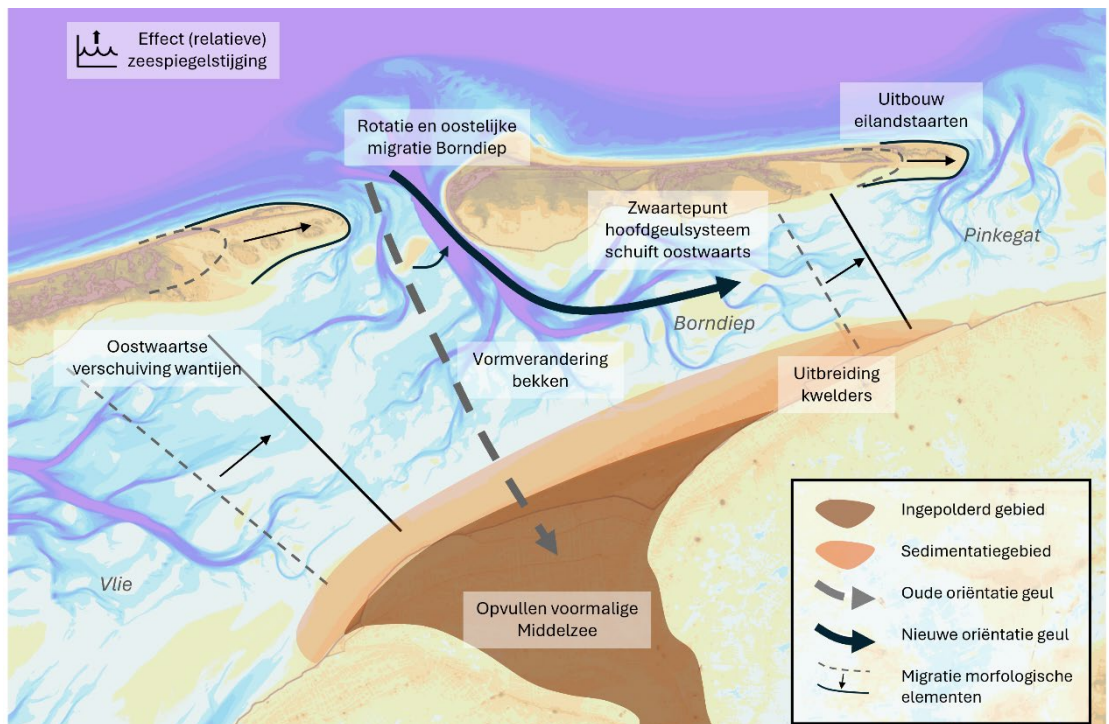
Figuur 2-3 Overzichtskartaat Middelzee van rond de 10^{de} eeuw. Bron: van der Spek, 1994.

Vanaf de 10de eeuw namen overstromingen en erosie sterk toe. In reactie hierop werden geulen afgesloten en de hoger gelegen delen bedijkt. Aan het eind van de 10^{de} eeuw was de volledige Middelzee bedijkt. Sedimentatie op het wantij bij Bolsward zorgde ervoor dat deze steeds hoger kwam te liggen en ook hier een dijk werd geplaatst. Dit resulteerde in kalmere condities, waardoor tussen 900 en 1200 snelle sedimentatie optrad. Platen veranderden in kwelders en werden vervolgens bedijkt, waardoor het systeem stapsgewijs kleiner werd van zuidwest naar noordoost. Rond 1200 volgde de afsluiting van het Marne-estuarium met een dijk bij Rauwerd. Vanaf de 13de eeuw tot in de 19de eeuw werd het systeem verder verkleind door doorgaande sedimentatie met daarop herhaalde bedijkingen en afsluitingen, gevolgd door nieuwsedimentatie door een verkleining van het kombergingsvolume na elke bedijking. De omvangrijke kwelderwerken langs de Friese kust versterkten daarbij de afname in komberging. Zo veranderde tussen de 12de en 17de eeuw het Amelanderzeegat van een smal, langgerekt bekken naar een kort, breed bekken, met een sterk afgenomen kombergingsvolume.

Vanaf 1600 verschoof daarbij het zwaartepunt van de geulen naar het oosten. Hierdoor verplaatsten ook de wantijen zich oostwaarts, met name het wantij onder Terschelling, dat sinds 1600 meerdere kilometers opschoof. De uitbouw van eilandstaarten droeg waarschijnlijk bij aan deze verplaatsing. Ook de hoofdgeul Borndiep verschoof sterk oostwaarts, van de eilandstaart van Terschelling naar de eilandkop van Ameland, en roteerde tegen de klok in doordat zij niet langer op de Middelzee maar op het oostelijke bekken georiënteerd was.



Figuur 2-4 Overzicht van de bedijking en inpoldering van de Middelzee. Bron: van der Spek (1994).

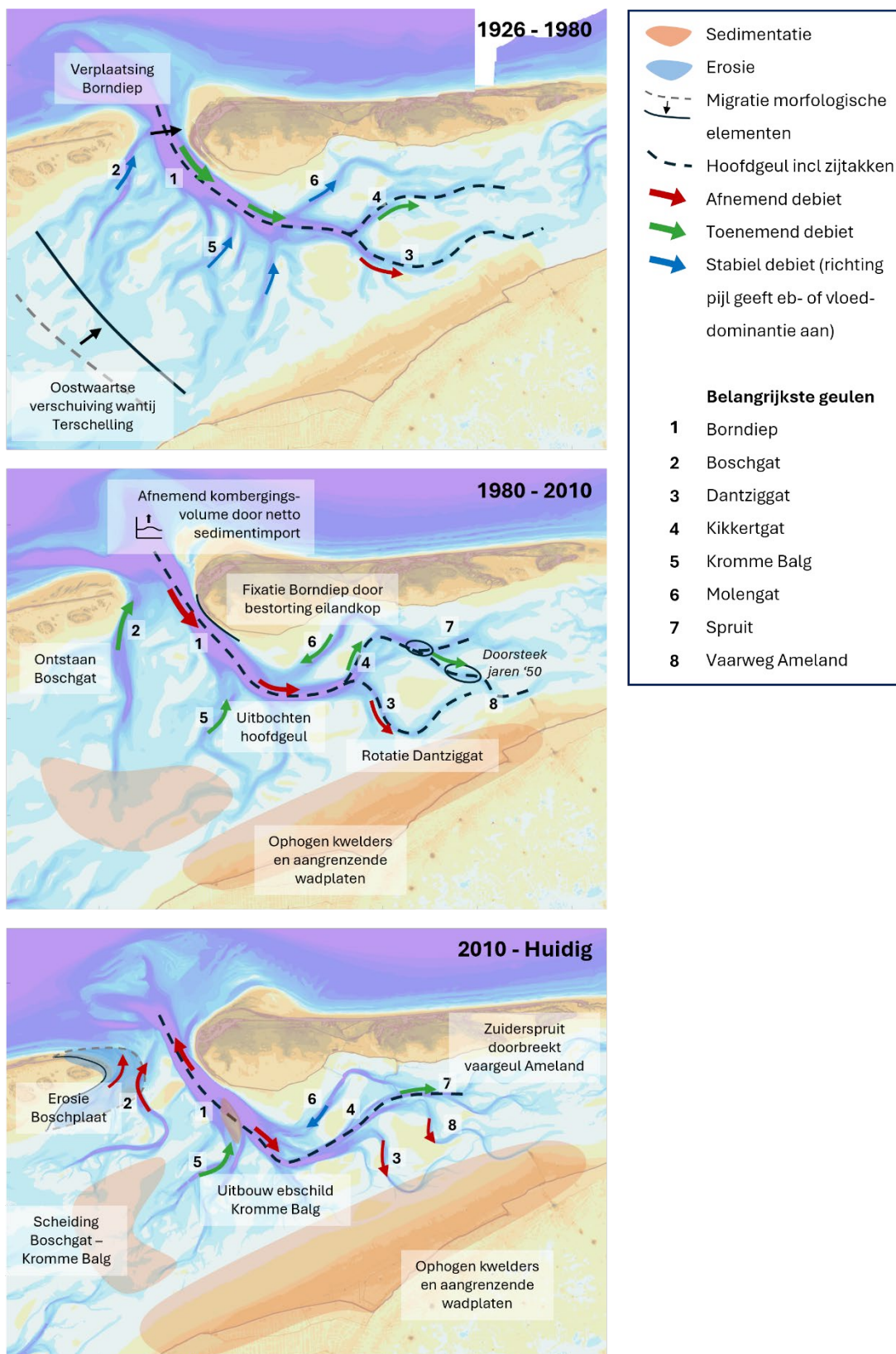


Figuur 2-5 Schematische weergave ontwikkeling van het Amelanderzeegat over de afgelopen eeuwen. Bron: Meijers (2025).

2.2.2 Decennia

Over de afgelopen tientallen jaren zijn een aantal ontwikkelingen te zien, waarvan een deel waarschijnlijk verband houdt met de grootschalige veranderingen van de afgelopen eeuwen, zie Figuur 2-6. Zo heeft rotatie en verplaatsing van de hoofdgeul gevolgen gehad voor het ontstaan en veranderen van andere geulen, de erosie van de Boschplaat en de erosie aan de eilandkop van Ameland, waardoor in de jaren '90 bestortingen zijn uitgevoerd om de zeewering te stabiliseren (Meijers, 2026). Verder blijft het bekken zich verkleinen door uitbreiding van de kwelders en doordat het wantij onder Terschelling nog steeds oostwaarts migreert (Elias, 2025), mogelijk beïnvloed door de aanleg van de Afsluitdijk. Daarnaast verkleint het bekken zich doordat de bekkengemiddelde sedimentatie over de periode 1926-2022 gemiddeld genomen groter is dan de zeespiegelstijging (Elias & De Wilde, 2026). Tot circa 1981 was daarbij de netto-opvulling gering, maar daarna versnelde deze tot circa +1,6 miljoen m³ per jaar, ongeveer 50% meer dan nodig om de zeespiegelstijging te compenseren. Deze trendbreuk in netto-sedimentatie is ook zichtbaar in het getijprisma: dit nam tot in de jaren tachtig toe, mogelijk als reactie op de afsluiting van de Zuiderzee, maar is door de netto-verlanding sinds de jaren tachtig weer afgenomen.

De verlanding wordt gedomineerd door opvulling van het sublitoraal (ondiepe geulen tussen -3 en -1 m NAP) en de geulen (<-3 m NAP). Wadplaten zijn in hoogte vrijwel constant gebleven, maar in oppervlak toegenomen doordat laagwaterzones ondieper zijn worden. Sinds 1990 zijn de geulen ondieper en kleiner geworden. Sediment in de vaargeul wordt gebaggerd en elders in het bekken teruggestort.



Figuur 2-6 Schematische weergave ontwikkelingen op de ruimtelijke schaal van het Amelandse Zeegeat en tijdschaal van decennia. Bron: Meijers, 2025.

3 Resultaten

3.1 Geïdealiseerde casussen

3.1.1 Inleiding en onderzoeksvragen

In deze paragraaf wordt eerst de stabiliteit van een getijdebekken bij een verandering in oppervlak beschouwd (§3.1.2). Vervolgens worden twee casussen behandeld: het effect van baggeren (§3.1.3) en het effect van een afnemend bekkenoppervlak (§3.1.4). Voor baggeren wordt met ASMITA onderzocht hoe het jaarlijkse baggervolume in de vaargeul Holwerd-Ameland en het terugstorten van sediment de dynamiek van het bekken beïnvloeden, en wat er gebeurt als het sediment niet wordt teruggestort. Voor de tweede casus wordt gekeken naar de gevolgen van veranderingen in bekkenoppervlak. Door het verschuiven van het wantij onder Terschelling en door uitbreiding van de kwelders wordt het bekken steeds kleiner. Met berekeningen wordt gekeken wat het effect is van een toe- of afnemend bekkenoppervlak op de ontwikkeling van het hele bekken, met en zonder versnelde zeespiegelstijging.

Onderzoeksvragen zijn:

- *Hoe beïnvloeden deze veranderingen de dynamiek in het hele bekken?*
- *Wat zijn de aanpassingstijden?*
- *Komt het bekken in een andere evenwichtstoestand en kan het uit evenwicht raken?*

3.1.2 Theoretische beschouwing

Theoretische analyse aan de hand van het 1-element ASMITA-model heeft veel inzichten opgeleverd over de invloed van zeespiegelstijging (ZSS) op een Waddenzeebekken (Lodder e.a., 2019; Lodder, 2024). Het 1-elementmodel gebruikt het watervolume V onder HW in een Waddenzeebekken als toestandsvariabele, in tegenstelling tot de 3 elementen zoals besproken in (§2.1.1). Door de (empirische) evenwichtsrelaties voor het plaatareaal, de plaathoogte en het geulvolume te combineren kan de evenwichtswaarde van dit watervolume V_e worden berekend als functie van de bekkenoppervlakte A_b en de getijslag H :

$$V_e = f(A_b, H) \quad 3-1$$

En het ASMITA-model leidt tot een gewone differentiaalvergelijking voor V :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{w\delta c_E A_b}{\delta + wA_b} \left[\left(\frac{V_e(t)}{V(t)} \right)^n - 1 \right] + A_b R = F(V) \quad 3-2$$

Deze vergelijking bevat verschillende ASMITA-modelparameters (in de eerste breuk van het rechterlid) en de snelheid van ZSS:

t	= tijd
w	= verticale uitwisselingscoëfficiënt
δ	= horizontale uitwisselingscoëfficiënt
c_E	= Overall evenwichtskoncentratie
n	= macht in de formulering van lokale evenwichtskoncentratie
R	= snelheid van zeespiegelstijging

De analyse aan de hand van deze vergelijking (Lodder e.a., 2019; Lodder, 2024) levert:

- Een kritische grens van ZSS-snelheid, R_c . Overschrijding hiervan leidt op den duur tot verdrinking, waarbij V blijft toenemen in de tijd (naar oneindig groot).
- Inzicht in hoe het dynamische evenwicht afhangt van de dimensieloze ZSS-snelheid $r=R/R_c$ (dynamische evenwichtsvolume niet-lineair toeneemt met r , en bij r boven ongeveer 0.8 gedraagt het bekken praktisch hetzelfde als bij verdrinking).
- Inzicht in de morfologische tijdschaal voor het bereiken van het dynamische evenwicht (de tijdschaal neemt niet-lineair toe met r).

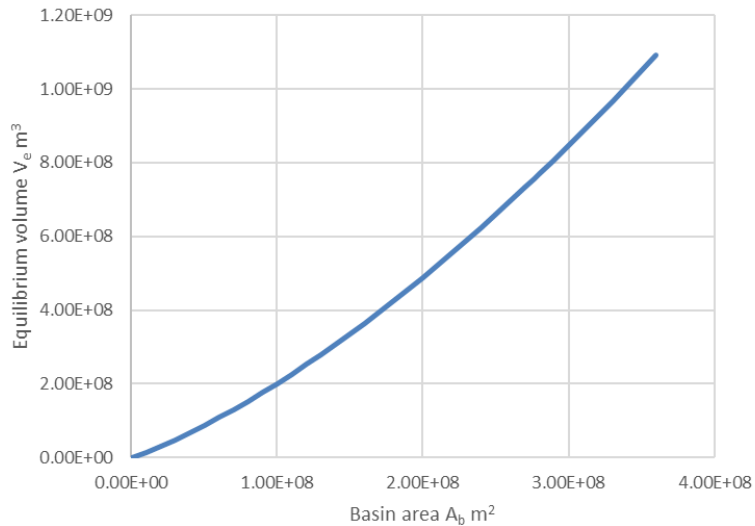
De resultaten van de analyse geven dus nuttige inzichten voor de veranderingen rondom het verdrinken van een Waddenzeebekken door ZSS.

Zoals eerder is opgemerkt (§2.1.1), zijn de bestaande ASMITA-modellen niet geschikt voor de modellering van verlanding. Dit komt door de beperking dat de horizontale oppervlakken van de morfologische elementen in de modellen constant in de tijd blijven en door de basisaanname dat er een morfologisch evenwicht bestaat zonder ZSS ($R=0$). Dit geldt ook voor het hierboven beschreven 1-element ASMITA-model. Om inzichten rondom verlanding te krijgen uit de analyse aan de hand van dit 1-elementmodel, moet het model worden aangepast, door het bekkenoppervlak A_b wel in de tijd te laten veranderen. A_b wordt dan een tweede toestandsvariabele, waardoor een extra vergelijking naast vgl. 3-2 vereist is. Voor de analyse hieronder wordt voor deze extra vergelijking verondersteld dat de verandering van het bekkenoppervlak A_b evenredig is met de verandering van het watervolume V . Het model wordt dan twee gekoppelde differentiaalvergelijkingen voor twee variabelen:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{w\delta c_E A_b}{\delta + wA_b} \left[\left(\frac{V_e(t)}{V(t)} \right)^n - 1 \right] + A_b R = F(V, A_b) \quad 3-3$$

$$\frac{dA_b}{dt} = \alpha \frac{dV}{dt} = \alpha F(V, A_b) \quad 3-4$$

Het gedrag van zo'n model kan worden geanalyseerd door de evenwichtstoestanden en hun stabiliteit te beschouwen. De evenwichtstoestanden worden bereikt wanneer de afgeleiden van beide variabelen gelijk aan nul zijn, dus wanneer de rechterleden van de vergelijkingen 3-3 en 3-4 gelijk zijn aan nul. Dit is het geval als $F(V, A_b) = 0$. De extra vergelijking voor de bekkenoppervlakte heeft dus geen invloed op het evenwicht voor V . De extra vergelijking heeft alleen tot gevolg dat er meerdere (oneindig veel) evenwichtstoestanden zijn: voor iedere A_b is er een evenwichtswaarde voor V . Dit is weergegeven in Figuur 3-1.



Figuur 3-1 Evenwichtswaarde van volume onder HW als functie van bekkenoppervlak, berekend met parameters zoals in het ASMITA-model voor Amelanderzeegat zonder ZSS ($R=0$). De blauwe lijn vertegenwoordigt alle evenwichtstoestanden van het model, gevormd door de vergelijkingen 3-3 en 3-4.

De stabiliteit van een evenwichtstoestand wordt bepaald door het teken van het reële deel van de eigenwaarden van de Jacobiaan matrix:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial F}{\partial V} & \frac{\partial F}{\partial A_b} \\ \alpha \frac{\partial F}{\partial V} & \alpha \frac{\partial F}{\partial A_b} \end{pmatrix} \quad 3-5$$

De twee eigenwaarden hiervan zijn:

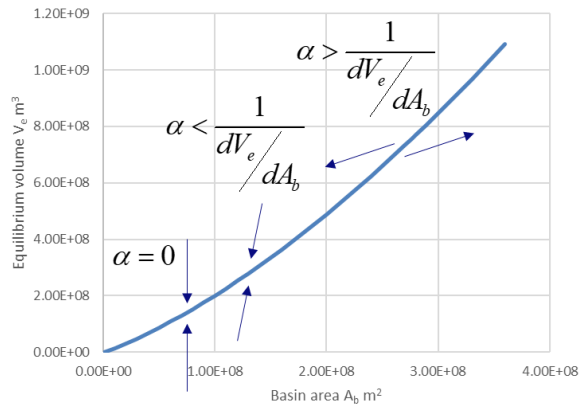
$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0 \\ \lambda_2 &= \frac{\partial F}{\partial V} + \alpha \frac{\partial F}{\partial A_b} \end{aligned} \quad 3-6$$

Dat één van de eigenwaarden gelijk aan nul is (marginale stabiliteit) is te verwachten, omdat er een oneindig aantal evenwichtstoestanden is (ieder punt op de blauwe lijn in Figuur 3-1 is een evenwichtstoestand). Bij een verstoring van een evenwicht langs de lijn blijft het systeem in evenwicht. De andere eigenwaarde is afhankelijk van de waarde van α , en er is waarschijnlijk een kritische waarde van α waarboven de eigenwaarde positief wordt. De eerste term van het rechterlid van vgl. 3-6 is negatief en de tweede positief. Om deze kritische waarde te bepalen, wordt het numerieke fase-diagram beschouwd.

Een numeriek fase-diagram kan worden gebruikt als alternatief voor het analytisch bepalen van de evenwichtstoestanden en de bijbehorende eigenwaarden van de Jacobiaanmatrix. Daarbij wordt een rooster op het V - A_b -vlak gebruikt. Op ieder roosterpunt worden de afgeleiden van de twee variabelen naar de tijd berekend, die samen een vector vormen. Hiermee kunnen de nul-isolijnen van de twee componenten van de vectoren worden getekend. De kruispunten van de twee isolijnen geven de evenwichtstoestanden aan. Vervolgens worden de vectoren (genormaliseerd naar gelijke lengte) getekend. Het vectorveld in de buurt van een evenwichtstoestand geeft een indicatie van de stabiliteit van de evenwichtstoestand.

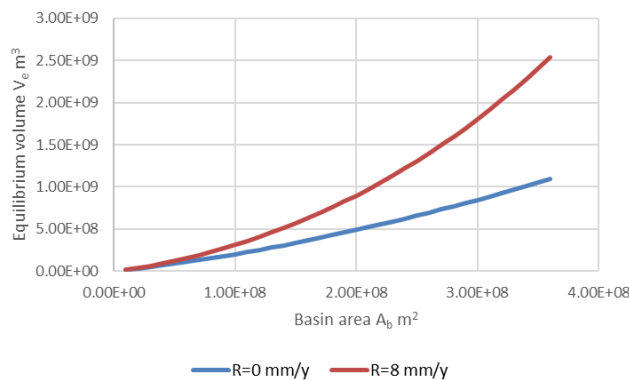
Vanwege vgl. 3-4 zijn alle vectoren in het fase-diagram parallel; immers de coëfficiënt α definieert de constante verhouding tussen de twee componenten van de vectoren. De vectoren boven en onder de lijn van de evenwichtstoestanden hebben wel tegengestelde richtingen, zie Figuur 3-2. Dit figuur laat zien dat de kritische waarde van α wordt bepaald door de helling van de lijn van de evenwichtstoestanden:

$$\alpha_c = \left(\frac{dV_e}{dA_b} \right)^{-1} \quad 3-7$$



Figuur 3-2 Beschouwing van het numerieke fase-diagram leidt tot de kritische waarde van α : de helling van de blauwe lijn bepaalt de kritische waarde.

Het laten veranderen van het bekkenoppervlak met de verandering van het watervolume in het bekken komt in feite neer op het meenemen van verlanding. Immers, sedimentatie in het bekken leidt naast een afname van de diepte ook tot een inkringing van het wateroppervlak. Het proces kan instabiel worden als de verandering van het wateroppervlak te snel gaat ten opzichte van de diepteverandering. ZSS heeft tot gevolg dat deze instabiliteit eerder (bij kleinere waarde van α) optreedt. Dit is te zien door vergelijkingen 3-3 en 3-6 te beschouwen en door te bekijken hoe de lijn van evenwichtstoestanden door ZSS wordt beïnvloed (Figuur 3-3).



Figuur 3-3 Invloed van ZSS. Hogere snelheid van ZSS maakt de helling van de lijn van evenwichtstoestanden steiler, waardoor de kritische waarde van α kleiner wordt.

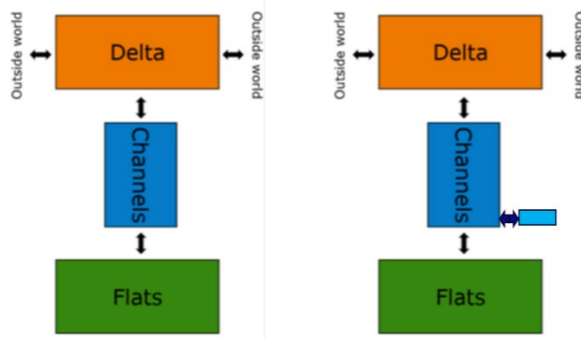
De resultaten van deze analyse hebben implicaties voor zowel modellering als de morfologische ontwikkeling in de werkelijkheid. Voor de modellering met ASMITA betekent dit dat er instabiliteit van simulaties mogelijk is wanneer de verandering van het bekkenoppervlak te snel is ten opzichte van de volumeveranderingen. Voor de ontwikkelingen in de werkelijkheid betekent dit dat een zeegatsysteem met een in de tijd veranderend bekkenoppervlak

gevoeliger is voor verdrinking en verlanding. Een bekken dat kan vergroten in oppervlak met ZSS verdrinkt eerder dan een bekken met vaste grenzen. Vergaande inpolderingen kan verlanding bevorderen.

3.1.3 Effect van baggeren

De snelle sedimentatie in het laatste deel van de vaargeul naar Holwerd is al genoemd als voorbeeld van verlanding in de vorm van lokale en snelle sedimentatie binnen een Waddenzeebekken. Een hypothese is dat dit de verklaring vormt voor de snellere sedimentatie dan ZSS in dit bekken in de laatste decennia (Lodder, persoonlijke communicatie). Door de vaargeul op diepte te houden wordt de sedimentvraag behouden. Zo is er een kunstmatige sedimentvang in het bekken gecreëerd. De sedimentvraag kan niet geheel door het gebaggerde sediment worden voldaan ook als het binnen het bekken wordt gestort. Zo ontstaat er een extra sedimentimport. Het huidige ASMITA-model voor het Amelanderveegat kan dit niet weergeven, maar door een aanpassing in de modelschematisatie moet het model in principe wel in staat zijn dit type systeemaanpassing te simuleren.

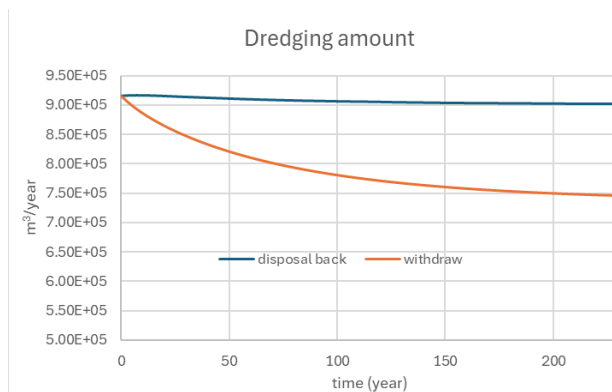
Uitgegaan is van het ASMITA-model voor Amelanderveegat, zoals gebruikt door Lodder e.a. (2022) en Huismans e.a. (2022) voor het ZSS-scenario zonder versnelling (ZSS-snelheid = 2 mm/jaar). Het model wordt uitgebreid met een extra geul-element dat de gebaggerde vaargeul vertegenwoordigt, zie Figuur 3-4. Voorlopig wordt, voor het gemak, het oorspronkelijke geulelement in het model niet aangepast. In plaats van het splitsen van het oorspronkelijke geulelement wordt er dus een klein geulelement extra toegevoegd.



Figuur 3-4 Aanpassing van het ASMITA-model. Links: het oorspronkelijke 3-elementenmodel; rechts: het aangepaste model met een extra kleine vaargeul.

Het extra (nieuwe) geulelement is uitsluitend gekoppeld aan het geulelement in het bestaande model. Dit vaargeul-element wordt sterk uit evenwicht gebracht door een groot verschil te specificeren tussen het initiële volume en het evenwichtsvolume. Verder wordt de parameterinstelling in en rondom dit element zodanig gekozen dat bij continu onderhoud de baggerhoeveelheid het juiste niveau heeft. Twee simulaties met het aangepaste model worden uitgevoerd: één zonder terugstorten van het gebaggerde sediment en één met terugstorten in de (grote) geul. De berekende baggerhoeveelheden zijn weergegeven in Figuur 3-5.

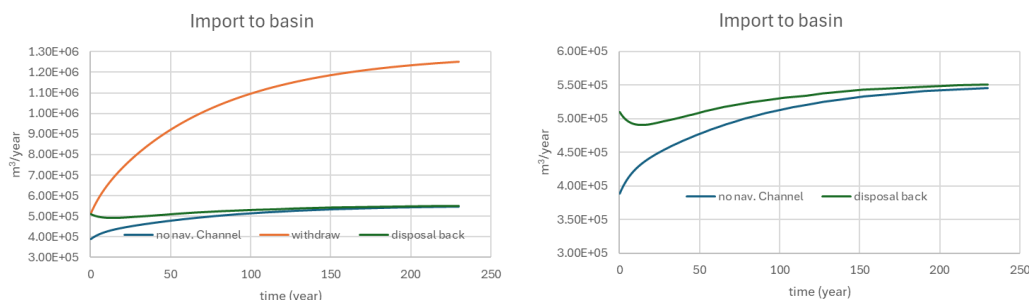
Aan het begin van de simulaties is de baggerhoeveelheid in beide simulaties gelijk, namelijk iets meer dan 0,9 miljoen m³ per jaar. Wanneer het gebaggerde materiaal wordt teruggestort, blijft de baggerhoeveelheid ongeveer constant. Zonder terugstorten, en dus onttrokken uit het systeem, neemt de baggerhoeveelheid in de tijd af en stabiliseert deze na een periode van meer dan een eeuw op een niveau van ongeveer 0,75 miljoen m³ per jaar.



Figuur 3-5 Berekend baggervolume uit de twee simulaties.

De hypothese dat een kunstmatige sedimentvang achter in het bekken, in de vorm van een onderhouden vaargeul (zoals hier gesimuleerd) of een havenbekken, extra sedimentimport naar het bekken veroorzaakt, wordt positief getoetst. Dit is vooral duidelijk in het geval van onttrekking van het gebaggerde sediment. Het verschil met de referentie (zonder kunstmatige sedimentvang) neemt in de tijd toe tot de baggerhoeveelheid, zie Figuur 3-6.

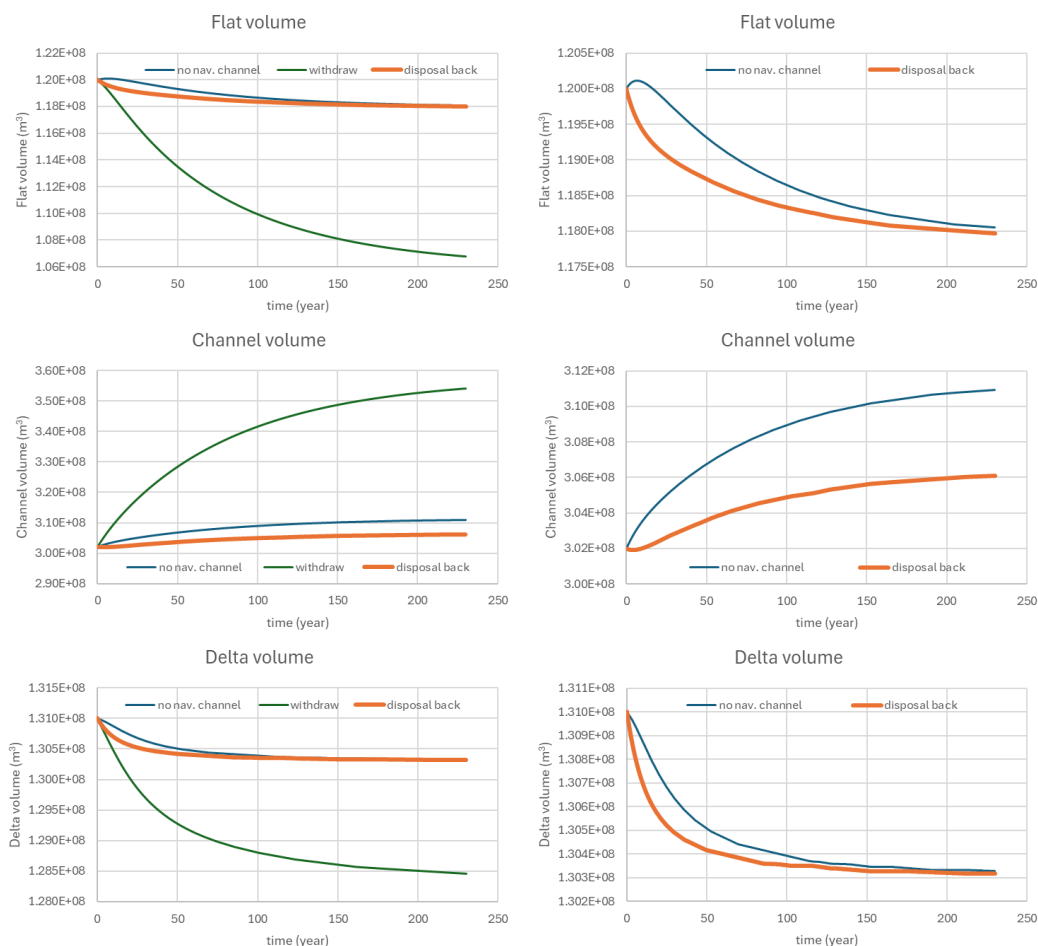
Wanneer het gebaggerde sediment wordt teruggestort, is de toename kleiner en bovendien tijdelijk. Na een lange tijd (meer dan een eeuw) gaat de sedimentimport terug naar hetzelfde niveau als wanneer er geen kunstmatige sedimentvang aanwezig is.



Figuur 3-6 Berekende sedimentimport naar het bekken. Links: alle drie simulaties; rechts: inzoom om het effect in het geval van met teruggestorten duidelijker te maken.

Het baggeren in de vaargeul heeft effecten op de morfologische ontwikkelingen van alle elementen in het systeem, zie Figuur 3-7. Deze effecten zijn veel groter in het geval dat het gebaggerde sediment niet wordt teruggestort. De effecten voor de platen in het bekken en voor de buitendelta zijn vergelijkbaar in gedrag. Zowel met als zonder teruggestorten wordt een volumeafname veroorzaakt. Zonder teruggestorten zijn de afnamen veel groter en ze nemen toe in de tijd (en zijn dus ook blijvend). Met teruggestorten zijn de afnamen relatief kleiner; bovendien nemen ze af in de tijd en verdwijnen de effecten uiteindelijk na een lange periode.

De effecten voor de geulen zijn omgekeerd voor de situatie met en zonder teugstorten. Zonder teruggestorten is het effect een verruiming, terwijl met teruggestorten juist sprake is van een vernauwing. In beide gevallen nemen de effecten toe in de tijd en zijn ze dus blijvend. In het geval zonder teruggestorten is het effect veel groter in omvang dan in het geval met teruggestorten.



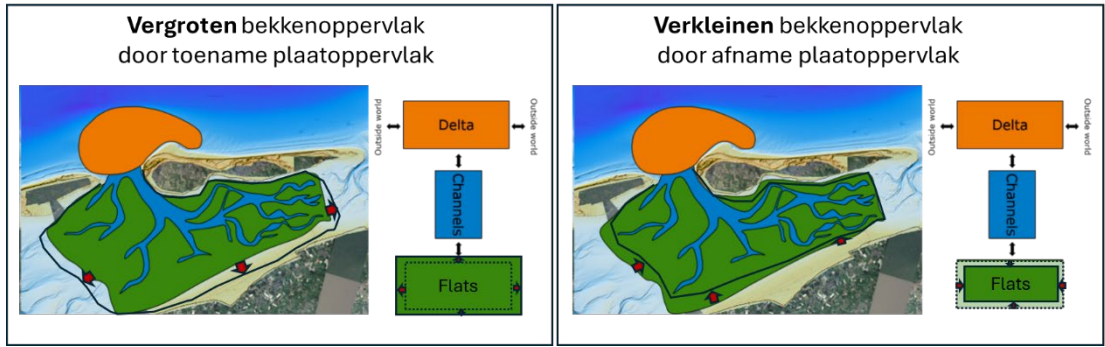
Figuur 3-7 Berekende ontwikkelingen van de volumes van de oorspronkelijke 3 morfologische elementen in het model. De rechterkolom bevat inzoom van de figuren in de linker kolom om het effect van het geval met terugstorten duidelijker te maken.

3.1.4 Verlanding van bekkens

Het effect van een verandering in bekkenoppervlak is onderzocht door het areaal van de platen tijdelijk of permanent te laten af- of toenemen (waarbij het geulareaal constant blijft). Hoe dit is geschematiseerd in ASMITA is weergegeven in Figuur 3-4. Voorbeelden van een afname van het bekkenoppervlak in het Amelanderzeegat zijn de verschuiving van het wantij onder Terschelling en de uitbreiding van de vastelandskwelders², waarbij met name het plaatoppervlak is afgenomen. Een toename van het bekkenoppervlak door uitbreiding van het plaatoppervlak kan optreden wanneer kwelders eroderen en plaat worden.

In deze paragraaf onderzoeken we drie typen gevoeligheden, namelijk: 1) oppervlakvariëaties (tijdelijk of permanent, afname of toename, groot of klein), 2) plaathoogtevariëaties (verlies van lage of hoge platen) en 3) het effect van zeespiegelstijging.

² NB. Kwelders worden niet gemodelleerd in ASMITA (voor de evenwichtsformuleringen uit de literatuur zijn de kwelders niet van belang), hierdoor heeft het kwelderoppervlak geen invloed op het bekkenoppervlak, en neemt het bekkenoppervlak af als platen veranderen in kwelder.

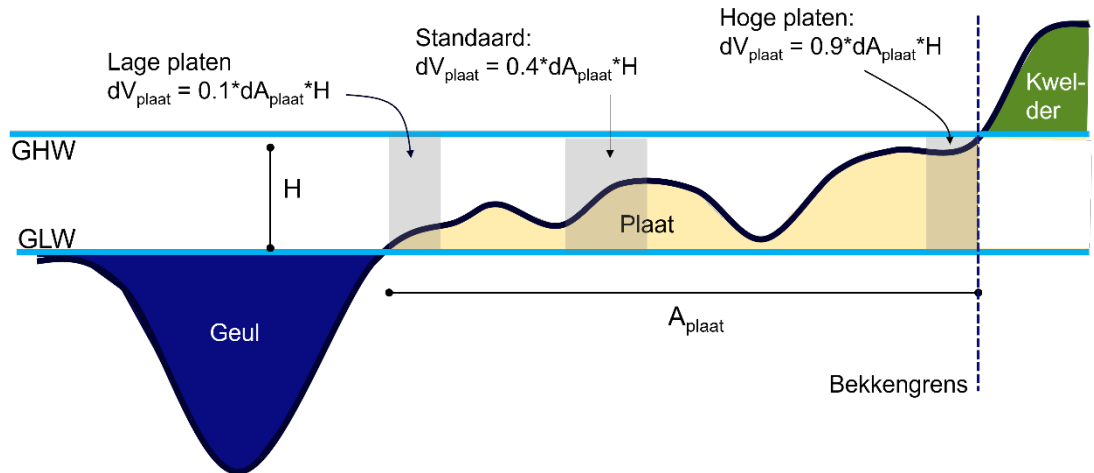


Figuur 3-8 illustratie van de aanpassing van de verandering in bekkenoppervlak door verandering in plaatoppervlak in de schematisatie in ASMITA.

3.1.4.1 Modelkeuzes

Voor het berekenen van het effect van een verandering in bekkenoppervlak met ASMITA moeten een aantal aannames worden gemaakt.

- Wanneer het bekkenoppervlak verandert, verandert ook het evenichtsvolume voor de platen (zie vergelijking 2-4 tot en met 2-7). Conform vergelijking 2-4 gaan we er in de modellering vanuit dat het evenichtsvolume evenredig schaaft met het plaatoppervlak; als dit afneemt, neemt het evenichtsvolume voor de platen dus evenredig af. Volgens vergelijking 2-5 verandert bij een verandering in bekkenoppervlak ook de verhouding tussen geul en plaatoppervlak. Omdat de beschouwde veranderingen in bekkenoppervlak relatief klein zijn, verwaarlozen we deze laatste component en nemen we deze niet mee in de modellering.
- Wanneer er plaatoppervlak bijkomt of afgaat, verandert ook het plaatvolume. Dit moet aan het model worden opgelegd. Als standaard gaan we ervan uit dat $dV_{plaat} = 0.4dA_{plaat}H$, dat wil zeggen dat de platen die erbij komen of afgaan een gemiddelde hoogte hebben van $0.4 \times$ de getijslag (H), zie Figuur 3-9. Voor lage platen nemen we $0,1 \times$ getijslag, voor hoge platen $0,9 \times$ getijslag.
- Tot slot nemen we aan dat de getijslag niet verandert. In werkelijkheid zal dit wel in enige mate veranderen als het bekken in oppervlak en vorm verandert. Hiervoor zijn echter numerieke berekeningen met een 2D-model nodig om te bepalen hoeveel de getijslag verandert.

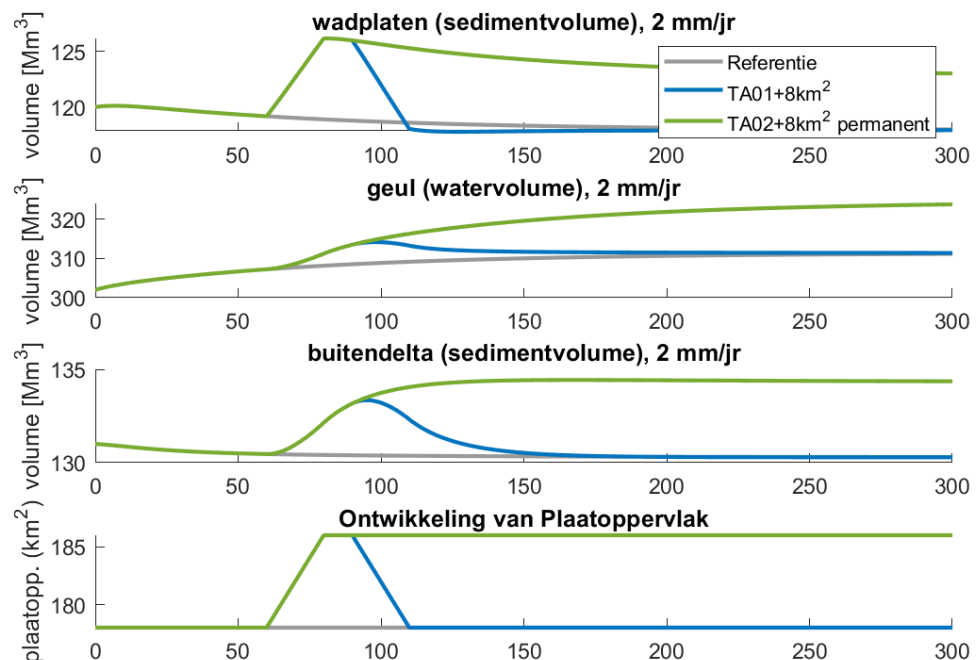


Figuur 3-9 Illustratie van een doorsnede van een deel van een getijbekken, met keuzes voor gemiddelde plaahtoogtes in de modellering. Bij berekening van plaatvolume gebruiken we standaard $0,4 \times$ getijslag (H). Voor lage platen nemen we $0,1 \times$ getijslag, voor hoge platen $0,9 \times$ getijslag.

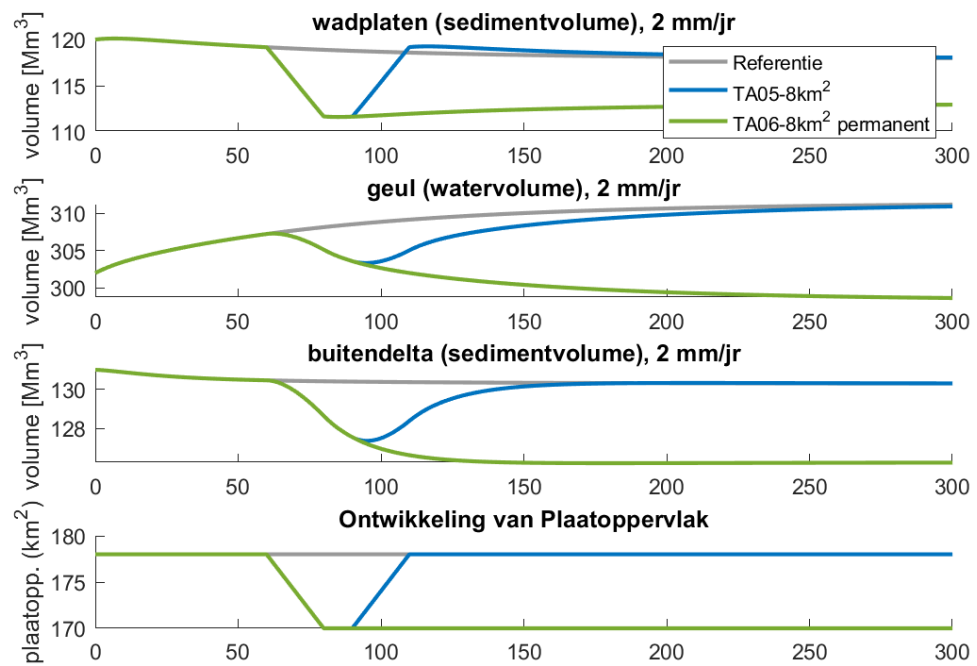
3.1.4.2 Gevoeligheidsanalyse oppervlakvariaties

Observaties: Ten eerste is de gevoeligheid van de reactie van het bekken op variaties in oppervlakverandering onderzocht. Berekeningen zijn uitgevoerd voor het bekken van Ameland, waarbij tijdelijke en permanente veranderingen van het plaatareaal met 8 km² (4% van het plaatareaal) en 24 km² (13% van het plaatareaal) zijn doorgerekend, zie Figuur 3-10 tot en met Figuur 3-12. Bij een tijdelijke verandering van het plaatareaal bij huidige zeespiegelstijging (~2 mm/jaar) veert het bekken terug naar het oorspronkelijke evenwicht. Het maakt daarbij niet uit of het om een tijdelijke toename (Figuur 3-10) of afname (Figuur 3-11) gaat, en of het om een kleine verandering van 8 km² (Figuur 3-11) of een grotere verandering van 24 km² (Figuur 3-12) gaat. Bij een permanente toe- of afname beweegt het bekken naar een nieuw evenwicht, dat bij een grotere verandering in oppervlak (Figuur 3-12) sterker afwijkt van het oorspronkelijke evenwicht dan bij een kleinere verandering (Figuur 3-11). Elk bekkenoppervlak heeft daarbij zijn eigen evenwicht, zie Figuur 3-1.

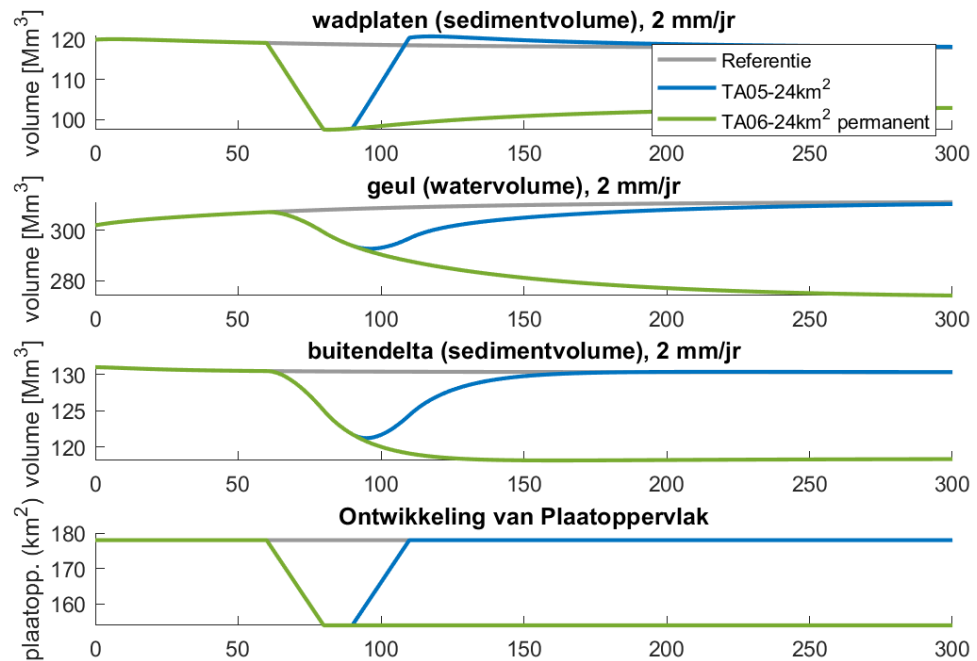
Bij een toename van het bekkenoppervlak door toename in plaatoppervlak (zie Figuur 3-8), neemt automatisch ook het plaatvolume toe (zie Figuur 3-9). Het want is bijvoorbeeld opgeschoven, waardoor meer platen uit een ander bekken nu bij dit bekken zijn gaan horen, of kwelders zijn geërodeerd en plaat geworden. Bij een afname in bekkenoppervlak gebeurt het omgekeerde. De verandering in bekkenoppervlak en het plaatoppervlak heeft effect op het getijprisma. Bij een afname in oppervlak wordt het getijprisma kleiner, omdat door de verkleining van het bekken minder water per getij in- en uitstroomt. Hierdoor zijn de geulen te ruim geworden voor de hoeveelheid water die per getij in- en uitstroomt, waardoor de geulen sedimenteren en het natte geulvolume afneemt. Het sediment voor de geulen is afkomstig van de buitendelta, waardoor het buitendeltavolume afneemt. In werkelijkheid kan dit sediment ook van elders afkomstig zijn, bijvoorbeeld van een eilandstaart. Bij een toename in oppervlak gebeurt het omgekeerde, namelijk het getijprisma neemt toe, de geulen zijn te krap en gaan eroderen. Dit sediment wordt naar buiten getransporteerd en voed de buitendelta, waardoor deze in sedimentvolume toeneemt.



Figuur 3-10 Ontwikkeling van het Amelanderzeegat, wanneer er 8 km² aan plaatoppervlak tijdelijk of permanent bijkomt. In de bovenste figuren de volumeontwikkeling van de platen, geulen en buitendelta over de tijd en in het onderste figuur verandering in plaatoppervlak.



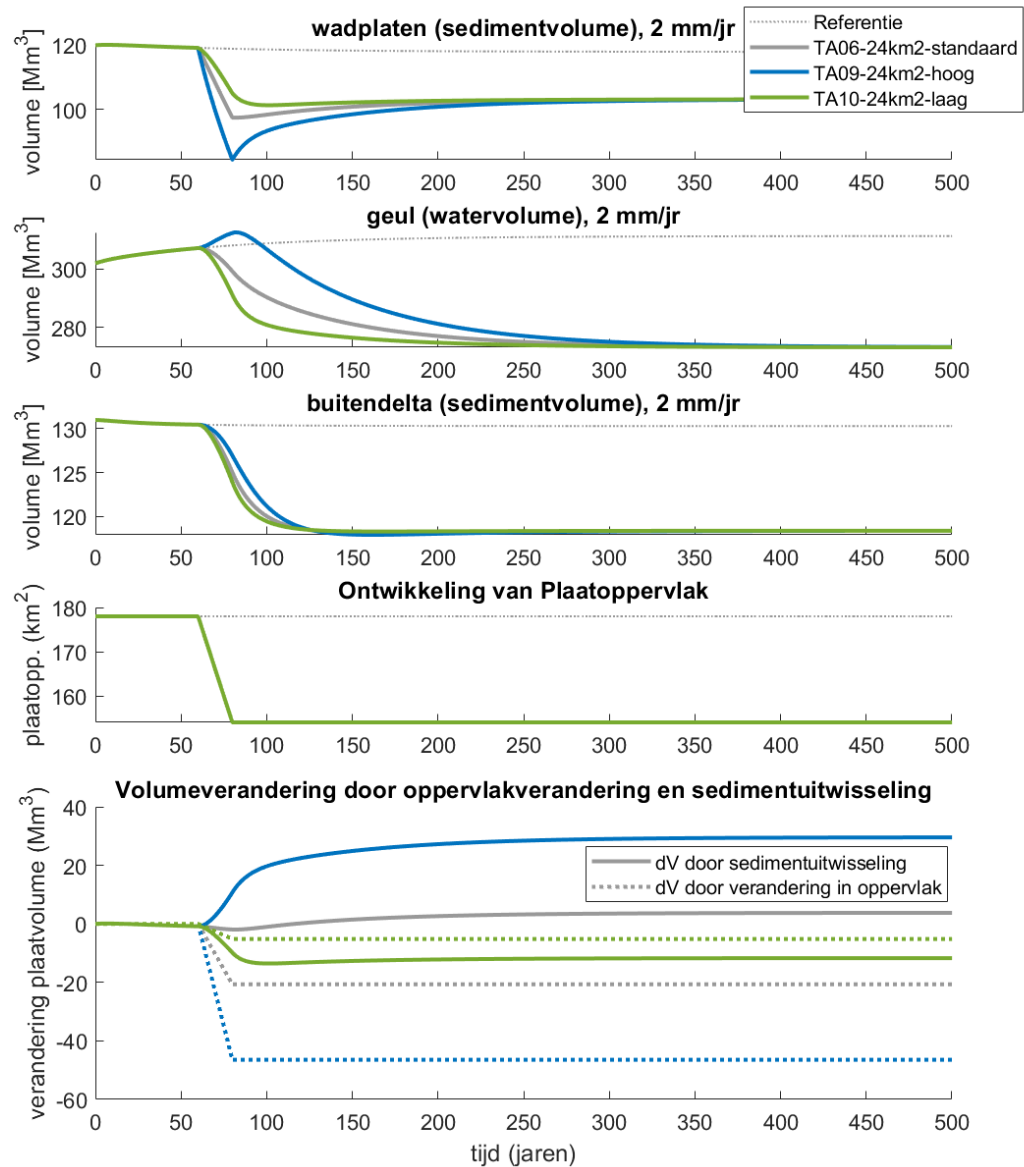
Figuur 3-11 Ontwikkeling van het Amelandsezeegat, wanneer er 8 km^2 plaatoppervlak tijdelijk of permanent verdwijnt. In de bovenste figuren de volumeontwikkeling van de platen, geulen en buitendelta over de tijd en in het onderste figuur verandering in plaatoppervlak.



Figuur 3-12 Ontwikkeling van het Amelandsezeegat, wanneer er 24 km^2 plaatoppervlak tijdelijk of permanent verdwijnt. In de bovenste figuren de volumeontwikkeling van de platen, geulen en buitendelta over de tijd en in het onderste figuur verandering in plaatoppervlak.

3.1.4.3 Gevoeligheidsanalyse plaathoogte

Wanneer een verandering in oppervlak in het model wordt opgelegd, moet een keuze worden gemaakt in hoeverre een bepaalde verandering in plaatareaal zich vertaalt in plaatvolume. Wanneer er vooral hoge platen bijkomen, zal een relatief kleine verandering in plaatareaal resulteren in een relatief grote verandering in plaatvolume, zie Figuur 3-9. Bij het verdwijnen van lage platen is het omgekeerde het geval. Figuur 3-13 toont de resultaten van het verlies van lage, middelhoge en hoge platen. Ook wordt getoond welk aandeel van de volumeverandering wordt veroorzaakt door het verlies in oppervlak (waardoor direct ook een deel van het plaatvolume verdwijnt) en welk deel wordt veroorzaakt door sedimentuitwisseling.



Figuur 3-13 Ontwikkeling van het Amelanderveegat wanneer 24 km² aan lage, middelhoge of hoge platen permanent verdwijnt. In de bovenste figuren de volumeontwikkeling van de platen, geulen en buitendelta over de tijd. In het vierde figuur de verandering in plaatoppervlak. In het onderste figuur wordt weergegeven welk deel van de volumeverandering van de platen wordt veroorzaakt door de verandering in oppervlak en welk deel door sedimentuitwisseling.

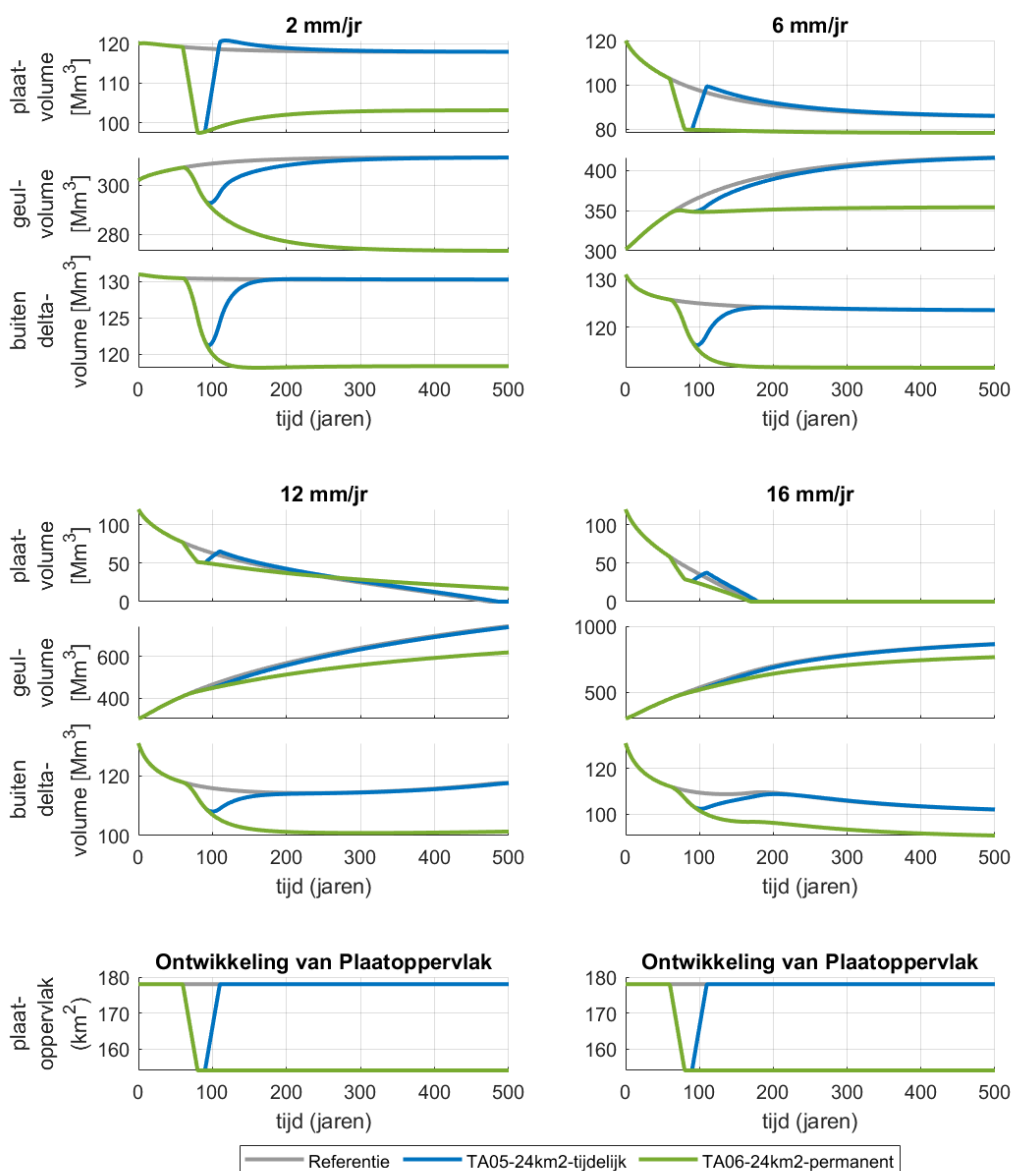
Te zien is dat na honderden jaren alle varianten uitkomen op hetzelfde dynamische evenwicht, maar dat de ontwikkeling naar dit dynamische evenwicht verschilt. Wanneer er vooral hoge platen verdwijnen, verdwijnt direct ook veel plaatvolume, waardoor het plaatvolume direct na verkleining van het bekken veel kleiner is dan het evenwichtsvolume van de platen. De platen herstellen zich door sedimentatie, wat zichtbaar is in de relatief grote positieve bijdrage van de volumeverandering door sedimentuitwisseling. Dit sediment is afkomstig uit de geulen, waardoor de geulen in eerste instantie gaan eroderen in plaats van sedimenteren, zoals bij het verlies van middelhoge platen het geval was door de afname van het getijprisma als gevolg van het verkleinen van het bekken. Pas wanneer de platen voldoende in volume zijn toegenomen, en de sedimentvraag naar de platen is afgenomen en het getijprisma verder is afgenomen, gaan de geulen sedimenteren. Wanneer vooral veel lage platen verdwijnen, zijn er relatief veel hoge platen over en is het resterende plaatvolume te groot voor het nieuwe evenwicht. Hierdoor vindt erosie van de platen plaats om het evenwicht te herstellen, wat leidt tot extra snelle sedimentatie in de geulen. Bij het verlies van middelhoge platen is het volumeverlies door de verandering in oppervlak vrijwel in evenwicht met de nieuwe situatie en is er nauwelijks sprake van extra volumeverandering door sedimentuitwisseling.

Samengevat maakt het voor de lange termijn niet uit of er vooral hoge of lage platen verdwijnen (of bijkomen), omdat voor een bepaald bekkenoppervlak één bepaald evenwicht van de platen en geulen hoort (zie Figuur 3-1) en het systeem naar dit evenwicht wil toe bewegen. Wanneer vooral hoge platen verdwijnen wordt het volume tekort op de platen aangevuld door sedimentatie, wanneer vooral lage platen verdwijnen wordt het volumeoverschot op de platen gecompenseerd door erosie. Voor het verloop naar het nieuwe evenwicht toe, maakt het daarom wel uit of er vooral hoge of lage platen verdwijnen. Het verlies van vooral hoge platen (bijvoorbeeld door kwelderuitbreiding of het opschuiven van het wantij), leidt tot een hogere sedimentvraag op de platen en tot tijdelijke (jaren- tientallen jaren) erosie in de geulen, gevolgd door sedimentatie in de geulen. In de transitiefase zal netto sedimentatie op de platen plaatsvinden, waarbij de sedimentatie groter is dan nodig om de zeespiegelstijging bij te houden. Hierbij lijkt het alsof er op de resterende platen verlanding optreedt, terwijl dit in werkelijkheid de compensatie is van het verlies van hoge platen en de extra sedimentatie naar verloop van tijd zal afnemen.

3.1.4.4 Gevoeligheidsanalyse zeespiegelstijging

De gevoeligheid voor zeespiegelstijging is getest voor 2, 6, 12, en 16 mm/jaar, zie Figuur 3-14. Wanneer de zeespiegelstijging toeneemt, gaat meespelen dat een groter bekken minder makkelijk kan meestijgen met de zeespiegelstijging, doordat meer sediment moet worden aangevoerd en zich over een groter oppervlak moet verspreiden. Hierdoor is de kritische zeespiegelstijgingsnelheid³ lager. Bij 6 mm/jaar bereikt het kleinere bekken daardoor sneller een dynamisch evenwicht dan het grotere bekken, al blijft het plaatvolume van het grotere bekken wel groter dan dat van het kleinere bekken. Bij 12 mm/ jaar is dit niet langer het geval. Het grotere bekken is dan voorbij de kritische zeespiegelstijgingsgrens, en verliest sneller plaatvolume dan het kleinere bekken dat nog wel een nieuw dynamisch evenwicht bereikt en op lange termijn meer plaatvolume overhoudt. Bij nog hogere zeespiegelstijging (16 mm/jaar) is de zeespiegelstijgingsnelheid dusdanig hoog dat ook het kleinere bekken voorbij de kritische grens raakt en alle bekkens ongeveer even snel verdrinken.

³ de zeespiegelstijgingsnelheid waarbij het bekken niet meer naar een nieuw dynamische evenwicht komt, en op termijn volledig zal verdrinken.



Figuur 3-14 Ontwikkeling van het Amelandseegat wanneer 24 km² aan plaatoppervlak tijdelijk (blauw) of permanent (groen) verdwijnt, voor verschillende zeespiegelstijgingsscenario's.

3.2 Historische verlanding

3.2.1 Inleiding en onderzoeksvragen

In het verleden zijn grote delen van de bekkens afgesloten of ingepolderd; een voorbeeld hiervan is de inpoldering en afsluiting van de Middellzee (zie §2.2.1). Het effect van deze historische veranderingen op de huidige sedimentdynamiek in het bekken is onderzocht met ASMITA. Onderzoeksvragen hierbij zijn:

- In hoeverre is ASMITA in staat om deze historische ingrepen te modelleren?
- Wat is de tijdschaal van aanpassing aan de historische inpolderingen en afsluitingen, en in hoeverre wordt de huidige dynamiek in de bekkens nog door deze historische ingrepen beïnvloed?

3.2.2 Modelkeuzes

Voor het berekenen van het stapsgewijs bedijken van de Middellzee zijn een aantal keuzes en aannames gemaakt:

- **Startjaar:** De berekeningen starten vanaf het moment dat de Marne-estuarium is afgesloten in 1200, zie §2.2.1.
- **Zeespiegelstijging:** de mate van zeespiegelstijging is in de loop van de eeuwen veranderd. Voor de periode 1200-1900 wordt uitgegaan van een gemiddelde zeespiegelstijging van 1,5 mm/jaar. Dit getal is een grofstoffelijk gemiddelde over een veel langere periode en gebaseerd op van der Spek (1994). Het is goed mogelijk dat de zeespiegelstijging gedurende de interesseperiode iets lager lag. In de afgelopen eeuw was de zeespiegelstijging 1,7 mm/jaar. Deze waarde wordt gehanteerd vanaf 1900.
- **Getijslag:** de getijslag wordt door vele parameters beïnvloed, waaronder de bodemligging op zee, in het bekken en de zeespiegelstijging. Met name de geometrie in het bekken heeft een sterke invloed op de getijslag. Het is daarom aannemelijk dat de getijslag in de afgelopen eeuwen veranderd is, zeker gezien de sterk veranderingen in de bekkengeometrie. Ook zal de getijslag binnen het bekken hebben gevarieerd, vooral toen het bekken nog een langgerekt karakter had. Bovendien was het bekken toen niet kort t.o.v. getijgolfengte, wat is aangenomen bij de berekening het getijprisma in ASMITA. Van de ontwikkeling van het getij in de tijd en over het bekken zijn echter geen metingen beschikbaar. Bij gebrek aan informatie is de getijslag constant gehouden op 2.15 m en aangenomen dat het bekken kort kan worden beschouwd (/HW en LW gelijktijdig in het hele bekken optreedt).
- **Evenwichtsparemeters:** aangenomen is dat de evenwichtsparemeters voor het historische bekken gelijk zijn aan die van het huidige bekken.
- **Sedimentkorrelgrootte:** de waarden voor de verticale uitwisseling (dat wil zeggen de korrelgrootte) zijn identiek gehouden aan die van het huidige systeem. Het is goed denkbaar dat de korrelgrootte in de loop van de eeuwen gevarieerd heeft, zeker gezien het karakter van het bekken aanzienlijk is veranderd. In afwezigheid van metingen zijn deze waarden echter gelijk gehouden aan het huidige systeem.
- **Horizontale sedimentuitwisseling:** De uitwisselingsparameter voor horizontale sedimentuitwisseling is conform de theorie (Kragtwijk, 2001) geschaald naar de afmetingen van het bekken. Voor de uitwisseling tussen buitendelta en de "buitenwereld" is geen schalingsregel bekend; daarom wordt aangenomen dat deze schaling gelijk is aan die van de uitwisselingsparameter tussen de geul en de buitendelta.
- **Verhouding arealen en volumes na afsluiting:**

In Van der Spek (1994) zijn alleen de verandering in bekkenoppervlak (het gebied onder gemiddeld hoogwater) gerapporteerd. Er is geen informatie beschikbaar over welk deel van dit oppervlak uit platen en geulen bestond, noch over de gemiddelde plaathoogtes of geuldieptes die zijn afgesloten. Voor de verhouding tussen geul- en plaatoppervlak en voor de volumeverhoudingen zijn daarom de volgende keuzes gemaakt:

- Voor de situatie van net na **1200** is alleen het totale oppervlak bekend. De verhouding plaat-geul is niet bekend. Aangenomen is dat het bekken vlak voor 1200 in evenwicht was, zowel qua verhouding plaat-geuloppervlak als qua volumes. De verhouding plaat-geuloppervlak kan op basis van het bekkenoppervlak van 1100 berekend worden met vergelijking 2-5. Vervolgens kan het evenwichtsvolume voor de plaat bepaald worden (vgl. 2-4), het getijprisma (vgl. 2-11) en de evenwichtsvolumes voor de geul (vgl. 2-9) en buitendelta. (vgl. 2-10). Voor het deel dat in 1200 afgesloten raakt moeten ook aannames worden gedaan over de verhouding plaat-geuloppervlak en volume. Hiervoor wordt aangenomen dat het afgesloten deelbekken ook in evenwicht was. Op basis van het oppervlak van het deelbekken kunnen met

- behulp van vergelijking 2-5 tot en met 2-11 de oppervlaktes en volumes van de geulen en platen bepaald worden. Vervolgens kunnen op basis van de oppervlaktes en volumes van het bekken uit 1100 en het afgesloten deelbekken de oppervlaktes en volumes in 1200 bepaald worden.
- Bij de bepaling van de oppervlaktes en volumes net na bedijking in **1300** volgt dezelfde aanpak als voor 1200, alleen worden voor de volumes van het hele bekken vlak voor afsluiting de door het model berekende volumes gebruikt, en niet de evenwichtsvolumes. Voor het deel wat afgesloten wordt, wordt er wel van uitgegaan dat dit deelbekken in evenwicht was.
 - Voor alle opvolgende afsluitingen van na 1400 wordt aangenomen dat het afgesloten gebied alleen bestaat uit platen. De vorm van het bekken is vanaf die tijd namelijk anders en het afgesloten deel heeft niet langer de vorm van een deelbekken, maar is meer een strook langs het bekken. Voor de gemiddelde plaathoogte van het afgesloten gebied wordt 1 m genomen. Er is voor gekozen om een hogere waarde te kiezen dan de gemiddelde plaathoogte in het Ameland bekken (67 cm), omdat zich aan de randen gemiddeld genomen hogere platen bevinden.
 - De evenwichtswaarde van het plaatoppervlak schaalt met het bekkenoppervlak (vergelijking 2-5). Direct na de bedijking is dit echter uit evenwicht, omdat vooral de platen zijn afgesloten. Omdat er geen formules beschikbaar zijn die beschrijven hoe het plaatoppervlak zich in de tijd ontwikkelt, hebben we in het model aangenomen dat het plaatoppervlak mee verandert met de volumeontwikkeling van de platen richting het evenwicht, volgens dezelfde schaalfactor.

3.2.3 Ontwikkeling Middelsee

In Figuur 3-15 zijn de ASMITA-resultaten van de historische ontwikkeling van de Middelsee weergegeven. Na elke afsluiting of bedijking is het systeem uit evenwicht. Bij elke afsluiting verdwijnen met name hoger gelegen gebieden, waardoor het plaatvolume direct na afsluiting veel kleiner is dan het evenwichtsvolume. Ook is de verhouding tussen plaat- en geuloppervlak uit evenwicht. Om deze evenwichten te herstellen vindt kort na afsluiting veel sedimentatie plaats op de platen. Doordat het bekken met elke afsluiting aanzienlijk kleiner wordt, neemt ook het getijprisma plotseling sterk af. Hierdoor raken ook de geulen uit evenwicht en gaan zij sedimenteren. De grote hoeveelheid sedimentatie op de platen en in de geulen is afkomstig van buiten het bekken.

Na elke afsluiting duurt het tientallen tot honderden jaren voordat het systeem weer een nieuw dynamisch evenwicht bereikt. In de meeste gevallen volgt een nieuwe afsluiting voordat het bekken een dynamisch evenwicht⁴ heeft kunnen bereiken. De ontwikkeling van sterke sedimentatie na elke afsluiting komt overeen met de historische reconstructie (Van der Spek, 2015). Qua orde van grootte komen ook de sedimentatievolumes overeen. Echter, zowel de uit historische bronnen afgeleide sedimentatievolumes als de berekende volumes zijn zeer onzeker.

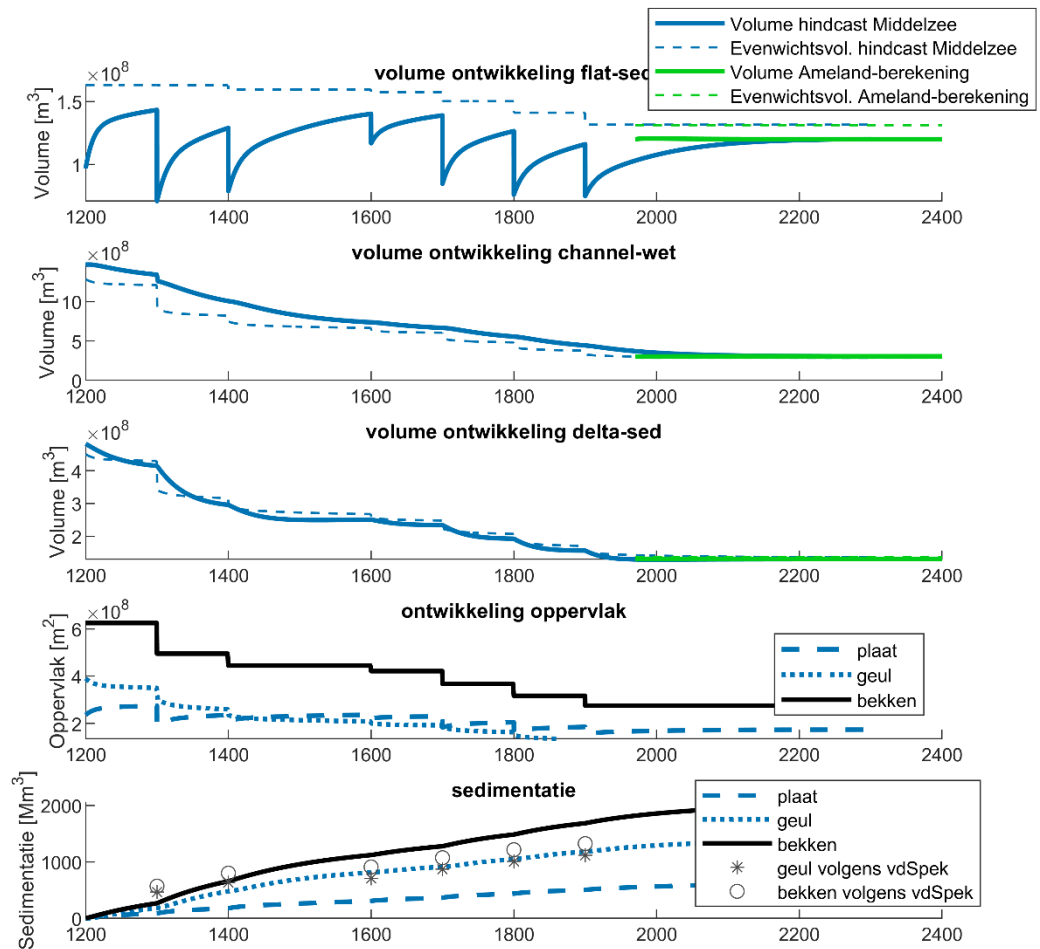
Tot slot zijn voor de periode na 1970 de resultaten van de ASMITA-berekeningen voor de Middelsee vergeleken met recente berekeningen voor het Amelandseegat (Lodder et al., 2022, Huismans et al., 2022). Uit deze recente berekeningen blijkt dat het bekken al veel dichterbij het evenwicht ligt dan op basis van de historische berekeningen voor de Middelsee het geval zou zijn.

Omdat de evenwichts- en uitwisselingsparameters in beide berekeningen voor deze periode identiek zijn, wordt het verschil waarschijnlijk veroorzaakt door onzekerheden in het historische

⁴ Door zeespiegelstijging zullen de volumes nooit de evenwichtswaarden bereiken. Het dynamisch evenwicht is bereikt als de volumes parallel raken aan de evenwichtsvolumes.

verloop. In dat verloop doen zich telkens grote sprongen voor in de ontwikkeling van oppervlak en volume. Onzekerheden in deze sprongen kunnen zich cumulatief opstapelen, waardoor steeds grotere afwijkingen ontstaan in elementvolumes en daarmee ook in aanpassingstijden. Daarnaast is het mogelijk dat processen die niet door ASMITA worden gemodelleerd en onzekerheden in de bepaling van de evenwichtsparameters, bijdragen aan de geobserveerde afwijkingen.

Dit toont aan dat ASMITA geschikt is om de systeemwerking te reproduceren en om de orde van grootte van de historische sedimentatie te benaderen. Zonder aanvullende informatie is het echter niet mogelijk om nauwkeurige schattingen te maken van het verloop van sedimentimport en sedimentatie in de tijd. Daardoor kan ook geen betrouwbare indicatie worden gegeven van welk deel van de huidige sedimentatie wordt veroorzaakt door de historische afsluiting en bedijking van de Middellzee.



Figuur 3-15 Rekenresultaten van de ontwikkeling van de Middellzee/ Amelanderzeegat vanaf 1200. In de bovenste drie panelen wordt de volumeontwikkeling van de platen, geulen en buitendelta gegeven in blauw. De gestreepte lijnen geven daarbij de evenwichtsvolumes weer. In groen is de volumeontwikkeling van het Amelanderzeegat volgens recente berekeningen weergegeven (Lodder et al, 2022, Huismans et al, 2022). In het vierde paneel wordt de ontwikkeling van het bekkenoppervlak getoond. Het bekkenoppervlak wordt opgelegd aan het model en volgt uit van der Spek (1994). Hoe de plaat- en geuloppervlaktes zijn bepaald is toegelicht in §3.2.2. In het onderste paneel worden de berekende sedimentatievolumes getoond en vergeleken met uit historische bronnen afgeleide getallen uit van de Spek (1994). Deze geven mogelijk enige onderschatting van de totale volumes, omdat niet alle bijdragen zijn gekwantificeerd. Ter referentie, voor het volledig meegroeien van de Waddenzee (~2000 km²) met 1 m zeespiegelstijging zou 2000 Mm³ sediment nodig zijn, qua orde grootte vergelijkbaar met de sedimentatie ten gevolge van bedijking en verlandings van de Middellzee over de afgelopen eeuwen.

4 Duiding van de resultaten

4.1 ASMITA-resultaten in relatie tot observaties in de Waddenzee

4.1.1 Ontwikkeling van het bekken over de afgelopen eeuwen

Over een tijdschaal van eeuwen is het Amelanderzeegat door herhaaldelijke bedijkingen en sedimentatie veranderd van een langgerekt bekken naar een breed en kort bekken. Daarbij is de oriëntatie van de hoofgeul veranderd en is met name het wantij onder Terschelling verplaatst (zie §2.2.1). Na elke afsluiting werd het bekken kleiner, trad verlanding op van platen en geulen en vond erosie plaats van de buitendelta en de eilandstaart en -kop. Dit patroon van versnelde sedimentatie op platen en in geulen na elke afsluiting, gecombineerd met erosie van de buitendelta, wordt goed gereproduceerd door ASMITA (zie §3.2.3).

Bij elke afsluiting neemt het bekkenoppervlak sterk af, waardoor ook het getijprisma aanzienlijk kleiner wordt. De geulen zijn daardoor te ruim voor de hoeveelheid water die per getij doorstroomt, wat leidt tot sedimentatie. Omdat bij afsluitingen vooral plaatoppervlak verdwijnt, raken de platen uit evenwicht en vindt ook hier sedimentatie plaats. Deze verhoogde sedimentvraag vanuit de platen en geulen veroorzaakt erosie van de buitendelta. Aanvankelijk verloopt de opvulling van het bekken snel (jaren-decennia), maar na verloop van tijd neemt de snelheid af (decennia-eeuwen).

Recente berekeningen vanaf 1970 laten minder sedimentatie zien dan berekeningen die de volledige historie van afsluitingen meenemen (1200 tot nu). Dit betekent dat de berekende morfologische toestand in 1970 niet overeenkomt met de gemeten begintoestand in de berekeningen vanaf 1970. Deze afwijking tussen metingen en berekeningen wordt waarschijnlijk veroorzaakt door een opeenstapeling van onzekerheden in historische data en berekeningen. In dat historische verloop doen zich telkens grote sprongen voor in de ontwikkeling van oppervlak en volume. Onzekerheden in deze sprongen kunnen zich cumulatief opstapelen, waardoor steeds grotere afwijkingen ontstaan in elementvolumes en daarmee ook in aanpassingstijden. Daarnaast spelen ontbrekende processen (zoals bijvoorbeeld het effect van de afsluiting Zuiderzee en andere ontwikkelingen in naastgelegen bekkens) een rol en wordt bijvoorbeeld aangenomen dat de getijslag en sedimentcompositie gelijk blijft.

Samengevat wordt het proces van versnelde sedimentatie na elke afsluiting, de bijbehorende responstijd van eeuwen en het verloop van de sedimentatie in het bekken over de afgelopen 800 jaar goed gereproduceerd. Het is aannemelijk dat *een deel van* de huidige sedimentatie nog steeds het gevolg is van historische afsluitingen, maar de exacte omvang daarvan is niet vast te stellen.

4.1.2 Ontwikkeling van het bekken over de afgelopen decennia

De ontwikkeling van het Amelanderzeegat over de afgelopen decennia wordt gekenmerkt door een verkleining van het bekken doordat het wantij onder Terschelling verplaatst (mogelijk nog in reactie op de afsluiting van de Zuiderzee) en sinds de jaren '80 de bekkengemiddelde sedimentatie groter is dan de zeespiegelstijging. Zoals blijkt uit de berekeningen van de afsluitingen van de Middellzee, is het goed denkbaar dat een deel van de huidige sedimentatie nog door deze historische afsluitingen wordt veroorzaakt, maar kan niet worden vastgesteld hoeveel dit is (§3.2.3).

Hoewel er ook gebieden zijn met erosie, vindt er in het merendeel van het bekken verlanding plaats (Elias & De Wilde 2026, Meijers 2026), met name in het sublitoraal (ondiepe geulen tussen -3 en -1 m NAP), maar ook op de kwelders en de wadplaten. De wadplaten zijn in hoogte vrijwel constant gebleven, maar in oppervlak toegenomen doordat laagwaterzones ondieper zijn worden. Vanwege de sedimentatie wordt in sommige geulen gebaggerd. Daarnaast is er sprake van een doorgaande verschuiving van het wantij, mogelijk beïnvloedt door afsluiting van de Zuiderzee. Tot slot is het getijprisma veranderd. Tussen de jaren '20 en '80 van de vorige eeuw nam deze eerst toe, mogelijk ook in reactie op afsluiting Zuiderzee, en is door de recente verlandingstrend afgenomen. Met ASMITA is onderzocht welk effect het baggerwerk, de verlanding en het verschuiven van het wantij hebben op de dynamiek van het hele bekken en of deze processen bepaalde trends kunnen versterken.

Volgens de berekeningen zorgt baggeren voor een extra sedimentvraag achter in het bekken en daarmee een extra sedimentimport en (enige) afname van het plaatvolume (§3.1.3). Wanneer het sediment wordt teruggestort (huidig beleid) zijn deze trends tijdelijk en bereiken de plaatvolumes en sedimentimport na lange tijd (meer dan een eeuw) weer hetzelfde niveau als zonder baggeren. Zonder terugstorten zijn deze veranderingen groter en permanent. De geulen veranderen in zowel de situatie met als zonder terugstorten permanent: met terugstorten worden ze gemiddeld ondieper, zonder terugstorten juist dieper.

Door kwelderuitbreiding en verschuiving van het wantij verkleint het bekken, wat leidt tot verlanding van zowel platen als geulen. De uitbreiding van kwelders gaat vooral ten koste van platen, waardoor hun volume afneemt en ze uit evenwicht raken. Om dit te herstellen vindt sedimentatie plaats op de resterende platen. Tegelijkertijd zorgt de kleinere bekkengrootte voor een afname van het getijprisma, waardoor stroomsnelheden in geulen dalen en ook daar sedimentatie optreedt. Wanneer vooral hoge platen verdwijnen, neemt het plaatvolume relatief sterk af, wat tijdelijk een grotere sedimentvraag veroorzaakt. Dit kan leiden tot enkele decennia erosie in de geulen, voordat voldoende sediment is aangevoerd en sedimentatie weer overheerst.

4.2 Duiding, aannames en modelkeuzes

Zowel de historische afsluiting van de Middellzee, het baggeren en storten in de vaargeul, als het verkleinen van het bekken door (natuurlijke) kweldergroei of verplaatsing van het wantij dragen waarschijnlijk bij aan de huidige trend van verlanding in het Amelandseegat. Het baggeren met terugstorten lijkt vooral de verlanding van geulen te bevorderen, terwijl platen hierdoor niet extra sedimenteren en mogelijk zelfs tijdelijk sediment verliezen. Vanwege de onzekerheden is niet vast te stellen welke bijdrage elk proces levert aan de verlanding.

Zonder ingrepen neemt verlanding uiteindelijk af en bereikt het systeem volgens de modelberekeningen een nieuw dynamisch evenwicht. In werkelijkheid kan kweldergroei het proces van verlanding blijven versterken. Dit proces zit momenteel niet in ASMITA, maar kan er in werkelijkheid voor zorgen dat hoge platen door groei van vegetatie en invangen van sediment verhogen, en uitgroeien tot kwelders en hierdoor het systeem op natuurlijke wijze weer verder doet verkleinen, met een kleiner getijprisma en nieuwe sedimentatie op de platen en in de geulen als gevolg. Ook wanneer het bekken herhaaldelijk wordt verkleind door menselijke ingrepen, zoals afsluitingen of stimulatie van kweldergroei, of door natuurlijke processen zoals verplaatsing van het wantij door ontwikkelingen elders in de Waddenzee, wordt de verlandingstrend telkens opnieuw versterkt.

Bij de berekeningen zijn verschillende modelkeuzes en aannames gemaakt. Hieronder lichten we enkele belangrijke keuzes toe. Een van de aannames is dat de getijslag constant blijft, terwijl deze in werkelijkheid kan veranderen door processen binnen en buiten het bekken. Op de lange termijn, zoals bij de verlanding van de Middellzee, is het aannemelijk dat de getijslag

sterk is veranderd door de gewijzigde bekkengeometrie en andere factoren, al ontbreken hiervoor gegevens. Recente ontwikkelingen hebben naar verwachting een veel kleiner effect. Het effect van baggeren en geulverlanding is waarschijnlijk zeer beperkt, terwijl processen zoals verschuiving van het wantij, kweldergroei en grootschalige Waddenzee-dynamiek een groter effect kunnen hebben. Met een gevoeligheidsanalyse kan worden onderzocht hoe een veranderende getijslag doorwerkt in sedimentatie en erosie van platen, geulen en buitendelta, en wat dit betekent voor de conclusies.

In de geïdealiseerde berekeningen van de verlanding van bekkens is gefocust op het effect van het verplaatsen van het wantij⁵ en de kweldergroei, waarbij met name plaatareaal verdwijnt. In werkelijkheid zal bij verlanding ook een deel van de geulen plaat worden. Voor de geïdealiseerde berekeningen van het baggereffect is de vaargeul nu verbonden aan de hoofdgeul. Hiermee wordt geen rekening gehouden met het effect dat deze vaargeul helemaal achter in het bekken ligt. Het effect hiervan kan worden gemodelleerd door de resolutie van de ASMITA-schematisatie te vergroten, door meer deelelementen voor de geulen en platen toe te voegen, of door met het ASMITA-hybridemodel berekeningen uit te voeren.

⁵ Verplaatsing van het wantij hoeft niet door verlanding te worden veroorzaakt, maar in deze studie is dit proces wel meegenomen. De wantijverplaatsing heeft het Ameland-bekken in het verleden namelijk verkleind, wat vergelijkbaar is met het effect van kweldergroei: het bekken wordt kleiner, vooral door afname van het plaatareaal.

5 Conclusies en aanbevelingen

In de huidige studie is met het ASMITA-model onderzoek gedaan naar toekomstige ontwikkeling van het bekken als gevolg van verlandingsprocessen en grootschalig baggeren in de vaargeul binnen de Waddenzee. Verlanding treedt op wanneer sedimentatie sneller gaat dan zeespiegelstijging, zoals historisch gebeurde in het Amelanderzeegat na de stapsgewijze bedijking en afsluiting van de Middellzee. Ook in recente decennia vindt bekkengemiddeld verlanding plaats, vooral door sedimentatie in het sublitoraal (ondiepe geulen), op platen en kwelders, waardoor kwelders uitbreiden. De meeste verlanding vindt daarbij plaats in het sublitoraal, waardoor de platen met name in oppervlak uitbreiden, en in hoogte nagenoeg stabiel blijven. Samen met de doorgaande verschuiving van het wantij onder Terschelling verkleint dit het bekken, wat invloed heeft op het getijprisma en de bekkendynamiek. Gezien de verwachting dat versnelde zeespiegelstijging in de toekomst juist tot verdrinking kan leiden, rijst de vraag hoe menselijke ingrepen en natuurlijke processen het systeem beïnvloeden, welke aanpassingstijden daarbij horen en wat dit betekent voor het beheer van de Waddenzee. Om dit te onderzoeken zijn berekeningen uitgevoerd met het ASMITA-model, dat de ontwikkeling van een getijbekken op een geaggregeerde ruimte- en tijdschaal beschrijft. Een eerste stap in dit onderzoek was na te gaan of verlandingsprocessen met ASMITA realistisch kunnen worden gesimuleerd. In dit hoofdstuk beantwoorden we deze onderzoeksvragen en sluiten af met aanbevelingen.

5.1 Conclusies

In hoeverre werken historische ingrepen, zoals bedijkingen en afsluitingen (Middellzee, Zuiderzee, Lauwerszee), nog door in de huidige dynamiek? Kunnen we een deel van de huidige veranderingen hieraan koppelen, en kan ASMITA deze processen reproduceren?

ASMITA kan de systeemwerking goed reproduceren. Het model laat zien dat na elke afsluiting de platen uit evenwicht raken en gaan sedimenteren. Door het kleiner worden van het bekken en de afname van het getijprisma nemen de stroomsnelheden in de geulen af, waardoor ook daar sedimentatie optreedt. Een groot deel van dit sediment is afkomstig uit de buitendelta, die na verloop van tijd steeds kleiner wordt. Ook de orde van grootte van de sedimentatie in het bekken wordt door ASMITA goed weergegeven.

Na elke afsluiting verloopt de aanpassing in de eerste decennia relatief snel, maar het duurt eeuwen voordat een nieuw dynamisch evenwicht is bereikt. De aanpassingstijd verschilt daarbij per afsluiting. Gezien de lange aanpassingstijd is het waarschijnlijk dat de historische afsluiting en bedijking van de Middellzee nog steeds doorwerken in de huidige dynamiek. Door grote onzekerheden in historische gegevens en modelbeperkingen is het echter niet mogelijk om de bijdrage van deze afsluitingen aan de huidige verlanding kwantitatief vast te stellen.

Wat is het effect van menselijke ingrepen en natuurlijke processen (zoals baggeren, verkleining van bekkens door verschuivende wantijen of verlanding van platen) op het dynamische evenwicht van het bekken, op de ontwikkeling van plaat-, geul- en buitendeltavolumes, en wat zijn de bijbehorende aanpassingstijden?

Volgens de resultaten van de ASMITA modellering ontstaat er een sedimentvang in het bekken door het baggeren in de vaargeul, waardoor de sedimentimport naar het bekken toeneemt. Wanneer het gebaggerde sediment elders in de geulen binnen het bekken wordt teruggestort, is de toename tijdelijk, en de niet-gebaggerde geulen worden hierdoor permanent bekkengemiddeld ondieper. Daarnaast nemen de platen en de buitendelta tijdelijk in volume licht af. Na meer dan een eeuw bereiken de sedimentimport en de plaat- en buitendeltavolumes weer

dezelfde waarden als zonder baggeren en storten. Baggeren met terugstorten draagt dus bij aan verlanding van de geulen volgens de ASMITA modelresultaten. Wanneer het sediment niet wordt teruggestort, neemt de sedimentimport naar het bekken permanent toe en nemen de platen en buitendelta permanent in volume af. Zonder terugstorten worden de niet-gebaggerde geulen dieper, in plaats van ondieper, zoals het geval is met terugstorten. Een nieuw dynamisch evenwicht wordt pas na meerdere eeuwen bereikt.

Wanneer het bekken kleiner wordt door verschuiving van het wantij en/of uitbreiding van de kwelders, verdwijnt een deel van de platen. Omdat de resterende platen uit evenwicht raken, vindt daar sedimentatie plaats om het evenwicht te herstellen. Door de verkleining van het bekken neemt het getijprisma af, waardoor sedimentatie in de geulen en erosie van de buitendelta optreden. De aanpassing verloopt in de eerste decennia snel, maar het duurt honderden jaren voordat een nieuw dynamisch evenwicht ontstaat. Verdwijning van vooral hoge platen vraagt tijdelijk om extra sedimentatie op de resterende platen, waardoor geulen eerst eroderen voordat ze na enkele tientallen jaren sedimenteren. Uiteindelijk maakt het voor de lange termijn niet uit of hoge of lage platen verdwijnen.

Zonder ingrepen neemt verlanding uiteindelijk af en bereikt het systeem een nieuw dynamisch evenwicht. Wanneer het bekken echter herhaaldelijk wordt verkleind door menselijke ingrepen, zoals afsluitingen of stimulatie van kweldergroei, of door natuurlijke processen zoals verplaatsing van het wantij, wordt deze verlandingstrend telkens opnieuw versterkt.

Op lange termijn kan een kleiner bekken beter meegroeien met zeespiegelstijging, omdat minder sediment nodig is en dit over een kleiner oppervlak wordt verdeeld. Daardoor neemt de kritische zeespiegelstijging toe. Tegelijkertijd verdwijnt bij verkleining ook plaatvolume, waardoor in de meeste scenario's het totale plaatvolume in een groot bekken groter blijft dan in een klein bekken, ondanks dat het grotere bekken minder goed kan meestijgen. Belangrijk is om op te merken dat er uiteraard binnen het bekken grote verschillen kunnen optreden in gebieden die makkelijker meegroeien dan andere gebieden.

Hoe kunnen deze inzichten worden toegepast in het beheer van de Waddenzee, zowel op korte als lange termijn?

Uit de berekeningen blijkt dat zowel de historische afsluiting van de Middellzee, het huidige bagger- en stortbeleid, als bekkenverkleining door kweldergroei en verschuiving van het wantij waarschijnlijk bijdragen aan de huidige verlandingstrend in het Amelandseegat. Als de huidige verlanding (deels) door deze processen wordt veroorzaakt, zal deze naar verwachting geleidelijk afnemen en met toenemende zeespiegelstijging op termijn omslaan naar verdrinking, waarbij met name de platen verder weg van de keel waarschijnlijk het meest gevoelig zijn. Hoe snel dit gebeurt, hangt af van de versnelling van de zeespiegelstijging. In de meeste scenario's zal de sedimentatie binnen enkele decennia naar verwachting onvoldoende zijn om de zeespiegelstijging bij te houden (Huismans et al., 2022).

Onderhoudsbaggeren in vaargeulen en havenbekkens vergroot de sedimentimport en beïnvloedt daarmee het kustonderhoud. Bij terugstorten (huidig beleid) is deze toename weliswaar tijdelijk, maar het duurt meer dan honderd jaar voordat de sedimentimport weer terugkeert naar het niveau zonder baggeren.

De extra sedimentimport komt vooral in de (niet gebaggerde delen van de) geulen terecht – waar ook wordt gestort – en nauwelijks op de platen. Hierdoor worden de geulen geleidelijk ondieper. Het onttrekken van baggerspecie kan de toekomstige baggerbehoefte wel iets verminderen, maar levert geen substantiële bijdrage. Daarom is onttrekking van gebaggerd sediment geen optie, ook vanwege de versnelling van de zeespiegelstijging in de toekomst. Het is wel zinvol om met modellen – en later eventueel met veldproeven – te onderzoeken of (gedeeltelijk) storten op de platen voordelen biedt: zowel om verdere verondieping van geulen te beperken als om, met het oog op de versnellende zeespiegelstijging, te verkennen of de

groei van platen op deze manier kan worden ondersteund. Niet alleen het ASMITA model, maar ook het hybride Delft3D-ASMITA model in ontwikkeling en het proces-gebaseerde Delft3D modellen dienen te worden gebruikt hiervoor.

Tot slot heeft het beheer van kwelders invloed op zowel het plaatvolume als de sedimentatie in de geulen. Dit biedt de beheerder aanvullende mogelijkheden om het systeem te sturen. Wanneer het doel is om het plaatareaal zo veel mogelijk te behouden en de sedimentatie in de geulen te beperken, is het wenselijk om verdere groei van de kwelders niet actief te stimuleren, of kweldergroei te beperken. Door Natura 2000-doelstellingen en andere beheerdoelen is dit echter geen stuurknop waaraan zonder meer kan worden gedraaid.

5.2 Aanbevelingen

In §5.1 zijn de inzichten voor beheer aan bod gekomen. Daarnaast biedt dit onderzoek nieuwe aanknopingspunten voor vervolgonderzoek, waaronder:

- **Baggeren en stortenbeleid:** Onderzoeken hoe het gebaggerde sediment optimaal kan worden teruggestort om beheerdoelen te bereiken. Het storten op de wadplaten is bijvoorbeeld in de huidige praktijk niet mogelijk vanwege de Natura 2000-regelgeving, maar er kan worden onderzocht of het wel gunstig kan zijn voor de behoud van ecologische waarden in de toekomst met versnelde ZSS. .
- **Bijdragen van processen inzichtelijk maken:** Recent zijn twee uitgebreide modellen en data-analyses uitgevoerd naar de ontwikkeling van het Amelandbekken (Elias & De Wilde, 2026; Meijers, 2026). Deze studies geven een goed beeld van de geobserveerde trends, maar bieden door de gelijktijdige werking van veel processen beperkt inzicht in de onderliggende terugkoppelingen. Met ASMITA kunnen deze processen afzonderlijk worden beschouwd, waardoor het effect van elk proces op de ontwikkeling van de geulen, platen en buitendelta inzichtelijk gemaakt kan worden. Door de observatiestudies en ASMITA-berekeningen te combineren, ontstaat meer inzicht in de relatieve bijdrage van de verschillende processen.
- **Effect verandering in getijslag:** In deze studie is de getijslag constant genomen, terwijl het aannemelijk is dat deze varieert over de tijd. Met ASMITA kan een gevoeligheidsanalyse worden uitgevoerd om het effect van een verandering in getijslag op de bekkenontwikkeling te onderzoeken. Bij de bedijking en verlanding van de Middellzee speelde daarnaast mee dat de getijslag niet overal in het langgerekte bekken gelijk zou zijn geweest en dat de HW en LW niet synchroon waren binnen het hele bekken. Het effect van beide op het getijprisma kan worden onderzocht met hydrodynamische modellering in Delft3D op basis van de historische geometrie.
- **Ruimtelijke variatie binnen het bekken:** Binnen de bekkens zijn er flinke verschillen in sedimentatie en erosiepatronen, bijvoorbeeld meer sedimentatie langs de vastelandskust dan aan de eilandkust. Door in ASMITA de bekkens op te delen in sub-bekken kan dit mogelijk gemodelleerd worden. Uit onderzoek blijkt dat modellering op het niveau van sub-bekken tot een bepaald verfijningsniveau betrouwbaar is. Bij verdere schaalverkleining gaan echter andere processen domineren, waardoor de evenwichtsformuleringen niet langer geldig zijn (Diepeveen, 2022). Ook het inzetten van het hybride Delft3D-ASMITA model kan worden aanbevolen om de modellering voor bijvoorbeeld het effecten van baggeren en storten te verbeteren.

Tot slot zijn er nog een aantal ideeën voor vervolgonderzoek die in samenwerking met de onderzoeksprogramma's WadSed en PaRCA kunnen worden opgepakt:

- **Invloed van slib:** De recente toevoeging van slib aan ASMITA maakt berekeningen met twee sedimentfracties mogelijk en vergroot daarmee de betrouwbaarheid van het model. Binnen WadSed wordt de zand-slibmodellering verder verbeterd en op meerdere bekkens toegepast om de effecten van slib op geul- en plaatverlanding, sedimentimport en het meegroeivermogen bij zeespiegelstijging beter te kunnen beoordelen.
- **Dynamische verandering in oppervlak:** Grote veranderingen in geul-, plaat- of bekkenoppervlak vragen om een modellering waarin deze oppervlaktes dynamisch worden berekend in plaats van vooraf opgelegd. Hiervoor moet ASMITA worden aangepast, omdat de huidige modelformuleringen hier niet in voorzien.
- **Kwelders:** Door zeespiegelstijging wordt de interactie tussen platen en kwelders steeds belangrijker. Binnen WadSed wordt voortgebouwd op een eerdere verkenning om kwelders beter in ASMITA te modelleren, inclusief verlanding van platen en erosie van kwelders.

Suppleties: Momenteel worden er af en toe suppleties uitgevoerd op de kop van de eilanden en op de buitendelta, om met name het kustfundament te onderhouden. Voor het laten meestijgen van de bekkens zelf (en met name de platen) is het naar verwachting effectiever om suppleties in de keel te plaatsen. Het effect van de verschillend type suppleties op de morfologische ontwikkeling van de bekkens en het dynamisch evenwicht kan met een combinatie van modellen onderzocht worden.

Referenties

- Diepeveen, S. (2022) Small scale equilibria in tidal basins - A data-analysis and case study in the Ameland Inlet. Master thesis TUDelft.
- Elias, E. (2025). Morfologische analyse Oostelijke Waddenzee. Een analyse van de kombergingen van het Ameland en Friesche Zeegat. Delft: Deltares Rapport 11210370-003.
- Elias, E., en De Wilde, T., 2026 Morfologische Analyse Centrale Waddenzee. Een verdiepende studie van het Ameland Zeegat.
- Huismans, Y., van der Spek, A., Lodder, Q., Zijlstra, R., Elias, E., & Wang, Z. B. (2022). Development of intertidal flats in the Dutch Wadden Sea in response to a rising sea level: Spatial differentiation and sensitivity to the rate of sea level rise. *Ocean & Coastal Management*, 216, 105969.
- Kragtwijk, N.G. (2001) 'Aggregated scale modelling of tidal inlets of the Wadden Sea', WL | Delft Hydraulics/Delft Cluster, Rapport Z2822/DC03.01.03a.
- Lodder, Q.J., Wang, Z.B., Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., de Looft, H., Townend, I.H., 2019a. Future response of the Wadden Sea tidal basins to relative sea-level rise: an aggregated modelling approach. *Water* 11 (10). <https://doi.org/10.3390/w11102198>.
- Lodder, Q., Huismans, Y., Elias, E., de Looft, H. & Wang, Z. B. (2022). Future sediment exchange between the Dutch Wadden Sea and North Sea Coast - Insights based on ASMITA modelling. *Ocean Coast. Manag.* 219, 106067.
- Meijers, C., 2026. Kombergingsrapportage Borndiep - Overzicht van informatie en kennis van het fysisch systeem. Deltares rapport, Versie 2026
- Van der Spek, A.J.F., 1994. Large-scale evolution of Holocene tidal basins in the Netherlands. Proefschrift, Universiteit Utrecht.
- Wang ZB, Elias EPL, van der Spek AJF, Lodder QJ., 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*. 2018;97(3):183-214. doi:10.1017/njg.2018.8

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