

## Memo

**Aan**

Karin van Thienen-Visser

**Datum**

21 maart 2024

**Contactpersoon**

Zheng Wang

**Doorkiesnummer**

+31(0)88 335 8202

**E-mail**

Zheng.Wang@deltares.nl

**Aantal pagina's**

1 van 6

**Onderwerp**

Het meegroeivermogen van het bekken van het Zeegat van het Vlie

**Inleiding**

Deze notitie is geschreven op verzoek van de Directie Transitie Diepe Ondergrond van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (MEZK), door Zheng Bing Wang, Ad van der Spek en Edwin Elias, als onderdeel van de programmasubsidie Deltares-EZK 2024.

*Ontwikkeling van getijbekkens*

De ontwikkeling van een getijbekken op een tijdschaal van jaren en langer is de uitkomst van de balans tussen de ruimte om sediment (zand en slib) in het bekken af te zetten (te beschouwen als een 'vraag' naar sediment), en de aanvoer van sediment van buitenaf. Bij een negatieve balans tussen 'vraag' en 'aanbod' neemt de gemiddelde diepte in het bekken toe, wat zich uit door het afnemen van de hoogte en omvang van wadplaten en kwelders. Bij een positieve balans neemt het sedimentvolume in het bekken toe, de gemiddelde diepte neemt af en de platen en kwelders breiden uit. Dit kan op de lange duur leiden tot verlanding<sup>1</sup> van het bekken.

*Meegroeivermogen*

Het *meegroeivermogen* van een getijbekken is een maat voor de grootte van de natuurlijke netto aanvoer van sediment. De netto aanvoer is het resultaat van sedimentaanvoer door de vloedstroom en sedimentafvoer door de ebstroom. De grootte van de aanvoer hangt af van de sedimentvoorraad in de brongebieden (zand in de kustzone, slib in de waterkolom) en de transportcapaciteit van de getijstrooming. Ieder getij brengt de vloedstroom sediment binnen door het zeegat. Hiervan wordt een deel afgezet op wadplaten en in kwelders en blijft achter, een ander deel wordt weer meegenomen door de ebstrooming. De hoeveelheid sediment die achterblijft hangt samen met de (verticale) ruimte om sediment af te zetten. Deze ruimte ontstaat door stijging van het gemiddeld zeeniveau en/of daling van de wadbodem en wordt *accommodatieruimte* genoemd. Een bekken met een groot meegroeivermogen kan veel sediment importeren als daarvoor de ruimte ontstaat. Het meegroeivermogen, de maximale toename van de dikte van het sedimentpakket, gemiddeld over het getijbekken, wordt uitgedrukt in mm per jaar.

*Gebruiksruimte*

Zolang de toename van de accommodatieruimte niet groter is dan het meegroeivermogen, kan de aanvoer van sediment het geomorfologische evenwicht herstellen. Als de accommodatieruimte sneller toeneemt dan de netto aanvoer van sediment, zal het geomorfologische evenwicht verstoord worden, waarbij de morfologie van met name wadplaten en kwelders gaat veranderen: ze nemen af in hoogte en/of ze worden kleiner in omvang. Daarnaast kan de verdeling van zand- en slibafzetting over het bekken veranderen.

---

<sup>1</sup> Verlanding houdt in dat door afzetting van sediment het kwelderareaal uitbreidt waardoor een steeds groter deel van het bekken niet meer onder water komt te staan bij hoogwater.

Het Hand-aan-de-Kraan principe voor regulering van de gas- en zoutwinning in de Waddenzee is op het hier beschreven evenwicht tussen vraag en aanbod van sediment gebaseerd. Na aftrek van de snelheid van de relatieve zeespiegelstijging (de optelsom van werkelijke zeespiegelstijging en natuurlijke daling van de bodem in mm per jaar) van het meegroeivermogen, blijft de maximaal door mijnbouwactiviteiten te veroorzaken extra bodemdaling over. Deze extra bodemdaling per jaar wordt de *gebruiksruimte* genoemd.

### Samenvatting eerdere beschouwing

In een eerder rapport (Wang & Van der Spek, 2021) zijn de definitie van het meegroeivermogen en de geldende waarden voor de verschillende kombergingsgebieden in de Waddenzee besproken. De waarden van het meegroeivermogen zijn ook vergeleken met de kritische ZSS snelheden voor verdrinking en met de waargenomen sedimentatiesnelheden. Tabel 1 geeft een overzicht van de waarden voor deze grootheden voor drie kombergingsgebieden, die respectievelijk als groot, middel en klein zijn gecategoriseerd (Oost e.a., 1998).

Tabel 1. Meegroeivermogen, kenmerkende ZSS snelheden gerelateerd aan verdrinking wadplaten en waargenomen sedimentatiesnelheid besproken in Wang en Van der Spek (2021).

Zeegat	Vlie	Pinkegat	Zoutkamperlaag.
Grootte	groot	klein	middel
Oost e.a., 1998	3 mm/j	6 mm/j	5 mm/j
Cleveringa & Grasmeijer, 2010	5 mm/j	Niet bepaald	Niet bepaald
Kritische snelheid verdrinking $R_c$ 50% kans verdrinking	6,3 mm/j	32,7 mm/j	17,1 mm/j
Gemeten sedimentatie-snelheid tussen 1935 en 2005	4,7 mm/j	6,7 mm/j	
Meegroeivermogen / $R_c$	0,79 (0,48)	0,18	0,29

Het meegroeivermogen is voor het eerst door Oost e.a. (1998) bepaald, waarbij de Waddenzeebekkens in drie categorieën zijn verdeeld: klein, middel en groot. Het bekken van het Zeegat van het Vlie (verder aan te duiden met 'het Vlie') hoort bij de grote bekkens waarvan het meegroeivermogen is bepaald op 3 mm/jr. Later tijdens de MER studie voor zoutwinning is deze waarde verhoogd naar 5 mm/jr (Cleveringa & Grasmeijer, 2010). Wang en Van der Spek (2021) hebben voorgesteld het meegroeivermogen te relateren aan de kritische ZSS snelheid, waarbij de verhouding tussen deze twee afhankelijk is van de morfologische status van het zeegatsysteem. Voor het Vlie geldt dat deze verhouding dicht bij 1 mag liggen. Voor de nu gehanteerde waarde van het meegroeivermogen is de verhouding gelijk aan 0,79 (zie Tabel 1; voor de waarde volgens Oost e.a., 1998, is de verhouding 0,48). Wang en Van der Spek concludeerden dat de gehanteerde waarde van 5 mm/jr onder de kritische ZSS snelheid voor verdrinking (6.3 mm/j) blijft en daarmee conservatief (veilig) is.

### Nadere beschouwing kritische ZSS snelheid voor verdrinking

De kritische ZSS snelheid voor verdrinking van de wadplaten in een zeegatsysteem is bepaald met het 3-elementen ASMITA model (Van Goor e.a., 2003; Kragtwijk e.a., 2004; Bijsterbosch, 2003; Hinkel e.a., 2013):

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

Hierin:

<b><math>R_c</math></b>	=	<b>Kritische snelheid van ZSS</b>
$C_E$	=	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
$\delta_{od}$	=	Horizontale uitwisselingscoëfficiënt tussen buitenwereld en buitendelta
$\delta_{dc}$	=	Horizontale uitwisselingscoëfficiënt tussen buitendelta en geul
$\delta_{cf}$	=	Horizontale uitwisselingscoëfficiënt tussen geul en plaat

Voor elk van de zeegaten in de Nederlandse Waddenzee is een ASMITA-model opgesteld. Op basis van de toen (2018) "up-to-date" parameterinstellingen zijn de kritische snelheden van ZSS voor deze zeegatsystemen berekend door Wang e.a. (2018), zie Tabel 2.

Tabel 2. Parameterinstellingen van de ASMITA modellen voor de zeegatsystemen in de Nederlandse Waddenzee en de berekende kritische ZSS snelheid voor verdrinking  $R_c$  (Wang e.a., 2018).

Bekken	Marsdiep	Eierlandse Gat	Vlie	Amelander Zeegat	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 <sup>2</sup> )	133	105	328	178	38.1	65
$S_c$ (km <sup>2</sup> )	522	52.7	387	98.3	11.5	40
$S_d$ (km <sup>2</sup> )	92.53	37.8	106	74.7	34	78
$\delta_{od}$ (m <sup>3</sup> /s)	1550	1500	1770	1500	1060	1060
$\delta_{dc}$ (m <sup>3</sup> /s)	2450	1500	2560	1500	1290	1290
$\delta_{cf}$ (m <sup>3</sup> /s)	980	1000	1300	1000	840	840
<b><math>R_c</math> (mm/jr)</b>	<b>7,0</b>	<b>18,0</b>	<b>6,3</b>	<b>10,4</b>	<b>32,7</b>	<b>17,1</b>

De formulering (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 bepaald rondom de eeuwwisseling (Van Goor e.a., 2003; Kragtwijk e.a., 2004), en vooral gebaseerd op de kalibratie van het model voor één van de zeegaten, Zoutkamperlaag, aan de hand van de ontwikkelingen na de afsluiting van de Lauwerszee. Voor de andere zeegatsystemen was 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 Zoutkamperlaag als referentie. Met de verbeterde modelparameters kunnen de kritische ZSS snelheden voor verdrinking voor de verschillende bekken beter worden geschat.

De globale evenwichtsconcentratie van sediment  $C_E$  is gerelateerd aan sedimentaanbod van buiten het systeem, die afhangt van de sedimenteigenschappen en het golfklimaat. De verticale uitwisselingscoëfficiënt  $w_s$  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:

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

waarbij:

$\delta$	=	<b>horizontale uitwisselingscoëfficiënt</b>
$D$	=	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:

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

waarbij  $u$  is stroomsnelheid die de sterkte van de getijstrooming weergeeft en  $h$  is waterdiepte. Voor de uitwisselingscoëfficiënt tussen geulen en platen  $\delta_{cf}$  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  $S_b=S_r+S_c$ ;  $L$  is ongeveer gelijk voor alle zeegatsystemen; dus

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

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

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

De uitwisselingscoëfficiënt tussen buitenwereld en buitendelta  $\delta_{od}$  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 van 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  $\delta_{od}$  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.

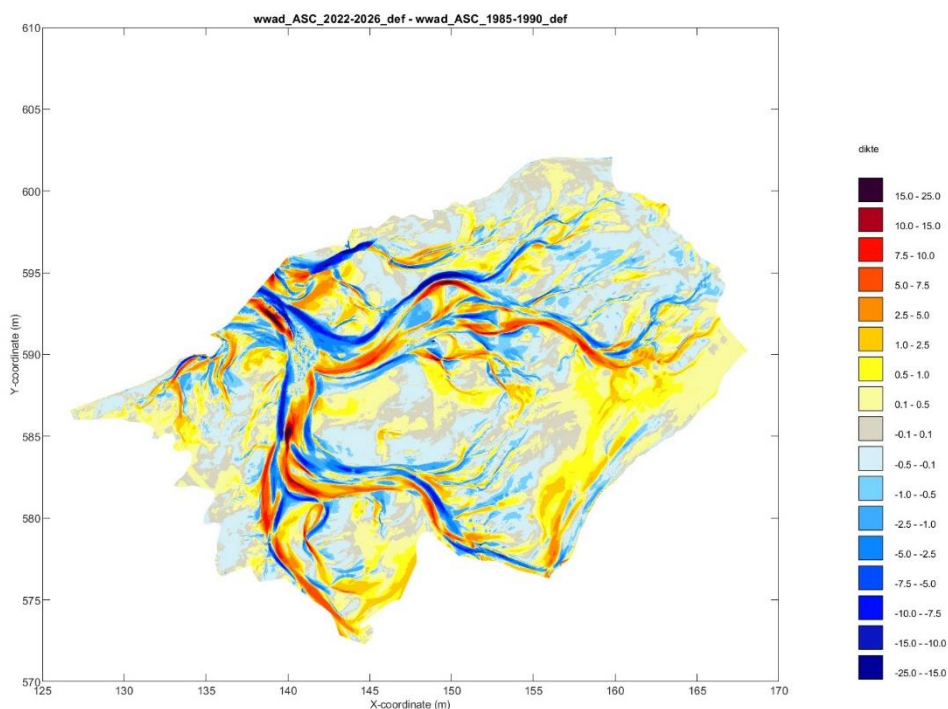
Na de aanpassing geldt nog steeds dat de kritische ZSS snelheid voor verdrinking kleiner is voor grotere bekkens, maar de mate van gevoeligheid voor de bekkengrootte is minder geworden (zie Tabel 3). Voor het Vlie is de nieuwe berekende kritische ZSS snelheid groter geworden, van 6,3 naar 8,8 mm/jr.

Tabel 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).

Bekken	Marsdiep	Eierlandse Gat	Vlie	Amelander Zeegat	Pinkegat	Zoutkamperlaag
$\delta_{dc}$ (m <sup>3</sup> /s)	7317	1762	7987	3087	673	1290
$\delta_{cf}$ (m <sup>3</sup> /s)	2001	982	2090	1299	607	840
$R_c$ (mm/jr)	<b>9,7</b>	<b>18,7</b>	<b>8,8</b>	<b>13,4</b>	<b>25,6</b>	<b>17,1</b>

### Update veldwaarnemingen

De bodemligging in de Waddenzee wordt iedere 6 jaar gemeten, en de gegevens worden verwerkt in de Vaklodingen. Met deze gegevens kunnen de bodemveranderingen worden vastgesteld (Figuur 1), en daarmee ook de ontwikkeling van het sedimentvolume in een bekken, zie Tabel 4 voor het Vlie. Aanvulling van de meetreeks voor het Vlie met de meest recente bodem van 2022 laat geen verandering in de ontwikkelingstrend zien, en geeft dus geen aanleiding om het meegroeivermogen aan te passen.



Figuur 1. Sedimentatie (+) en erosie (-) in het bekken van het Vlie in de periode 1988-2022.

Tabel 4. Recente ontwikkelingen sedimentvolume in het bekken van het Vlie ten opzichte van 1988.

Jaar	Volumeverandering (miljoen m <sup>3</sup> )	Gemiddelde hoogteverandering (m)
1988	0	0
1992	23	0,04
1998	53	0,08
2004	16	0,03
2010	46	0,07
2016	49	0,08
2022	61	0,09

## Conclusies

Het meegroeivermogen voor het Waddenzeebekken Vlie, zoals gehanteerd bij het Hand-aan-de-Kraan principe bij mijnbouwactiviteiten, is opnieuw beschouwd aan de hand van meest up-to-date veldwaarnemingen en de geaggregeerde modellering voor lange-termijn morfologische ontwikkelingen met ASMITA. De beschouwing bevestigt de eerdere conclusie dat de gehanteerde waarde (5 mm/jr voor Vlie) conservatief (laag gekozen) is (Wang & Van der Spek, 2021). De kritische ZSS snelheid voor verdrinking van wadplaten, die kan worden gerelateerd aan het meegroeivermogen, is uitgaande van deze analyse voor het Vlie aangepast van 6,3 naar 8,8 mm/jr. Dit betekent dat de nu gehanteerde waarde voor het meegroeivermogen in dit bekken nog veiliger is dan eerder werd gedacht. Ook voor de andere zeegaten (behalve Zoutkamperlaag) is de kritische ZSS snelheid voor verdrinking aangepast. De aangepaste waarden kunnen, samen met de nieuwste sedimentatie-erosie gegevens, worden gebruikt voor een nieuwe beschouwing van het meegroeivermogen van de bekkens in de Waddenzee.

## Referenties

- Bijsterbosch, L.W.W., 2003. Influence of relative sea level rise on tidal inlets. MSc. Thesis. Delft Hydraulics & Delft University of Technology.
- Cleveringa, J. & Grasmeijer, B., 2010. Meegroeivermogen en gebruiksruimte in de getijbekkens Vlie en Marsdiep; Grootschalige morfologische ontwikkelingen westelijke Waddenzee. Arcadis rapport A2062R3r5.
- 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)
- 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.
- 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., 1998. *Integrale bodemdalingstudie Waddenzee*. Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., Assen. 372 pp.
- 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.
- 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. (eds): *River, coastal and estuarine morphodynamics*, RCEM 2007. Taylor & Francis (London): 103–111.
- 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., 2021. Meegroeivermogen en kritische zeespiegelstijgingsnelheid voor verdrinking in de Nederlandse Waddenzee. Deltares rapport 11206346-002-BGS-0002.