

Rekenmethodiek areaalontwikkeling Waddenzee

t.b.v. Digitale Systeemrapportage (DSR)



Rekenmethodiek areaalontwikkeling Waddenzee
t.b.v. Digitale Systeemrapportage (DSR)

Auteur(s)

Carlijn Meijers
Jasper Dijkstra
Lodewijk de Vet
Luka Jaksic
Ellen Quataert

Rekenmethodiek areaalontwikkeling Waddenzee

t.b.v. Digitale Systeemrapportage (DSR)

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Martijn Klein Obbink
Projectreferenties	Referenties
Trefwoorden	Trefwoorden

Documentgegevens

Versie	1.1
Datum	12-12-2025
Projectnummer	11211571-002
Document ID	11211571-002-ZKS-0001
Pagina's	55
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)

	Carlijn Meijers Jasper Dijkstra Lodewijk de Vet Luka Jaksic Ellen Quataert	

Samenvatting

Een belangrijke indicator om de morfologische ontwikkeling van de Waddenzee te duiden is de ontwikkeling van zogenoemde 'arealen', het oppervlak van een bepaalde diepteklasse, zoals bijvoorbeeld geulen en intergetijdegebieden. De oppervlakteverandering van de verschillende arealen over de tijd geeft waardevolle informatie over de ontwikkeling van het bekken, trends in morfologische en ecologische functies en de bevaarbaarheid. Informatie over de ontwikkeling van deze arealen is onder anderen te vinden in de Digitale Systeem Rapportage (DSR) van de Wadden.

Deze diepteklassen worden in verschillende studies op verschillende wijze begrensd. Afhankelijk van de toepassing en de informatie waarnaar gezocht wordt kunnen verschillende begrenzingen zinvol zijn. In dit rapport worden verschillende mogelijke methoden beschreven en is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om de effecten van de verschillende methodieken in beeld te krijgen.

Hieruit volgen de volgende aanbevelingen voor areaalbegrenzing voor morfologische toepassingen (langjarige, trendmatige ontwikkelingen) in de Waddenzee:

- **Afbakening van het intergetijdegebied op basis van gebiedsdekkende kaarten van Gemiddeld Hoogwater (GHW) en Gemiddeld Laagwater (GLW) in de Waddenzee.** Deze kaarten kunnen worden bepaald door ruimtelijke interpolatie van gemeten waterstanden of modelsimulaties. In veel studies werd tot op heden NAP +/- 1 m gebruikt als proxy voor GHW en GLW. Omdat GHW en GLW over de Waddenzee variëren van + 0,6/ -0,8 m bij Den Helder tot + 1,2/ -1,4 m bij Eemshaven wordt het oppervlak intergetijdegebied met vaste (+/- 1 m) grenzen in de meest westelijke bekkens tot 40% overschat en in de meest oostelijke bekkens tot 20% onderschat.
- **Het baseren van de GHW en GLW kaarten op een lange-termijn (19 jaar) lopend gemiddelde.** Het gemiddeld hoog- en laagwater is niet constant maar kan van jaar tot jaar sterk (~10 cm) verschillen. Omdat ieder bekken in de Waddenzee elke 6 jaar wordt ingemeten kunnen trends in arealen enkel op de schaal van decennia beschouwd worden (er is slechts 1x per 6 jaar een datapunt beschikbaar). Het berekenen van arealen op basis van jaarlijkse waterstanden geeft dus enkel een beeld van variaties in waterstand en niet van daadwerkelijke morfologische veranderingen. Voor morfologische toepassingen is het belangrijk om de lange-termijn trends in waterstanden te vangen. Hiervoor is het wenselijk dat langjarige ontwikkelingen in GHW en GLW, als gevolg van bijvoorbeeld zeespiegelstijging en veranderende getijslag binnen een bekken, worden meegenomen. Om te voorkomen dat jaar-op-jaarvariaties in waterstanden (zoals overheersende windrichting of meerjarige getijcomponenten) de trend domineren wordt het gebruik van een lopend gemiddelde over meerdere jaren aanbevolen. Om effecten van de nodale cyclus met een periode van 18,9 jaar uit te filteren wordt hierbij gemiddeld over een periode van 19 jaar.
- **Voor de horizontale begrenzing heeft het werken met veranderende wantijen, die recht doen aan migratie, de voorkeur als standaardoptie.** Voor sommige gebruikersvragen kan een vaste begrenzing echter relevant zijn om morfologische ontwikkelingen te kunnen isoleren en los van wantijmigratie te beschouwen.

Het streven is om de methodiek die in deze studie is ontwikkeld consistent toe te passen als nieuwe standaardmethode in morfologische studies. Door een eenduidige methodiek in alle studies te gebruiken wordt het eenvoudiger om trends uit verschillende studies met elkaar te vergelijken.

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de gebruikte methode een sterke invloed heeft op de gevonden oppervlakten en trends: oppervlakten kunnen tot 40% verschillen (bv. intergetijdegebied Marsdiep afgebakend met NAP +/- 1 m vergeleken met ruimtelijk GHW/GLW) en trends kunnen omslaan van een toe- naar een afname bij gebruik van een andere methode (bv. bij gebruik jaarlijks variërende GHW/GLW versus een vast (arbitrair gekozen) jaar in het Marsdiep). Voor alle toepassingen waarbij arealen worden gedefinieerd is het daarom essentieel om een goed inzicht te krijgen in de impact van de gekozen methodiek op de resultaten. Het is belangrijk de invloed van de gekozen methode in het achterhoofd te houden bij de interpretatie van resultaten uit verschillende studies.

Inhoud

	Samenvatting	4
	Inhoud	6
1	Inleiding	8
1.1	Aanleiding	8
1.2	Doel en afbakening	9
1.3	Leeswijzer	10
2	Achtergrond en methodologische opties	11
2.1	Horizontale afbakening	11
2.1.1	Gevoeligheidsanalyse	12
2.2	Verticale afbakening – ruimtelijke differentiatie	14
2.2.1	Methoden voor de bepaling van een ruimtelijk variërend GHW en GLW	15
2.2.2	Gevoeligheidsanalyse	17
2.3	Verticale afbakening - temporeel	18
2.3.1	Gevoeligheidsanalyse	20
2.4	Verschillende gebruikers, verschillende behoeften	21
2.5	Samenvattend: Aanbevelingen t.b.v. morfologische studies	23
3	Methode	25
3.1	Bathymetrie	25
3.2	Voorbewerken waterstanden	26
4	Resultaten	29
5	Conclusies en aanbevelingen	32
	Referenties	34
A	Ruimtelijke interpolatie GHW en GLW	36
A.1	Ruimtelijke interpolatie	36
A.2	Correctie Nieuw Statenzijl	37
A.3	Vergelijking InterTides	38
B	Methode D-Flow FM kaartlagen	41
B.1	Methodebeschrijving	41
B.2	Vergelijking InterTides	43
C	Begrenzing bekkens	44
D	Notities expertdiscussie Morfologische Indicatoren Waddenzee	52

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De Digitale Systeem Rapportage (DSR) van de Wadden¹ is een naslagwerk dat voorziet in de informatiebehoefte van beheerders, gebruikers en onderzoekers van de Waddenzee. Hier worden de belangrijkste indicatoren gepresenteerd die de staat en ontwikkeling van het natuurlijke en abiotische systeem beschrijven. Onderdeel van de DSR is een overzicht van de morfologie van de Waddenzee².

Een belangrijke morfologische indicator is de ontwikkeling van zogenoemde 'arealen', het oppervlak van een bepaalde diepteklasse, zoals bijvoorbeeld geulen of intergetijdegebied. De oppervlakteverandering van de verschillende arealen geeft waardevolle informatie over de ontwikkeling van het bekken, trends in morfologische en ecologische functies en de bevaarbaarheid.

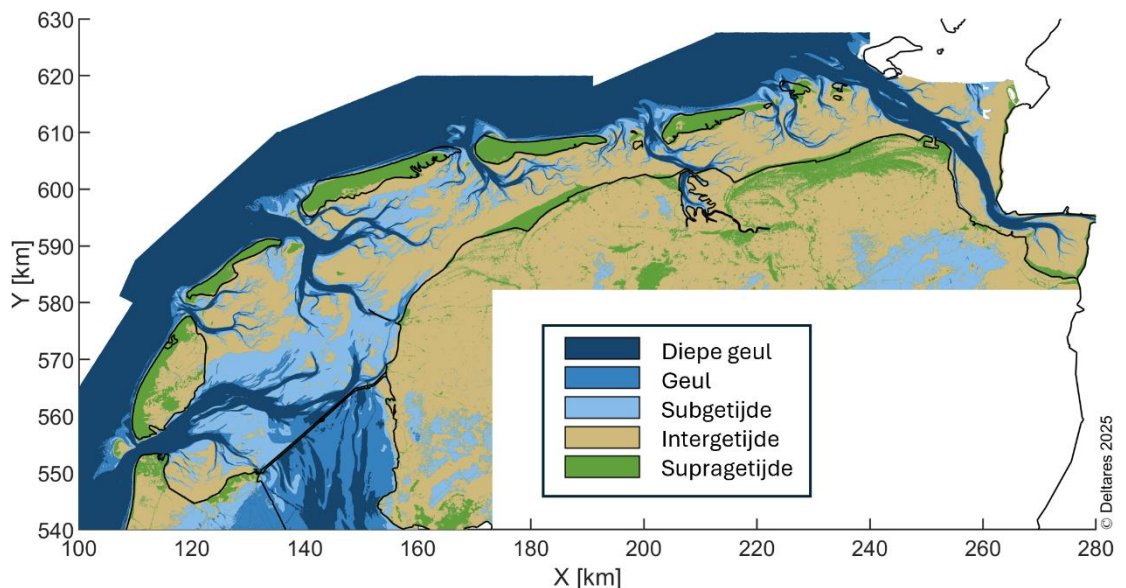
In de DSR worden de volgende diepteklassen onderscheiden (Figuur 1.1):

- Het supragetijdegebied is het gebied dat boven hoogwater ligt en overstroomt alleen tijdens springtij en/of stormopzet en biedt kansen voor vegetatiegroei (kwelder of duin).
- Het intergetijdegebied valt tweemaal dagelijks droog en is een belangrijk leefgebied voor macrofauna en foerageergebied voor vogels. De hoogte en omvang van het intergetijdegebied wordt bepaald door een complex samenspel van getij, golfwerking en biologische activiteit en is een belangrijke indicator voor het getijdevolume van een gebied.
- Het subgetijdegebied ligt onder normale omstandigheden onder water en kent door de geringe diepte beperkte stroomsnelheden waardoor het een relatief rustig gebied is.
- Geulen: kleinere geulen (dieper dan NAP -3 m) zorgen voor de verbinding tussen hoofdgeulen en ondiepere gebieden.
- Diepe geulen (dieper dan NAP -5 m) met hoge stroomsnelheden en sedimenttransporten. Deze hoofdgeulen vormen de verbinding met de Noordzee. Het geuloppervlak is indicatief voor de transportcapaciteit van het systeem.

De keuze voor een begrenzing om deze diepteklassen te definiëren is niet triviaal. In voorgaande morfologische studies (o.a. kombergingsrapportages, knelpuntanalyses, ecotopenkartering, academische literatuur en de DSR) is geen eenduidige standaard gevolgd. De keuze voor een bepaalde begrenzing kan echter invloed hebben op de waargenomen trend. Het is daarom belangrijk om een goed beeld te hebben van de gevoeligheid voor de keuze van begrenzing op de resultaten om deze goed te kunnen interpreteren.

¹ <https://systeemrapportage.nl/wadden/index.html>

² <https://systeemrapportage.nl/wadden/morfologie.html>



Figuur 1.1 Arealen in de Waddenzee. Op basis van de bodemkaart samengesteld door Elias (2024) van de 6^{de} vaklodingscyclus (2015 – 2020).

1.2 Doel en afbakening

In een expertdiscussie tussen o.a. Rijkswaterstaat en Deltares (d.d. 20 maart 2024; zie Bijlage D) is geconcludeerd dat nadere analyses nodig zijn om te komen tot een onderbouwde en eenduidige methodologie voor de areaalberekening van de DSR en idealiter ook voor toekomstige morfologische studies in de Waddenzee.

De keuze voor een begrenzing hangt sterk af van de informatie waarnaar gezocht wordt. Voor verschillende toepassingen kunnen andere begrenzingen zinvol zijn. In morfologische studies is het belangrijk om inzicht te verkrijgen in de morfologische ontwikkeling op een langere tijdschaal. Voor ecologische of nautische toepassingen kan het waardevol zijn om ook de onderliggende jaarlijkse variatie te beschouwen. Hierbij moet de kanttekening geplaatst worden dat de Waddenzeebodems slechts 1x in de 6 jaar ingemeten worden (zie Sectie 3.1 voor een overzicht van de bemeten jaren voor elk bekken). Voor analyses met een hogere frequentie dan 6 jaar kan geen rekening gehouden worden met veranderingen in bodemhoogte waardoor de resultaten bepaald worden door waterstandsfluctuaties).

Doel van dit rapport is (1) duiden welke methodologische keuzes in de areaalberekening gemaakt worden, (2) de gevoeligheid van de areaalberekening voor methodologische alternatieven in kaart brengen, en (3) een aanbeveling voor een voorkeursmethodologie in de toekomstige areaalberekeningen om tot een eenduidige aanpak te komen. Hierbij wordt de focus gelegd op morfologische toepassingen, waarvoor het van belang is om systeemveranderingen op lange termijn (decennia) te beschouwen. Korte termijn fluctuaties kunnen daarnaast maar beperkt beschouwd worden door de meetfrequentie van de vaklodingen. Daarnaast kunnen voor specifieke doeleinden aanvullende overwegingen sturend zijn om een andere methode te kiezen, bijvoorbeeld om de complexiteit van de resultaten te beperken.

1.3 Leeswijzer

Dit rapport begint met een overzicht van de verschillende mogelijke methoden om de diepteklassen af te bakenen in **Hoofdstuk 2**. Hierin wordt beschreven wat de implicaties van de verschillende methoden zijn en een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd: hoe groot is het effect van de keuze voor een bepaalde methode op de berekende arealen en trends? Op basis van deze gevoeligheidsanalyse en een analyse van gebruikersbehoeften (2.4) komt een advies tot stand voor de berekening van arealen in de DSR en overige morfologische studies (2.5).

Hoofdstuk 3 beschrijft vervolgens de gebruikte methode waarmee de arealen op de DSR zijn berekend, zodat deze aanpak in andere studies kan worden gereproduceerd. Tot slot worden de resultaten (berekende arealen en trends) beschreven in **Hoofdstuk 4**.

2 Achtergrond en methodologische opties

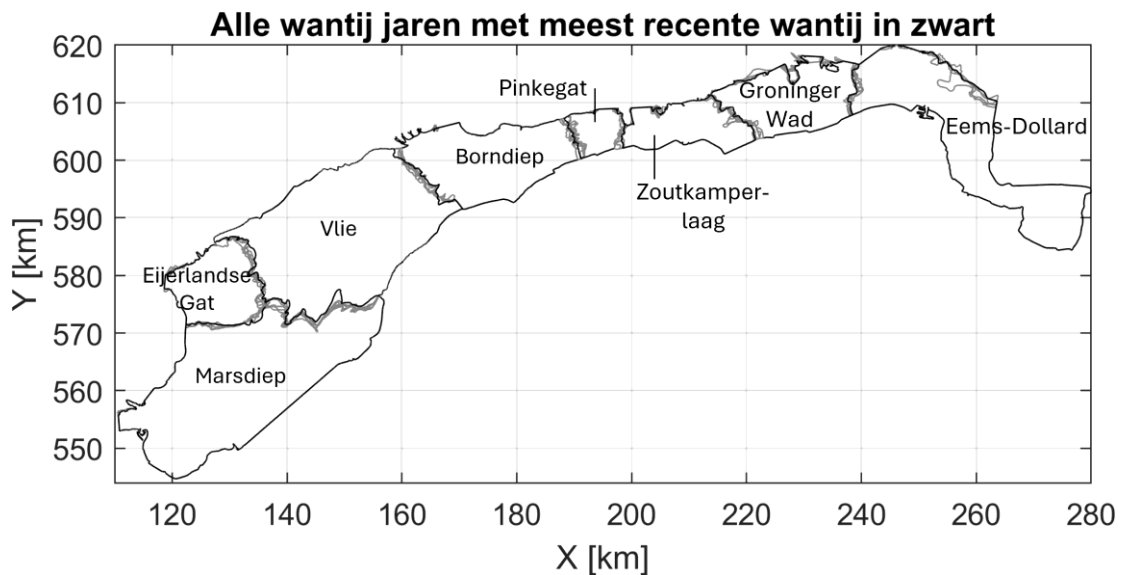
De keuzes die gemaakt worden in het afbakenen van diepteklassen en bekkens, en de tijdsperiode waarover geëvalueerd wordt, kunnen een substantiële invloed hebben op de berekende arealen en trends. Afhankelijk van de gemaakte keuzes kunnen de arealen verschillende informatie en inzichten geven. Dit hoofdstuk beschrijft de verschillende opties en afwegingen (§2.1 t/m 2.3) die hierin kunnen worden gemaakt, en laat middels een gevoeligheidsanalyse voor het intergetijdgebied zien hoe substantieel de verschillen in resultaten zijn. Paragraaf 2.4 geeft een beschouwing van de relevantie van de verschillende begrenzingen voor verschillende gebruikerstoepassingen, zoals ecologie, morfologie en nautiek. Op basis van deze afwegingen en de gevoeligheidsanalyses wordt tot slot in §2.5 een aanbeveling gedaan voor een methodologie voor morfologische toepassingen.

2.1 Horizontale afbakening

Arealen kunnen berekend worden voor gebieden van verschillende groottes, bijvoorbeeld voor de volledige Waddenzee of per kombergingsgebied. In de praktijk worden op de DSR en in veel morfologische studies arealen meestal berekend per kombergingsgebied om de ontwikkeling van de verschillende kombergingsgebieden te kunnen duiden. Veel bekkens in de Waddenzee kennen hun eigen karakteristieke ontwikkeling en trends, ingegeven door een combinatie van de geometrie en diepteligging van het bekken en de reactie op ingrepen in het verleden. In de bekkens direct naast de afsluitdijk (Marsdiep en Vlie) was bijvoorbeeld een veel sterkere respons op de afsluiting van de Zuiderzee zichtbaar vergeleken met de meer oostelijk gelegen bekkens.

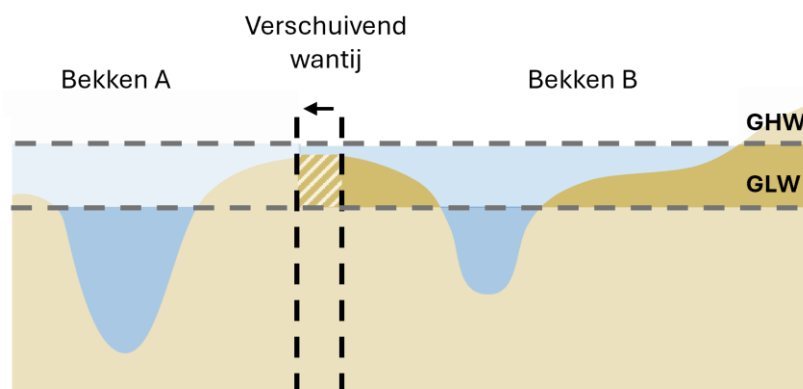
De grenzen van een kombergingsgebied kunnen in de tijd verschuiven, bijvoorbeeld door het verplaatsen van wantijen³ of veranderingen in de kustligging (Figuur 2.1). Bij het berekenen van arealen binnen een kombergingsgebied moet de keuze worden gemaakt of het kombergingsgebied wordt afgebakend aan de hand van vaste grenzen, of dat de feitelijke bewegende grenzen gevolgd worden (Figuur 2.2).

³ In dit rapport wordt met 'wantij' het morfologische wantij bedoeld; gedefinieerd als het ondiepste gebied tussen twee kombergingsgebieden, meestal niet doorsneden door geulen. Het morfologische wantij kan worden afgeleid aan de hand van de bodemligging zoals wordt beschreven in Elias (2025) en Wagenaar (2024).



Figuur 2.1 Overzicht van de kombergingsgebieden in de Waddenzee, begrensd door wantijen, die bewegen in de tijd. De historische wantijen zijn in grijs weergegeven met het meest recente wantij in zwart.

Beide methoden geven een ander inzicht. Een variabele begrenzing, die recht doet aan de migratie van wantijen en daarmee het veranderende (lokale) kombergingsvolume wat bepalend is voor de morfologische ontwikkeling, toont voor ieder jaar het areaal dat in dat jaar feitelijk tot het bekken behoorde. Een vaste begrenzing is in staat de morfologische verandering te isoleren, omdat eventuele veranderingen in arealen puur veroorzaakt worden door veranderingen in hoogteligging en niet door verschuivende wantijgrenzen. Het combineren van een vast en veranderend wantij kan inzicht geven in welke veranderingen veroorzaakt zijn door bodemhoogteverandering en welke het gevolg zijn van wantijmigratie.



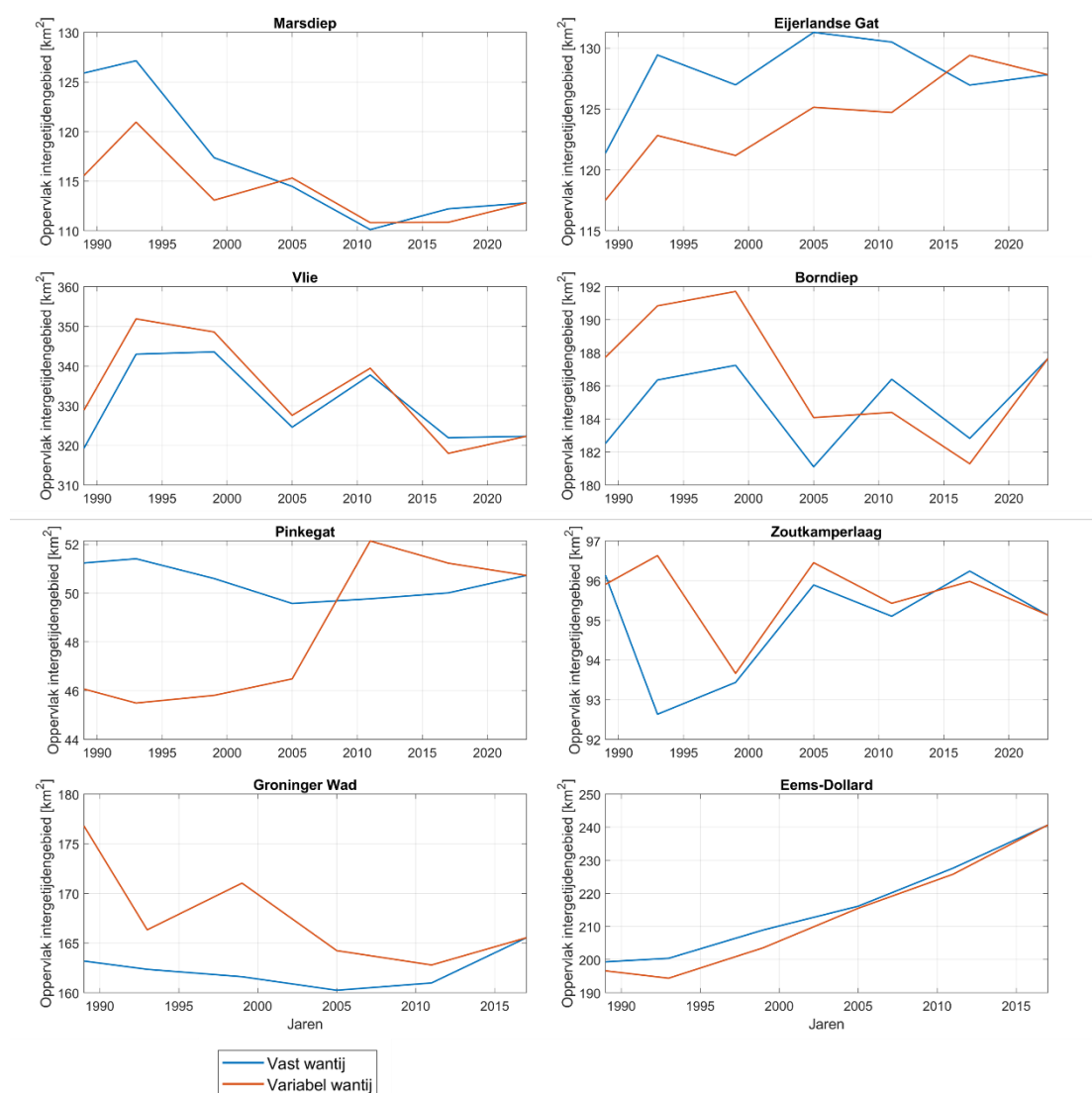
Figuur 2.2 Schematische illustratie van de invloed van een verschuivend wantij op het areaal intergetijdegebied voor twee aangrenzende bekken. Het intergetijdegebied in bekken B, dat zich bevindt tussen hoog- en laagwater (grijze gestreepte lijnen) is gehighlight. Het wantij (zwarte gestreepte lijn) migreert richting bekken A. Het gearceerde deel van het intergetijdegebied hoorde eerst bij bekken A en nu bij bekken B; het areaal intergetijdegebied in bekken B neemt dus toe ten koste van bekken A.

2.1.1 Gevoeligheidsanalyse

De gevoeligheid van de (trends in) areaalontwikkeling voor de keuze van een vaste of variërende horizontale begrenzing is in beeld gebracht voor het intergetijdegebied in Figuur 2.3. Omdat de wantijen zich meestal in hoger gelegen delen van het bekken bevinden is het intergetijdegebied het meest gevoelig voor de wantijligging.

De belangrijkste bevinding is dat voor veel bekkens de trend in intergetijdegebieds-ontwikkeling in grote lijnen gelijk op gaat met beide methodes, met name de bekkens waar een sterke trend zichtbaar is. In de bekkens waar een minder sterke trend zichtbaar is kan de keuze tussen een vast of variabel wantij het verschil maken tussen een netto toe- of afname van intergetijdegebied tussen 1989 en 2023, ondanks dat het gedrag in grote lijnen vergelijkbaar is (bijvoorbeeld Vlie of Borndiep). Dit gaat echter om zeer kleine verschillen in de ordegrootte van enkele procentpunten.

In enkele, veelal iets kleinere bekkens (bijvoorbeeld Pinkegat en Groninger Wad), heeft een verschuiving in de wantijen plaatsgevonden die de trend in het intergetijdegebied substantieel beïnvloedt. Absolute verschillen in intergetijdegebied berekend op basis van vaste versus variabele wantijen lopen op van enkele procenten tot in het uiterste geval 10% voor het Pinkegat in 1989.



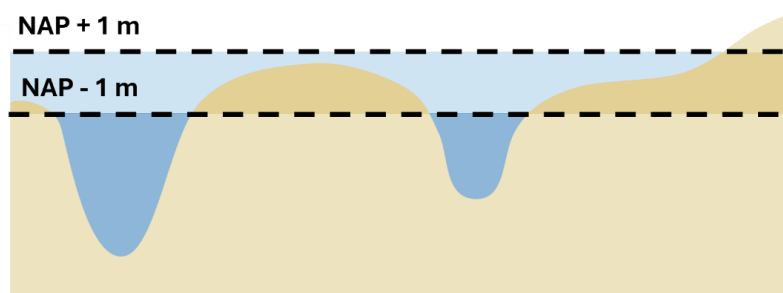
Figuur 2.3 Gevoeligheid van het berekende oppervlak intergetijdegebied voor de ruimtelijke begrenzing van de bekkens. De blauwe lijn geeft de bekkens begrensd met een vast wantij (meest recente jaar) en de rode lijn voor ieder jaar een wantij afgeleid voor de betreffende bodem. Het intergetijdegebied tussen hoog- en laagwater is ruimtelijk en temporeel begrensd met de methode die wordt aanbevolen in §2.5 en in de komende paragrafen wordt uitgelegd.

2.2 Verticale afbakening – ruimtelijke differentiatie

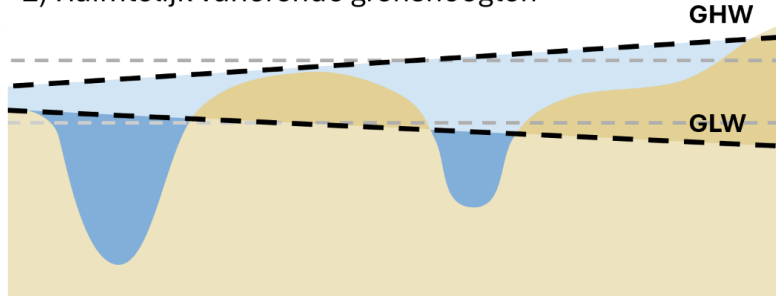
Arealen worden afgebakend aan de hand van diepteklassen. Hierbij worden verschillende grenshoogten aangehouden. Voor het afbakenen van het intergetijdegebied zijn meerdere opties:

1. Ruimtelijk uniforme grenshoogten (Figuur 2.4; boven). In veel studies⁴ worden NAP +1 m en -1 m gebruikt als grove benadering voor respectievelijk GHW en GLW. Het voordeel van deze ruimtelijk uniforme grenshoogten is dat ze eenduidig en makkelijk toepasbaar zijn, en daarmee ook eenvoudig te reproduceren. Het hanteren van één uniforme waarde voor de volledige Nederlandse Waddenzee is echter niet voor alle bekkens representatief: het GHW varieert bijvoorbeeld van NAP +0,6 m bij Den Helder tot + 1,2 m bij Eemshaven en het GLW van NAP -0,8 m bij Den Helder tot -1,4 m bij Eemshaven. Door NAP +1 m en -1 m te gebruiken wordt het areaal intergetijdegebied in de westelijke Waddenzee overschat en in de oostelijke Waddenzee en Eems-Dollard onderschat.
2. Ruimtelijk variërende grenshoogten (Figuur 2.4; onder). Om recht te doen aan de verandering van de GHW- en GLW-standen over de Waddenzee kan worden gerekend met ruimtelijk variërende GHW- en GLW-kaarten. Deze GHW- en GLW kaarten kunnen op verschillende manieren worden gemaakt, bijvoorbeeld door ruimtelijke interpolatie of modelberekeningen (zie 2.2.1 voor een vergelijking tussen die twee).

1) Ruimtelijk uniforme grenshoogten



2) Ruimtelijk variërende grenshoogten



Figuur 2.4 Opties voor verticale afbakening van het intergetijdegebied. Boven: ruimtelijk uniforme grenshoogten, met NAP +1 m en NAP -1 m als proxy voor respectievelijk GHW en GLW. Het intergetijdegebied (donkerder) bevindt zich tussen de zwarte stippellijnen. Onder: de invloed van een ruimtelijk variërend GHW en GLW op de definitie van het intergetijdegebied.

⁴ O.a. Elias (2025); de Wit et al. (2024); Meijers (2024); Quataert et al. (2024); Smits & Nederhoff (2018); Nederhoff et al. (2017)

2.2.1 Methoden voor de bepaling van een ruimtelijk variërend GHW en GLW

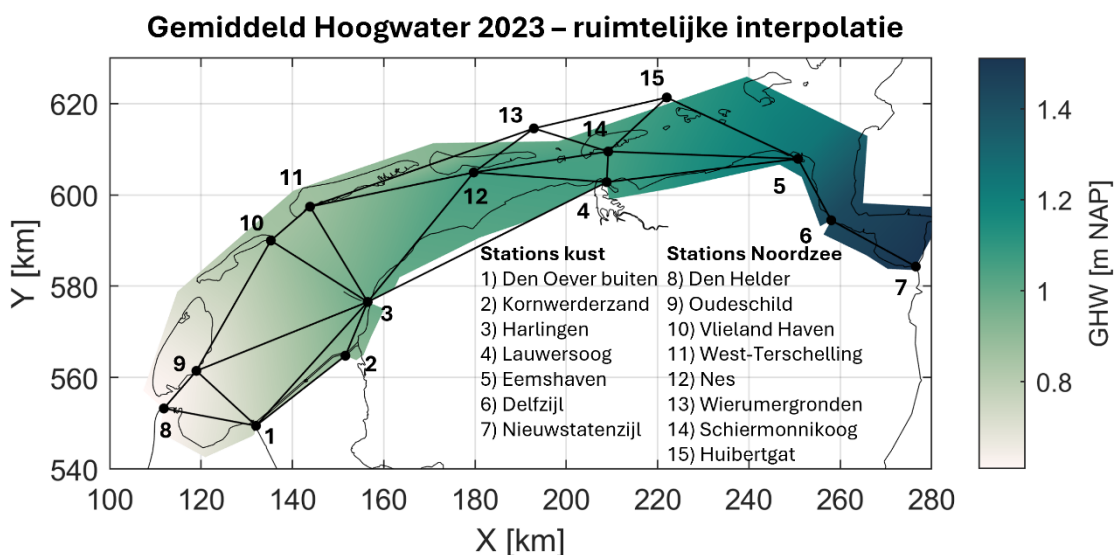
Er zijn verschillende methodes om een ruimtelijk variërend GHW en GLW te bepalen. Twee methodes die in dit rapport zijn onderzocht zijn ruimtelijke interpolatie en het berekenen van waterstanden met behulp van D-Flow FM modelberekeningen. De methode van ruimtelijke interpolatie wordt ook toegepast in de veelgebruikte online tool 'InterTides'.

Een uitdaging bij het bepalen van ruimtelijk variërende laagwaterstanden is het omgaan met droogvallende gebieden, omdat hier geen eenduidig laagwaterpeil bestaat. Door vertraagde afwatering in modellen ligt de daadwerkelijke laagwaterstand op platen vaak boven de bodem, waardoor de begrenzing van het intergetijdegebied minder nauwkeurig wordt. Een laagwatervlak dat wordt gecreëerd door ruimtelijke interpolatie tussen meetstations in diepere, niet-droogvallende delen voorkomt dit probleem. Anderzijds houdt een dergelijk 'schaduwlaagwatervlak' geen rekening met lokale effecten in geulen, met name op grotere afstanden van de meetstations, wat kan leiden tot oversimplificatie. Er zijn geen langjarige waterstandsmetingen centraal in de Waddenzee beschikbaar om te bepalen welke methode het dichtst bij de werkelijkheid ligt.

Ruimtelijke interpolatie

Het model InterTides bepaalt de GLW en GHW kaarten door triangulatie van gemeten waterstanden van 15 meetstations langs de randen van de Waddenzee. Voor elk meetstation wordt een tijdserie van waterstanden geanalyseerd, waarbij het gemiddelde van alle hoogwater- (GHW) of laagwaterpieken (GLW) wordt bepaald. Dit resulteert in één GLW- en GHW-waarde per station. Vervolgens interpoleert het model deze stationswaarden tot een gebiedsdekkende kaart (Rappoldt et al., 2024). Omdat sinds 2025 de lange-termijn beschikbaarheid van InterTides onduidelijk is zijn deze kaarten gereproduceerd op basis van dezelfde ruimtelijke interpolatietechnieken als in InterTides worden gebruikt. De gebruikte methode en vergelijking met de InterTides kaartlagen is te vinden in Bijlage A.

De meetstations die worden gebruikt voor de ruimtelijke interpolatie liggen in relatief diepe delen langs de eilanden- en de vastelandskust van de Waddenzee en niet op de platen. Hierdoor wordt in feite een schaduw-laagwatervlak tussen de meetstations gespannen (Figuur 2.5). De meetstations liggen tot 60 kilometer uit elkaar en er zijn geen meetstations beschikbaar in het midden van de Waddenzee.

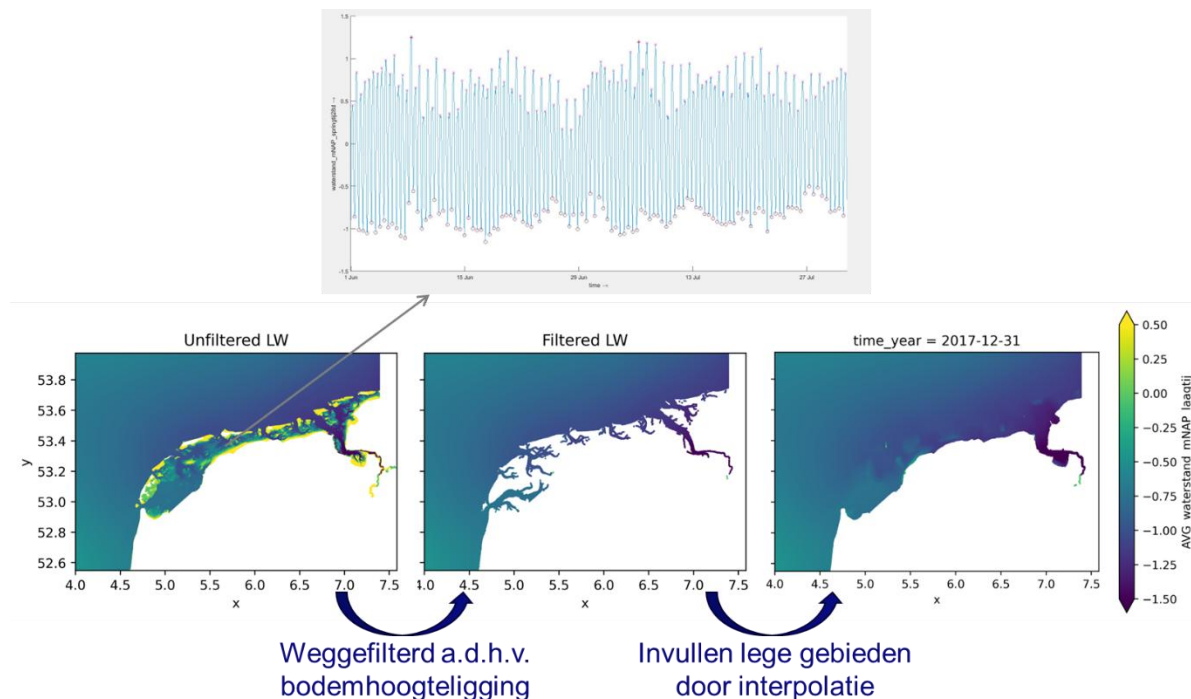


Figuur 2.5 GHW-kaartlaag voor de Waddenzee voor 2023, op basis van ruimtelijke interpolatie van de waterstanden op de verschillende stations binnen driehoeken en langs lijnen zoals beschreven in Bijlage A.

D-Flow FM modelberekening

Door GHW- en GLW kaarten te maken met behulp van D-Flow FM modelberekeningen kan rekening worden gehouden met lokale effecten zoals een vertraagde afwatering. Hiervoor is gebruik gemaakt van de 2D Dutch Wadden Sea-modelschematisatie met een resolutie van 100 m (DWSM-100m). Dit is dezelfde modelschematisatie die gebruikt is in van Weerdenburg en Hanssen (2023), uitgevoerd voor een volledig jaar (2017) in plaats van een periode van drie maanden.

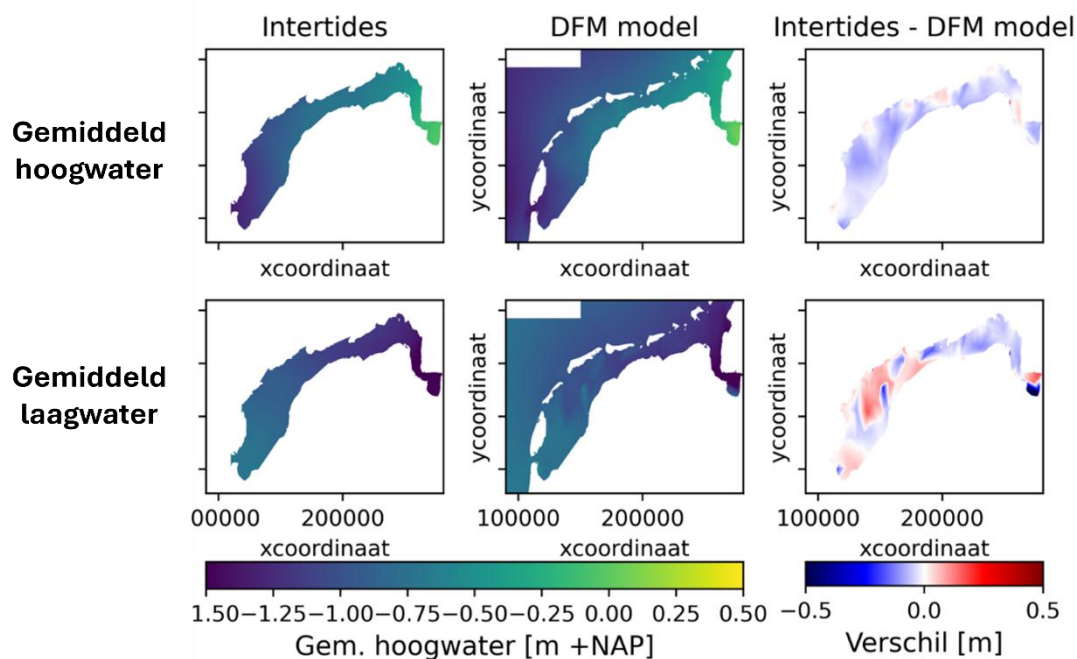
Om een nauwkeurigere ondergrens voor het intergetijdegebied te bepalen zijn droogvallende plaatgebieden uit de gemodelleerde GHW- en GLW-kaarten gefilterd (Figuur 2.6). De waterstanden in deze gebieden zijn vervolgens ingevuld door middel van interpolatie. Voor meer informatie over dit proces wordt verwezen naar Bijlage B.



Figuur 2.6 Methode bepaling laagwaterkaarten op basis van D-Flow FM. (1) Voor elke roostercel zijn het GHW en GLW voor 2017 vastgesteld (linker paneel), (2) artefacten op droogvallende gebieden zijn gefilterd, (3) de missende droogvallende gebieden zijn weer opgevuld met interpolatie.

Vergelijking InterTides en D-Flow FM kaartlagen

De GHW-kaarten op basis van InterTides en D-Flow FM voor 2017 vertonen slechts kleine verschillen van maximaal enkele centimeters, terwijl de GLW-kaarten lokaal grotere verschillen vertonen, tot enkele decimeters (Figuur 2.7). In de buurt van de meetstations, die zich in diepe kustwateren van de Waddenzee bevinden, komen de GLW-kaarten goed overeen, met een verschil van maximaal 5 cm tussen InterTides en D-Flow FM (zie Bijlage 0). Dit wijst erop dat de grotere verschillen in GLW-waarden veroorzaakt worden door hydrodynamische effecten in het D-Flow FM model. Het is echter onduidelijk welke methode beter presteert in deze centrale gebieden van de Waddenzee, omdat er geen langjarige metingen beschikbaar zijn.



Figuur 2.7 Vergelijking gemiddeld hoog- en laagwaterkaarten op basis van InterTides en D-Flow FM voor het jaar 2017.

2.2.2 Gevoeligheidsanalyse

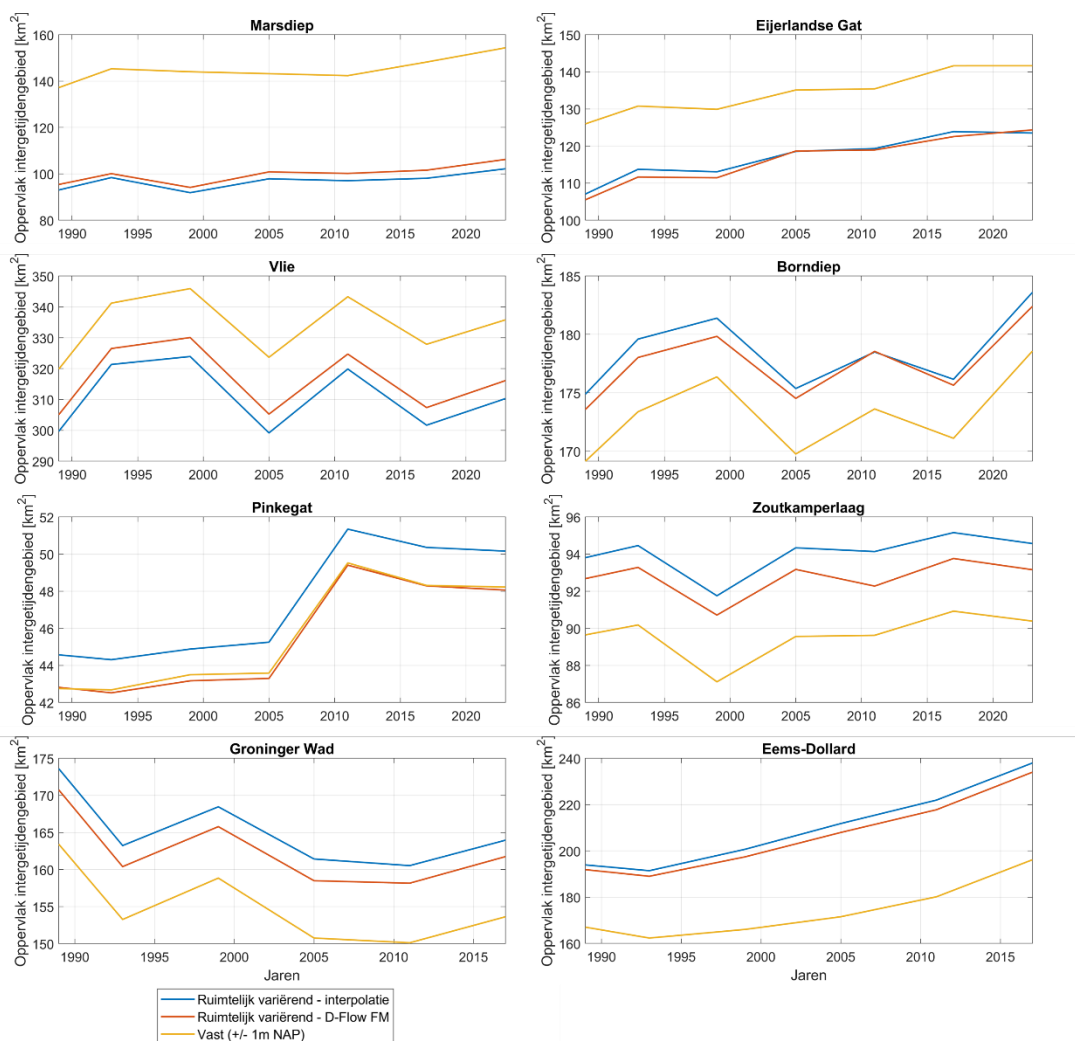
De gevoeligheidsanalyse in Figuur 2.8 laat zien dat het berekende areaal intergetijdegebied sterk afhankelijk is van de verticale begrenzing.

Omdat de getijslag in het westelijke deel van de Waddenzee wordt overschat bij gebruik van de uniforme GLW/GHW waarden van NAP -1 m en NAP +1 m (zie ook Figuur 2.5), wordt daar ook het areaal intergetijdegebied overschat ten opzichte van een berekening met het ruimtelijk variërende GLW/GHW veld. In het Marsdiep bedraagt deze overschatting ruim 40% (gele lijn in Figuur 2.8). In het oostelijke deel van de Waddenzee wordt met deze uniforme GLW/GHW waarden de getijslag juist onderschat. Dat resulteert bijvoorbeeld in Zoutkamperlaag in een onderschatting van het areaal intergetijdegebied van orde 5% en deze onderschatting loopt op tot haast 20% in de Eems-Dollard. Vanwege de substantiële invloed van de ruimtelijke variatie van de getijslag op de areaalberekening is het advies om te rekenen met een ruimtelijk variërend GLW/GHW veld.

Een ruimtelijk variërend GHW/GLW veld kan worden bepaald met behulp van ruimtelijke interpolatie (blauwe lijn in Figuur 2.8) en modelberekeningen (rode lijn in Figuur 2.8) zoals beschreven in de vorige paragraaf. Beide ruimtelijk variërende GLW/GHW velden resulteren in vergelijkbare oppervlakten intergetijdegebied. De verschillen tussen beide rekenmethoden zijn op wantijschaal beperkt tot enkele hectares. Mede daardoor zijn ook de resulterende trends in de arealen zeer vergelijkbaar. Beide ruimtelijk variërende GLW/GHW lagen zijn dus uitwisselbaar voor het doeleinde van deze areaalberekening. Praktische overwegingen (bijv. eenvoud en reproduceerbaarheid van ruimtelijke interpolatie ten opzichte van modelberekeningen) of voorkeuren voortvloeiend uit de toepasselijkheid van de GLW/GHW laag voor andere studies zullen dus doorslaggevend zijn.

Een aantal kanttekeningen moeten worden geplaatst. Allereerst zijn deze resultaten bepaald op wantijschaal. Lokaal – in gebieden met grote afwijkingen tussen de GLW/GHW velden – kunnen verschillen groter zijn. Daarnaast is de overeenkomst tussen beide GLW/GHW velden mede te danken aan het wegfilteren van ondiepe gebieden (boven NAP -5 m; Figuur 2.6) uit de modellaag.

Hiermee wordt de GLW/GHW laag op basis van de modellering maar beperkt beïnvloed door ondiep water effecten. Reden om de ondiep water effecten buiten beschouwing te laten in de GLW/GHW laag op basis van de modellering was om tot een ruimtelijk vloeiend vlak te komen zonder veel lokale variaties (relevant voor de volumeberekening van de intergetijdegebieden).



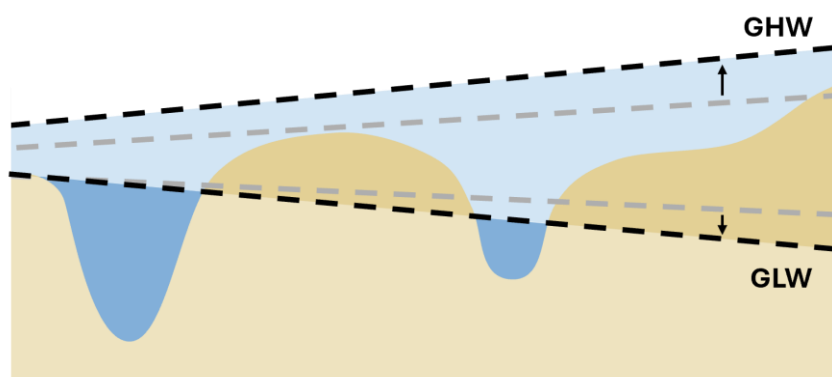
Figuur 2.8 Gevoeligheid van het berekende oppervlak intergetijdegebied voor de verticale begrenzing. Blauwe lijn – GHW en GLW bepaald op basis van ruimtelijke interpolatie (2017). Rode lijn – GHW en GLW bepaald op basis van het D-Flow FM model (2017). Gele lijn – ruimtelijk constante GHW en GLW waarden (NAP +/- 1 m). Voor alle drie methoden wordt gerekend met in de tijd variërende wantijen zoals vastgesteld in §2.1.

2.3 Verticale afbakening - temporeel

Het GHW en het GLW zijn niet constant maar veranderen in de tijd onder invloed van onder anderen zeespiegelstijging, verandering in de getijslag binnen een bekken, meerjarige getijcomponenten en meteorologische effecten. Met name meteorologische effecten, zoals de overheersende windrichting en -sterkte, leiden tot sterke jaar-op-jaarvariaties in de ordegrootte van centimeters tot decimeters (zie blauwe stippen in Figuur 2.10), terwijl zeespiegelstijging en hydromorfologische respons van het bekken voorkomen op een tijdschaal van decades.

Het areaal intergetijdegebied kan dus berekend worden op basis van een GHW- en GLW-vlak dat constant blijft in de tijd, of op basis van een tijdsvariërend waterstandsvlak (Figuur 2.9). Wanneer een constant GHW- en GLW-vlak gebruikt wordt, is het van belang om zorgvuldig te onderzoeken hoe een representatief vlak gekozen kan worden. Vanwege de sterke jaarlijkse variatie kan de keuze voor een arbitrair jaar ertoe leiden dat berekende arealen meer een

weergave zijn van meteorologische condities in dat jaar dan dat ze representatief zijn voor een langere tijdschaal.

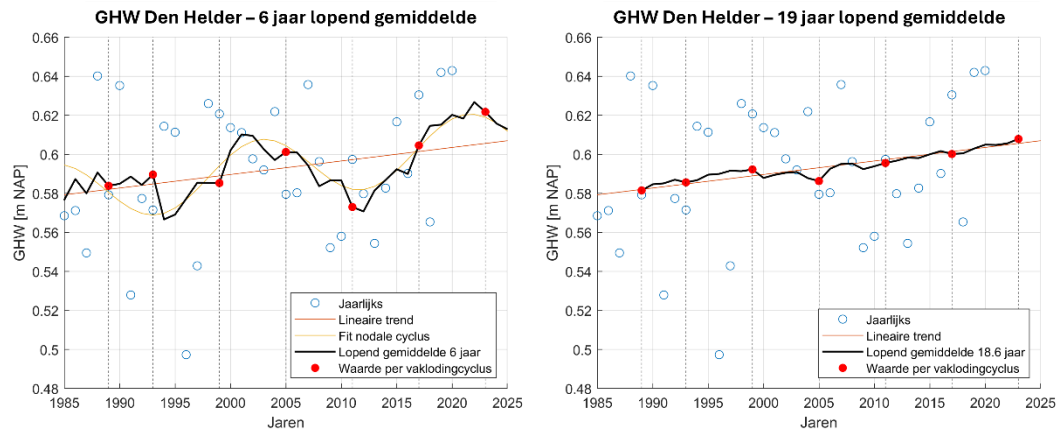


Figuur 2.9 Schematische illustratie van het gebruik van temporeel variërende grenshoogten voor GHW en GLW. De grijze en zwarte stippellijnen geven het GHW en GLW voor twee momenten in de tijd.

Door temporeel variërende hoog- en laagwaterstanden te gebruiken wordt recht gedaan aan de veranderingen van waterstanden in de Waddenzee. De uitdaging hierbij is om langjarige, trendmatige veranderingen in waterstanden mee te nemen, zoals bijvoorbeeld zeespiegelstijging en verandering in getijslag door morfologische aanpassingen binnen een bekken. Tegelijkertijd worden jaargemiddelde hoog- en laagwaterstanden gedomineerd door (relatief) korte termijn fluctuaties, zoals meteorologische omstandigheden en de nodale cyclus⁵. Wanneer deze zouden worden meegenomen zijn de berekende arealen van een bepaald jaar met name een afspiegeling van de meteorologische condities of fase in de nodale cyclus van dat jaar en niet van morfologische ontwikkelingen.

Dit kan worden ondervangen door een lopend gemiddelde te berekenen van de jaargemiddelde GHW en GLW waarden over meerdere jaren. Op deze wijze kan voor iedere vaklodingcyclus waarvan bodemkaarten beschikbaar zijn een 'representatief' jaar midden in de cyclus gekozen worden (zwarte verticale stippellijnen in Figuur 2.10) waarvoor de waterstand wordt bepaald als het lopend gemiddelde van de jaren voor en na dit jaar (rode stippen). Uit gevoeligheidsanalyse blijkt dat de verkregen waterstand sterk gevoelig is voor de gekozen middelingsperiode. Wanneer over 6 jaar wordt gemiddeld (zwarte lijn in Figuur 2.10; links) wordt de verkregen waterstand per vaklodingcyclus gedomineerd door de nodale cyclus (gele lijn). Door te middelen de periode van het nodale getij (18,6 jaar; in de praktijk wordt een periode van 19 jaar gebruikt voor de middeling), worden alle korte termijn fluctuaties uit het waterstandssignaal gefilterd en zijn de verkregen waterstanden een representatieve afspiegeling van de langjarige ontwikkeling (zwarte lijn en rode stippen in Figuur 2.10; rechts).

⁵ De nodale cyclus is een langjarige getijcomponent met een periode van 18,6 jaar. De amplitude is voor de meeste stations in de Waddenzee tussen de 4 en 6 cm.



Figuur 2.10 Gemiddeld Hoogwater in Den Helder. De blauwe stippen geven de jaargemiddelde GHW waarden en kennen een sterke jaarlijkse variatie. De zwarte lijn toont het lopend gemiddelde over 6 jaar (links) en 19 jaar (rechts). De rode stippen geven de waterstand voor elke vaklodingcyclus waarbij een representatief jaar in het midden van de cyclus is gekozen (bv 2017 voor cyclus 2015 – 2020). Wanneer een lopend gemiddelde over 6 jaar wordt genomen is hierin sterk de invloed van de nodale cyclus (gele lijn in linker figuur) zichtbaar. Een 19 jarig gemiddelde (rechts) is een betere afspiegeling van de langjarige trend.

2.3.1 Gevoeligheidsanalyse

Figuur 2.11 toont de gevoeligheid van het berekende oppervlak intergetijdegebied voor de keuze van temporele begrenzing. Hierin zijn twee uitersten weergegeven; een vaste waarde voor GHW/GLW voor alle jaren (hierbij is 2023 gebruikt; gele lijn in Figuur 2.11) en de GHW/GLW waarden per jaar (rode lijn) waarbij ook alle meteorologische jaar-op-jaarvariaties worden meegenomen. Als middenweg is een 19 jarig lopend gemiddelde (blauwe lijn) gegeven, waarbij langjarige trends worden meegenomen maar jaarlijkse fluctuaties zijn uitgemiddeld.

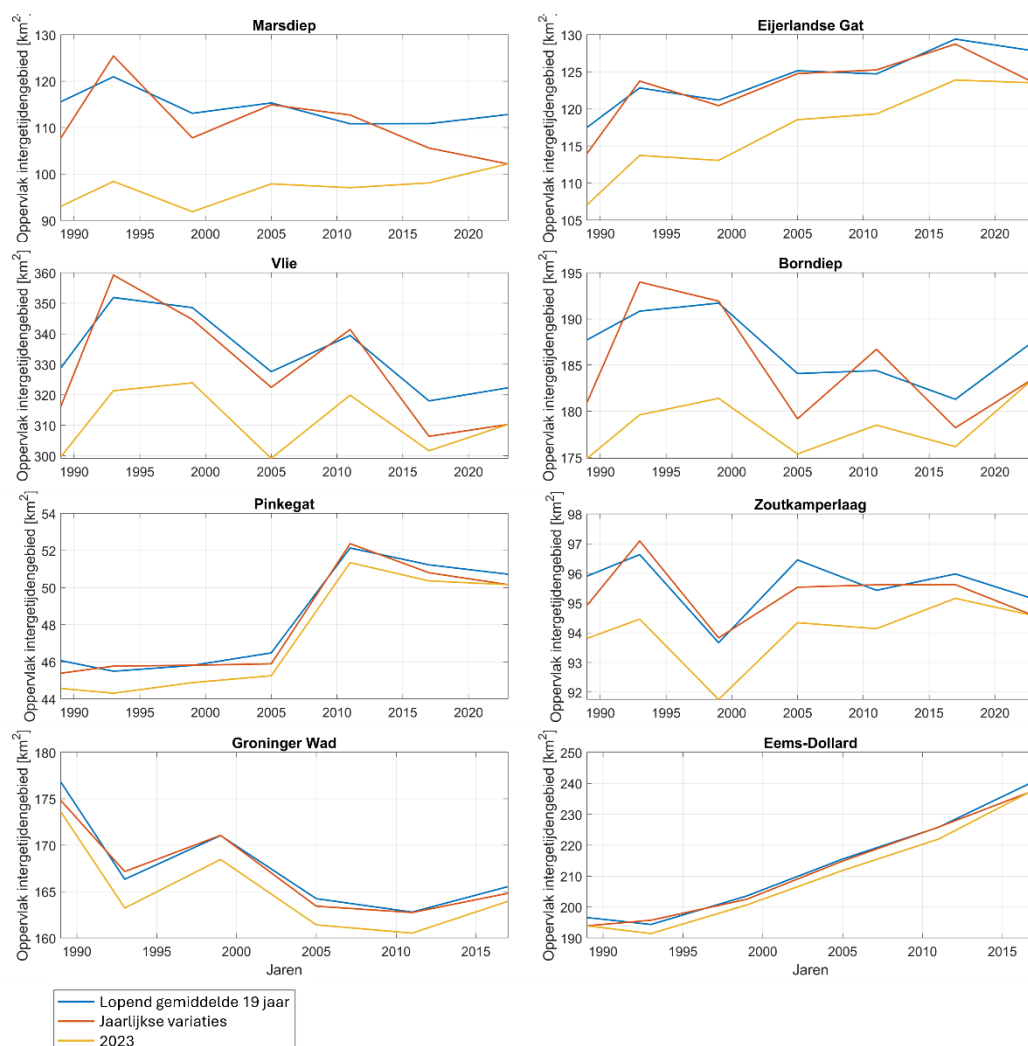
De gele en blauwe lijn (vast jaar en 19 jarig gemiddelde) gedragen zich grofweg hetzelfde. Echter tonen deze twee lijnen een licht verschillende trend: voor de meeste bekkens geeft het vaste jaar een sterkere toename van intergetijdegebied dan het lopend gemiddelde. In sommige bekkens, bijvoorbeeld het Marsdiep, neemt het intergetijdegebied toe wanneer een vast jaar wordt gebruikt (geel), maar licht af bij het 19 jarig gemiddelde (blauw). Dit verschil in trend is dus een gevolg van de lange termijn ontwikkeling in de gemiddelde waterstanden. Welke van deze twee indicatoren het meest geschikt is, is afhankelijk van de informatie die wordt gezocht en welke conclusies er uit getrokken kunnen worden: bij het gebruik van een vast jaar wordt de absolute ontwikkeling (bv ophogen van plaatgebieden) geïsoleerd, terwijl het lopend gemiddelde iets zegt over de langjarige 'beschikbaarheid' van het intergetijdegebied, bijvoorbeeld of het meegroeit met een in hoogte toenemend GHW.

De gele lijn (constante 2023 waarde) bevindt zich voor alle bekkens onder de blauwe lijn (19 jaar lopend gemiddelde): het jaar 2023 is blijkbaar een jaar waarin het intergetijdegebied kleiner is vergeleken met het langjarig gemiddelde. Dit laat zien dat bij de keuze van een vast jaar om het intergetijdegebied af te bakenen, het oppervlak sterk afhankelijk is van het gekozen jaar. Afhankelijk van het bekken kan het absolute verschil in intergetijdegebied door de keuze van het jaar oplopen tot 10%. Wanneer een vast jaar wordt gebruikt is een zorgvuldige selectie van een representatief jaar dus van groot belang.

De rode lijn, waarin jaar-op-jaarvariaties in de waterstand worden meegenomen, fluctueert veel sterker dan de gele en blauwe lijn. Dit is een gevolg van meteorologische variaties en dus geen morfologische verandering in het bekken. De ordegrrootte van dit effect verschilt per bekken.

Daarnaast is de rode lijn sterker gevoelig voor de keuze van het begin- en eindjaar. 2023 is een jaar met een relatief 'laag' intergetijdegebied (gele lijn ligt lager dan blauwe lijn). Hierdoor

wordt de trend in de rode lijn 'omlaag getrokken'. Indien het laatste jaar een jaar zou zijn met een relatief hoog intergetijdegebied (bijvoorbeeld 1993 of 2011) zou de trend in intergetijdegebied die de rode lijn laat zien sterker toenemen (of minder sterk afnemen).



Figuur 2.11 Gevoeligheid van het oppervlak intergetijdegebied voor de keuze van temporele begrenzing. De lijnen tonen het berekende intergetijdegebied waarbij drie verschillende keuzes zijn gemaakt in het vaststellen van GHW en GLW: Blauwe lijn - GHW en GLW zijn bepaald als lopend gemiddelde over 19 jaar. Rode lijn - GHW en GLW per jaar (inclusief meteorologische effecten). Gele lijn - Constante waarde voor GHW en GLW (uit 2023). Voor alle figuren zijn in de tijd variërend wantijen gebruikt en zijn GHW en GLW bepaald door ruimtelijke interpolatie. Voor alle drie methoden wordt gerekend met in de tijd variërende wantijen zoals vastgesteld in §2.1.

2.4 Verschillende gebruikers, verschillende behoeften

De keuze voor een begrenzing hangt sterk af van de informatie waarnaar gezocht wordt en elke aanpak brengt ook de nodige beperkingen met zich mee. Deze paragraaf geeft een beschouwing van de afwegingen die hierin worden gemaakt voor verschillende gebruikersfuncties. Op basis van deze beschouwing wordt in de volgende paragraaf (2.5) een aanbeveling gedaan voor morfologische studies.

Tijdschaal

In veel morfologische studies waarin ontwikkelingen op de schaal van een getijdebekken worden beschouwd is het belangrijk om inzicht te verkrijgen in de morfologische ontwikkeling op een langere tijdschaal. Getijdebekken kennen een dynamisch evenwicht tussen de externe

hydrodynamische forcering, met name het getijprisma en in mindere mate golven, en karakteristieke morfologische kenmerken als geulvolume en plaatoppervlak (bijv. Eysink, 1990, Friedrichs & Aubrey 1996). Dit evenwicht kent een tijdschaal van tientallen jaren. Voor ecologische of nautische toepassingen kan het waardevol zijn om ook de onderliggende (sterke) jaarlijkse variatie te beschouwen. Jaarlijkse fluctuaties in intergetijdegebied of geuloppervlak kunnen van belang zijn voor de beschikbaarheid van een bepaald habitat of de vereiste baggerinspanning. Hierbij moet de kanttekening geplaatst worden dat de Waddenzeebodem slechts 1x in de 6 jaar wordt ingemeten: het weergeven van de arealen 'per jaar' met de jaarlijkse waterstanden geeft hier een schijnnaauwkeurigheid omdat de tussenliggende morfologische veranderingen vaak niet bekend zijn (met uitzondering van de gebieden waar vaargeulonderhoud plaatsvindt, die met frequentere 'beheerlodingen' worden ingemeten).

Afbakening intergetijdegebied

Arealen zijn één aspect in een scala van morfologische indicatoren die samen informatie geven over de ontwikkeling van een bekken. Voorbeelden van andere indicatoren zijn veranderingen in de bodemhoogte en sedimentvolumes. In morfologische studies wordt tot op heden vaak gebruik gemaakt van vaste, ruimtelijk uniforme grenshoogten om deze volume-ontwikkelingen te bepalen. Het voordeel van ruimtelijk uniforme grenshoogten is dat deze eenduidig zijn en dus makkelijk toepasbaar zijn. Met name bij studies waar complexere volumeberekeningen worden uitgevoerd, zoals bijvoorbeeld in Elias (2025) waar volumeveranderingen worden berekend voor diepteklassen die meebewegen met morfologische veranderingen (bijvoorbeeld opschuivende geulen of in oppervlak toenemende platen die worden gevolgd) kan het gebruik van ruimtelijk variërende GHW/GLW velden een (onwenselijke) extra complexiteit meebrengen.

In andere studies (bijvoorbeeld ASMITA studies) wordt een vaste waarde per bekken gebruikt. Voordeel hiervan is dat geen interpolatie over de bekkengrenzen plaats hoeft te vinden. Een nadeel in het gebruik hiervan voor areaalberekening is dat het oppervlak intergetijdegebied daardoor extra gevoelig is voor de keuze van wantijligging, omdat ter plaatse van het wantij een sprong in hoog- en laagwaters plaatsvindt.

In ecologische studies, zoals bij de ZES.1 ecotopenkaart, wordt vaak juist al gekeken naar de bodemhoogte in relatie tot een lokaal waterpeil of droogvalduur, wat essentieel is voor het classificeren van ecotopen en het begrijpen van de ecologische functie van een gebied (Paree et al., 2021; van Donk & Baptist, 2021; Bouma et al., 2005).

Afbakening geulen

Geulen worden in verschillende studies begrensd door de NAP -3 m of -5 m contour. Vanuit morfologisch oogpunt is het zinvol om een geul te definiëren aan de hand van een dieptecontour waarbij zoveel mogelijk vertakkende geultjes onderdeel uitmaken van de klasse 'geul'. Hiervoor voldoet in veel gevallen de NAP -3 m contour. Ook vanuit nautisch oogpunt is dit een logische begrenzing, omdat veel baggerwerkzaamheden plaatsvinden in geulen met een diepte tussen NAP -3 m en -5 m. De te onderhouden vaargeulen hebben in veel gevallen namelijk een streefdiepte van NAP -3,5 m (veerbootroute Schiermonnikoog en Vlieland), of NAP -3,8 m (veerbootroute Ameland, Boontjes voor de pilot in 2025)⁶ (Cleveringa, 2024; Waddenacademie, 2024). Vanuit nautisch oogpunt is het zinvol deze vaargeulen als geul te beschouwen in de areaalontwikkeling.

Voor ecologische toepassingen wordt dan weer vaak een diepte ten opzichte van GLW gebruikt als begrenzing van een geul, bijvoorbeeld in de ecotopenkaart. In verschillende versies van de ecotopenkaart worden respectievelijk NAP -6.3 m, GLWS -5 m en GLW -5 m

⁶ Met uitzondering van de verbinding Harlingen – Noordzee (streefdiepte NAP -7,5 m), veerbootroute Terschelling (streefdiepte NAP -5 m) en verbinding Eemshaven – Noordzee (streefdiepte NAP -12 m) (Cleveringa, 2024)

gebruikt (Paree et al., 2021; van Donk & Baptist, 2021; Bouma et al., 2005; Paree et al., 2025). De verschillende begrenzings die hiervoor gebruikt zijn leiden tot uiteenlopende geularealen (zie gevoeligheidsanalyse in Bijlage E). Daarnaast moet bij een methode gebaseerd op een jaarlijks GLW rekening gehouden worden met de effecten van de waterstanden in het gekozen jaar (zoals beschreven in Sectie 2.3)

Wanneer bij de afbakening van arealen, zoals het geulgebied, verschillende grenshoogten worden gehanteerd, kunnen uit verschillende studies inconsistente trends voortvloeien. Dat blijkt bijvoorbeeld uit recente studies van Meijers (2024) en de Wit et al. (2024), waarin geulen worden gedefinieerd op basis van een bovengrens van respectievelijk NAP -3 en -5 m. Afhankelijk van deze keuze neemt het geulareaal in het Marsdiep sinds 1933 af of blijft het gelijk.

2.5 Samenvattend: Aanbevelingen t.b.v. morfologische studies

Horizontale afbakening

Het hangt van het analysedoel van de gebruiker af welke rekenmethode voor horizontale afbakening (vast of veranderend wantij) de relevante inzichten geeft. Beide rekenmethoden parallel beschouwen vergroot de interpretatiemogelijkheden. Voor de ontwikkeling van het areaal intergetijdegebied dat feitelijk tot een bekken heeft toebehoord, is een berekening met het veranderende wantij relevant. Voor een analyse van de veranderingen die alleen morfologisch van aard zijn, en dus niet het gevolg van toevoegingen/uitsluitingen met veranderende wantijen, is een berekening met een vast wantij waardevol. Een kanttekening bij het gebruik van een vast wantij is dat duidelijk moet worden vastgelegd welk wantij hiervoor wordt gebruikt om te voorkomen dat een toekomstige studie die met een ander wantij rekent op andere getallen uitkomt. Daarnaast moet zorgvuldig een 'representatief' wantij worden gekozen.

Voor de DSR wordt aanbevolen te rekenen met in de tijd veranderende wantijen, om een representatief beeld te geven van de ontwikkeling van het areaal dat daadwerkelijk tot het bekken behoorde, en de veranderingen in bekkenoppervlak (bijvoorbeeld het groeien van één bekken ten koste van een ander). Op deze wijze kunnen de resultaten geduid worden in termen van veranderende kombergingsvolumes binnen een bekken, een belangrijk sturend mechanisme voor het dynamische evenwicht. Hierbij wordt echter de kanttekening geplaatst dat, met name in kleine bekkens waarbij de wantijgrenzen sterk veranderen, het waardevol is om ook de trends met vaste wantijgrenzen te beschouwen: juist de combinatie van deze twee indicatoren geeft inzicht in de achterliggende processen achter de geobserveerde veranderingen.

Verticale afbakening- ruimtelijk

Vanwege de substantiële ruimtelijke variatie van de getijslag in de Waddenzee is het advies om te rekenen met een ruimtelijk variërend GLW/GHW veld. Vaste waarden voor GHW en GLW (respectievelijk NAP +/- 1 m) geven namelijk een significante overschatting (~40%) van het intergetijdegebied in het Marsdiep en een ~20% onderschatting in de Eems-Dollard.

Het ruimtelijke GHW/GLW veld kan worden berekend met een DFlow-FM model of een ruimtelijke interpolatie. Beiden geven vergelijkbare trends, en met de beperkte metingen op plaatgebieden in de Waddenzee kan niet worden nagegaan welke van de twee een betere inschatting geeft. Op basis van praktische overwegingen (eenvoud en reproduceerbaarheid van ruimtelijke interpolatie ten opzichte van modelberekeningen) gaat de voorkeur uit naar ruimtelijke interpolatie.

Voor de verticale afbakening van geulen wordt in de DSR nu zowel NAP -3 m als -5 m gegeven (diepteklassen NAP -3 m tot -5 m, en dieper dan -5 m). Op deze wijze kan het totale geulareaal

onder NAP -3 m worden verkregen door deze twee diepteklassen op te tellen. Daarnaast geeft deze onderverdeling inzicht in welk deel van de verandering in geulareaal in 'ondiepe' geulen plaatsvindt.

Verticale afbakening - Temporeel

Wanneer de jaarlijkse waterstand wordt gebruikt voor het bepalen van GHW en GLW domineren kortdurende waterstandsfluctuaties (meteorologische effecten en fase in de nodale cyclus) over morfologische trends. De resulterende trends geven feitelijk een beeld van de waterstand in de jaren van de bodemopnamen in plaats van morfologische ontwikkelingen. Het gebruik van jaarlijkse waterstanden wordt dus afgeraden.

Of een vast jaar of een lopend gemiddelde van de waterstanden het meest geschikt is, is afhankelijk van de informatie die wordt gezocht: bij het gebruik van een vast jaar wordt de morfologische ontwikkeling (bv ophogen van plaatgebieden tov NAP) geïsoleerd, terwijl het lopend gemiddelde iets zegt over de langjarige 'beschikbaarheid' van het intergetijdegebied, bijvoorbeeld of het meegroeit met een in hoogte toenemend GHW. Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat wanneer de langjarige trends in waterstanden worden meegenomen, het intergetijdegebied in de meeste bekkens minder sterk toeneemt. Bij gebruik van een vast jaar is zorgvuldige keuze een representatief jaar essentieel: het berekende intergetijdegebied (en dus ook het aandeel intergetijdegebied als percentage van het totale bekkenoppervlak) is sterk afhankelijk van de keuze van het jaar. Het aandeel intergetijdegebied in een bekken kan tot 10% verschillen afhankelijk van het gekozen jaar. Het gebruik van een langjarig lopend gemiddelde maakt de berekening minder gevoelig voor het gekozen jaar.

Om de daadwerkelijke ontwikkeling van een bekken in relatie tot de langjarige trends in waterstanden te kunnen beschouwen, en de gevoeligheid voor meteorologische effecten te verhelpen wordt voor gebruik op de DSR een 19 jarig lopend gemiddelde van de waterstanden aangeraden.

3 Methode

3.1 Bathymetrie

Voor de bodemligging zijn de bodemkaarten van de volledige Waddenzee en Eems-Dollard gebruikt, zoals recent samengesteld door Elias (2024). Benadrukt wordt dat de kwaliteit van de berekende arealen afhankelijk is van de kwaliteit van de bodemkaarten en de keuzes die bij de totstandkoming van deze bodemkaarten zijn gemaakt.

De bodem van de Waddenzee wordt ingemeten in zogenaamde 'Vaklodingcycli'; waarbij ieder jaar een ander bekken wordt gemeten en na 6 jaar een complete dekkende bodemkaart van de Waddenzee kan worden gemaakt. Ieder bekken wordt dus eens in de 6 jaar ingemeten. Hoewel de kwaliteit van de data in de 1985-1991 cyclus minder is dan in de daaropvolgende cycli, zijn deze data in dit rapport voor de volledigheid wel getoond. Voorzichtigheid is dus wel geboden bij de interpretatie van de ontwikkelingen ten opzichte van deze eerste cyclus. Tabel 3.1 geeft een overzicht van de gebruikte vaklodingcycli. Voor iedere cyclus is een representatief jaar gekozen in het midden van de cyclus, voor de bepaling van de waterstanden zoals beschreven in §3.2. De bekkens worden begrensd door in de tijd variërende wantijen zoals bepaald door Wagenaar (2024) en Elias (2025) (Figuur 2.1).

*Tabel 3.1 Overzicht van de gebruikte vaklodingcycli en representatieve jaren per vaklodingcyclus. * Cyclus 7 is nog niet volledig; de vaklodingen van het Groninger Wad (uitgevoerd in 2025) en de Eems-Dollard (gepland voor 2026) ontbreken nog.*

Vaklodingcyclus	Jaren	Representatief jaar
Cyclus 1	1985-1991	1989
Cyclus 2	1991-1997	1993
Cyclus 3	1997-2002	1999
Cyclus 4	2003-2008	2005
Cyclus 5	2009-2014	2011
Cyclus 6	2015-2020	2017
Cyclus 7*	2021-2026	2023

De kwaliteit van de bodemkaarten op de kwelders is beperkt. Door de aanwezigheid van vegetatie zijn de LIDAR-metingen die op de hogere delen worden uitgevoerd onnauwkeurig. Omdat dit met name effect heeft op de gekarteerde hoogteligging in de gebieden hoger dan GHW (supratidaal) wordt het oppervlakte supratidaal areaal in theorie niet beïnvloed door deze onnauwkeurigheid. Omdat de ontwikkeling van het supratidaal wel waardevolle informatie geeft over de ontwikkeling van een bekken (bijvoorbeeld in relatie tot kwelderuitbouw) is gekozen om de kwelders wel mee te nemen in de resultaten. Echter is voorzichtigheid geboden bij de interpretatie: het oppervlak supratidaal wordt naast uitbouw of terugtrekking van kwelders namelijk ook beïnvloed door de begrenzing van de kombergingsgebieden bij de eilanden (zie Bijlage C voor een overzicht hoe deze begrenzing in de wantijen van Wagenaar (2024) en Elias (2025) is toegepast). Met name de eilanden in het oostelijke deel van de Waddenzee (Rottumeroog, Rottumerplaat, Engelsmanplaat en de strandhaak aan de zuidwestzijde van Schiermonnikoog) veranderen sterk van vorm. Aan de landwaartse zijde zijn alle bekkens begrensd door de zeewering, een begrenzing die in de tijd constant blijft.

3.2 Voorbewerken waterstanden

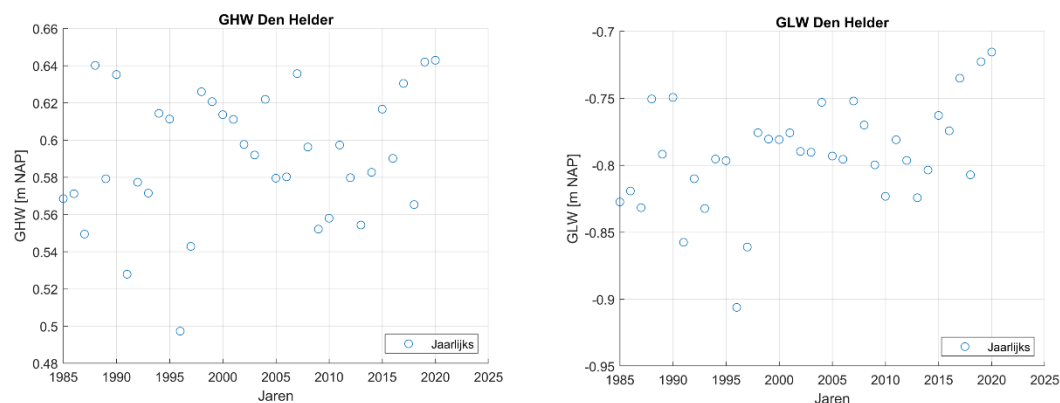
Om de intergetijdegebieden af te kunnen bakenen wordt een GHW- en GLW-kaartlaag geconstrueerd. Voor iedere vaklodingcyclus is een representatief jaar in het midden van de cyclus gekozen (zie Tabel 3.1) waarvoor de kaartlagen worden gemaakt.

Hiervoor zijn de volgende voorbewerkingsstappen genomen:

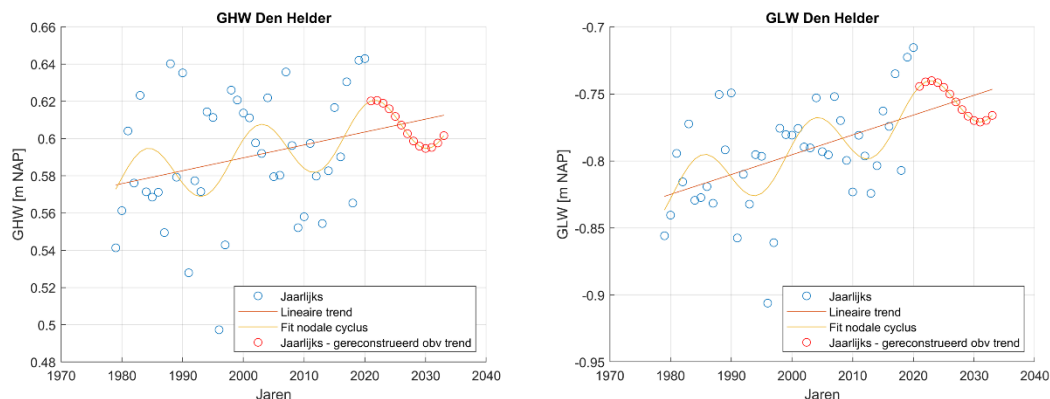
- Inladen waterstandsdata en bepalen GHW en GLW per jaar: Voor alle waterstandsstations die worden gebruikt bij de interpolatie (voor een overzicht van de gebruikte stations, zie Figuur 3.2 en Bijlage A) wordt ruwe waterstandsdata opgehaald vanaf 1979 (vrij toegankelijk via <https://waterinfo.rws.nl> met een temporele resolutie van 10 minuten). Voor ieder jaar wordt hieruit het gemiddeld hoogwater en gemiddeld laagwater bepaald als gemiddelde van alle hoog- en laagwaterpieken in dat jaar (stap 1 in Figuur 3.1). Voor enkele stations waren geen waterstanden vóór 1987 beschikbaar, hier zijn de eerste jaren in de tijdserie geëxtrapoleerd op dezelfde wijze als hieronder beschreven.
- Extrapoleren waterstanden tot 10 jaar na laatste vakloding: De GHW en GLW waarden voor elk station worden geëxtrapoleerd tot en met 2033 om een 19-jarig lopend gemiddelde te kunnen bepalen tot en met de meest recente vaklodingcyclus (de meest recente is cyclus 7, met 2023 als representatief jaar, zie Tabel 3.1). Deze extrapolatie gebeurt op basis van een combinatie van de lineaire trend en een fit van de nodale cyclus door de beschikbare data vanaf 1979 (stap 2 in Figuur 3.1). Dit is nodig om te voorkomen dat het lopend gemiddelde in de meest recente jaren onevenredig sterk wordt beïnvloed door de voorgaande jaren. Zonder deze extrapolatie zou het lopend gemiddelde van 2017 en 2023 worden gedomineerd door de waarden in de jaren ervoor omdat er geen waterstanden ‘in de toekomst’ beschikbaar zijn (en dus te hoog uitvallen, omdat de nodale cyclus rond 2021 piekt).
- Bepalen 19-jarig lopend gemiddelde: Vervolgens wordt voor elk station van 1989 t/m 2023 het lopend gemiddelde over 19 jaar bepaald (stap 3 in Figuur 3.1). De waarde van dit lopend gemiddelde voor een bepaald jaar X is dus het gemiddelde van de jaren voor en na jaar X.
- Extractie representatieve waterstand voor elke vaklodingcyclus: iedere vaklodingcyclus heeft een representatief jaar (zie Tabel 3.1). Voor deze jaren wordt een representatieve waterstand bepaald: de waarde van het 19 jarig gemiddelde in het betreffende jaar (rode stippen in Figuur 3.1, stap 3).
- Correctie GLW Nieuw Statenzijl: het gemiddeld laagwater bij meetstation Nieuw Statenzijl in de Dollard wordt overschat door de aanwezigheid van een spuisluis. Representatieve GLW waarden voor Nieuw Statenzijl worden bepaald op basis van een correctie, beschreven in Bijlage A.2.

Met de hierboven beschreven stappen wordt voor elke vaklodingcyclus voor alle stations een representatieve waterstand bepaald. Met behulp van ruimtelijke driehoeksinterpolatie wordt vervolgens voor iedere vaklodingcyclus een GHW en GLW kaartlaag gemaakt (Figuur 3.1). De gebruikte interpolatie wordt in meer detail beschreven in Bijlage A.

Stap 1 – bepalen GHW en GLW per jaar



Stap 2 – Extrapoleren tot 10 jaar na laatste vakloding



Stap 3 – Bepalen representatieve GHW/GLW waarde per vaklodingscyclus obv lopend gemiddelde

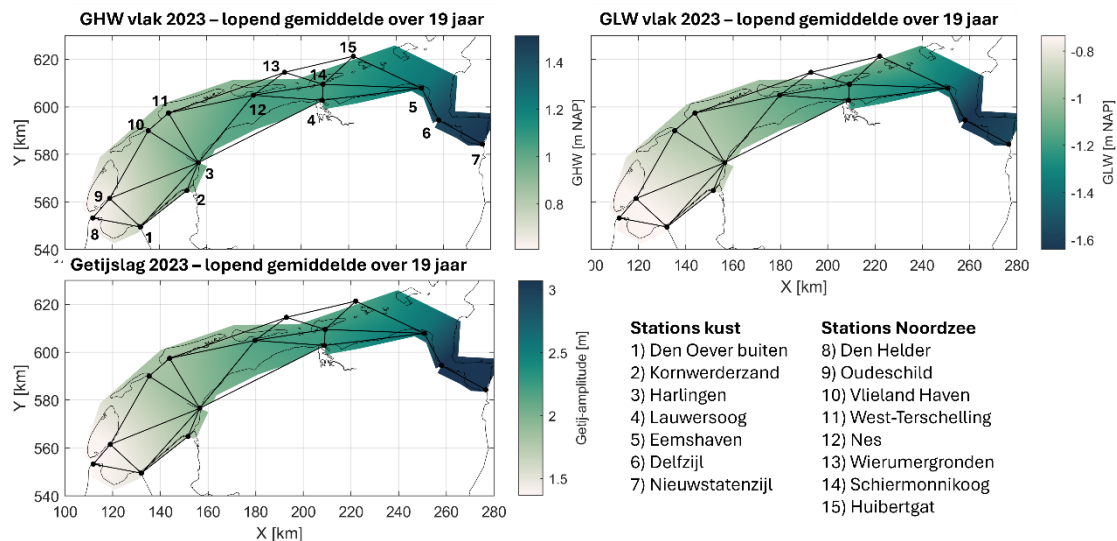


Figuur 3.1 Bepaling van representatieve GHW en GLW waarden per vaklodingscyclus in 3 stappen; voorbeeld Den Helder. Deze stappen worden uitgevoerd voor alle waterstandsstations langs de Waddenzee.

Stap 1: Bepalen GHW en GLW waarden per jaar door middelen van alle hoog- en laagwaterpieken

Stap 2: Extrapoleren jaarlijkse GHW en GLW waarden tot 10 jaar na laatste vakloding om lopend gemiddelde te kunnen bepalen (rode cirkels). Extrapolatie gebeurt op basis van de optelsom van de lineaire trend (rode lijn) en een fit van de nodale cyclus (gele lijn)

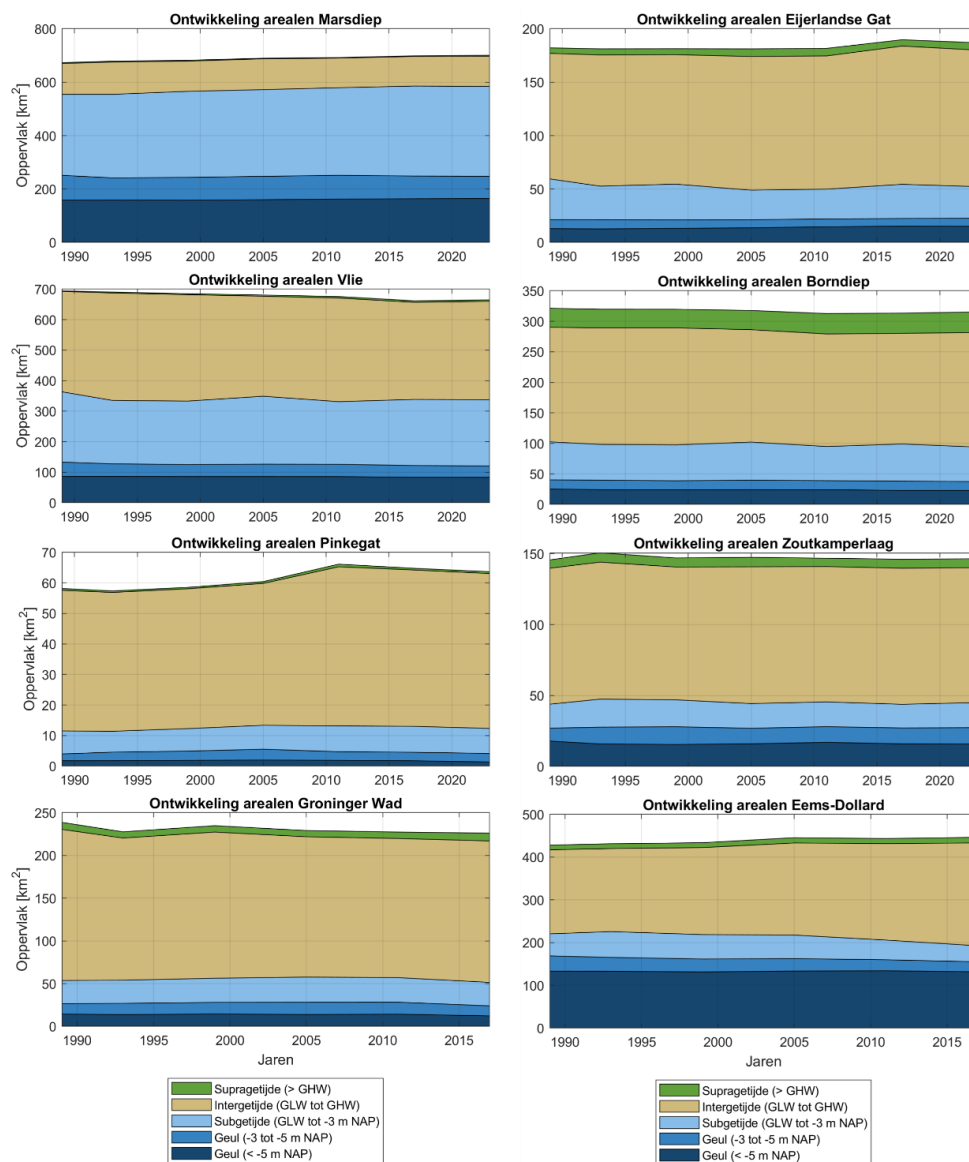
Stap 3: Bepalen van het 19 jarig gemiddelde op basis van de gemeten en geëxtrapoleerde jaarlijkse waterstanden (zwarte dikke lijn). De waarde van het lopend gemiddelde op het representatieve jaar van een vaklodingscyclus is de representatieve waterstand voor de betreffende vaklodingscyclus (rode stippen).



Figuur 3.2 Linksonder: Gemiddeld hoogwater kaartlaag voor 2023 (referentiejaar cyclus 7) op basis van het lopend gemiddelde over 19 jaar. Rechtsboven: gemiddeld laagwater kaartlaag. Linksonder: getijslag (verschil tussen GHW en GLW). Rechtsonder: overzicht gebruikte waterstandsstations voor de ruimtelijke interpolatie.

4 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de arealen gepresenteerd zoals berekend met de methodiek die in dit rapport is beschreven: met tijdsvariërende wantijen, en een ruimtelijk variërend GHW/GLW veld voor de afbakening van het intergetijdegebied, waarbij voor GHW en GLW lopende gemiddelden over 19 jaar zijn bepaald. Omdat het doel van dit rapport is om een methodiek te ontwikkelen wordt hier geen gedetailleerde analyse van de geobserveerde morfologische trends gegeven. De gevoeligheid van deze methodiek voor de verschillende gemaakte keuzes is weergegeven in Hoofdstuk 2: de hier getoonde resultaten komen overeen met de rode lijn (variabel wantij, Sectie 2.1) in Figuur 2.3, en met de blauwe lijn (lopend gemiddelde over 19 jaar, Sectie 2.3) in Figuur 2.11.

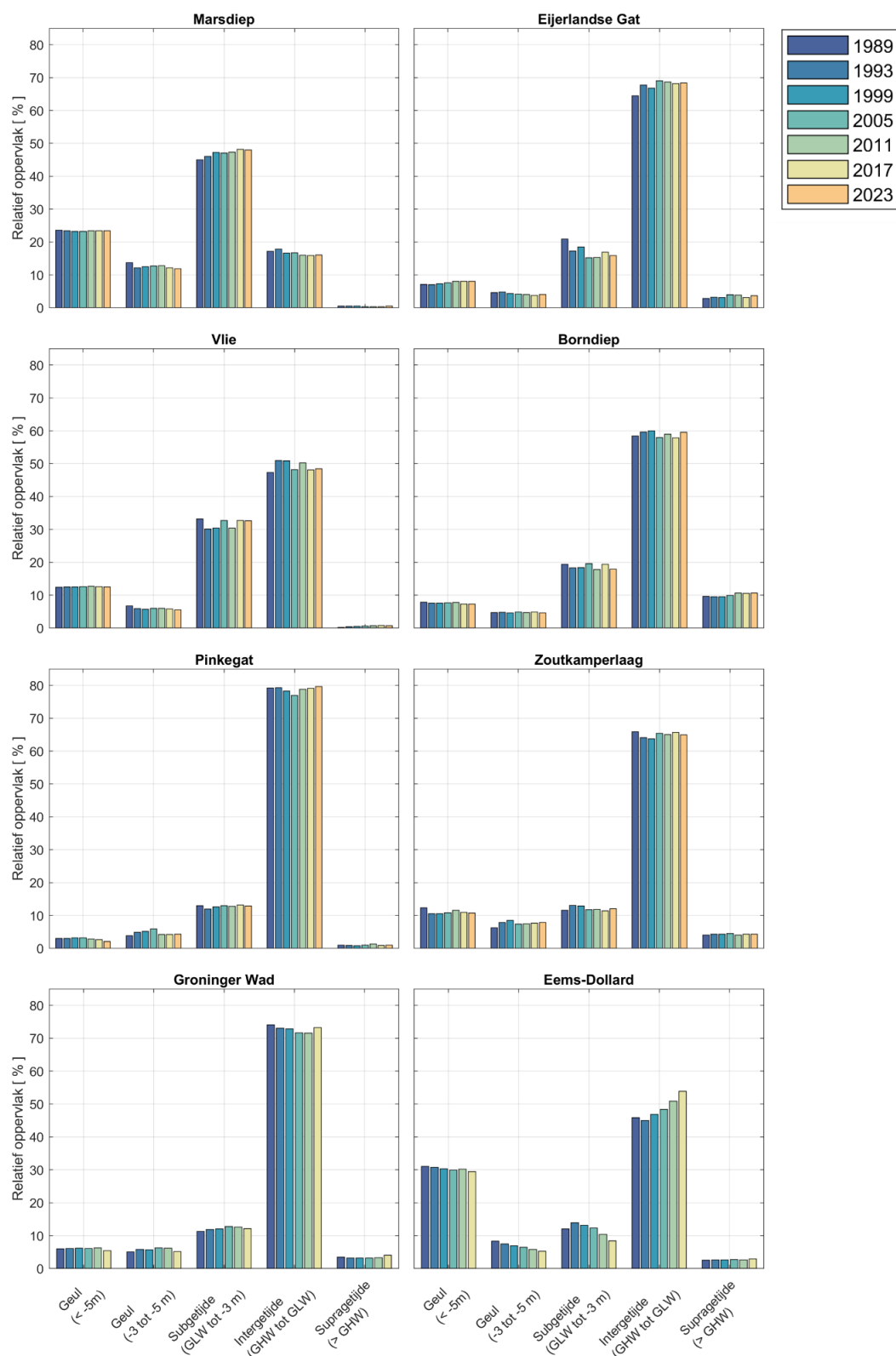


Figuur 4.1 Areaalverdeling in de Waddenzee van 1989 tot 2023 zoals weergegeven in de DSR met variabele wantijen en een ruimtelijk variërend GHW-GLW veld, gemiddeld over 19 jaar. Let op dat voor Groninger Wad en Eems-Dollard nog geen bodemdata in de laatste vaklodingcyclus beschikbaar is; data voor deze bekkens gaat tot 2017.

Wanneer alle bekkens naast elkaar worden beschouwd in Figuur 4.1 valt op dat de grotere bekkens in de westelijke Waddenzee (Marsdiep en Vlie) dieper liggen dan de kleinere bekkens in de oostelijke Waddenzee, met een hoger aandeel subgetijdegebied en geulen, terwijl de bekkens in de oostelijke Waddenzee (met uitzondering van het grote bekken Eems-Dollard) voor een veel groter gedeelte uit intergetijdegebied bestaan.

Ondanks dat sommige bekkens in oppervlak veranderen valt op dat de verdeling in arealen binnen de bekkens sinds 1989 relatief constant is (Figuur 4.2). Er zijn weinig sterke verschuivingen en de meeste veranderingen zijn in de orde van enkele procentpunten van het bekkenoppervlak, waarbij elk bekken zijn eigen unieke verdeling heeft (met als uitzondering de Eems-Dollard, waar het intergetijdegebied sterk is toegenomen).

- Het **Marsdiep** heeft het kleinste aandeel intergetijdegebied van alle bekkens en ligt voor een relatief groot deel permanent onder water. Er is een toename van subgetijdegebied te zien, die de laatste jaren lijkt af te vlakken.
- Tussen 1989 en 2005 is het intergetijdegebied in het **Eijerlandse Gat** toegenomen, ten koste van met name het subgetijdegebied. Sinds 2005 is deze ontwikkeling afgevlakt en is de verdeling in diepteklassen gelijk gebleven.
- Het oppervlak van het **Vlie** als geheel is enkele procenten afgenomen door wantijmigratie (met name uitbreiding van het Marsdiep en Eijerlandse Gat). De verdeling van diepteklassen binnen het bekken is relatief gelijk gebleven, ondanks dat in de volume-analyses van dit bekken een netto sedimentimport geconstateerd wordt. Deze sedimentimport uit zich dus met name op ophoging binnen specifieke areaalklassen en minder veranderingen tussen arealen (Meijers, 2024).
- In het **Borndiep** neemt het permanent onder water liggende areaal (geulen en subgetijdegebied) licht af, terwijl het kwelderoppervlak enkele procenten uitbreidt, met name door groei van de vastelandskwelders. Net zoals het Vlie blijkt ook van het Borndiep uit volume-analyses dat dit bekken sediment importeert (Elias, 2025a).
- In het **Pinkegat** en **Zoutkamperlaag** is de verdeling van diepteklassen in het bekken relatief gelijk gebleven.
- Op het **Groninger Wad** is het aandeel intergetijdegebied afgenomen, met name door een uitbreiding van subgetijdegebied.
- **Eems-Dollard**: hier is het intergetijdegebied behoorlijk toegenomen (van 46% naar 54%). Dit is ten koste gegaan van met name het subgetijdegebied (12 naar 8%) en de ondiepe geulen (van 8 naar 5%). Deze ontwikkeling kan worden verklaard door grootschalige sedimentatie op met name het Eemshornwad en Hond Paap, waar subgetijdegebied is veranderd in intergetijdegebied (Elias et al., 2021).



Figuur 4.2 Relatieve areaalverdeling (in procenten van bekkenoppervlak) in de Waddenzee van 1989 tot 2023 zoals weergegeven in de DSR met variabele wantijen en een ruimtelijk variërend GHW-GLW veld, gemiddeld over 19 jaar. Let op dat voor Groninger Wad en Eems-Dollard nog geen bodemdata in de laatste vaklodingscyclus beschikbaar is; data voor deze bekkens gaat tot 2017.

5 Conclusies en aanbevelingen

In dit rapport zijn verschillende methoden besproken om diepteklassen en kombergingsgebieden te begrenzen, met als doel om tot een eenduidige areaalberekening te komen. Ook is er een gevoeligheidsanalyse gedaan op de methodologische alternatieven. Het doel van dit rapport is om tot een aanbeveling te komen voor een voorkeursmethodologie voor de DSR en andere morfologische studies, waarbij arealen een indicator zijn in de analyse van morfologische ontwikkeling.

De keuze voor een begrenzing hangt sterk af van de informatie waarnaar gezocht wordt. Voor verschillende toepassingen kunnen andere begrenzingen zinvol zijn. Uit deze studie blijkt dat de gebruikte methode een grote invloed heeft op de gevonden oppervlakten en trends. Voor alle toepassingen waarbij arealen worden gedefinieerd is het daarom essentieel om een goed inzicht te krijgen in de impact van de gekozen methodiek op de resultaten.

Voor morfologische toepassingen is het belangrijk om de lange-termijn trends (tijdschaal decennia) te vangen, en de ontwikkeling in het perspectief te plaatsen van het systeemgedrag van het bekken. Hiervoor is het wenselijk dat langjarige veranderingen in hoog- en laagwaterstanden en bekkenoppervlak worden meegenomen, zodat ontwikkelingen kunnen worden geduid in de context van zeespiegelstijging en veranderende getijslag, en informatie geven over toe- of afnemende kombergingsgebieden.

Met deze toepassing in het achterhoofd worden de volgende aanbevelingen gedaan voor het begrenzen van arealen in de Waddenzee:

- **Overstap van vaste (+/- 1 m NAP) verticale grenzen voor het intergetijdegebied naar getijslag (GHW/GLW veld) is een wezenlijke verbetering.** De verschillen in intergetijdegebied tussen vaste en ruimtelijk variërende verticale grenzen kunnen oplopen tot 40%. De methode waarmee dit veld bepaald wordt (ruimtelijke interpolatie of een modelsimulatie) blijkt weinig uit te maken voor de arealen. In het kader van reproduceerbaarheid en eenvoud geniet een ruimtelijke interpolatie de voorkeur.
 - Momenteel worden de GHW en GLW kaarten op basis van ruimtelijke interpolatie enkel gebaseerd op Nederlandse meetstations. Hiervoor vindt in de Eems-Dollard extrapolatie van waterstanden langs een lijn plaats in plaats van interpolatie binnen een driehoek (zie Bijlage A.1). De waterstanden in de Eems-Dollard zouden verbeterd kunnen worden door data van Duitse meetstations mee te nemen.
- **Jaarlijkse variaties in waterstanden zijn significant en kunnen de arealen sterk beïnvloeden.** Afhankelijk van het bekken kan het absolute verschil in intergetijdegebied door de keuze van het jaar oplopen tot 10%. Wanneer hier niet zorgvuldig mee omgegaan wordt bestaat het risico dat een weergegeven trend wordt gedomineerd door verschillen in waterstanden in plaats van morfologische veranderingen. Het gebruik van een langjarig gemiddelde biedt een praktische oplossing om met deze gevoeligheid om te gaan en een waterstand te genereren die representatief is voor de langetermijntrends. Dit gemiddelde is gevoelig voor de gekozen middelperiode. **Om de langetermijntrends te isoleren en waterstandsfluctuaties gegenereerd door de nodale cyclus uit te filteren is een middeling over 19 jaar nodig** (op basis de getijperiode van de nodale cyclus van 18,6 jaar, dit wordt afgerond naar 19 jaar om een middeling mogelijk te maken).
 - Bij toepassingen waarbij waterstanden worden gebruikt voor areaalbepaling zoals de ecotopenkaart is voorzichtigheid geboden bij het gebruik van jaarlijkse waterstanden. Het risico bestaat dat ogenschijnlijke areaalveranderingen in werkelijkheid worden veroorzaakt door

waterstandsfluctuaties. Het is belangrijk om ervan bewust te zijn dat gemiddelde waterstanden van jaar op jaar verschillen met een ordegrrootte van 5 tot 10 cm. Er moet een bewuste keuze gemaakt worden of arealen worden berekend ten opzichte van de waterstanden in een specifiek jaar (bijvoorbeeld het areaal dat in jaar X daadwerkelijk droogviel) of een waarde representatief voor de langetermijn trend. Hierbij moet in acht genomen worden dat bodemhoogte slechts 1x in de 6 jaar wordt opgenomen: het weergeven van de arealen 'per jaar' met jaarlijkse waterstanden creëert een schijnnaauwkeurigheid omdat de tussenliggende morfologische veranderingen vaak niet bekend zijn (met uitzondering van gebieden waar vaargeulonderhoud plaatsvindt, die lokaal met frequentere 'beheerlodingen' worden ingemeten).

- **Voor de horizontale begrenzing heeft het werken met veranderende wantijen, die recht doen aan migratie, de voorkeur als standaardoptie.** Voor sommige gebruikersvragen kan een vaste begrenzing echter relevant zijn om bodemhoogteveranderingen te kunnen isoleren en los van wantijmigratie te beschouwen.

Referenties

Bouma, H., de Jong, D. J., Twisk, F., & Wolfstein, K. (2005). Zoute wateren EcotopenStelsel (ZES.1). Middelburg: RIKZ.

Cleveringa, J. (2024). Kennisvragen baggeren en verspreiden van sediment in de Waddenzee, Verkenning in het kader van uitvoeringsprogramma UP23 “Ecosysteemgericht baggeren in de Waddenzee”. Fase 1. Rapport 2023-03, Waddenacademie, Leeuwarden

De Wit, L., Grasmeijer, B., van Kessel, T., Dees, N. Meijers, C., & Quataert, E. (2024). Abiotische effecten baggeren en verspreiden in de Waddenzee. Voorbereidende studie voor het opstellen van het tweede natura2000 beheerplan Waddenzee. Deltares rapport 11210370-014-ZKS-0001.

Elias, E., Colina Alonso, A., van Maren, B. (2021). Morfologische veranderingen Eems-Dollard en Groninger Wad. Deltares; Delft.

Elias, E. (2024). Bodemkaarten van de Waddenzee: een overzicht van data en bodemkaarten: werkdocument versie 1 – 2024. Deltares rapport 11210266-015.

Elias, E. (2025). Morfologische analyse Centrale Waddenzee. Een analyse van de kombergingen van het Amelanders Zeegat en Friesche Zeegat.

Elias, E. (2025a). Morfologische Analyse Centrale Waddenzee. Een verdiepende studie van het Amelanders Zeegat.

Eysink, W. D. (1990), Morphologic response of tidal basins to changes, paper presented at Coastal Engineering Conference, Am. Soc. of Civ. Eng., Delft, Netherlands.

Friedrichs, C. T., and D. G. Aubrey (1996), Uniform bottom shear stress and equilibrium hypsometry of intertidal flats, in Mixing in Estuaries and Coastal Seas, Coastal and Estuarine Stud., vol. 50, edited by C. Pattiaratchi, pp. 405–429, AGU, Washington, D. C.

Meijers, C.H. (2024) Kombergingsrapportage Vlie. Delft; Deltares.

Nederhoff, K., Smits, B., Wang, Z.B. (2017). KPP Waddenzee Kennisontwikkeling morfologie en Baggerhoeveelheden. Data analyse hypsometrie en getij. Delft; Deltares.

Paree, E., Kers, A. S., Jentink, R., Hendriks, J.-R., & Baptist, M. J. (2021). Toelichting op de zoute ecotopenkaart Waddenzee 2017. Rijkswaterstaat.

Paree, E., Kers, A.S., Jentink, R., Baptist, M.J. (2025). Toelichting op de zoute ecotopenkaart Waddenzee Eierlandse Amelanders zeegat 2023. Rijkswaterstaat CIV; Wageningen Marine Research (WMR).

Quataert, E., Meijers, C., de Beer, A., Elias, E. (2024). Knelpuntanalyse Harlingen – Noordzee: Conceptueel model en handelingsperspectief voor knelpunten in de vaargeul Harlingen – Noordzee. Delft; Deltares.

Rappoldt, C., Roosenschoon, O.R., van Kraalingen, D.W.G. (2024). InterTides 2 ; maps of the intertidal by interpolation of tidal gauge data. EcoCurves rapport 34, EcoCurves BV, Haren. Updated document, version June 2024. 102 p.

Smits, B., Nederhoff, K. (2018). Meso schaal volumebalans Westelijke Waddenzee. Delft; Deltares.

van Donk, S., & Baptist, M. (2021). Validatie van het Zoute wateren EcotopenStelsel (ZES.1) in de Waddenzee. Den Helder: Wageningen Marine Research.

Van Weerdenburg, R., Hanssen, J. (2023). Modelleren van droogvalduur in de Waddenzee met D-Flow FM. Delft: Deltares.

Waddenacademie (2024) Tijdelijk minder baggeren in vaargeul Boontjes: natuur krijgt adempauze. 12-12-2024. <https://waddenvereniging.nl/nieuws/tijdelijk-minder-baggeren-in-vaargeul-boontjes-natuur-krijgt-adempauze/>. Bezocht 14-11-2025.

Wagenaar, M. (2024) Derivation morphological tidal divides of the Wadden Sea. Memo/stageverslag.

A Ruimtelijke interpolatie GHW en GLW

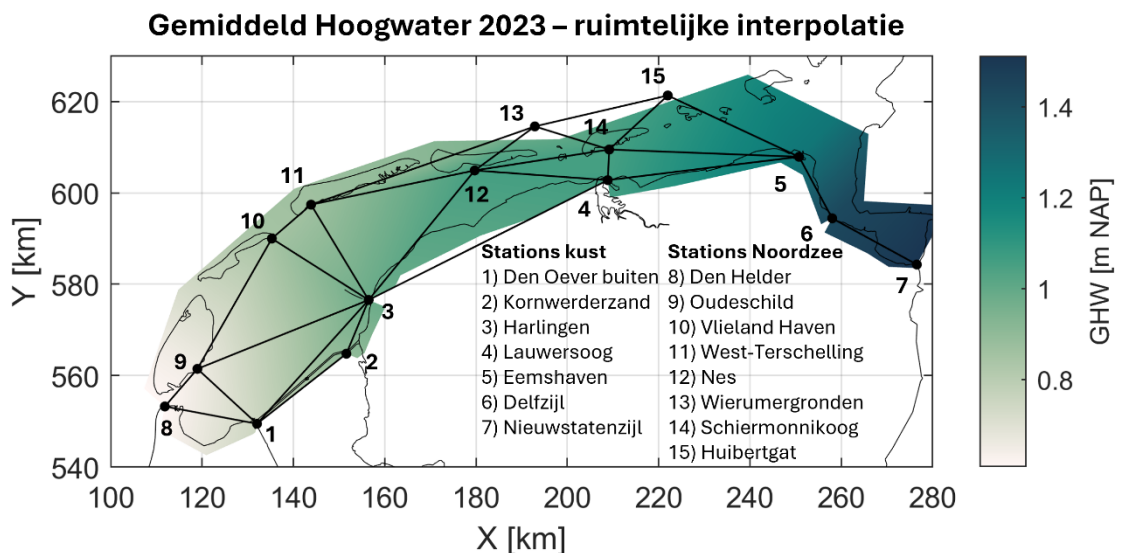
A.1 Ruimtelijke interpolatie

Een Gemiddeld Hoogwater (GHW) en Gemiddeld Laagwater (GLW) kaartlaag voor de Waddenzee wordt geconstrueerd met behulp van ruimtelijke driehoeksinterpolatie. Als basis worden de GHW en GLW waarden van 15 waterstandsstations rondom de Waddenzee (op de eilanden en langs de vastelandskust) gebruikt. Tabel A-1 geeft een overzicht van de gebruikte waterstandsstations en de Rijksdriehoekscoördinaten van elk station.

Deze ruimtelijke interpolatie is afgeleid van het model InterTides. Deze bestaat, binnen de Waddenzee, uit een combinatie van interpolatie binnen een driehoek en extrapolatie langs één of meerdere lijnsegmenten. Interpolatie gebeurt tussen dezelfde waterstandsstations als bij InterTides, en op basis van dezelfde driehoeken en lijnsegmenten. Dezelfde driehoeken zijn gebruikt. Bijlage A.3 beschrijft de verschillen tussen de InterTides waterstandsvlakken en de kaarlagen gegenereerd in deze studie.

De waterstanden worden geïnterpoleerd op het vaklodings grid (20 x 20 km) zodat ieder punt in de bodemkaart een bijbehorende waterstand krijgt (Figuur A-1). Het gebied binnen een driehoek wordt geïnterpoleerd met behulp van barycentrische coördinaten. De waterstand op een willekeurig punt binnen de driehoek wordt hierbij bepaald als een gewogen gemiddelde van de waterstanden op de drie hoekpunten waarbij de afstand tot elk van de drie hoekpunten de weging bepaalt, zoals beschreven in paragraaf 5.2 in Rappoldt et al. (2024).

Langs een lijnsegment vindt extrapolatie plaats van de waterstanden op de hoekpunten van de lijnen, haaks op de lijn. Indien twee lijnsegmenten onder een hoek aan elkaar grenzen (bijvoorbeeld lijnsegment 15 – 5 – 6 of segment 5 – 6 – 7 in Figuur A-1) is deze extrapolatie onder een rechte hoek ten opzichte van het lijnsegment niet afdoende: in het geval van lijnsegment 15 – 5 – 6, waarbij de hoek tussen lijnsegment 15 – 5 en 5 – 6 meer dan 180 graden is zou er een leeg stuk overblijven in het midden. In het geval van lijnsegment 5 – 6 – 7, waarbij de hoek tussen lijnsegment 5 – 6 en 6 – 7 minder dan 180 graden is zou er in het midden een stuk dubbel geïnterpoleerd worden, met een abrupte sprong in waterstanden als gevolg. In deze situaties wordt de hoek tussen de lijnsegmenten in twee gelijke stukken gedeeld middels een bissectrice. Vervolgens wordt de waterstand op de hoekpunten geprojecteerd over deze bissectrice, waardoor het waterstandsverloop tussen punt A en B ofwel wordt 'uitgerekt' (in het geval van een hoek > 180 graden) ofwel ingekort (bij een hoek < 180 graden), zoals beschreven in paragraaf 5.4 in Rappoldt et al. (2024).



Figuur A-1 GHW vlak voor 2023 op basis van ruimtelijke interpolatie. De genummerde stippen geven de gebruikte waterstandsstations. De zwarte lijnen geven de driehoeken waarbinnen is geïnterpoleerd en lijnsegmenten waarbuiten is geëxtrapoleerd.

Tabel A-1 Overzicht van gebruikte waterstandsstations in de interpolatie en hun locaties (in Rijksdriehoekskoördinaten [m]). * Voor station Nieuw Statenzijl is een extra correctie op de laagwaterstanden uitgevoerd, zie A.2.

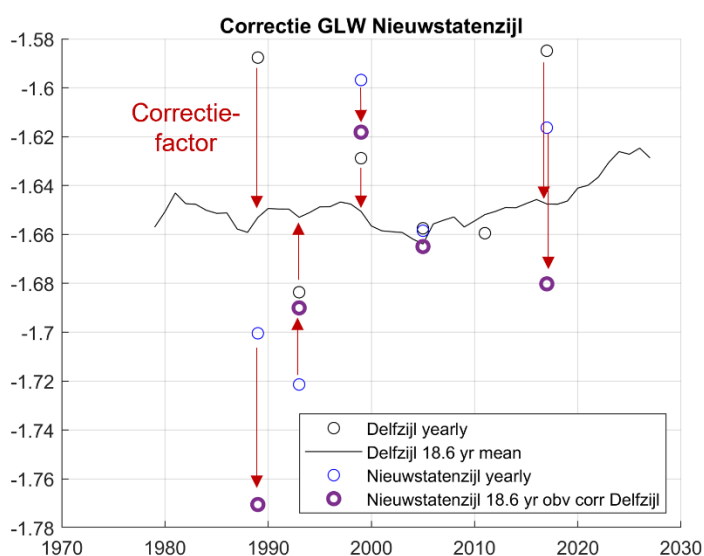
Naam	X	Y
Den Helder	111850	553230
Oudeschild	118980	561460
Den Oever	132030	549440
Vlieland Haven	135280	590000
West-Terschelling	143870	597420
Kornwerderzand	151610	564780
Wierumergronden	192882	614562
Harlingen	156480	576550
Nes	179707	604916
Lauwersoog	208850	602790
Schiermonnikoog	209170	609500
Huibertgat	221990	621330
Eemshaven	250750	607900
Delfzijl	258000	594430
Nieuw Statenzijl*	276540	584310

A.2 Correctie Nieuw Statenzijl

De waterstandsdata afkomstig van <https://waterinfo.rws.nl> bevat een afwijking voor de laagwaters bij meetstation Nieuw Statenzijl. Het meetstation bevindt zich naast een spuisluis waar met laagwater vaak gespuid wordt. Tijdens het spuien worden hierdoor de laagwaterstanden bij Nieuw Statenzijl overschat.

Voor de InterTides kaarten wordt een uitgebreide harmonische correctie toegepast waarbij per getijcyclus wordt geanalyseerd of het getijsignaal afwijkt door het spuien. Deze getijcycli worden vervolgens gecorrigeerd op basis van harmonische analyse (Rappoldt et al., 2024).

Voor de gereconstrueerde kaarten is een versimpelde correctie toegepast voor de jaarlijkse GLW waarden op basis van het gemiddeld laagwater in Delfzijl. Voor de jaren waarvoor een InterTides kaartlaag beschikbaar is, is de waterstand bij Nieuw Statenzijl uit de InterTides kaart gehaald. Er is echter niet voor alle jaren een InterTides kaartlaag beschikbaar, waardoor op deze wijze geen lopend gemiddelde kan worden berekend. Daarom wordt een correctiefactor op de jaarlijkse data toegepast om tot een waarde te komen die het 19-jarig gemiddelde representeert. Deze correctiefactor wordt bepaald aan de hand van station Delfzijl, uitgaande van het principe dat de meteorologische effecten in Delfzijl vergelijkbaar zullen zijn met Nieuw Statenzijl. De correctiefactor wordt vastgesteld op basis van het verschil tussen de waarde in jaar X en het lopend gemiddelde in jaar X voor Delfzijl (rode pijlen in Figuur A-2). Als in jaar X het gemiddeld laagwater in Delfzijl hoger is dan het langjarig gemiddelde, zal de correctiefactor de waterstand ook in Nieuw Statenzijl omlaag bijstellen om tot een langjarig gemiddelde in Nieuw Statenzijl te komen.



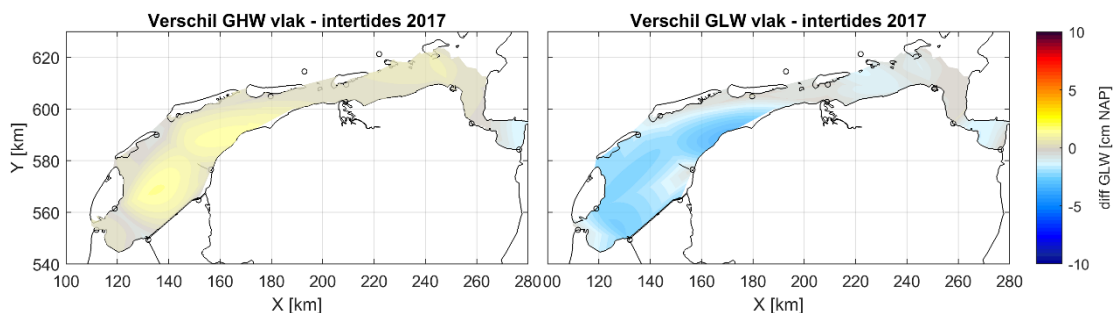
Figuur A-2 Het principe achter de correctiefactor voor Nieuw Statenzijl. De jaarlijkse waterstand en het langjarig gemiddelde voor Delfzijl zijn in zwart aangegeven. Het verschil tussen de twee bepaalt de correctiefactor (rode pijl). Vervolgens wordt de waterstand in Nieuw Statenzijl (blauwe stip; afkomstig uit de InterTides kaarten voor specifieke jaren) met eenzelfde correctie omgezet naar een waarde representatief voor het 19-jarig gemiddelde (dikgedrukte paarse stip).

A.3 Vergelijking InterTides

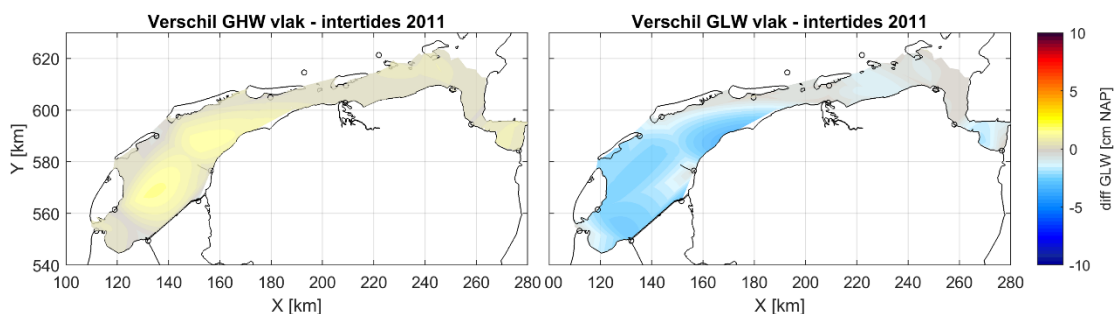
Voor de jaren waarvoor een gedownloade InterTides kaartlaag beschikbaar was is een vergelijking uitgevoerd tussen de geïnterpoleerde GHW en GLW vlakken uit deze studie en de InterTides waarden. Voor de meeste jaren en waterstandsstations komen de GHW en GLW waarden op de stations goed overeen. In de driehoeksinterpolatie tussen de stations lijken kleine verschillen te zitten: de waterstanden op het intertides vlak lijken een iets meer bolle vorm te hebben, waardoor de in deze studie gegenereerde waterstanden voor hoogwater enkele centimeters hoger liggen dan de InterTides waarden, en de laagwaters enkele centimeters lager.

Beide interpolaties zijn een versimpelde versie van de werkelijkheid, doordat er een uniform vlak wordt opgespannen tussen meetstations in diep water, waarbij lokale waterstandsverschillen (oa. door vertraagde afwatering) niet worden meegenomen. Deze

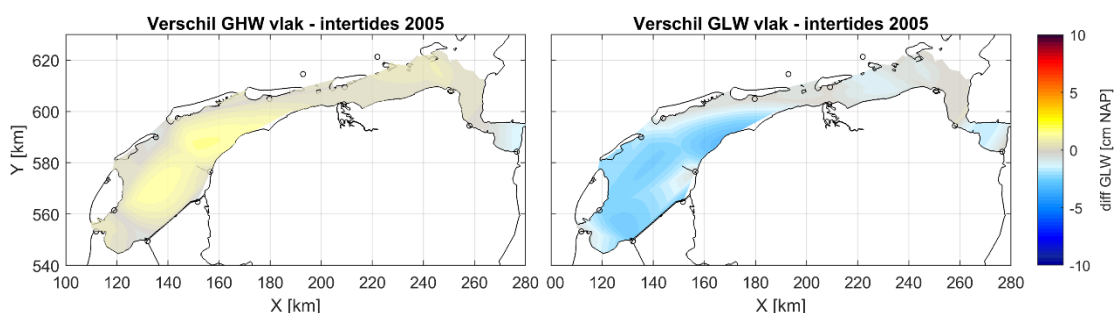
verschillen zijn van grotere orde dan de verschillen tussen de twee interpolaties. Omdat er weinig waterstandsmetingen centraal in de Waddenzee beschikbaar zijn is niet te zeggen welke interpolatiemethode dicht bij de waarheid zit (bovendien zal dit waarschijnlijk ruimtelijk verschillen).



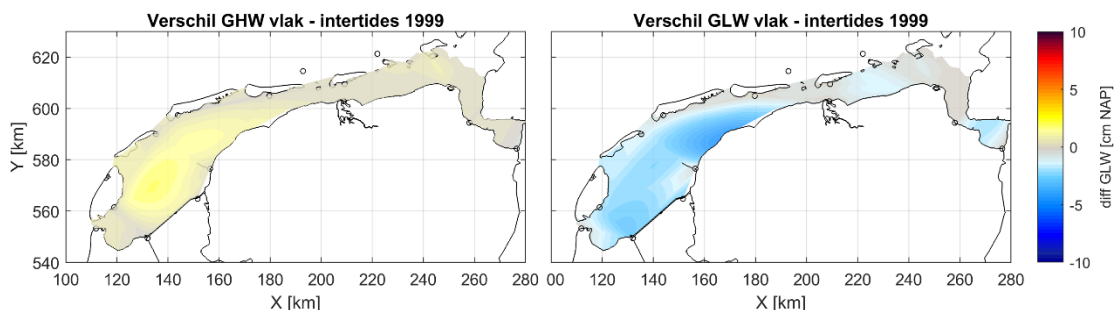
Figuur A-3 Vergelijking GHW vlak (links) en GLW vlak (rechts) tussen de interpolatie uitgevoerd in deze studie en de InterTides kaartlaag voor 2017. Het GHW vlak is enkele centimeters hoger en het GLW vlak enkele centimeters lager vergeleken met InterTides.



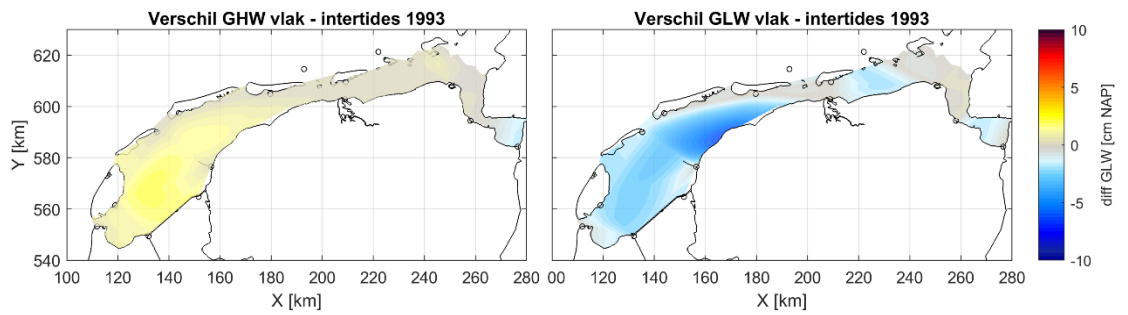
Figuur A-4 Vergelijking GHW vlak (links) en GLW vlak (rechts) tussen de interpolatie uitgevoerd in deze studie en de InterTides kaartlaag voor 2011.



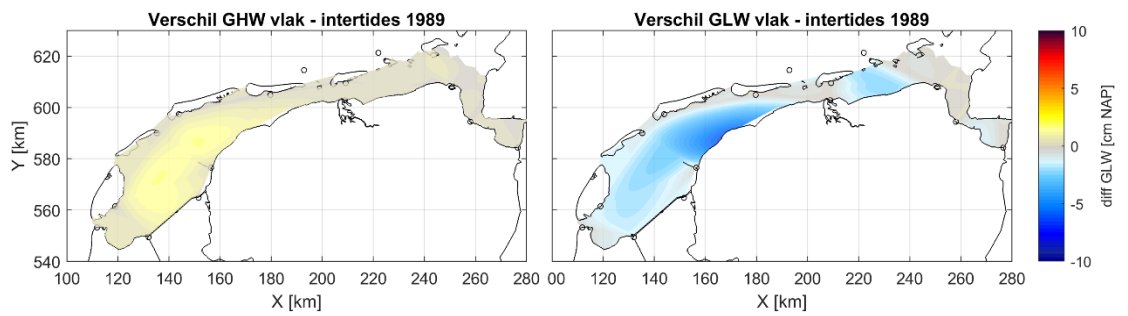
Figuur A-5 Vergelijking GHW vlak (links) en GLW vlak (rechts) tussen de interpolatie uitgevoerd in deze studie en de InterTides kaartlaag voor 2005.



Figuur A-6 Vergelijking GHW vlak (links) en GLW vlak (rechts) tussen de interpolatie uitgevoerd in deze studie en de InterTides kaartlaag voor 1999.



Figuur A-7 Vergelijking GHW vlak (links) en GLW vlak (rechts) tussen de interpolatie uitgevoerd in deze studie en de InterTides kaartlaag voor 1993.

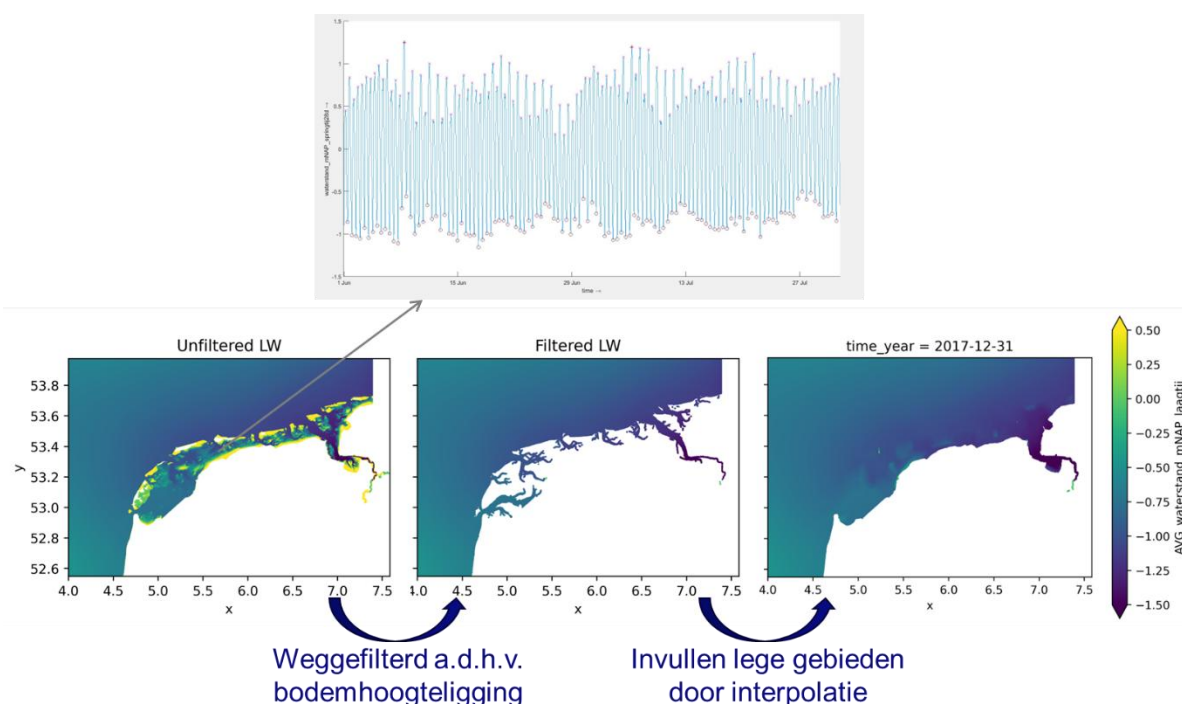


Figuur A-8 Vergelijking GHW vlak (links) en GLW vlak (rechts) tussen de interpolatie uitgevoerd in deze studie en de InterTides kaartlaag voor 1989.

B Methode D-Flow FM kaartlagen

B.1 Methodebeschrijving

Er zijn vier stappen doorlopen om GLW- en GHW-kaarten te maken met D-Flow FM. Deze zijn gevisualiseerd in Figuur B-1 en worden hieronder toegelicht. Er is gebruikt gemaakt van de 2D Dutch Wadden Sea-modelschematisatie met een resolutie van 100 m (DWSM-100m). Dit is dezelfde modelschematisatie die gebruikt is in van Weerdenburg en Hanssen (2023), maar nu uitgevoerd voor een volledig jaar in plaats van een periode van drie maanden. Het jaar 2017 is gekozen als simulatieperiode, omdat het het meest recente jaar is waarvoor Vakkodingsdata voor de gehele Waddenzee beschikbaar zijn en omdat het jaar ook in InterTides is gebruikt. Voor meer informatie over de modelopzet en validatie wordt verwezen naar van Weerdenburg en Hanssen (2023).

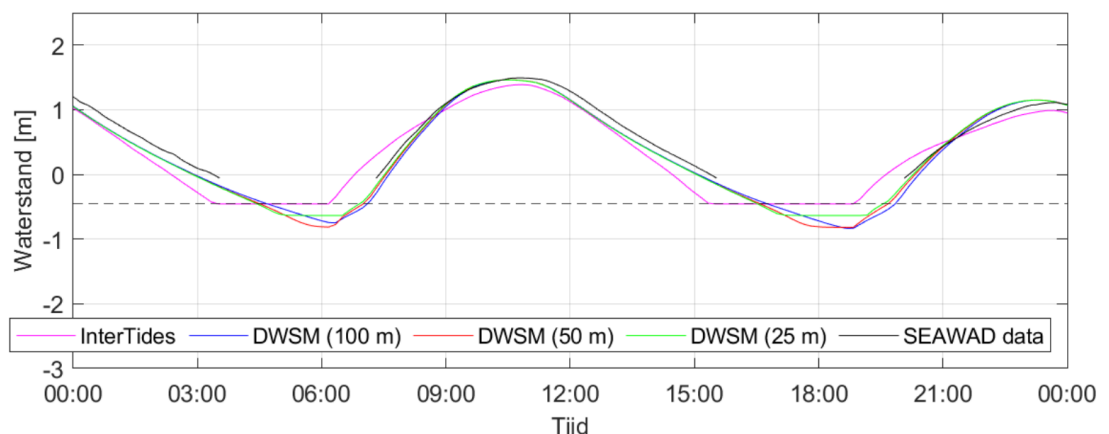


Figuur B-1 Methode bepaling laagwaterkaarten op basis van D-Flow FM. (1) Voor elke cel is met behulp van een `find_peaks` functie vastgesteld wat de GLW en GHW was voor 2017 (linker paneel), (2) artefacten op droogvallende gebieden zijn gefilterd, (3) de missende droogvallende gebieden zijn weer opgevuld met interpolatie.

1. **Bepaling lokale GLW- en GHW waarden:** Voor elke roostercel in het modeldomein zijn de GLW en GHW bepaald met gemodelleerde waterstandtijdseries. Deze waren beschikbaar voor het volledige jaar 2017 met een uitvoerresolutie van 1 uur. De GLW/GHW-waarden zijn berekend door respectievelijk alle laagwaters en hoogwaters uit de tijdseries te middelen. Deze extremen zijn geïdentificeerd met een piekdetectie-algoritme uit de D-Eco Impact tool, gebaseerd op `signal.find_peaks` van SciPy. Het linker paneel in Figuur 2.6 laat zien dat de resulterende GLW-kaart reliëfrijk is. Dit komt doordat het lokale GLW-peil op droogvallende plaatgebieden hoger ligt dan in de omgeving door vertraagde afwatering. Hoewel metingen in deze droogvallende gebieden beperkt zijn, laat een vergelijking met metingen van Kustgenese 2.0/SEAWAD (Figuur B-2) zien dat de waterstanden op de droogvallende plaatgebieden bij de wantijen van Terschelling en Ameland beter worden

gereproduceerd in de D-Flow FM modelresultaten dan met de InterTides kaarten (van Weerdenburg & Hanssen, 2023). Echter, omdat de GLW op droogvallende platen boven de bodemhoogte ligt is de ondergrens van het intergetijdegebied niet goed gedefinieerd en moet een 'schaduw'-laagwatergrens bepaald worden.

2. Wegfilteren droogvallende plaatgebieden: Om een nauwkeurigere ondergrens voor het intergetijdegebied te bepalen, zijn de droogvallende plaatgebieden uit de gemodelleerde GLW- en GHW-kaarten gefilterd (middelste paneel, Figuur B-1). Gebieden met een bodemligging boven een bepaalde drempelwaarde zijn hiervoor verwijderd uit de GLW- en GHW-kaarten. Hoe lager de drempelwaarde, hoe minder de artefacten van droogvallende gebieden de kaarten beïnvloeden.
3. Invullen missende gebieden door interpolatie: Om tot ruimte dekkende GLW- en GHW-kaarten te komen zijn de missende, droogvallende gebieden ingevuld met lineaire interpolatie. Er is in stap 2 gekozen voor een drempelwaarde van NAP -5 m, omdat dit leidt tot een vloeiend GLW- en GHW-vlak zonder veel lokale variatie en artefacten door droogval (rechter paneel, Figuur B-1). Deze drempelwaarde komt ook overeen met de typische bovengrens voor geulgebieden. Bovendien zijn de resulterende kaarten vergelijkbaar met die van hogere drempelwaarden, zoals NAP -2.5 m.
4. Projecteren op Vaklodings rooster: Tot slot zijn de D-Flow FM-kaarten (resolutie 100 m) geïnterpoleerd op het Vaklodings rooster (resolutie 20 m) om een consistente vergelijking met de bodemdata mogelijk te maken. Omdat de gradiënt tussen twee roostercellen minimaal is, is hierbij gebruikgemaakt van nearest-neighbour interpolatie.



Figuur B-2 Voorbeeld tijdseries SEAWAD metingen op het wantij van Ameland op 7 september 2017, vergeleken met InterTides (roze) en het gebruikte D-Flow FM model (blauw). Uit van Weerdenburg & Hansen (2023).

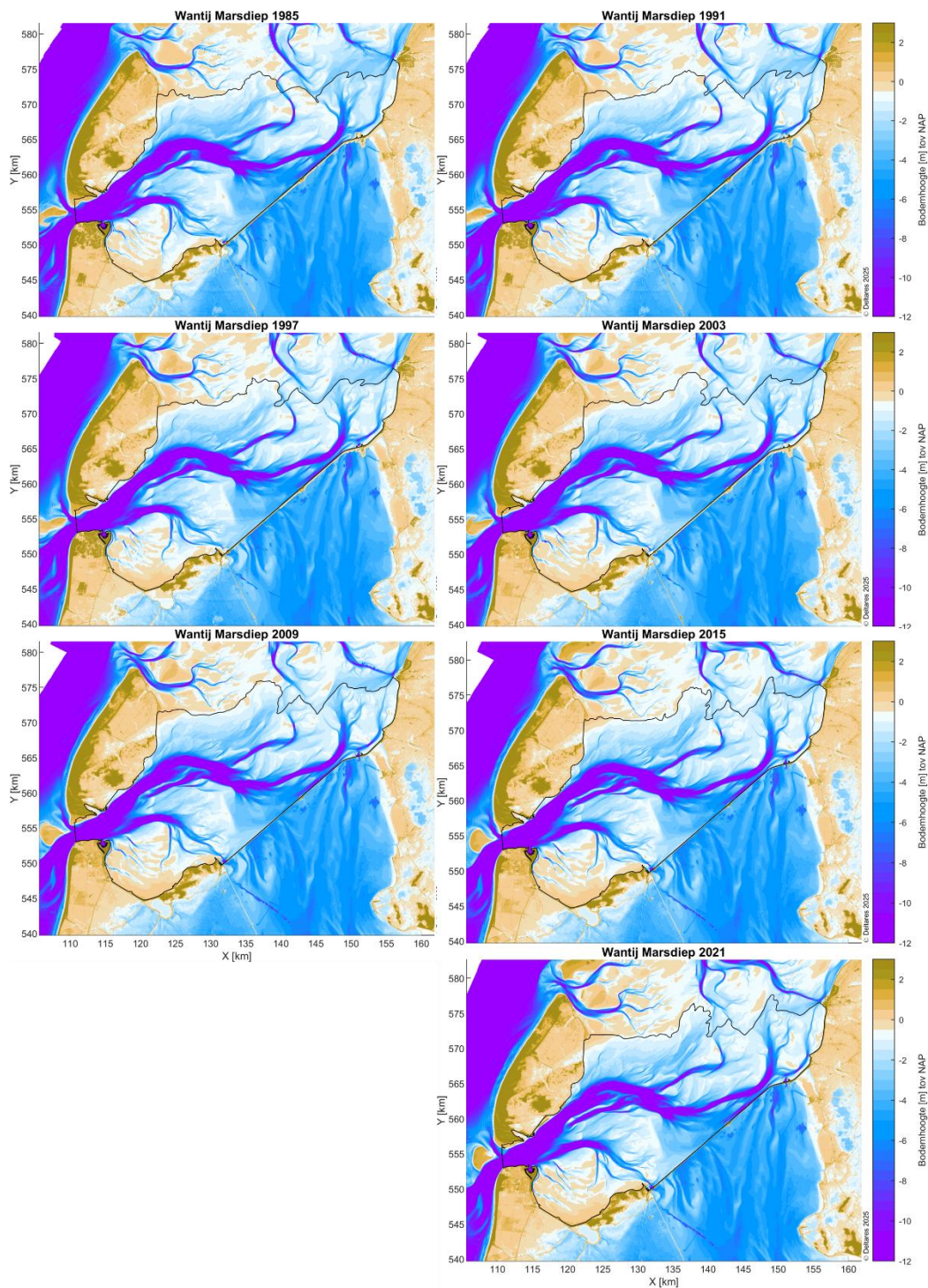
B.2 Vergelijking InterTides

Tabel B-1 GLW en GHW op basis van InterTides and D-Flow FM [m NAP] en het lokale verschil. Let wel: meetstations waarop InterTides gebaseerd zijn liggen enkel in relatief diepe delen, dus dit is geen validatie voor prestatie in ondiepere delen.

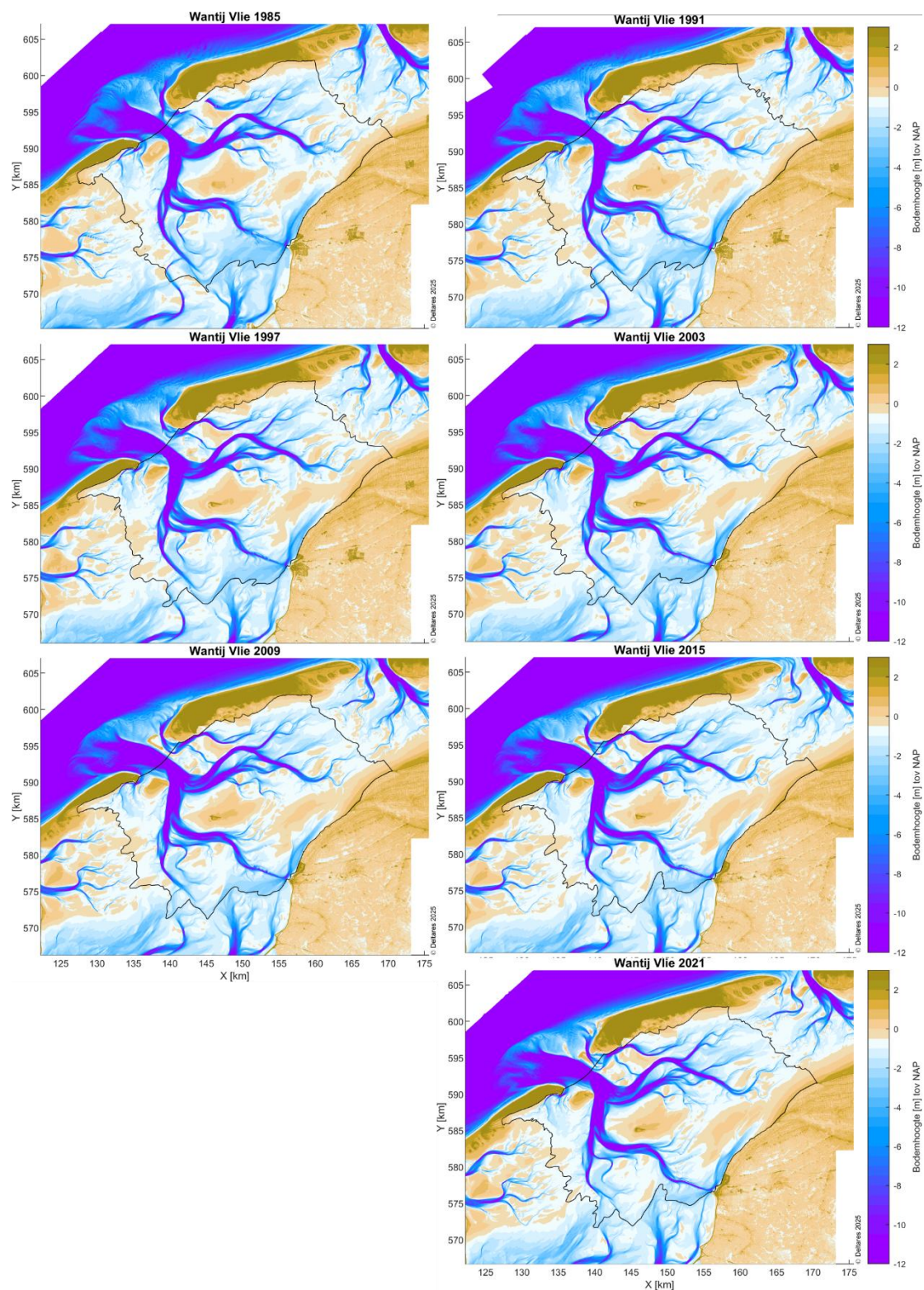
Station	GLW DFM	GLW InterTides	Vershil GLW [m]	GHW DFM	HW_intertides	Vershil HW [m]
<i>Den Helder</i>	-0.74	-0.73	-0.01	0.61	0.63	-0.01
<i>Oudeschild</i>	-0.73	-0.72	-0.01	0.69	0.67	0.01
<i>Vlieland haven</i>	-0.97	-0.93	-0.03	0.90	0.88	0.02
<i>West-Terschelling</i>	-0.93	-0.92	-0.01	0.91	0.89	0.02
<i>Nes</i>	-1.10	-1.10	0.00	1.13	1.09	0.05
<i>Schiermonnikoog</i>	-1.12	-1.18	0.06	1.11	1.08	0.03
<i>Den Oever buiten</i>	-0.78	-0.72	-0.06	0.79	0.78	0.02
<i>Kornwerderzand</i>	-0.82	-	-	0.97	-	-
<i>Harlingen</i>	-0.84	-0.90	0.05	1.05	1.02	0.03
<i>Lauwersoog</i>	-1.17	-1.18	0.01	1.13	1.09	0.04
<i>Eemshaven</i>	-1.30	-1.32	0.02	1.31	1.28	0.03
<i>Delfzijl</i>	-1.62	-1.58	-0.03	1.51	1.49	0.03
<i>Nieuw Statenzijl</i> *	-0.91	-1.61	0.71	1.64	1.61	0.03

C Begrenzing bekkens

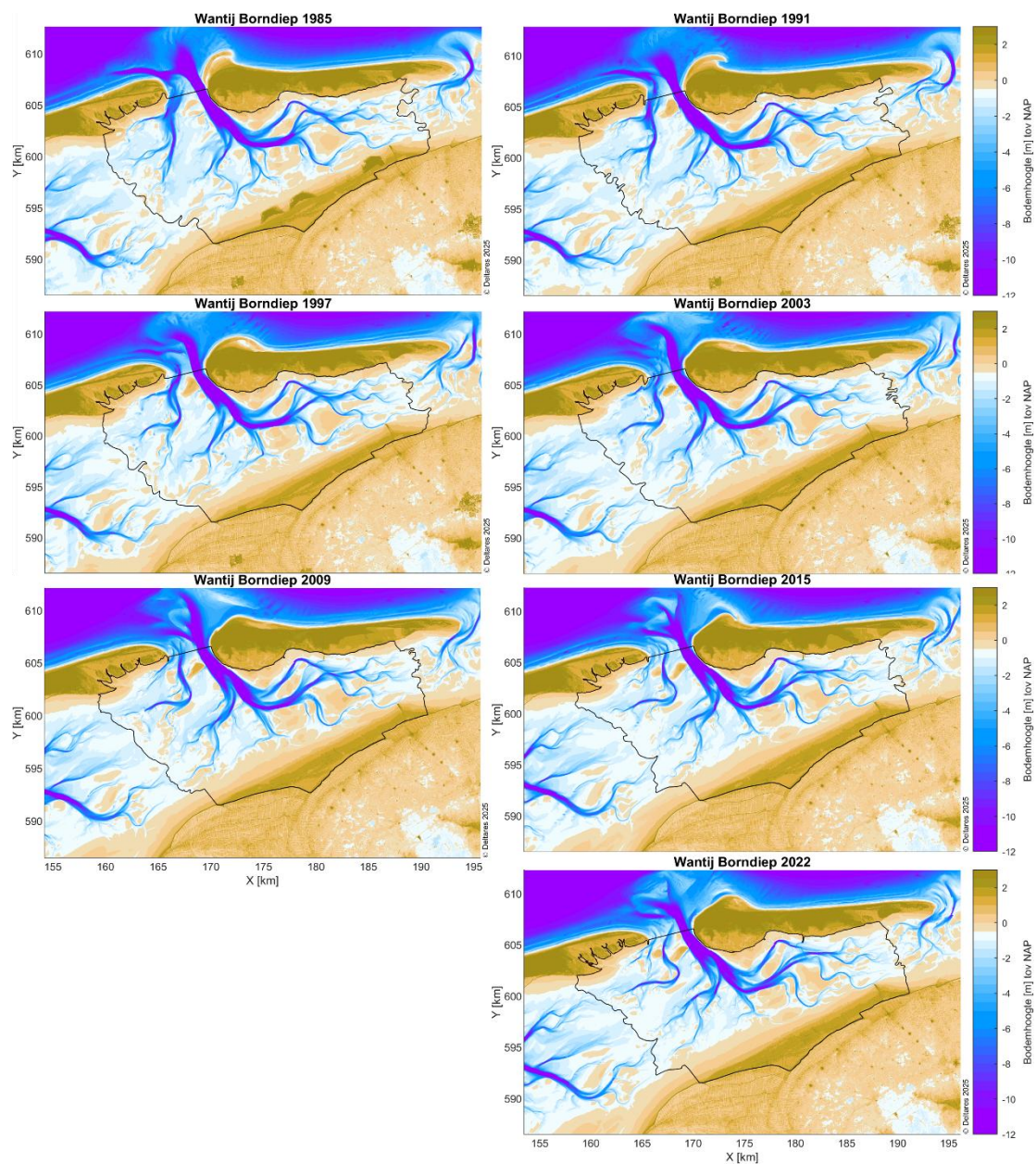
De bekkens worden begrensd door in de tijd variërende wantijen zoals bepaald door Wagenaar (2024) en Elias (2025). In deze bijlage wordt een overzicht gegeven van de ligging van deze begrenzingen voor alle gebruikte bodemkaarten.



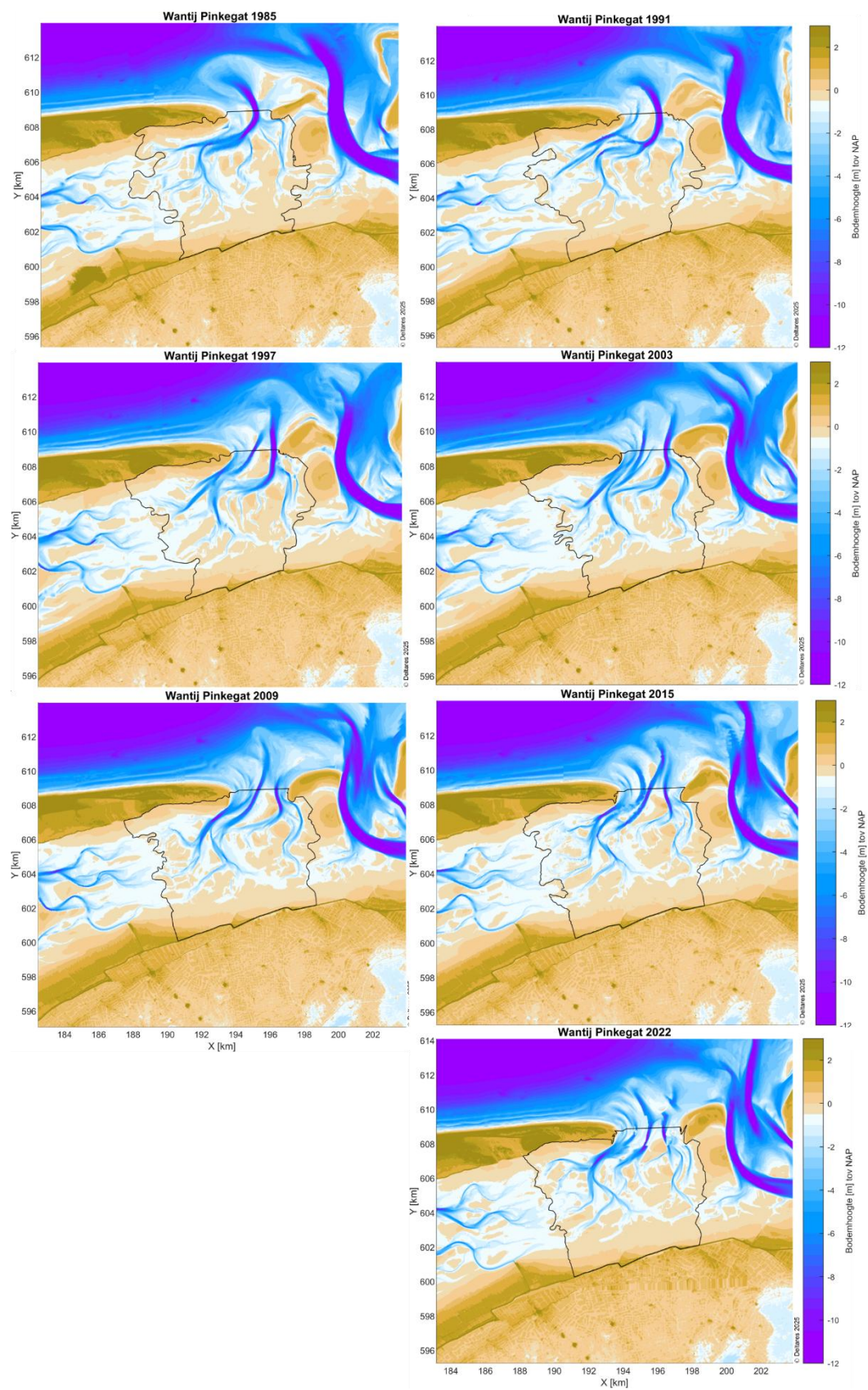
Figuur C-1 Begrenzing Marsdiep.



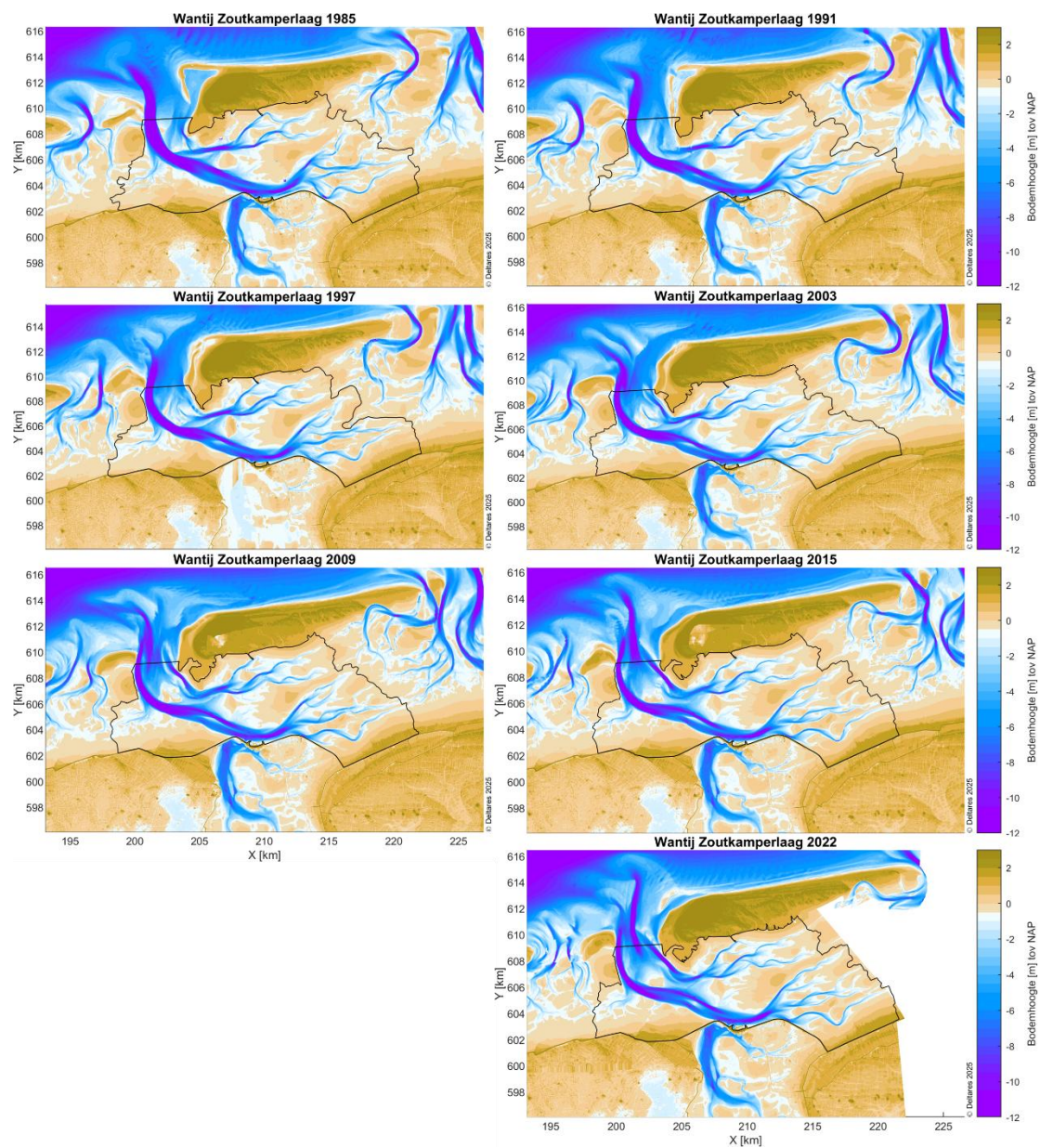
Figuur C-3 Begrenzing Vlie.



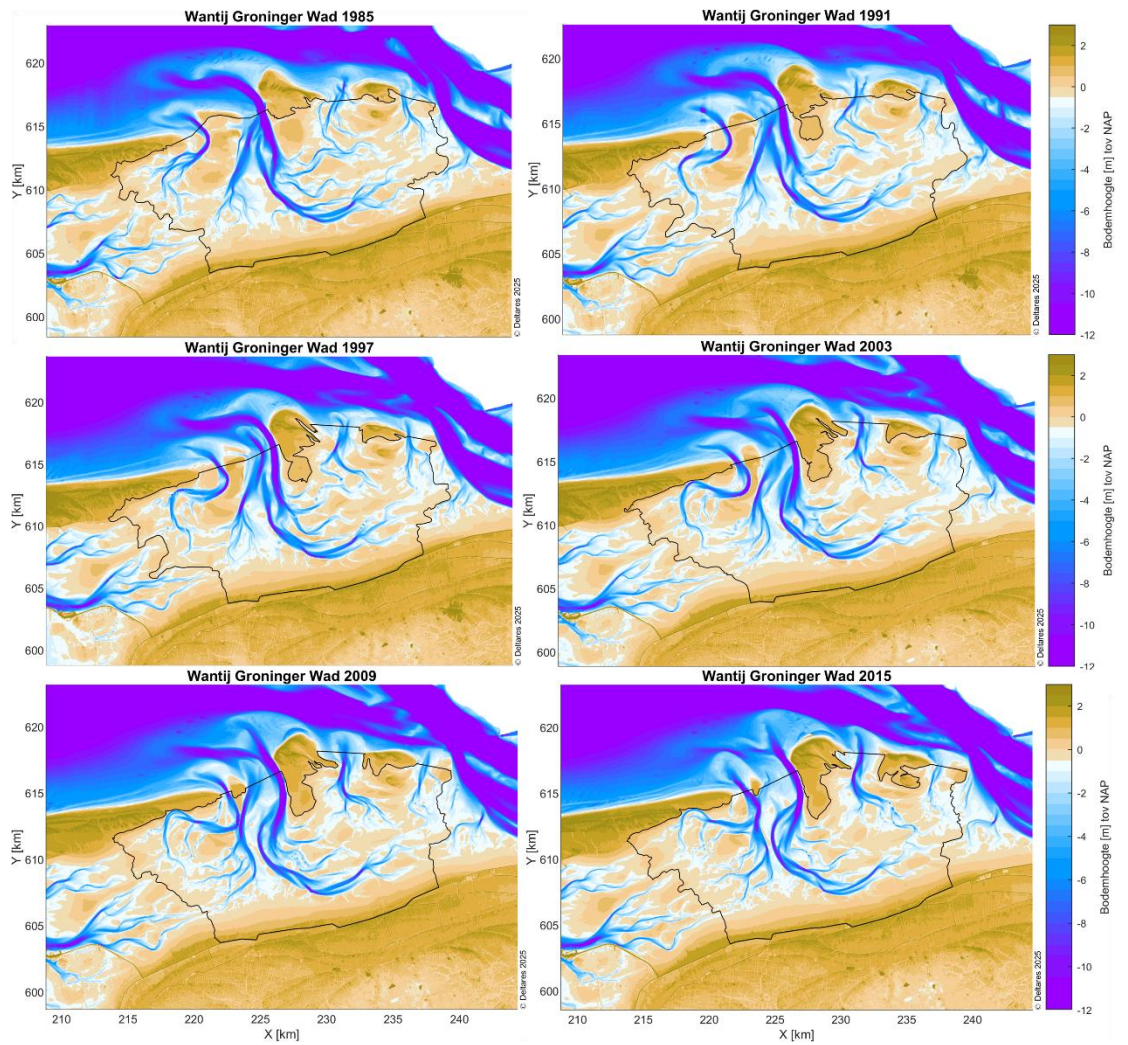
Figuur C-4 Begrenzing Borndiep.



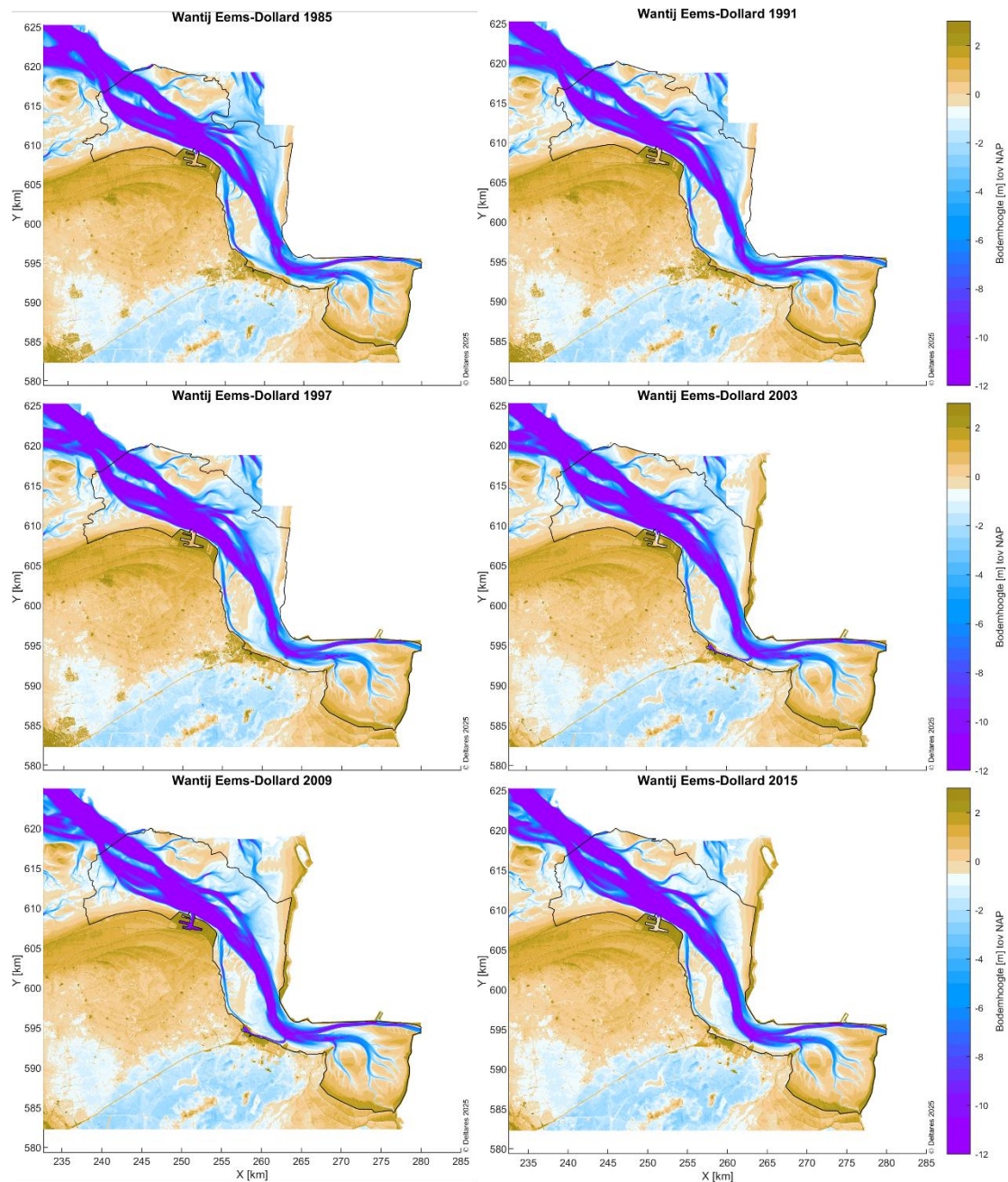
Figuur C-5 Begrenzing Pinkegat.



Figuur C-6 Begrenzing Zoutkamperlaag.



Figuur C-7 Begrenzing Groninger Wad.



Figuur C-8 Begrenzing Eems-Dollard.

D Notities expertdiscussie Morfologische Indicatoren Waddenzee

Datum: 20 maart 2024

Aanwezig: Zheng Bing Wang, Edwin Elias, Jelmer Cleveringa, Ernst Lofvers, Quirijn Lodder, Ellen Quataert, Jurre de Vries, Martijn klein Obbink, Jasper Dijkstra

Doel

Met een groep experts bepalen wat bruikbare, informatieve en transparante morfologische indicatoren voor de Waddenzee zijn. De aanleiding hiervoor is een diversiteit aan mogelijke indicatoren, die verschillen tussen bijvoorbeeld kombergingsrapportages, ecotopenkartering en digitale systeemrapportage (DSR), waar geen gedeelde onderbouwing voor bestaat.

Zeespiegelstijging

Zeespiegelstijging/waterstanden spelen een belangrijke rol in het bepalen van morfologische indicatoren maar de juiste manier van bepalen hoort thuis in een ander gremium. Het is wel van belang om te realiseren dat te bepalen morfologische indicatoren zeespiegelstijging meenemen.

Reflectie op lijst indicatoren op DSR

De huidige lijst van indicatoren op de DSR is in principe relevant, samenhangend en bruikbaar. Goed om te realiseren dat de hypsometrische curves (zowel op kombergings- of geulsysteem schaal) eigenlijk de basis vormen. De indicator 'arealen' – welk deel van de hypsometrische curve in een bepaalde hoogteklasse valt - vormt de basis voor afgeleide parameters als plaathoogte, plaatvolume, geuldiepte en geulvolume. Het doel van de bepaling van deze arealen is het signaleren en duiden van veranderingen en trends van morfologisch karakteristieke eenheden en heeft ook waarde voor de biotiek.

Discussie definitie arealen

Reflectie op huidige indeling

De huidige indeling, deels afkomstig uit de Westerschelde, lijkt voor de Waddenzee (met name Marsdiep) een categorie te missen, namelijk sublitorale geulen en sublitorale platen. Juist deze categorie is aan het verdwijnen. Door per areaal de hypsometrische curve te bepalen kun je deze wel laten zien.

Wadplaten en litoraal worden door elkaar gebruikt maar zijn eigenlijk verschillend. Het gebied dat nu als wadplaten wordt aangeduid kent juist ook veel kleine ondiepe geulen en die lijken op te vullen. Kunnen we dit proces terug zien in veranderingen in hypsometrische curves per areaal, per geulsysteem? (of komen we hier terecht in meetnauwkeurigheid?) Voor dit kleinere schaalniveau is nog geen definitief conceptueel model. Dit brengt wel aan het licht dat de huidige indeling alleen op diepte is gebaseerd, terwijl de functie er zeker ook toe doet. In WadSed wordt ook gekeken naar aspecten als het geulnetwerk, de helling en afstroming die daarover kunnen informeren.

Opties voor te gebruiken waterstanden

Ook de te gebruiken waterstanden zijn besproken: InterTides geeft duidelijk betrouwbaarder waarden dan driehoeksinterpolatie. Als we dit willen blijven gebruiken moet dit ook goed beheerd blijven worden (contact met CIV; Edwin Pree, Bas Kers). De recente studie van Roy van Weerdenburg en Jill Hanssen laat zien dat GHW, GLW en droogvalduur inmiddels ook goed met modellen te bepalen zijn -wel met ca 11% verschil in droogvalduur t.o.v. InterTides, wat dynamiek mist. Nadeel van modellen draaien is dat dit mogelijk opnieuw moet als een verbeterde bodem beschikbaar is. Nog geen overeenstemming over wat beter is.

Leg de resultaten met vaste referentieniveaus naast die met waterstandsvlakken. Zo kun je effecten van morfologie en hydrodynamiek los van elkaar beschouwen. Het is noodzakelijk bovenstaande concreter te maken door de verschillende methodes toe te passen op een kombergingsgebied. Het Vlie ligt hiervoor voor de hand; daar wordt nu aan komberginsrapportage gewerkt en met de ligging in het midden van de Waddenzee lijkt het redelijk representatief voor het geheel.

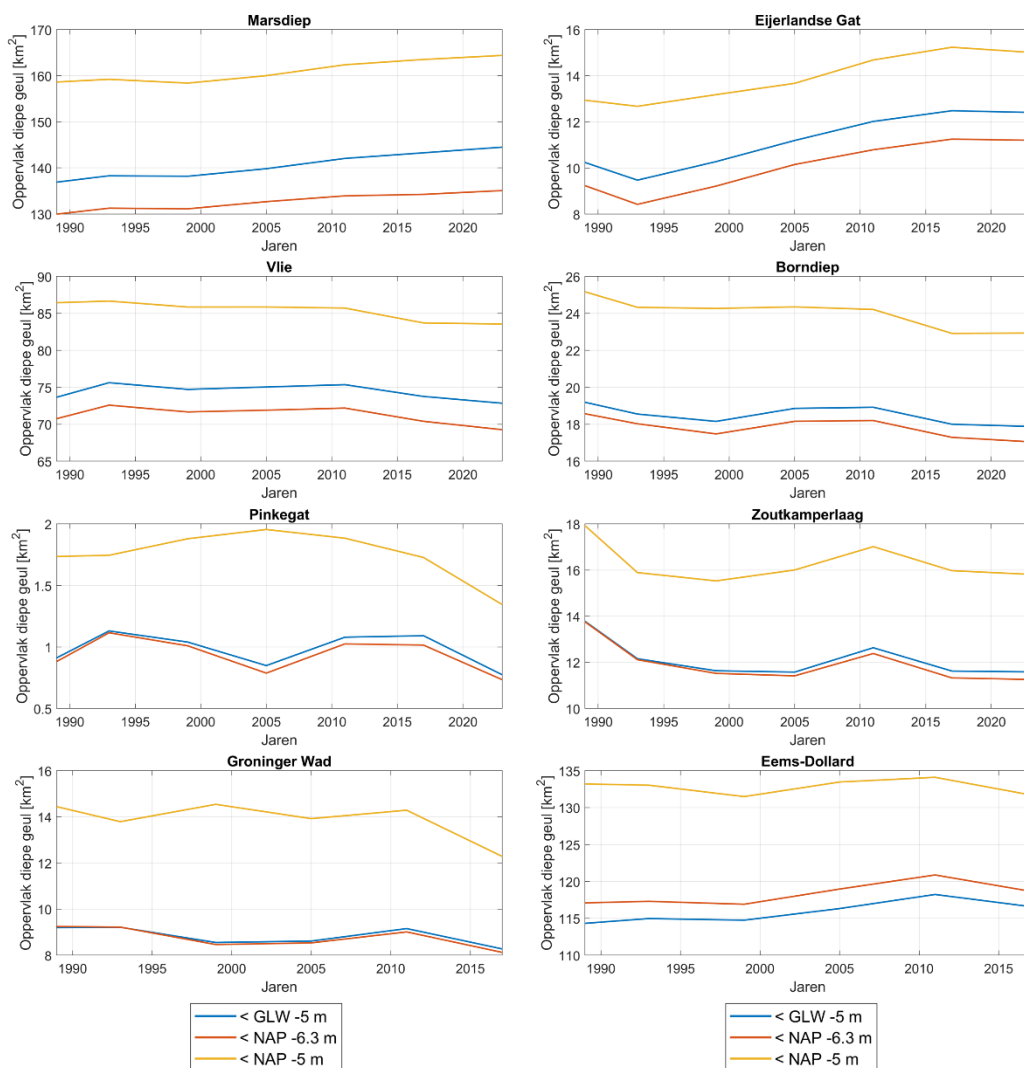
Overige punten

- Laat het supratidaal voorlopig buiten de berekeningen: dit is door de jaren heen op verschillende manieren – of niet – bepaald.
- Het is ook waardevol om de arealen in de ruimte (op kaart) te laten zien; waar verdwijnt iets, waar ontstaat iets?
- De Ecotopenkaart is weliswaar een belangrijk afgeleid product maar kan ook eigen analyses doen; een te sterke specificatie in deze richting beperkt de generieke toepasbaarheid. Rapport van Donker & Baptist (2021) 'Validatie van ecotopenstelsel op basis van van bodemdieren (SIBES)' biedt mogelijk ook nog aanwijzingen voor nuttige indelingen.
- Wees bewust van consequenties van fouten in het bronmateriaal (bodemdata, ook waterstanden); geef metdata mee (NB, wordt aan gewerkt naar aanleiding van opschonen bodems begin 2024 door Edwin, zie ook Elias (2024)).

E Gevoeligheid verticale afbakening diepe geul

Figuur E-1 toont het oppervlak diepe geul voor verschillende verticale begrenzingen. De gele lijn geeft de NAP -5 m contour aan, gebruikt in veel morfologische studies. De rode lijn geeft het geuloppervlak, gedefinieerd op de NAP -6,3 m contour, welke is gebruikt voor de ecotopenkaart 2017 (Paree et al., 2021). Het oppervlak diepe geul op basis van de -6,3 m is afhankelijk van het bekken 12 tot 45% kleiner dan met de NAP -5 m contour.

De blauwe lijn geeft het geuloppervlak wanneer de geulen worden afgebakend aan de hand van GLW -5 m, zoals is gedaan in de ecotopenkaart 2023 (Paree et al., 2025). Een belangrijke kanttekening hierbij is dat in de ecotopenkaart waarschijnlijk jaarlijks variërende waarden voor GLW aangehouden worden, en de blauwe lijn in werkelijkheid sterker zal fluctueren gedreven door waterstandsverschillen.



Figuur E-1 Oppervlak diepe geul voor verschillende begrenzingen gebruikt in de ecotopenkaart.

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