

Bodemdynamiek van de diepe onderwateroever

met oog op de -20 m NAP lijn



Bodemdynamiek van de diepe onderwateroever

met oog op de -20 m NAP lijn

Tommer Vermaas
Thaiënne van Dijk
Marc Hijma

1220034-003

Titel
Bodemdynamiek van de diepe onderwateroever

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	1220034-003	1220034-003-ZKS-0002	45

Trefwoorden
Kustfundament, morfodynamiek, -20 m NAP lijn

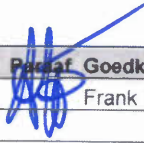


Samenvatting

Het Nederlandse kustbeleid is momenteel gebaseerd op het compenseren van een sedimenttekort als gevolg van zeespiegelstijging. De grens van het te onderhouden gebied is gebaseerd op het gebied dat geen significante hoeveelheid sediment uitwisselt met de gebieden daarbuiten op een termijn van 100-200 jaar. Momenteel wordt daarvoor de -20 m NAP lijn gehanteerd. In deze studie is onderzocht of deze diepte kan worden onderbouwd doormiddel van data analyse van offshore data van de Dienst der Hydrografie en data van het kustgebied van Rijkswaterstaat. Deze studie is een voortzetting van de *pilot* die is uitgevoerd door Van Dijk et al. (2014).

In 8 gebieden is de variatie van de verticale bodemdynamiek (een lineaire trend van de bodemhoogte in de tijd) en de range (het verschil tussen minimale en maximale bodemhoogte in de tijd) ten opzichte van de diepte geanalyseerd. Hoe dynamisch een gebied is hangt sterk samen met de morfologie van de gebieden: aanwezigheid van zandgolven zorgt voor grotere dynamiek.

De netto verandering voor een bepaalde diepte – ongeacht de mate van dynamiek – wordt weergegeven door de gemiddelde waarden in dynamiek en range. De dieptes tot -15 m NAP tonen een duidelijk andere gemiddelde dynamiek en range dan diepere gebieden. Er is een afname te zien naarmate de diepte toeneemt. Dieper dan -15 m NAP blijven de gemiddelde dynamiek en range vrijwel constant. De kustdata en offshore data sluiten meestal goed op elkaar aan, hoewel er verschillen te zien zijn waaraan de verschillen in data en dataverwerking waarschijnlijk ten grondslag liggen.

Op basis van de overgangsdiepte, -15 m NAP, zijn indicatief grenzen om het dynamische deel van de kust getrokken. Dit dynamische deel van de kust heeft een oppervlak dat 26% kleiner is dan het huidige kustfundament.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	nov. 2015	Tommer Vermaas		Ad van der Spek		Frank Hoozemans	
		Thaïenne van Dijk					
		Marc Hijma					

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Doel	1
2 Data en methoden	3
2.1 Data	3
2.2 Methoden	3
3 Resultaten	9
3.1 Inleiding	9
3.2 Bodemdynamiek kustvakken – uit Van Dijk et al. (2014)	9
3.3 Bodemdynamiek offshore	12
3.3.1 Westerschelde, Grevelingen en Haringvliet	12
3.3.2 Zuid-Holland en Texel	22
3.3.3 Noord-Holland	29
3.3.4 Ameland en Terschelling	33
3.4 Ondergrens dynamische deel van de kust	39
4 Conclusies	43
4.1 Ruimtelijke variatie in kwantitatieve bodemdynamiek Nederlandse kust	43
4.2 De rol van morfologie in de ruimtelijke variatie van bodemdynamiek	43
4.3 Is de -20 m NAP lijn een goede ondergrens voor het dynamische deel van de kust?	43
4.4 Aanbevelingen	44
Bijlage(n)	
Referenties	45

1 Inleiding

Het KPP-deelproject Bodemdynamiek valt onder het KPP-project Efficiënte Monitoring. Dit deelproject is opgesplitst in twee onderzoeken: dat in de kust- en offshoregebieden, en dat in de rivier de Waal. Dit rapport beschrijft de bevindingen van het onderdeel Bodemdynamiek Kust & Offshore 2015.

1.1 Achtergrond

Het Nederlandse kustbeleid is momenteel gebaseerd op het compenseren van een sedimenttekort als gevolg van zeespiegelstijging (V&W, 2000). De begrenzing van het te onderhouden gebied wordt gegeven door Mulder (2000) – van de binnenkant van de duinen tot de ‘doorgetrokken’ -20 m NAP lijn. De basis – nu de -20 m NAP lijn – is gedefinieerd als de diepte waarop er geen significante *netto* sedimentuitwisseling plaatsvindt met het gebied daarbuiten, op een termijn van 100 tot 200 jaar.

De ondergrens is sinds het vaststellen onderwerp van discussie geweest, maar is relatief weinig onderzocht. Tot voor kort werden de dynamiek van de kust en die van het continentaal plat altijd apart geanalyseerd. De geografische scheiding tussen de bathymetrische data van de kust (vaklodingen van Rijkswaterstaat) en het continentaal plat (Dienst der Hydrografie) ligt rondom de -20 m lijn. Om te kunnen bepalen wat de dynamiek rond de -20 m lijn is, moeten de datasets van het continentaal plat (offshore) en de kust gekoppeld worden.

In recente jaren is door Deltares een methode ontwikkeld voor het kwantificeren van bodemdynamiek uit grote hoeveelheden bathymetrische data in tijdreeksen (zie: Van Dijk et al., 2011). In dit onderzoek zijn alle digitaal-beschikbare bathymetrische data in de database van de Dienst der Hydrografie (Bathymetric Archive System) - inclusief een deel van de Rijkswaterstaat-data - geanalyseerd. Hierin werden voor het eerst de kust- en offshoredata gecombineerd geanalyseerd. In vervolgonderzoek is een *pilot*studie gedaan naar het combineren van offshore bathymetrische data van de Dienst der Hydrografie met alle vaklodingen van Rijkswaterstaat voor het gebied van Zuid-Holland. De twee datasets bleken goed te combineren en elkaar goed aan te vullen (Van Dijk et al., 2014). Voor de achterliggende vragen over het netto zandtransport over de -20 m NAP dieptelij, en de validiteit van de -20 m NAP lijn als grens voor het te onderhouden gebied is het van belang om deze *pilot*analyse van bodemdynamiek uit te breiden naar de gehele Nederlandse kust.

1.2 Doel

Het doel van het KPP deelproject Bodemdynamiek 2015, onderdeel Kust & Offshore, is het vaststellen van de ruimtelijke variaties in zeebodemdynamiek langs de open Nederlandse kust tot buiten de -20 m NAP lijn. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een eerder ontwikkelde methode voor de kwantitatieve analyse van verticale bodemdynamiek, op basis waarvan een uitspraak kan worden gedaan over de toepassingsmogelijkheden van de methode voor kustmorfologie (dit laatste is doel B in de KPP-*requirements*).

De onderzoeksvragen die zijn opgesteld vanuit het KPP-programma B&O Kust, onder andere ook om de inzetbaarheid van de analysetool te toetsen, zijn:

- Wat is de mate van verticale bodemdynamiek (de verandering in de tijd (dz/dt) en het verschil in minimale en maximale bodemligging (*range*)) rond de -20 m lijn?
- Op basis van de verticale bodemdynamiek, waar ligt de ondergrens van het dynamische deel van de kust?

De objectieven die hieruit volgen, zijn:

- het kwantificeren van de zeebodemdynamiek uit gekoppelde bathymetrische datasets offshore (Nederlands Continentaal Plat (NCP)) (Dienst der Hydrografie) en in de kustgebieden (RWS vaklodingen). Hierin wordt de *pilot* van 2014 voor het gebied van Zuid-Holland uitgebreid naar de gehele Nederlandse kustzone.
- het uitbreiden van de toepassing van de voorheen ontwikkelde methode naar toepassing in de kustmorfologie,
- het vaststellen van de ondergrens voor het dynamische deel van de kust gebaseerd op de ruimtelijke variatie in zeebodemdynamiek. Hierin is onderzocht welke rol de zeebodem morfologie speelt in de variatie in bodemdynamiek.
- het op de kaart aangeven van het dynamische deel van de kust, op basis van de geanalyseerde verticale dynamiek ter vergelijking met de -20 m lijn.

Er wordt in deze studie geen gebruik gemaakt van morfodynamische modellen.

2 Data en methoden

2.1 Data

In deze studie zijn alle beschikbare digitale datasets van Rijkswaterstaat en de Dienst der Hydrografie (DdH) gebruikt. Beide datasets zijn beschikbaar op www.openearth.nl (<https://publicwiki.deltares.nl/display/OET/Dataset+documentation+Vaklodingen> en <https://publicwiki.deltares.nl/display/OET/Dataset+documentation+bathymetry+NLHO>).

De vaklodingen van Rijkswaterstaat bestaan uit singlebeam echoloodopnames langs kustdwarse raaien met een onderlinge afstand tot 1000 m. De tussenliggende ruimte wordt door Rijkswaterstaat vlakdekkend geïnterpoleerd tot een grid van 20x20 m. De data hebben een vrij hoge meetfrequentie (gemiddeld een meting per 2.7 jaar in de geanalyseerde gebieden), maar dekken alleen het kustnabije deel. De verticale referentie is NAP, het gebruikte coördinatensysteem Rijksdriehoek.

De data van de DdH bevatten zowel singlebeam als multibeam metingen, de vaarrichting verschilt bij elke meting. Alle metingen zijn geïnterpoleerd naar een 25x25 m grid met de Inverse Distance Weight methode (IDW). De data hebben voor de meeste gebieden een veel lagere meetfrequentie dan de vaklodingen, maar dekken vrijwel het gehele Nederlands Continentaal Plat (NCP). De verticale referentie is LAT, het gebruikte coördinatensysteem WGS84 UTM 31N.

2.2 Methoden

De gebruikte en in deze paragraaf beschreven methoden volgen Van Dijk et al. (2014). De bestaande deelgebieden (Figuur 2.1) zijn aangevuld met gebieden die direct zeewaarts daarvan liggen (Figuur 2.2). De kustnabije gebieden zijn zo gekozen, dat ze geen grote geulen of verstoringen zoals zandwinputten en loswallen omvatten. De offshore gebieden zijn zo gekozen dat aanwezige grote afwijkingen in de data (vaak door verschillen tussen de vele surveys van de DdH), ook wel 'data-artefacten', niet in de gebieden lagen en wederom geen grote geulen of verstoringen zoals zandwinputten en loswallen omvatten. Hierdoor ligt het offshore gebied bij de Westerschelde veel verder zeewaarts en sluiten de gebieden van Ameland, Terschelling en Zuid- en Noord Holland niet helemaal aan.

Voor zowel de vaklodingen dataset als de data van de DdH zijn statistieken per gridcel uitgerekend

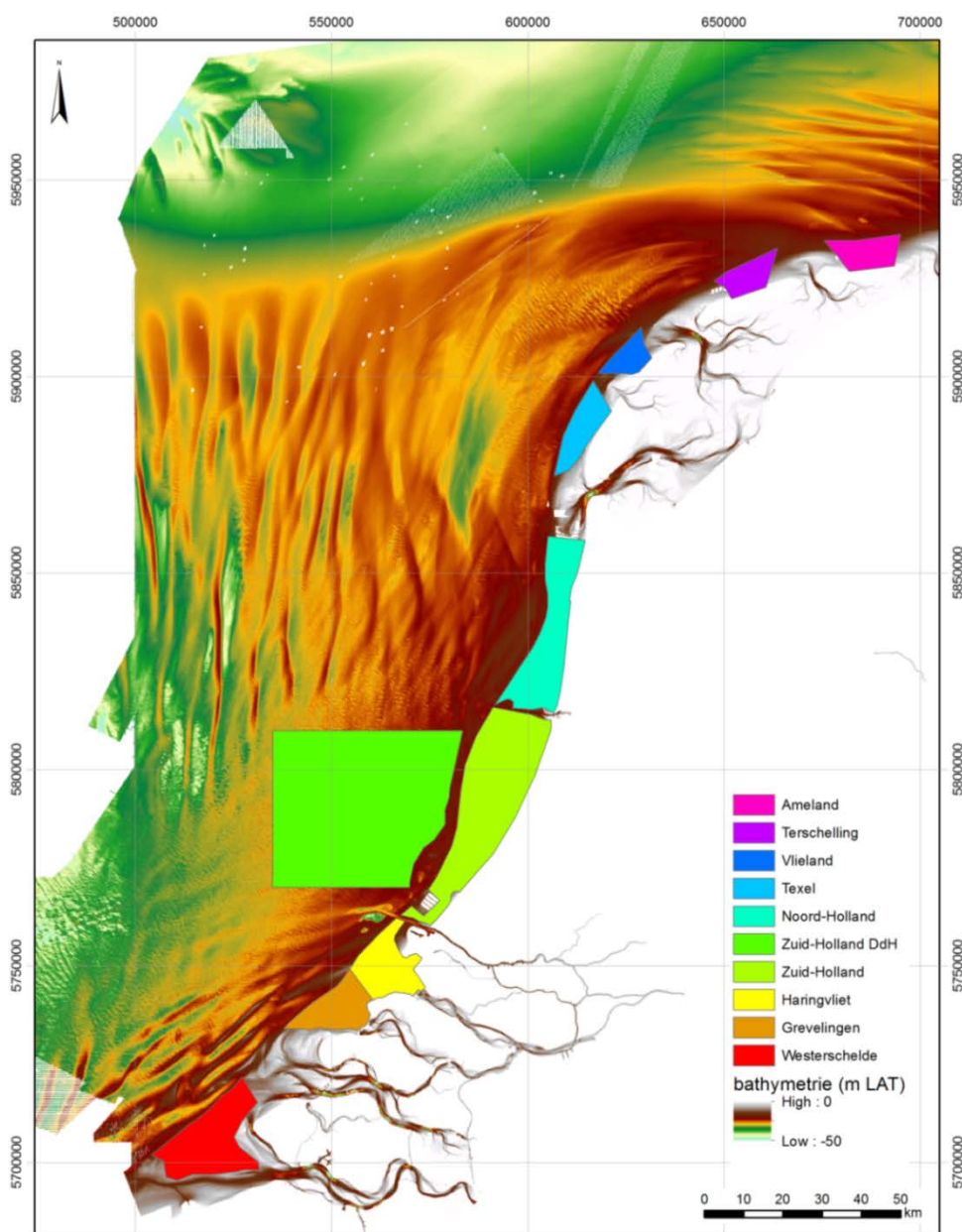
- de 'range': het verschil tussen de minimale en maximale bodemhoogte in de tijd,
- ' dz/dt ': de verticale verandering van de bodemhoogte in de tijd, en
- de gemiddelde bodemhoogte van alle lodingen in de tijd.

De verticale bodemdynamiek (dz/dt) is berekend door een lineaire trend te trekken door de beschikbare datapunten (bodemhoogten in de tijd), zoals uitgebreid besproken in Van Dijk et al. (2011). Voor de dz/dt van de vaklodingen worden alleen die pixels (van de geïnterpoleerde grids) gebruikt waarvoor minimaal 6 datapunten beschikbaar waren over een periode van minimaal 15 jaar. De periode waarin de metingen zijn gedaan verschilt per deel van de kust, de meeste metingen zijn in de volgende periode gedaan: de Wadden vanaf 1971, de Hollandse kust vanaf 1990 en de voordelta vanaf 1964. De meest recente metingen die zijn meegenomen zijn die van 2013. De lineaire trend is bepaald op alle meetpunten in de tijd – er zijn geen trendbreuken meegenomen in de analyse.

Voor de dz/dt van de offshore data zijn alleen de surveys met hogere resolutie gebruikt, maar is verder niet geselecteerd op aantal metingen of periode om zoveel mogelijk punten te

hebben. Doordat in de offshore data fouten in het reductievlak aanwezig zijn, is de dz/dt daarvoor gecorrigeerd (zie Van Dijk et al. 2011 voor een uitgebreidere beschrijving). Zonder correctie laten sommige gebieden sterk afwijkende trends zien. In andere gebieden zijn ongecorrigeerde trends niet sterk afwijkend, maar tonen ze een structurele negatieve trend tot ca. -1 cm/jaar (Van Dijk et al. 2014). Deze trend is ook in de vaklodingen offshore te zien – hier is echter geen geschikte correctie voor mogelijk. De periode en het aantal metingen van de hogere resolutie offshore data zijn te zien in Figuur 2.3 en Figuur 2.4. De gebruikte data is opgenomen tussen 1989 en 2013.

Voor de offshore data is de gemiddelde bodemhoogte omgerekend naar het NAP reductievlak door middel van een reductiematrix (een grid met de verschilwaardes tussen de NAP en LAT reductievlakken).

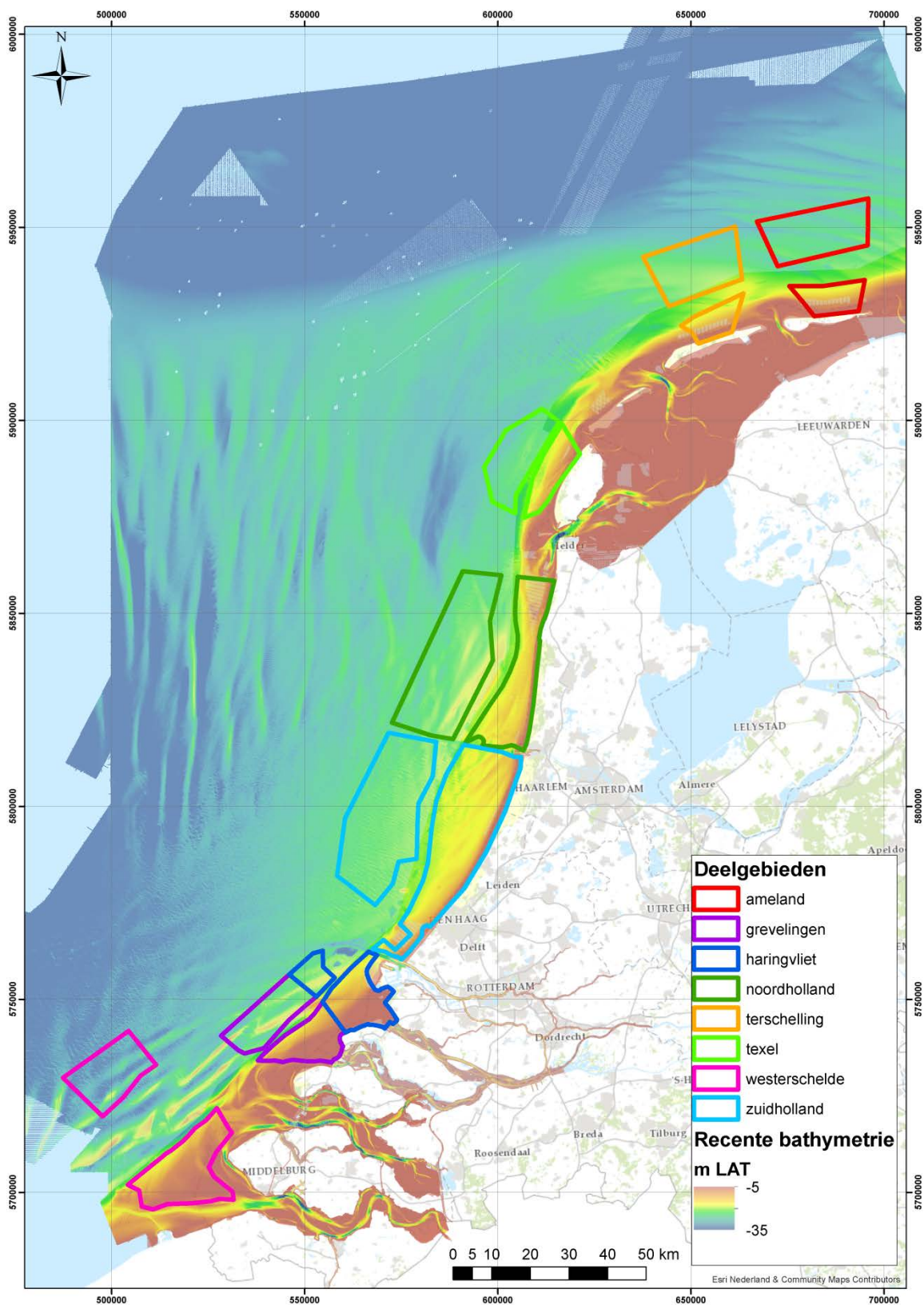


Figuur 2.1 Ligging van de bestaande deelgebieden langs de kust, uit Van Dijk et al. (2014). In deze studie is het vak Vlieland weggelaten omdat er geen geschikt gebied zeewaarts te selecteren was. Het zeewaartse gebied dat hier bij Zuid-Holland is te zien is in deze studie aangepast.

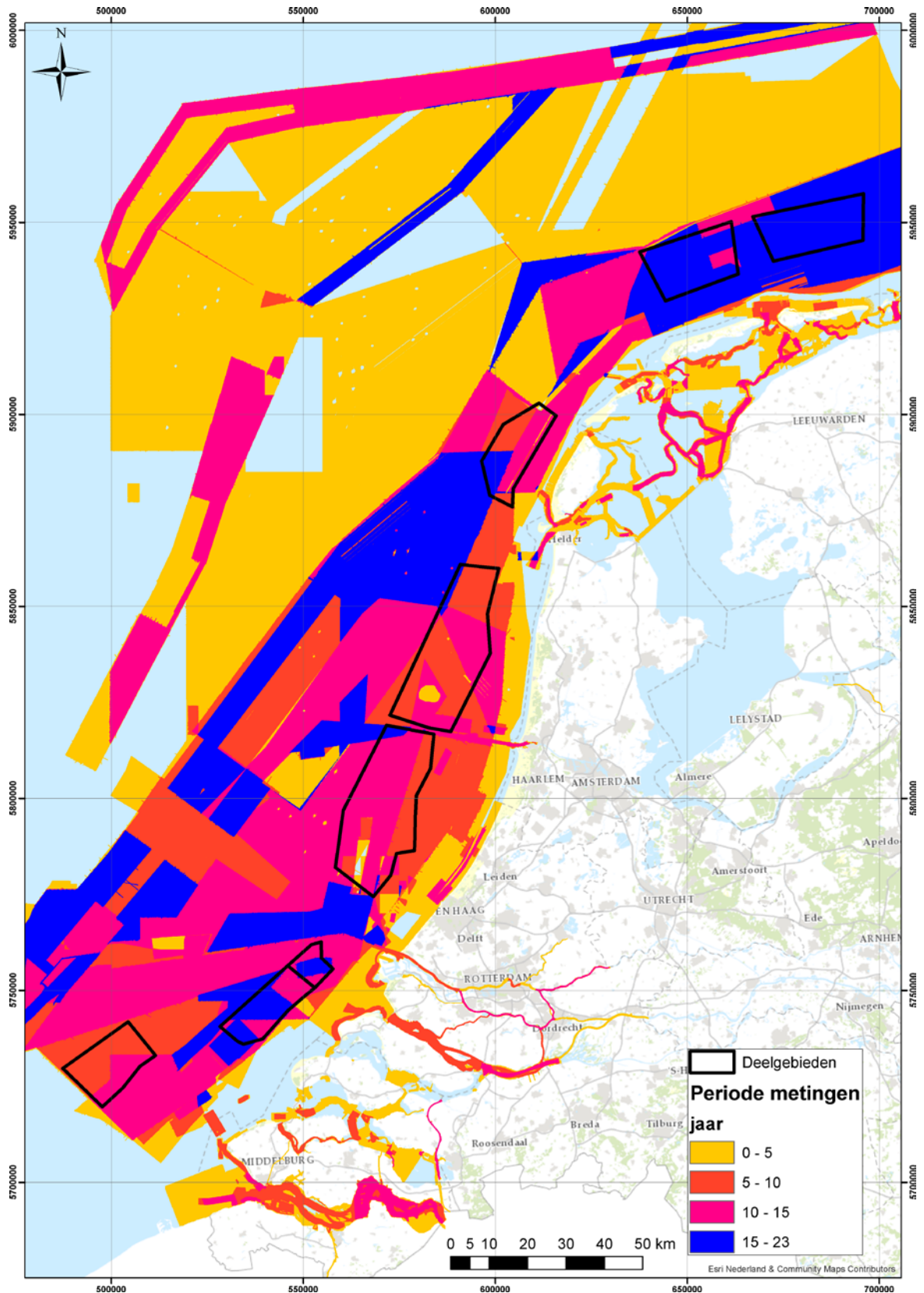
Voor elk van de deelgebieden is vervolgens de relatie tussen de gemiddelde bodemhoogte en (1) de range, en (2) de verticale bodemdynamiek (dz/dt) geanalyseerd door deze tegen elkaar uit te zetten in een scatterplot. Hierbij zijn de data van de kust en offshore vakken in dezelfde grafiek getoond en daarom ten opzichte van NAP. Per diepterange is hiervoor ook een gemiddelde waarde en standaard afwijking bepaald en in de grafieken aangegeven. Door aanwezigheid van grootschalige morfologie (zandruggen) neemt de diepte niet in elk gebied af in de offshore richting. Hierom is in de scatterplots voor de offshore data de afstand tot de dichtstbijzijnde strandpaal aangegeven door de kleur.

Van alle offshore deelgebieden is de morfologie beschreven op basis van de bathymetrie in dat gebied, waarvoor LAT als referentie is gebruikt.

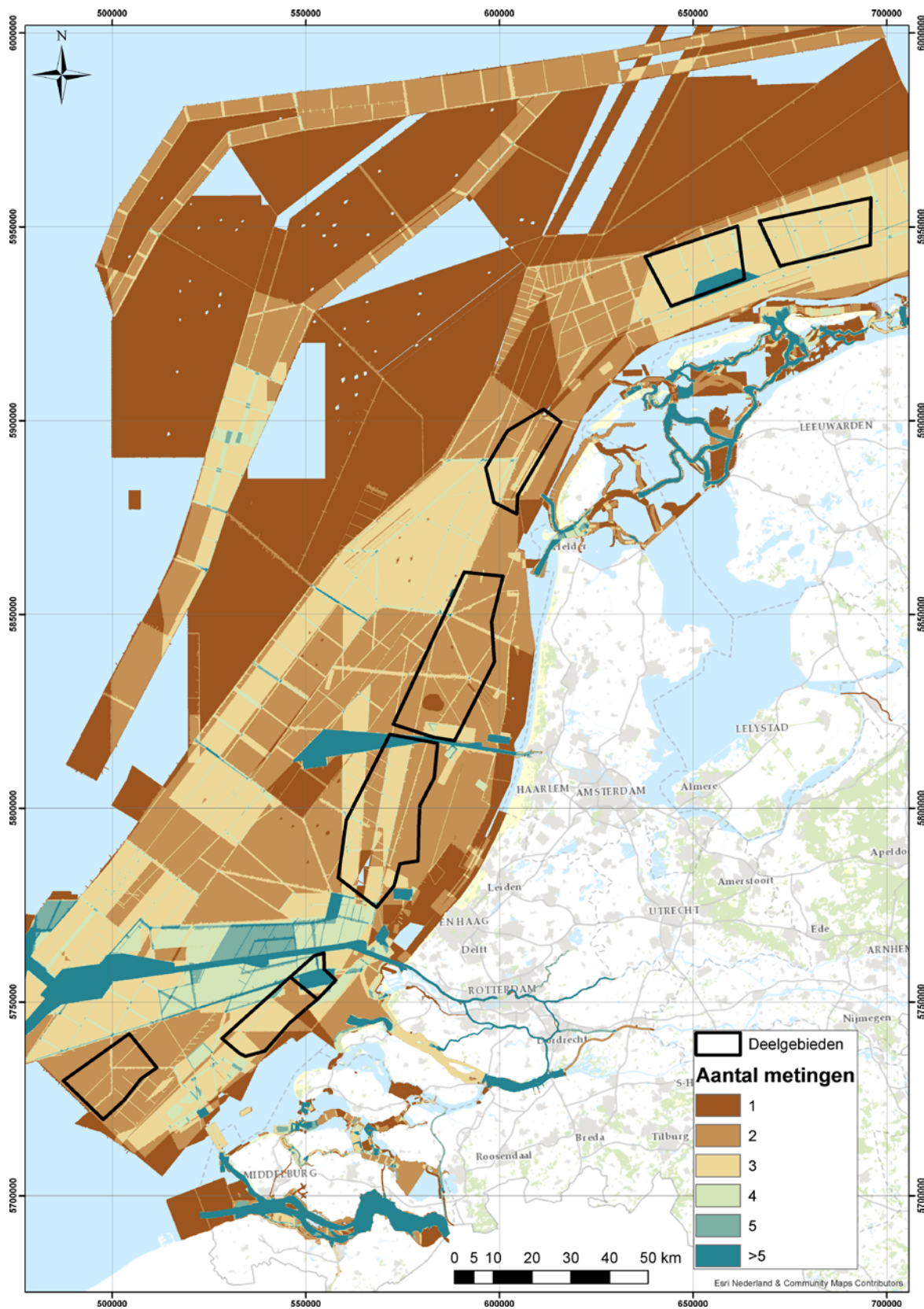
Op basis van de relatie tussen de gemiddelde bodemhoogte en de range en de dz/dt is een potentiële nieuwe ondergrens van het dynamische deel van de kust gekozen. Deze nieuwe grens is vergeleken met het huidige kustfundament op de kaart, waarbij het verschil in oppervlakte is bepaald.



Figuur 2.2 Deelgebieden waarvoor dynamiek is onderzocht, de gebieden langs de kust zijn gekozen in Van Dijk et al. (2014)



Figuur 2.3 Periode tussen de eerste en laatste beschikbare meting in de offshore gebieden



Figuur 2.4 Aantal beschikbare metingen in de offshore gebieden

3 Resultaten

3.1 Inleiding

De bodemdynamiek voor alle gekoppelde vakken (kust en offshore, zie Figuur 2.2) zijn geanalyseerd op zowel verticaal-dynamische trends (dz/dt) als het bereik van de minimale en maximale bodemligging (*range*). De verticale bodemdynamiek zijn de lineaire trends in bodemligging in de tijd (in meter/jaar), berekend voor ieder gridpunt (zie hoofdstuk 2). De range is het verschil tussen minimale en maximale bodemhoogte in meters.

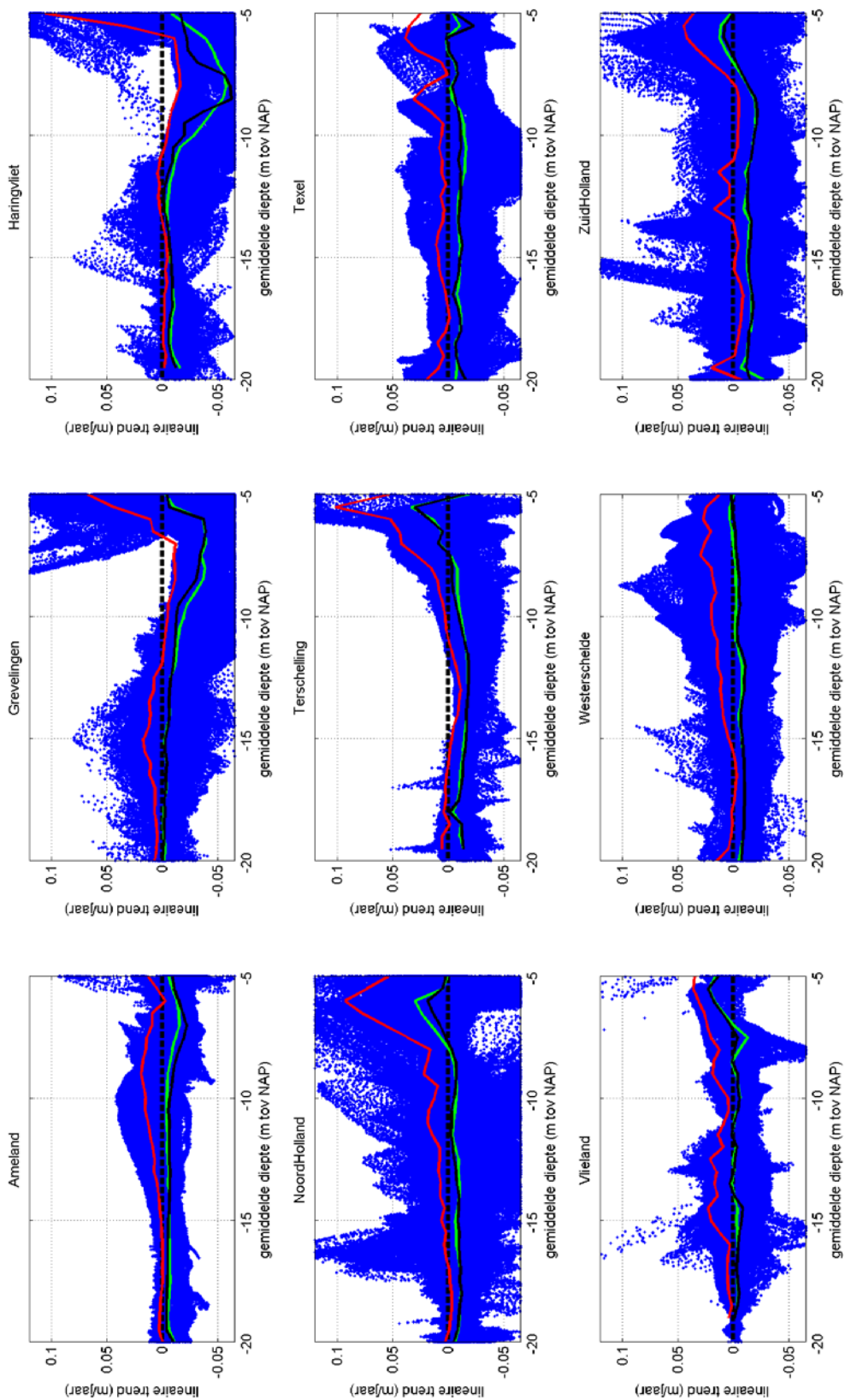
In deze paragraaf beschrijven we de morfologie van gekoppelde kust- en offshoregebieden en de dynamische eigenschappen van deze gebieden. Omdat de morfologische en dynamische eigenschappen van sommige gebieden overeenkomen, worden de resultaten van die gebieden hieronder gegroepeerd in paragrafen beschreven.

De dynamiek van de kustvakken is beschreven in paragraaf 3.2, naar het KPP-2014 rapport (Van Dijk et al., 2014). De resultaten van de offshore bathymetrie en dynamiek worden beschreven in paragraaf 3.3. Voorheen is de koppeling met de offshore dynamiek enkel voor het gebied Zuid-Holland gemaakt. In dit rapport worden alle kustvakken gekoppeld aan de offshore vakken.

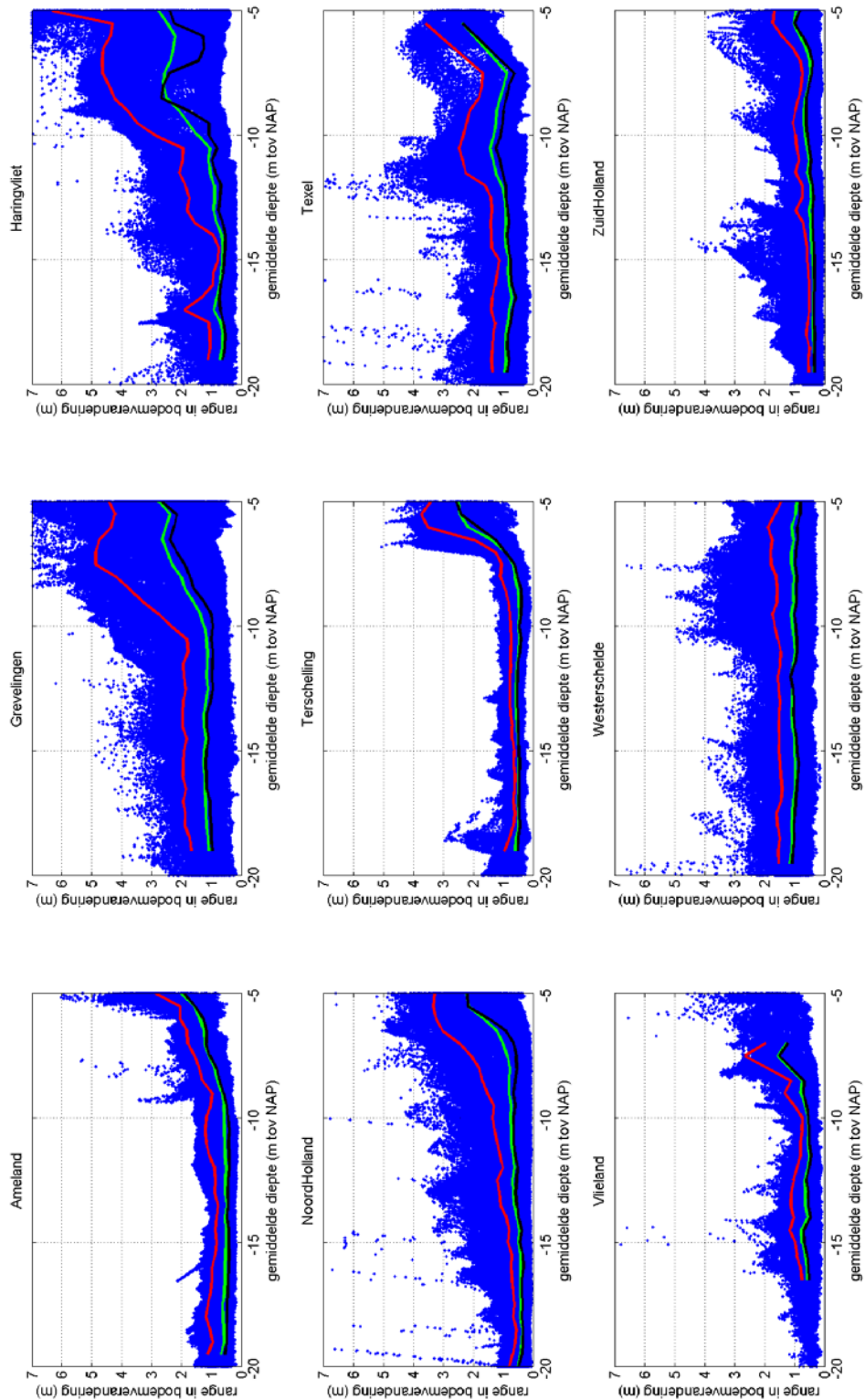
In de figuren van de offshore bathymetrie worden bodemhoogten gegeven ten opzichte van LAT; voor de gecombineerde diagrammen van kust- en offshoredynamiek (scatterplots) zijn de offshore waterdiepten omgerekend naar NAP.

3.2 Bodemdynamiek kustvakken – uit Van Dijk et al. (2014)

Figuur 3.1 laat de lineaire verticale trend zien voor de vaklodingsgebieden (Figuur 2.1). De grootste variatie tussen de deelgebieden is te vinden in relatief ondiep water. Voor water dieper dan 10 m lijken de trends sterk op elkaar en zijn deze alle licht negatief (erosie). In ondieper water is een onderscheid te maken tussen deelgebieden met een negatieve trend (Ameland, Grevelingen, Haringvliet), een positieve trend (Noord-Holland, Terschelling, Vlieland, Zuid-Holland) en netto weinig verandering (Texel, Westerschelde). Figuur 3.2 toont de maximale range in bodemhoogte per pixel. Deze range is een indicatie voor de dynamiek in de verschillende gebieden. In vrijwel alle gebieden neemt de range sterk af tussen -5 en -10 m NAP. In dieper water is de range veelal constant.



Figuur 3.1 De lineaire trend in meters per jaar voor de geanalyseerde vaklodingsgebieden. In de meeste gevallen neemt de lineaire trend sterk af voor water dieper dan -7 à -10 m NAP, tot een licht negatieve trend. Groene lijn: gemiddelde waarde; zwarte doorgetrokken lijn: mediane waarde; rode lijn: het 90ste percentiel.



Figuur 3.2 De maximale range in bodemhoogteverandering voor de vaklodingsgebieden. Voor water dieper dan 10 m schommelt de range rond de 0,5-1 m. Naar ondieper water neemt de range in de meeste gevallen toe tot 1-2 m. Groene lijn: gemiddelde waarde; zwarte doorgetrokken lijn: mediane waarde; rode lijn: het 90ste percentiel.

3.3 Bodemdynamiek offshore

3.3.1 Westerschelde, Grevelingen en Haringvliet

De gebieden Westerschelde, Grevelingen en Haringvliet hebben een relatief vlakke bodemmorfologie nabij de kust. De offshore morfologie bestaat uit kust-parallelle zandbanken of kust-aangehechte banken met daarop zandgolven. De verticale bodemdynamiek voor deze offshore gebieden is maximaal -0,20 tot +0,20 m/jr. Dit bereik van verticale bodembeweging wordt veroorzaakt door zandgolfmigratie en daarmee afwisselend positief/negatief op beide zijden van een zandgolf, maar de gemiddelde dynamiek in een zandgolvenveld is gemiddeld rond nul. De gemiddelde range is rond 1 m, met maxima (voor het merendeel) van 4 - 6 m en extremen tot 8 m.

Westerschelde

De kustmorfologie van het vak Westerschelde bestaat uit de relatief vlakke zeebodem van de buitendelta van de Westerschelde, de Vlake van de Raan. De kustafwaartse helling (deltafront) ligt in het westelijk deel van het vak. Offshore is de zeebodem getypeerd door zandbanken parallel aan de kust met daarop zandgolven in een oriëntatie haaks op de banken (Figuur 3.3 boven). Golf lengtes zijn relatief kort (150 m op de toppen van banken tot 400 m in de troggen tussen de banken). Bodemhoogten variëren tussen -15 en -40 m LAT.

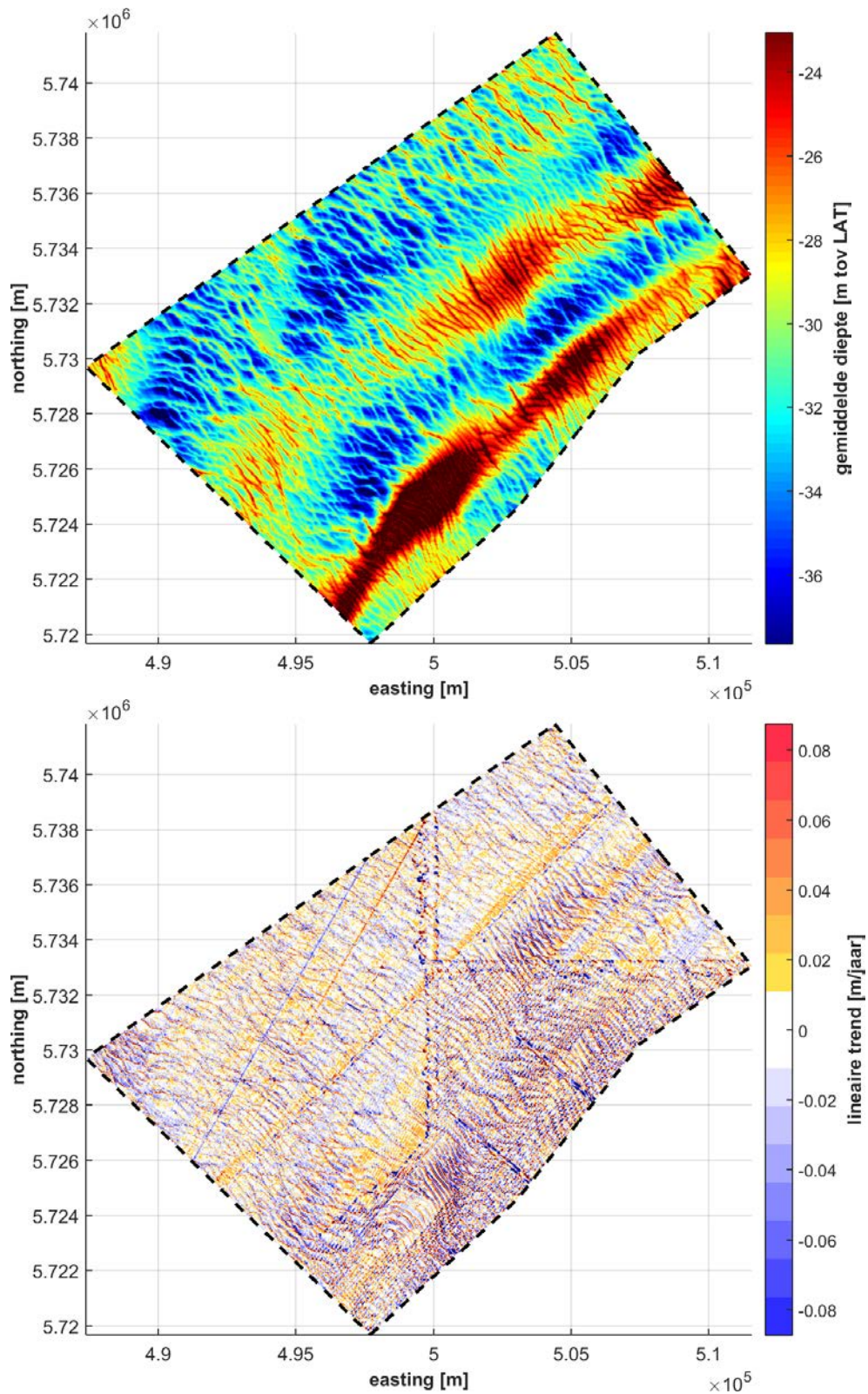
De offshore trends in verticale bodemdynamiek (dz/dt) laten een patroon zien van zandgolven en zandbanken met maximale waarden tussen -0,2 en +0,2 m/jr, die respectievelijk een daling en stijging van de bodemligging weergegeven, oftewel degradatie en aggradatie (Figuur 3.3 onder). Over het algemeen is de verticale bodemdynamiek het grootst in de zandgolfgebieden op de banken en in het oostelijke deel van het offshore vak, en minder dynamisch in het westelijke deel van dit vak.

Voor de koppeling van kust- en offshore dynamiek, worden de resultaten weergegeven in scatterplots. Om deze figuren goed uit te leggen, wordt Figuur 3.4 (voor het vak Westerschelde) in komende twee alinea's eenmalig uitgebreid beschreven. Voor dergelijke figuren van de volgende gebieden is de beschrijving minder uitvoerig.

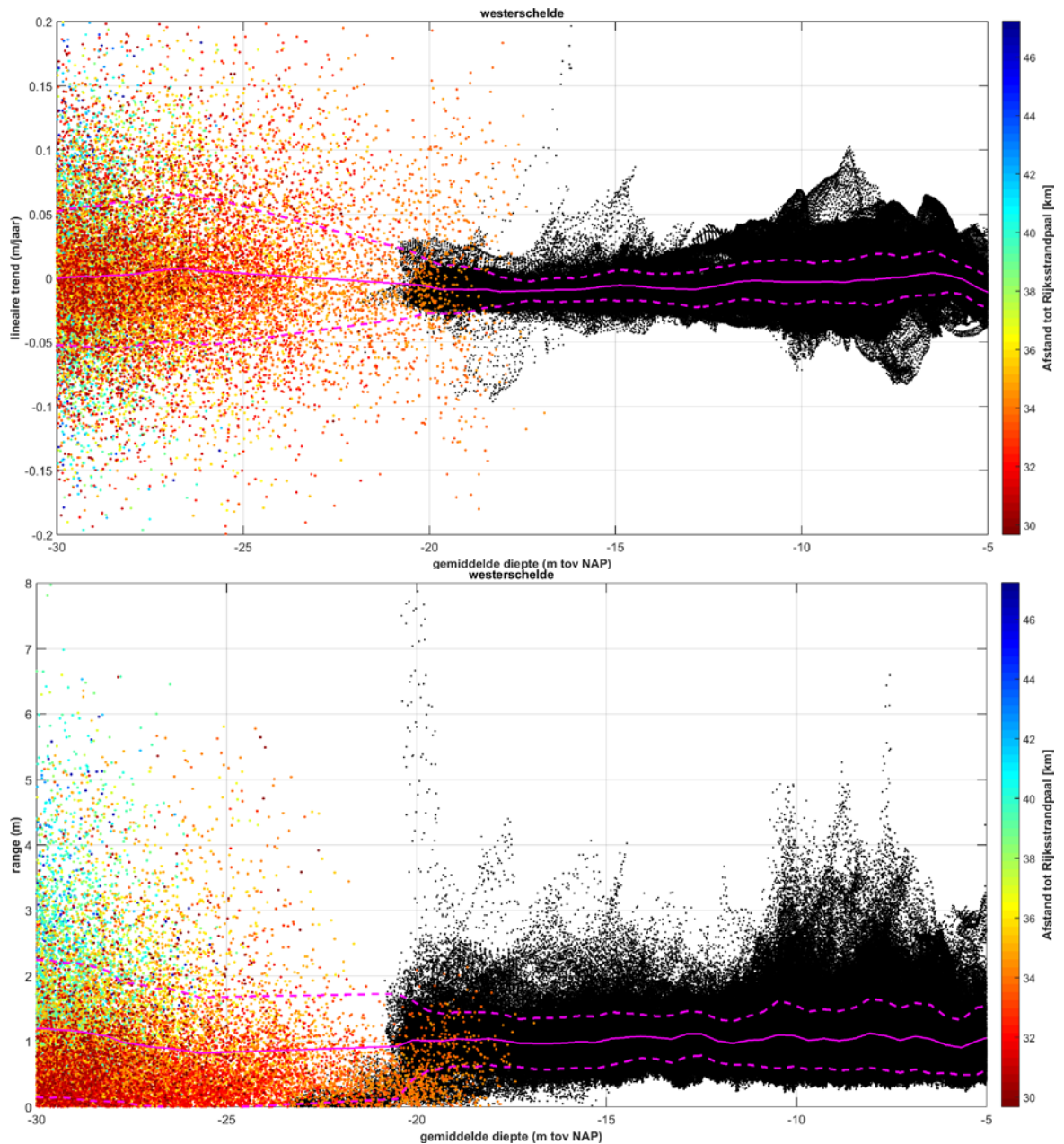
Wanneer de trends in verticale bodemdynamiek worden uitgezet in een scatterplot tegen waterdiepte (Figuur 3.4 boven, waterdiepten t.o.v. NAP) resulteert dit in een grote puntenwolk, die de degradatie en aggradatie weergeeft, met de meest voorkomende waarden tussen de -0,05 en +0,05 m/jr. De kleuren van de punten geven de afstand tot de kust aan. Hieruit blijkt dat waterdiepten van -30 m NAP (x-as) zowel in het oostelijke deel (blauwe punten) als westelijke deel (donker-rode punten) van het offshore vak voorkomen en dat het volle bereik van dynamiek op alle afstanden van de kust voorkomt. Op waterdiepten tussen -20 en -30 m NAP komen minder punten voor omdat het offshore- en kustvak hier verder uit elkaar liggen (zie paragraaf 2.2). De gemiddelde dynamiek (roze doorgetrokken lijn) offshore ligt rond de 0 m/jr en de standaard deviaties (gestippelde roze lijnen) rond 0,05 m/jr (pos/neg) voor waterdiepten van 25 tot 30 m. De gemiddelden en standaarddeviaties rond de -20 m NAP lijn sluiten goed aan bij de verticale bodemdynamiek van het kustvak en zijn respectievelijk 0 m/jr en 0,02 m/jr.

De *range*, het verschil tussen de minimale en maximale bodemligging op 1 locatie (gridpunt) in de gehele tijdreeks van lodingsbestanden, is maximaal 4 tot 6 meter voor het merendeel van de gridpunten, met extremen tot 8 m (Figuur 3.4 onder). Hierin zien we waterdiepten van 25 tot 30 m voorkomen zowel in het oostelijke als westelijke deel en dat de oostelijke punten een range hebben van 0 – 2 m en de westelijke punten een range van 0 – 6 m. Het gemiddelde is rond 1 m op waterdiepten van 25 - 30 m (30 - 47 km uit de kust), en is iets lager (~0,8 m) voor diepten van 20 tot 25 m (32 - 36 km uit de kust). In de aansluiting bij de range van de kustvakken is het gemiddelde offshore met een kleine knik ongeveer 0,1 m

lager en nemen de standaarddeviaties toe. Een dergelijke knik is ook te zien in de range op waterdiepten van 20 tot 23 m, door de groep kust-data punten die plotseling lager liggen.



Figuur 3.3 Boven: bathymetrie van de zandgolven morfologie in het offshore vak bij de Westerschelde met waterdiepten in m LAT. X- en Y-coördinaten zijn in UTM31N WGS84. Onder: Kaart van de gecorrigeerde verticale bodemdynamiek (lineaire trend in m/jr).



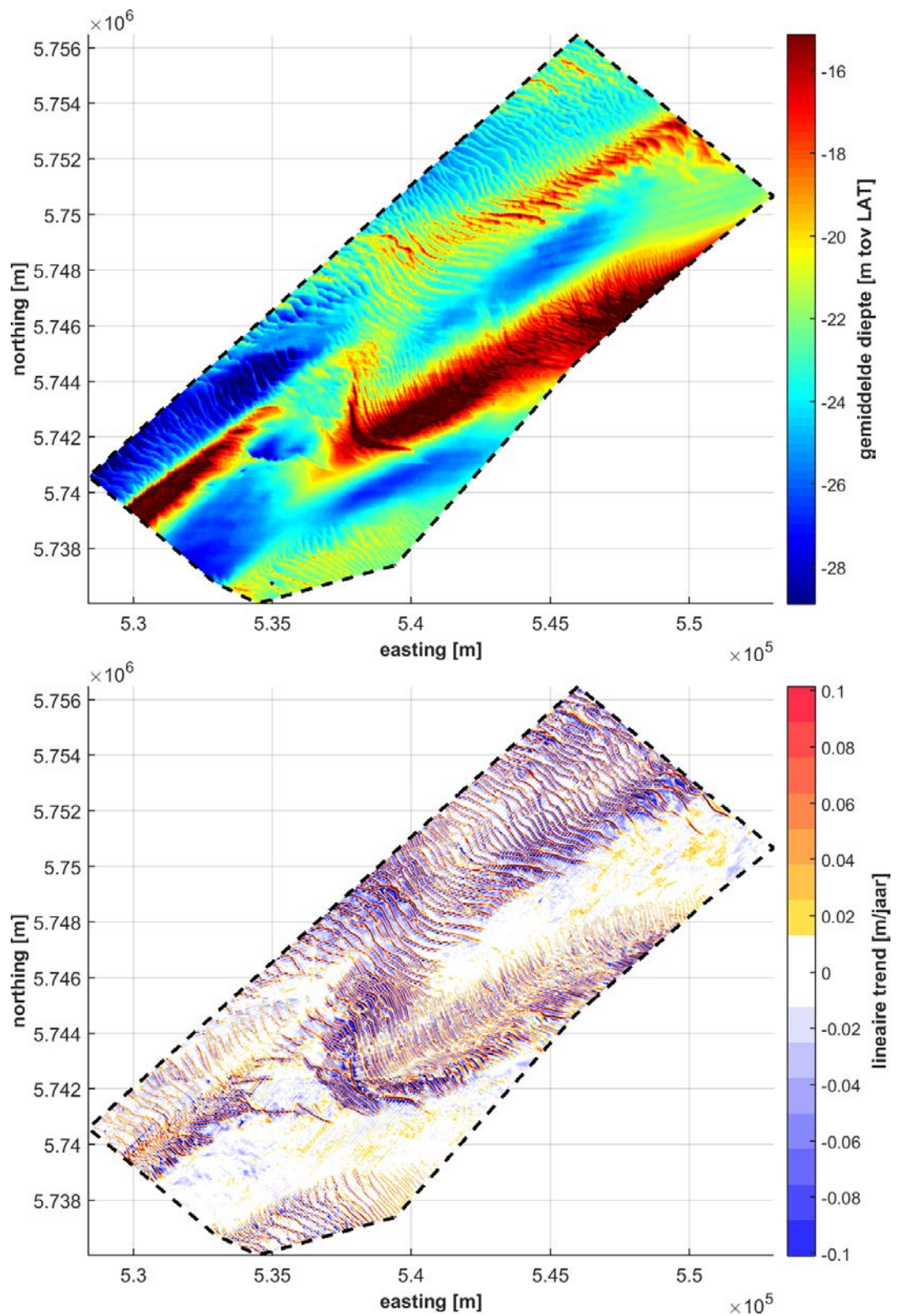
Figuur 3.4 Boven: de gecorrigeerde bodemdynamiek (m/jr) uitgezet tegen de gemiddelde waterdiepte (m NAP) van gecombineerde vakken bij Westerschelde op basis van kustlodingen (zwarte punten) en offshore lodingen (gekleurde punten). De kleuren geven de afstand tot de strandpalen aan van de offshore data en zijn ter onderscheid van variërende waterdiepten. De gemiddelde waarden (doorgetrokken lijnen) en standaard deviatie (gestippelde lijnen) zijn weergegeven in roze. Onder: het verschil tussen minimum en maximum bodemhoogte (m) in de tijd van gecombineerde vakken bij Westerschelde.

Grevelingen

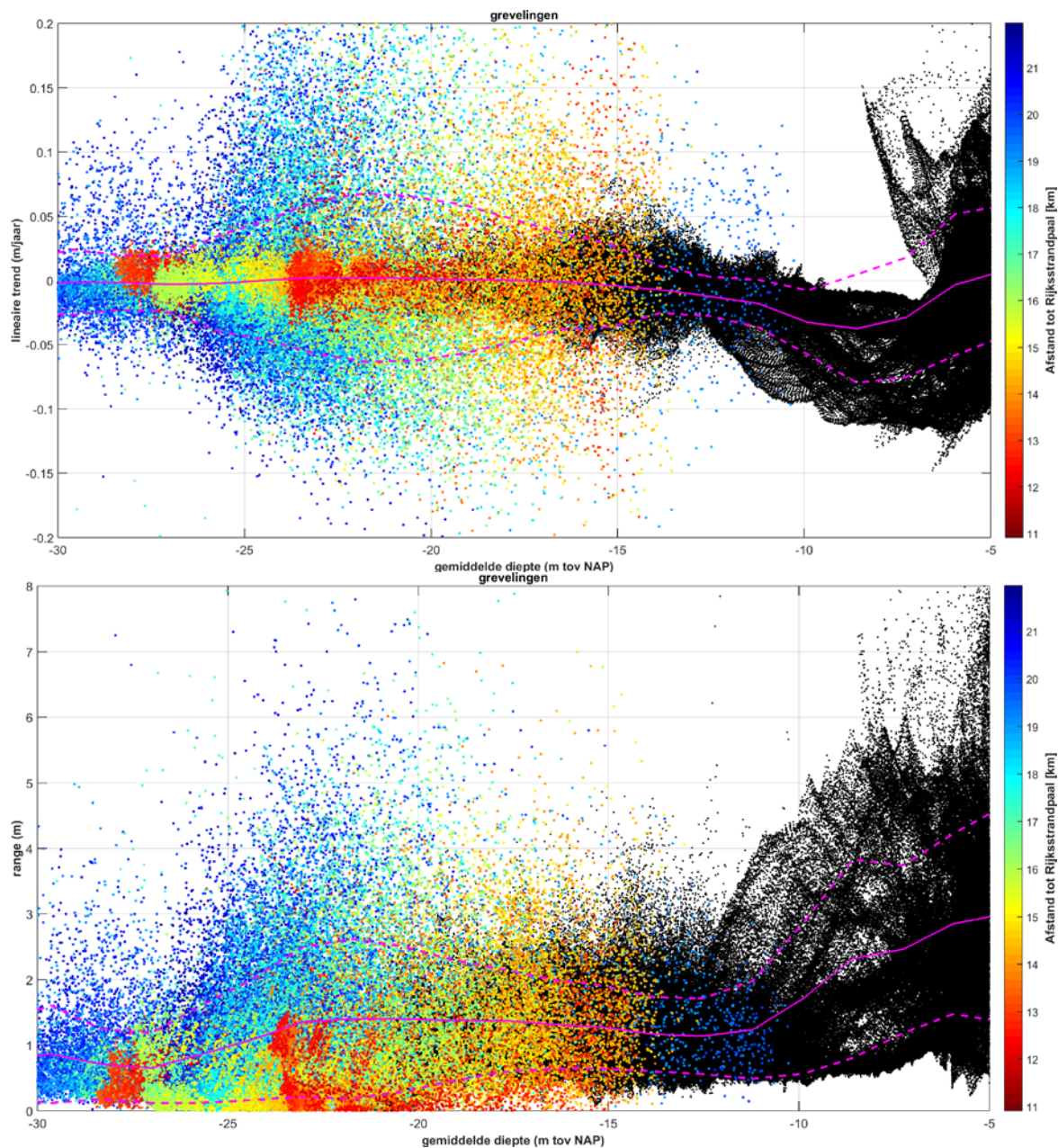
De kustmorfologie bestaat uit een relatief vlakke bodem zeewaarts van de Brouwersdam met enkele (relict) getijgeulen. De kustafwaartse helling van de onderwateroever ligt in het westelijk deel van dit vak. De offshore morfologie wordt gevormd door kust-aangehechte banken (Figuur 3.5 boven). Ook hier zijn zandgolven van korte golflengte gesuperponeerd op de ruggen van de banken, maar in de dalen tussen de meest kustnabije banken komen geen zandgolven voor; wel in het meest westelijke dal. Bodemhoogten in het offshore vak variëren van -8 tot -30 m LAT.

Het contrast in het patroon van de verticale bodemdynamiek (Figuur 3.5 onder) is groter dan in het offshore vak van de Westerschelde. De zandgolfgebieden op de banken zijn het meest dynamisch met waarden tussen -0,1 en +0,1 m/jr (met maximale waarden in de scatterplot tot + of - 0,2 m/jr). De zones waar géén zandgolven voorkomen zijn nagenoeg stabiel (0 m/jr is wit in de bodemdynamiekaart). Dit is ook te zien in de scatterplot (Figuur 3.6 boven), waarin de geconcentreerde puntenwolken (rode punten op waterdiepten van -23/-24 m en -28 m NAP) de troggen tussen de kustnabije banken zonder zandgolven representeren, met een zeer lage dynamiek (-0,02 – +0,02 m/jr). De westelijke, meest zeewaarts gelegen trog (30 m diep, blauwe punten ver uit de kust) zijn geconcentreerde punten met lage dynamiek (wit in de kaart) en meer verspreide punten met middelmatige dynamiek van de zandgolven in de trog. De banken (kustnabij: -14 tot -17 m NAP en rood; offshore: -10 tot -12 m NAP en blauw) laten een groot bereik zien van dynamiek, evenals de brede puntenwolk over het volle bereik van de dynamische trends ongeacht de waterdiepte en afstand tot de kust. Dit zijn de dynamische zandgolfgebieden (rood-en-blauwe patroon-paren in de dz/dt -kaart). Eenzelfde gebiedspatroon is zichtbaar in de scatterplot voor ranges (Figuur 3.6 onder), waarin de troggen tussen de banken een lage range van 0 – 0,5 en 0,6 – 1,2 m laten zien en de ranges in de zandgolfgebieden een brede wolk van 0 – 2 à 4 m (met extremen tot 8 m) laten zien ongeacht waterdiepte en afstand tot de kust.

De gemiddelde bodemdynamiek (roze lijn in Figuur 3.6) verandert van iets meer dan 0 m/jr op -5 m NAP (zwarte punten kustvak) tot -0,03 m/jr op -8 m NAP. Bij toenemende waterdiepte blijft de bodemdynamiek – afgezien van een kleine toename en afname – rond de 0 m/jr. De gemiddelde range voor de vakken bij de Grevelingen is 3 m op -5 m NAP en daalt naar 1,2 m op -12 m NAP. De range is ongeveer gelijk tussen -12 en -23 NAP en daalt tot 0,6 m op -27 m NAP.



Figuur 3.5 Boven: bathymetrie van de zandgolven morfologie in het offshore vak bij de Grevelingen met waterdiepten in m LAT. X- en Y-coördinaten zijn in UTM31N WGS84. Onder: Kaart van de gecorrigeerde verticale bodemdynamiek (lineaire trend in m/jr).



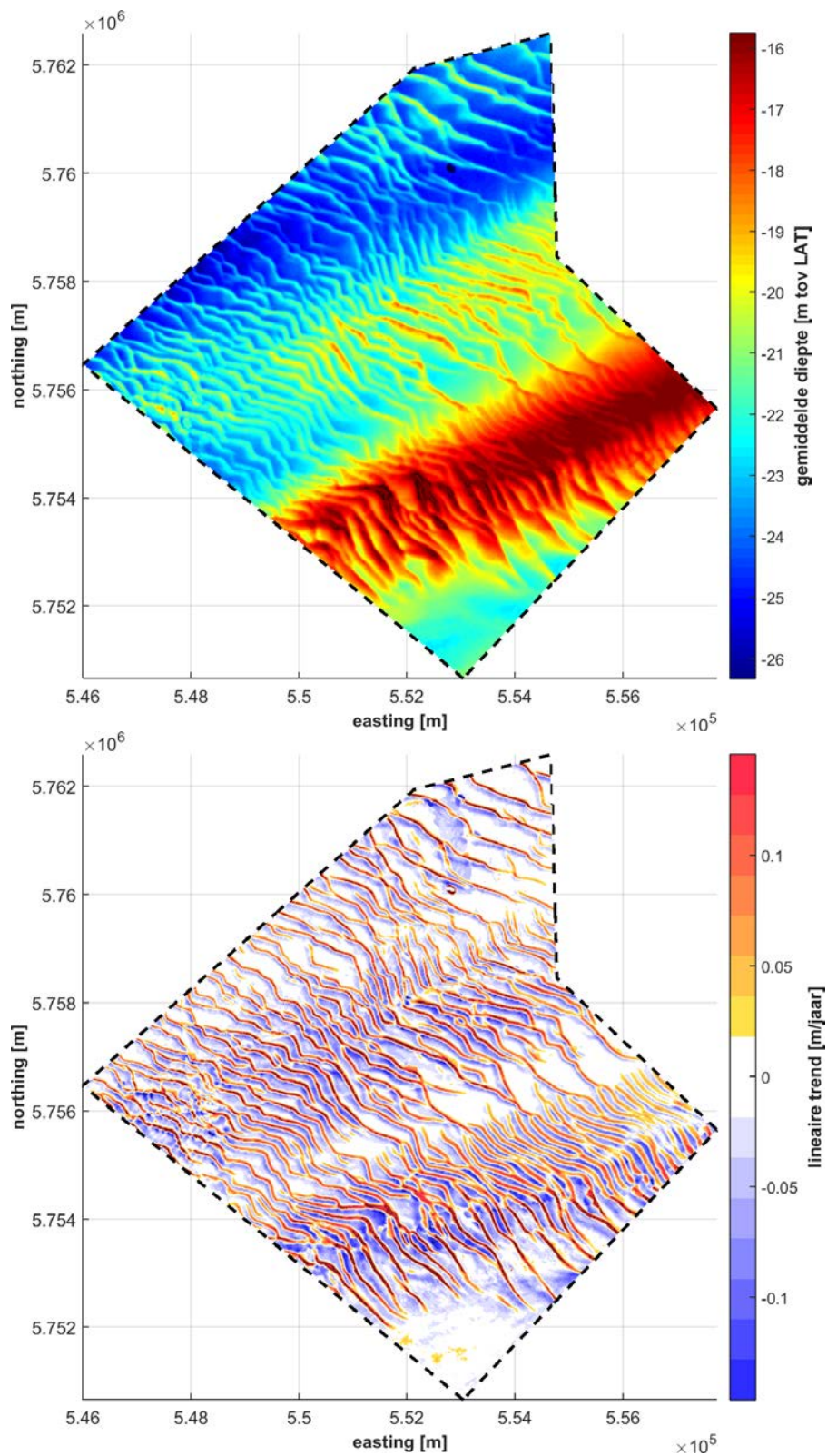
Figuur 3.6 Boven: de gecorrigeerde bodemdynamiek (m/jr) uitgezet tegen de gemiddelde waterdiepte (m NAP) van gecombineerde vakken bij Grevelingen op basis van kustlodingen (zwarte punten) en offshore lodingen (gekleurde punten). De kleuren geven de afstand tot de strandpalen aan van de offshore data en zijn ter onderscheid van variërende waterdiepten. De gemiddelde waarden (doorgetrokken lijnen) en standaard deviatie (gestippelde lijnen) zijn weergegeven in roze. Onder: het verschil tussen minimum en maximum bodemhoogte (m) in de tijd van gecombineerde vakken bij Grevelingen.

Haringvliet

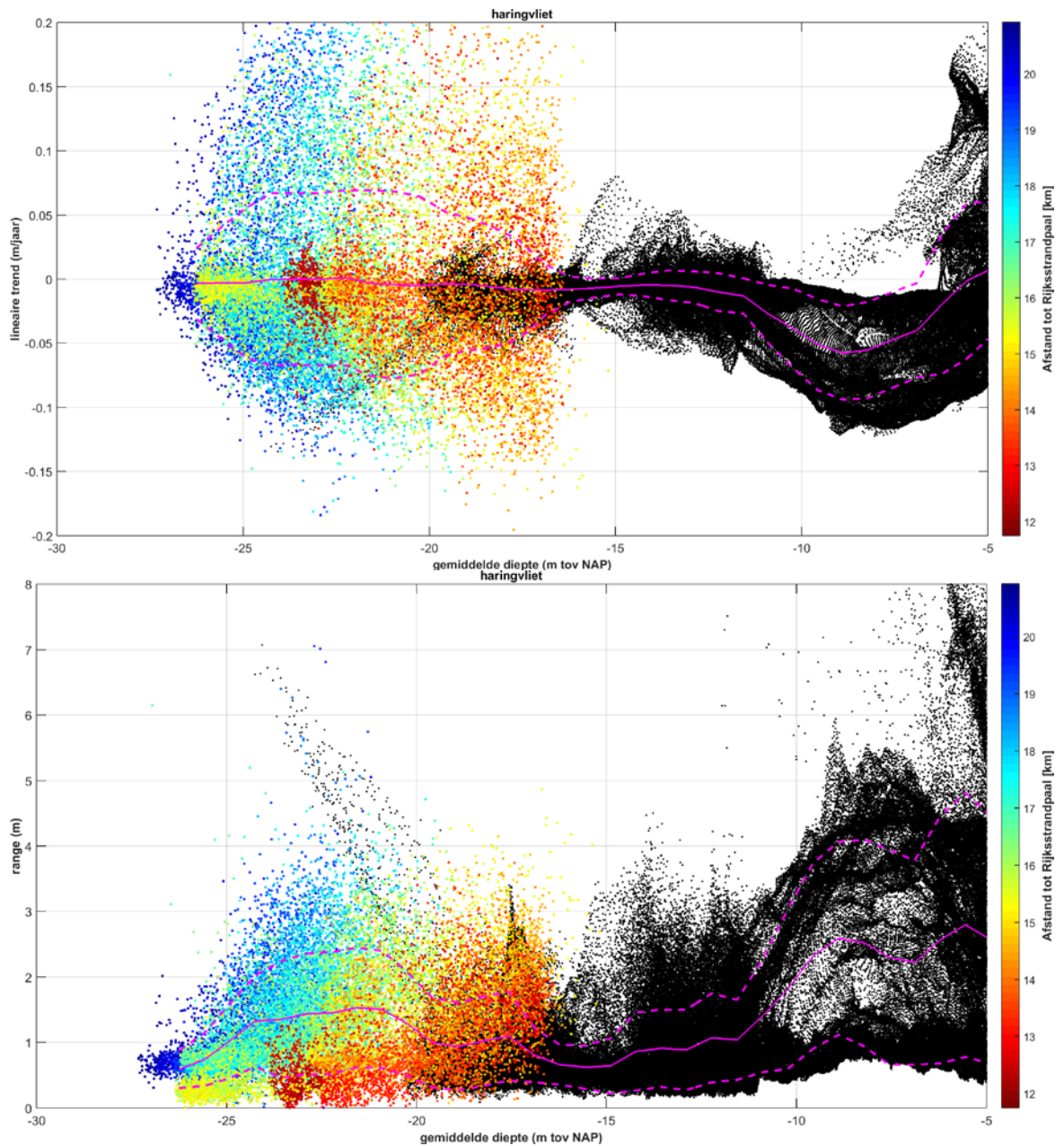
De kustmorfologie omvat een relatief vlakke bodem zeewaarts van de Haringvlietsluizen en een geleidelijke kusthelling naar dieper water in het westelijke deel van dit kustvak. Twee kustaangehechte banken hechten aan in de zuidwest hoek en aan de westrand ter hoogte van de Maasvlakte. De offshore morfologie omvat een deel van de kustaangehechte bank ter hoogte van de Maasvlakte met daarop zandgolven van korte golflengte (150 - 300 m) (Figuur 3.7 boven). De uitlopers van zandgolven in de dalen tussen de banken en in het uiterlijk westelijke deel hebben een langere golflengte (350-700 m). In het dal tussen de kustaangehechte bank en de kusthelling (rechteronderhoek) komen geen zandgolven voor. De zandwinputten ten zuiden van de Maas- en Eurogeul vallen buiten dit zeewaartse vak. Bodemhoogten variëren van -13 m LAT op de bank tot -25 m LAT in het meest westelijke deel.

De verticale bodemdynamiek (Figuur 3.7 onder) is wederom het grootst in de zandgolfgebieden op de banken (-0,15 tot +0,20 m/jr) en is nagenoeg 0 m/jr in de troggen tussen de banken en in gebieden waar zandgolven afwezig zijn. In de scatterplot van de gecombineerde trends in verticale bodemdynamiek van de kust- en offshorevakken (Figuur 3.8 boven) geven de brede puntenwolken de grote variatie in bodemdynamiek weer van de zandgolven over waterdiepten van -17 tot -26 m NAP over het gehele gebied en de geconcentreerde puntenwolken (-0,02 tot +0,02 m/jr) de twee dalen tussen de banken (rood kust nabij en geel in het midden) en het westelijke deel (blauw). Voor de range gelden dezelfde verdelingen, met 0 tot 4 m verschil tussen de minimale en maximale bodemligging in de tijd voor zandgolfgebieden en minder dan 1 m in de geconcentreerde puntenwolken voor de troggen tussen de banken (Figuur 3.8 onder).

De gemiddelde bodemdynamiek verandert van iets meer dan 0 m/jr op -5 m NAP (zwarte punten kustvak) tot -0,06 m/jr op -9 m NAP (erosief) en neemt dan weer toe tot 0,01 m/jr op -12 m NAP. Bij verder toenemende diepte blijft de verticale bodemdynamiek vrijwel gelijk (rond 0 m/jr, Figuur 3.8). De gemiddelde range voor de vakken bij het Haringvliet begint hoog aan de kust (2,5 à 3 m op waterdiepten van -5 tot -9 m NAP), en neemt sterk af tussen -9 en -12 m NAP naar 1 m en naar 0,6 m op 15 m waterdiepte.



Figuur 3.7 Boven: bathymetrie van de zandgolven morfologie in het offshore vak bij het Haringvliet met waterdiepten in m LAT. X- en Y-coördinaten zijn in UTM31N WGS84. Onder: Kaart van de gecorrigeerde verticale bodemdynamiek (lineaire trend in m/jr).



Figuur 3.8 Boven: de gecorrigeerde bodemdynamiek (m/jr) uitgezet tegen de gemiddelde waterdiepte (m NAP) van gecombineerde vakken bij Haringvliet op basis van kustlodingen (zwarte punten) en offshore lodingen (gekleurde punten). De kleuren geven de afstand tot de strandpalen aan van de offshore data en zijn ter onderscheid van variërende waterdiepten. De gemiddelde waarden (doorgetrokken lijnen) en standaard deviatie (gestippelde lijnen) zijn weergegeven in roze. Onder: het verschil tussen minimum en maximum bodemhoogte (m) in de tijd van gecombineerde vakken bij Haringvliet.

Interpretatie Westerschelde, Grevelingen en Haringvliet

De verticale bodemdynamiek offshore geeft een grote variatie weer in brede puntenwolken (0,2 m/jaar degradatie of aggradatie) in alle gebieden waar zandgolven voorkomen. Op de kaart zijn dit de sterk afwisselend positieve en negatieve waarden in rood-blauw patronen, veroorzaakt door de migratie van zandgolven. De ranges in de zandgolfgebieden tot 4 m komen overeen met zandgolfhoogten (ongeveer 2 – 5 m in deze gebieden). Wanneer de kust- en offshore dynamiek worden gecombineerd, blijkt dat de gemiddelde dynamische trends en standaarddeviaties rond de 20 m dieptelijn goed aansluiten.

Voor de belangrijkste overgang van de dynamische kust naar het minder dynamische continentaal plat offshore (zandgolfgebieden uitgezonderd), moet naar zowel de verticaal dynamische trends als de range worden gekeken. De Vlakte van de Raan voor de Westerschelde is in het geheel vrij stabiel qua bodemdynamiek, met waarden rond 0 m/jr en ranges rond 1 m. Het grootste contrast tussen de kust en offshore komt door de vlakke bodem in het kustvak en de zandgolfvelden in het offshore vak. De plotselinge – maar subtiele – overgang in de range rond 20 m diepte lijkt veroorzaakt door het scherpe contrast in de range van de zwarte punten van 20 – 23 m waterdiepte t.o.v. NAP, die ineens rond 0 m liggen, terwijl de zwarte punten ondieper dan -20 m NAP rond de range van 1 m liggen. De overgang in kust- en offshore dynamiek is duidelijker in de gecombineerde vakken bij de Grevelingen en het Haringvliet, waar de range scherp afneemt van 2 à 3 m naar 1 m in het dieptebereik van -5 tot -8 m NAP en de kustdynamiek daalt tot zelfs negatieve waarden (erosie) rond de -8 m NAP. De erosie van het buitendeltafront na de afsluiting van deze zeegaten is hier de oorzaak van. Zowel de trend als de range in deze gebieden zijn onder -13 m NAP relatief stabiel. Van de Vlakte van de Raan valt enkel de *delta plain* binnen de -12 m NAP dieptelijn, en niet de helling van de delta.

3.3.2 Zuid-Holland en Texel

De globale overeenkomst tussen de gekoppelde kust- en offshore morfologie van Zuid-Holland en Texel zijn de hellende onderwateroevers met of zonder kustaangehechte banken, brekerbanken aan de kust en de zandgolfvelden offshore met lage daaronder liggende zandbanken. De dynamische trends offshore zijn vrij groot (-0,15 tot +0,2 m/jr), daarentegen is de gemiddelde range kleiner dan 1 m (met maxima tot ongeveer 4 m).

Zuid-Holland

De kustmorfologie bij Zuid-Holland in het zuidelijke deel van dit gebied is een brede, geleidelijke onderwateroever. In het noordelijke deel van dit gebied bevinden zich kustaangehechte banken met – in het diepere deel – zandgolven op de kammen en in de troggen; in het kustnabije deel en het zuidelijke deel komen geen zandgolven voor. Dicht langs de kustlijn strekt zich een serie van 2 of 3 brekerbanken uit in nagenoeg het gehele gebied.

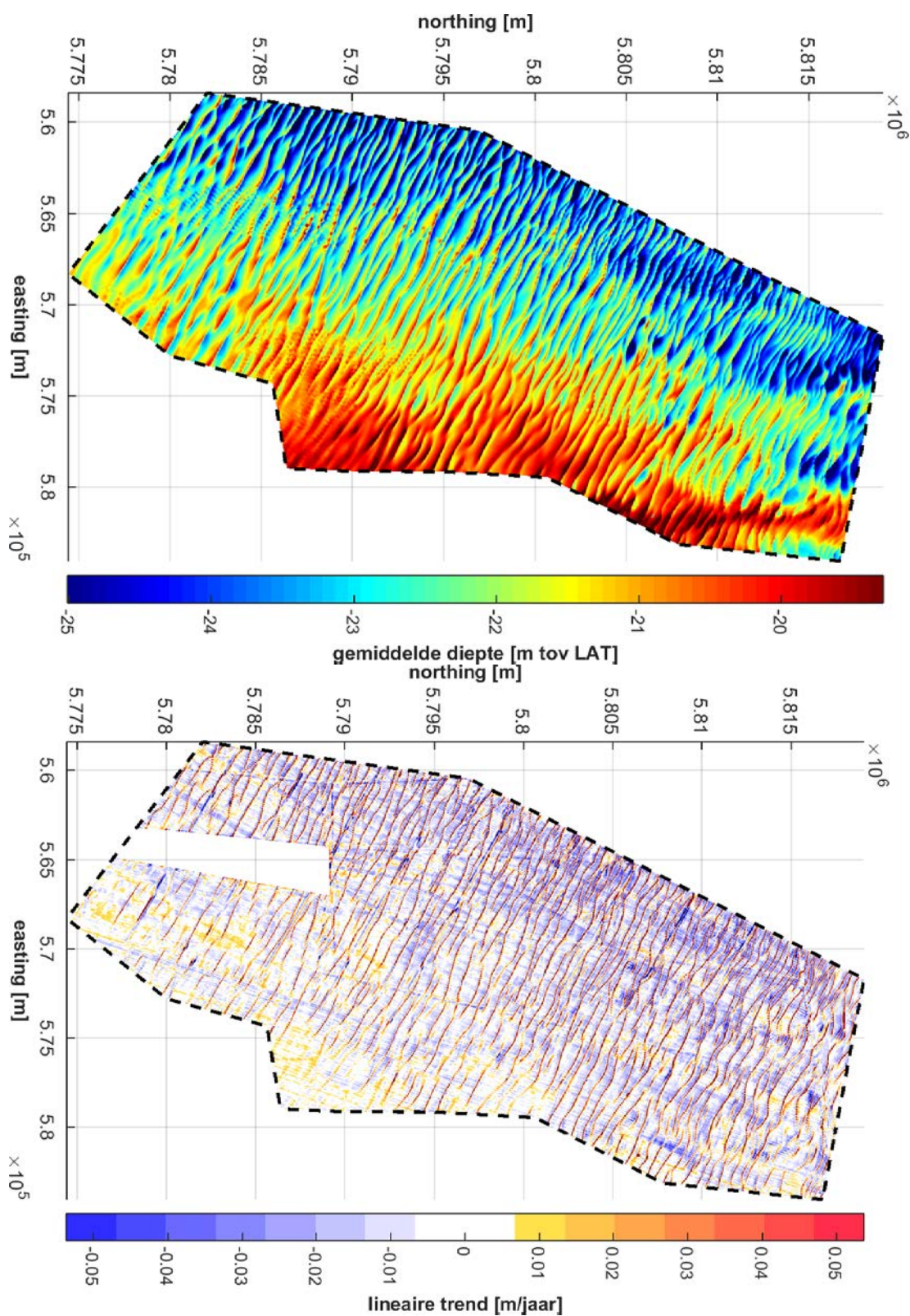
De morfologie in het offshore gebied is gekenmerkt door een zandgolvenveld op naar het westen hellende bodem met lage grootschalige morfologie zoals zandbanken (Figuur 3.9 boven). In het oosten zijn de zandgolven regelmatig met relatief rechte kammen en grote golflengten van 500 tot 700 m. Het karakter van de zandgolven verandert gradueel in zeewaartse richting met een toenemende sinusoiditeit en een afnemende golflengte (350 – 600 m). De bodemligging in het offshoregebied varieert tussen -15 en -26 m LAT.

De verticaal dynamische trends van de bodem in kaartbeeld van het offshoregebied (Figuur 3.9 onder) laten een zandgolvenpatroon zien van smalle lijnen waar de dynamische trends maximaal en positief zijn (groter dan +0,05 m/jr) met negatief, laag-dynamische zones daartussen (0 tot -0,03 m/jr). De lijnpatronen in zuidwest-noordoostelijke richting zijn data-artefacten langs de vaarlijnen, lijnen haaks daarop zijn artefacten door de controleslagen, en ook de ongeveer noord-zuid georiënteerde lijnen zijn data-artefacten langs de grenzen van

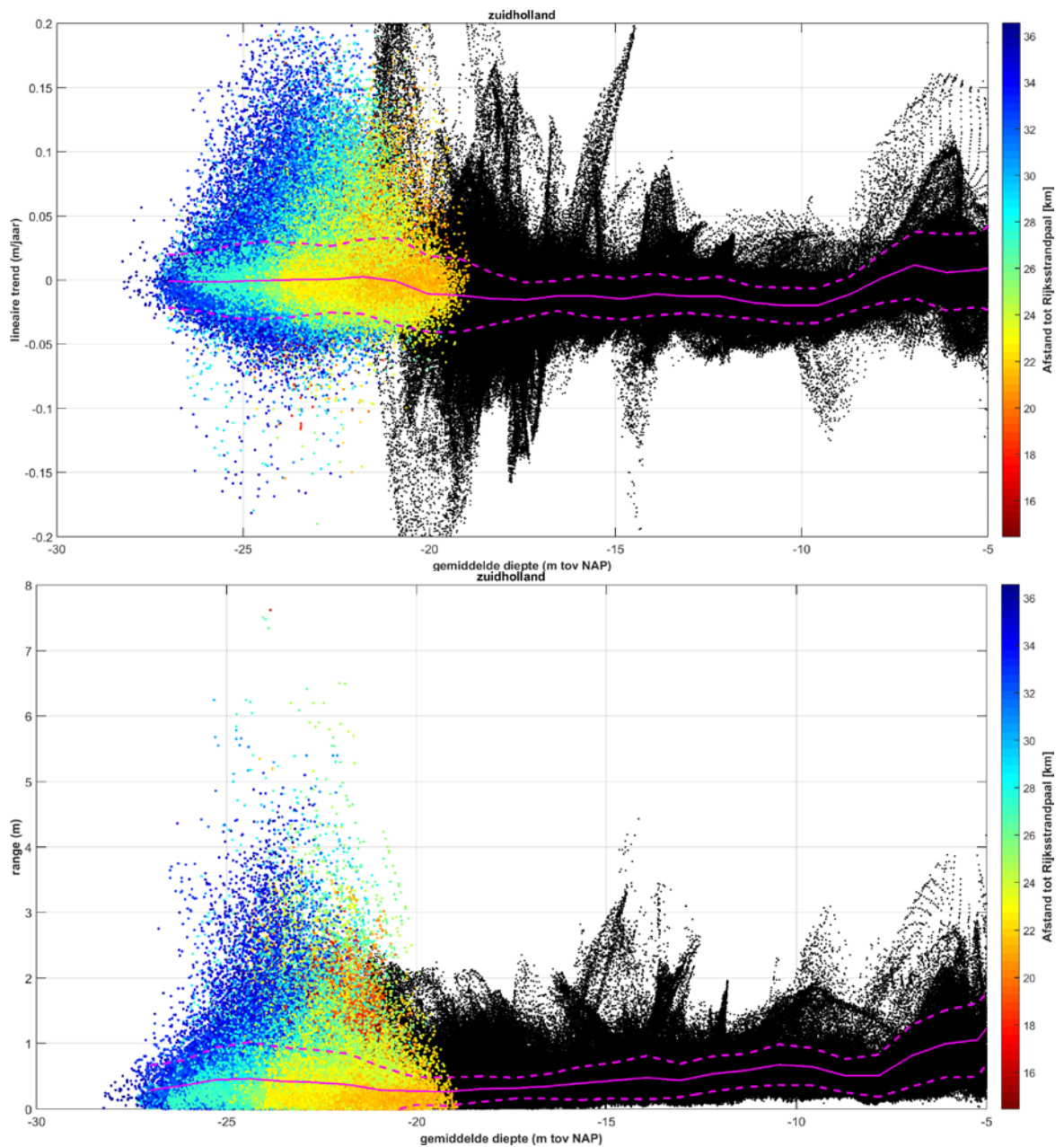
de surveys (overeenkomend met de vaarroutes). Als deze lijnen worden genegeerd, zou de bodemdynamiek grotendeels rondom 0 m/jr zijn. Het geheel witte vlak (midden onderin) is veroorzaakt door het ontbreken van waarnemingen.

Wanneer de offshore-dynamiek samen met de kustdynamiek wordt geplot (Figuur 3.10 boven), blijkt dat de spreiding van de waarden van vergelijkbare grootte is als de kustdynamiek. De waarden van de dynamische trends uitgezet tegen de diepte (Figuur 3.10 boven) laten zien dat over de gehele diepte van -19 tot -25 m NAP een spreiding van dynamische trends voorkomt tot ongeveer 0,2 m/jr (brede puntenwolk) en dat de diepte systematisch toeneemt met de afstand tot de kust. De brede wolk geeft de variatie in dynamiek van de zandgolven. De range geeft een soortgelijke verdeling (Figuur 3.10 onder) met maximale waarden tot 4 meter (extremen tot meer dan 7 m).

De gemiddelde bodemdynamiek (roze lijn) neemt af tot ca. 0 m/jr op -9 à -10 m NAP, en blijft op grotere diepte rondom de 0 m/jr. De gemiddelde range neemt af van 1,2 m op -5 m NAP waterdiepte tot 0,5 m op 8 m waterdiepte, neemt daarna langzamer af in grootte naar ~0,3 m op ~ -19 m NAP en neemt weer iets tot 0,5 m voor de offshore data.



Figuur 3.9 Boven: bathymetrie van de zandgolven morfologie in het offshore vak bij Zuid-Holland met waterdiepten in m LAT. X- en Y-coördinaten zijn in UTM31N WGS84. Onder: Kaart van de gecorrigeerde verticale bodemdynamiek (lineaire trend in m/jr).



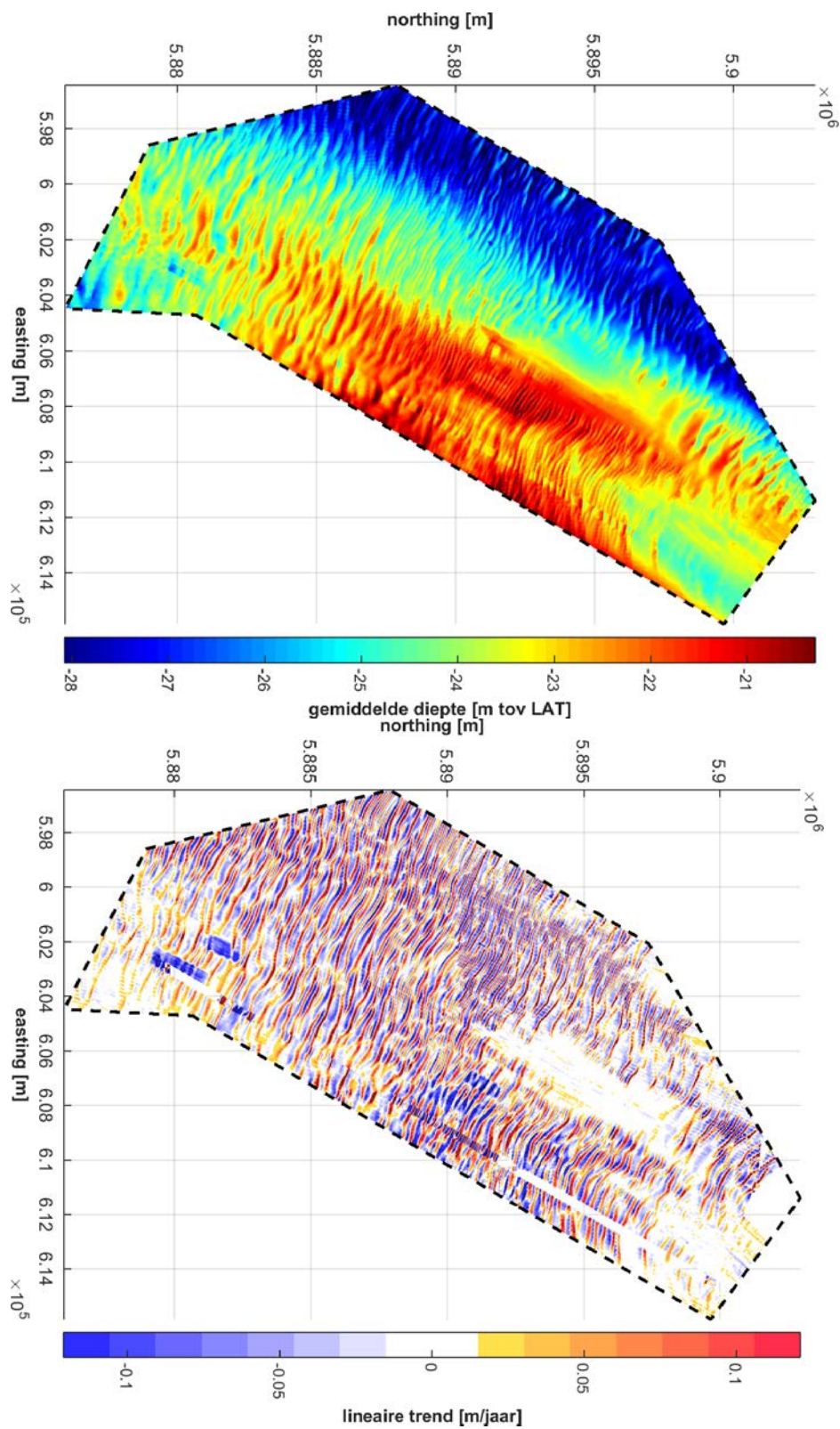
Figuur 3.10 Boven: de gecorrigeerde bodemdynamiek (m/jr) uitgezet tegen de gemiddelde waterdiepte (m NAP) van gecombineerde vakken bij Zuid-Holland op basis van kustlodingen (zwarte punten) en offshore lodingen (gekleurde punten). De kleuren geven de afstand tot de strandpalen aan van de offshore data en zijn ter onderscheid van variërende waterdiepten. De gemiddelde waarden (doorgetrokken lijnen) en standaard deviatie (gestippelde lijnen) zijn weergegeven in roze. Onder: het verschil tussen minimum en maximum bodemhoogte (m) in de tijd van gecombineerde vakken bij Zuid-Holland.

Texel

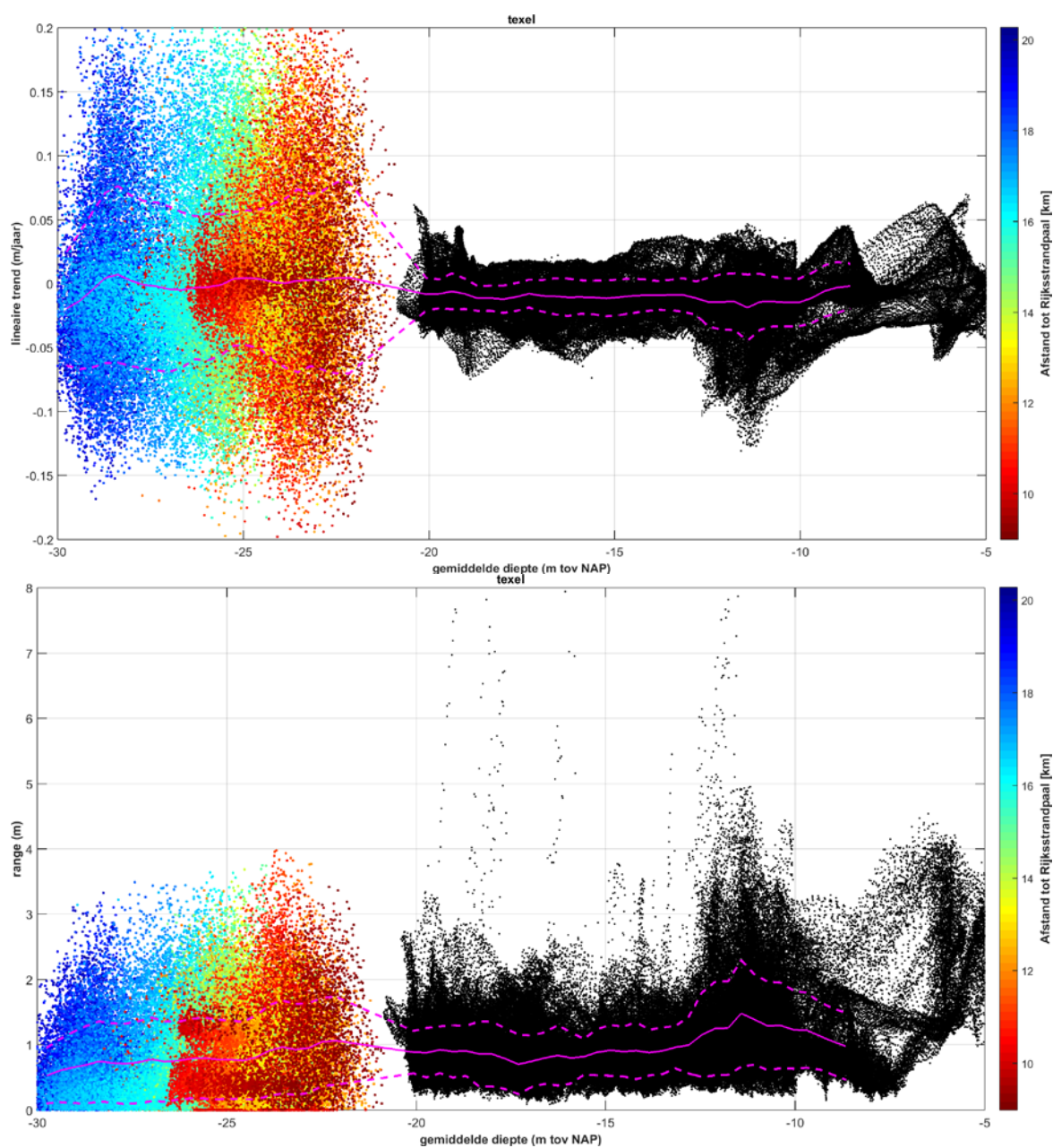
Het kustvak bij Texel laat een soortgelijke morfologie zien met een brede, geleidelijke helling van onderwateroever met slecht-ontwikkelde kustaangehechte banken en kustlangse brekerbanken nabij de kustlijn. De zeewaartse grens van het kustvak ligt op de overgang naar het offshore zandgolvengebied. Bodemhoogten in het kustvak variëren van -2 m LAT iets uit de kust tot -20 m LAT langs de westrand. De offshore morfologie wordt gekenmerkt door zandgolven op een lage, brede, bank-achtige verondieping en op de helling kustafwaarts (Figuur 3.11 boven). Bodemhoogten variëren van -20 m op de ondiepte en -30 m LAT verder offshore.

Ook voor het zandgolvenveld bij Texel is in de kaart van de verticale bodemdynamiek (Figuur 3.11 onder) een zandgolfpatroon te zien, maar in dit geval van meer symmetrische rood-blauwe paren dan offshore Zuid-Holland, met maximale waarden van -0,2 tot +0,2 m/jr (zie Figuur 3.12 boven). In de bodemdynamiekaart zijn twee zones van lage dynamiek (wit, ~0 m/yr) te zien, en dit zijn wederom gebieden waar zandgolven afwezig zijn. De brede banen in de vaarrichting (zw-no) met grote negatieve bodembeweging (blauw) zijn veroorzaakt door data-artefacten. De kleurenwolken in Figuur 3.12 laten zien dat de diepte geleidelijk toeneemt met de afstand tot de kust, en dat de mate van dynamiek niet afhankelijk is van waterdiepte over dit bereik, maar van het al dan niet voorkomen van zandgolven. Zo zijn de kleine geconcentreerde wolken van kustnabije (rood) dieper-water zones (-25 tot -26 m NAP op de x-as) met zeer lage dynamiek (rondom 0 m/jr) de zones waar zandgolven afwezig zijn. De ranges in bodemligging in het offshoregebied zijn maximaal 3 - 4 m (Figuur 3.12 onder), met ook een geconcentreerde wolk van een kust-nabije, dieper-gelegen zone met lage verschillen in bodemligging (0.4 m) en een dergelijke wolk van 1,2 m. De ene zou een zone van natuurlijke lage range kunnen weergeven en de andere een groep zou veroorzaakt kunnen zijn door data-artefacten.

De gemiddelde bodemdynamiek van de kust naar offshore (roze lijn) laat nog een kleine afname zien tussen -8 en -10 m NAP, en is in de verdere kustdata nagenoeg gelijk. Het ontbreken van de roze lijn in het dieptebereik -5 tot -8 m NAP komt doordat het aantal punten niet voldoet aan de drempelwaarde opgelegd in de methode (er zijn niet genoeg punten met deze dieptes in dit gebied, zie ook paragraaf 2.2). In de offshore data ligt de bodemdynamiek rond 0 m/jr (gecorrigeerde dz/dt) met grote standaard deviaties door de brede puntenwolk.



Figuur 3.11 Boven: bathymetrie van de zandgolven morfologie in het offshore vak bij Texel met waterdiepten in m LAT. X- en Y-coördinaten zijn in UTM31N WGS84. Onder: Kaart van de gecorrigeerde verticale bodemdynamiek (lineaire trend in m/jr).



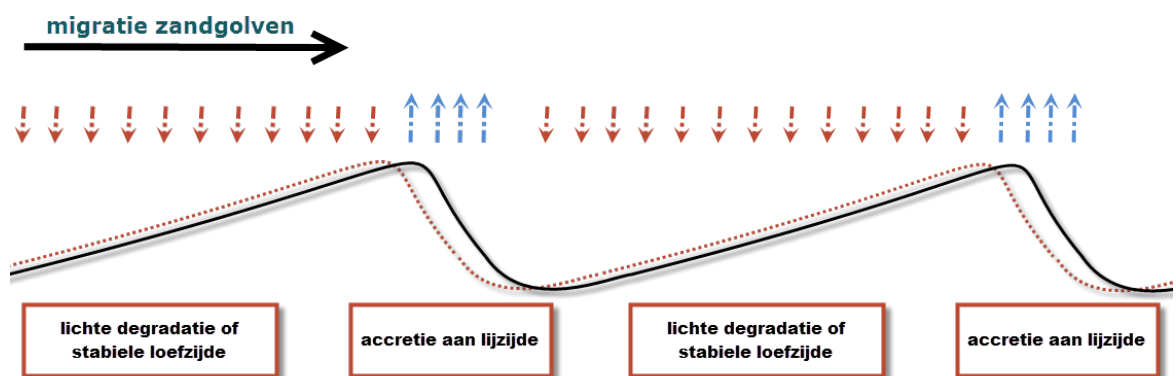
Figuur 3.12 Boven: de gecorrigeerde bodemdynamiek (m/jr) uitgezet tegen de gemiddelde waterdiepte (m NAP) van gecombineerde vakken bij Texel op basis van kustlodingen (zwarte punten) en offshore lodingen (gekleurde punten). De kleuren geven de afstand tot de strandpalen aan van de offshore data en zijn ter onderscheid van variërende waterdiepten. De gemiddelde waarden (doorgetrokken lijnen) en standaard deviatie (gestippelde lijnen) zijn weergegeven in roze. Onder: het verschil tussen minimum en maximum bodemhoogte (m) in de tijd van gecombineerde vakken bij Texel.

Interpretatie van Zuid-Holland en Texel

De dunne lijnen van maximaal positieve dynamische trends in het offshore gebied van Zuid-Holland geeft de migratie van zandgolven weer, waar bij de lijzijden verticale accretie laten zien. De stabiele tot laag-negatieve delen daartussen zijn de licht-degraderende loefzijden van zandgolven (Figuur 3.13). De stationaire zones nabij Texel waar zandgolven afwezig zijn, in een verder dynamisch en meer symmetrisch zandgolvenveld, geven aan dat de aanwezigheid van zandgolven bepalend is voor de mate van verticale bodemdynamiek in offshore gebieden (zie ook Van Dijk et al., 2011).

In vergelijking met de kustdynamiek (zwarte punten in Figuur 3.12) is de variatie in de offshore dynamische trends veel groter. Dit komt enkel door de dynamiek van de zandgolven, want is tegengesteld aan de grootschaligere verdeling van een dynamische kust en een veel minder dynamisch continentaal plat (Van Dijk et al., 2011). De maximale ranges in bodemligging offshore (3 - 4 m) komt overeenkomt met de maximale zandgolfhoogte in dit gebied (3.2 m in Van Dijk et al., 2011; zie ook Van der Meulen et al., 2004).

De gemiddelde bodemdynamiek en range stabiliseren rond de -10 m (Zuid-Holland) en -13 m (Texel) NAP.



Figuur 3.13 Schematische weergave van de verticale dynamiek bij (horizontaal) migrerende zandgolven

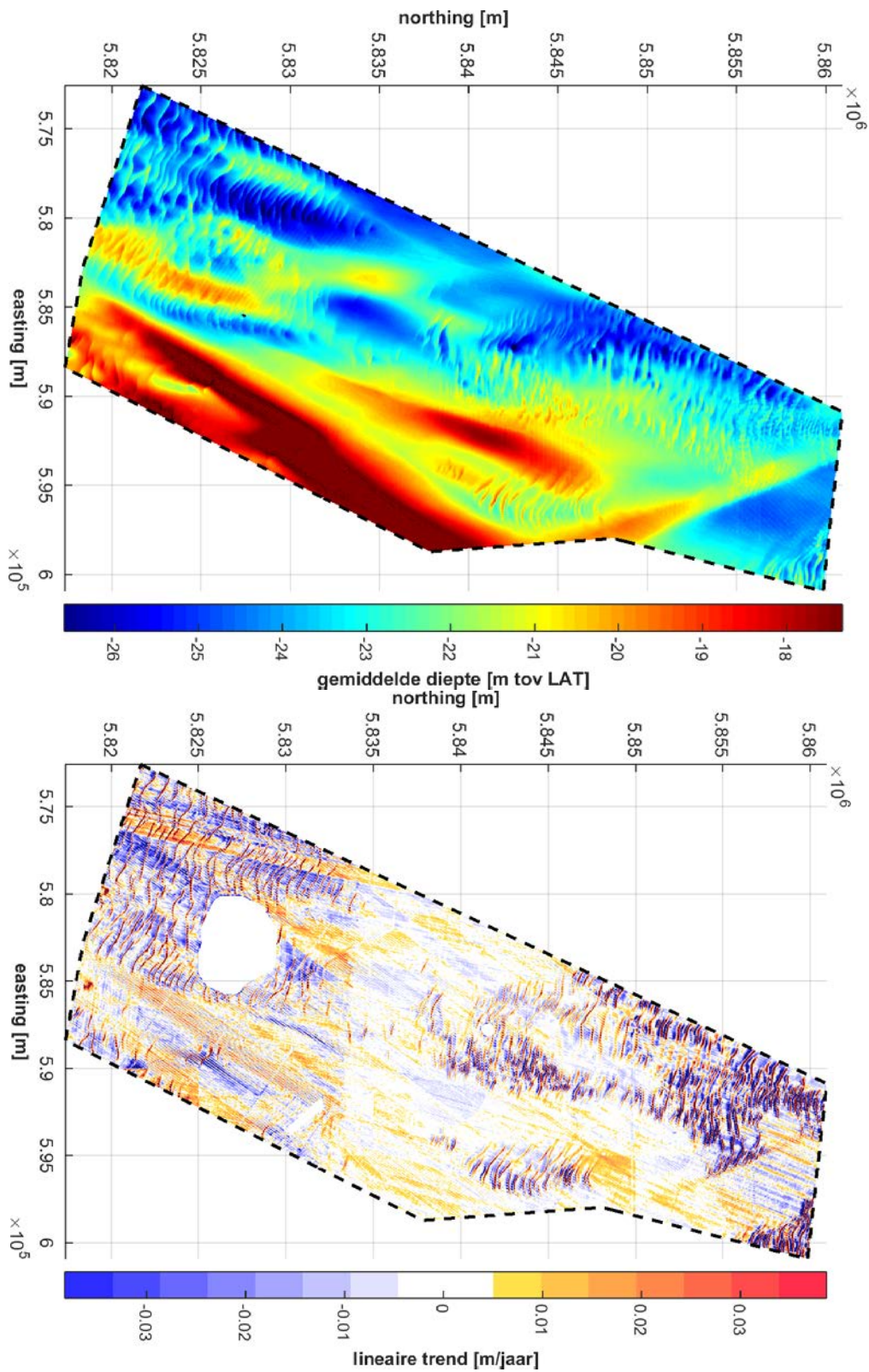
3.3.3 Noord-Holland

Noord-Holland is een soort overgangsgebied met zowel kust-aangehechte banken als noord-zuid georiënteerde banken die verder offshore hier meer voorkomen (Figuur 3.14, boven). Een deel van de banken en troggen is zonder zandgolven, maar er komen ook geïsoleerde zandgolfvelden in het gebied voor. De dieptes liggen tussen ca. -18 en -26 m LAT. In het kustgebied zijn ook kustaangehechte banken aanwezig en brekerbanken aan de kust, hier komen geen zandgolven voor.

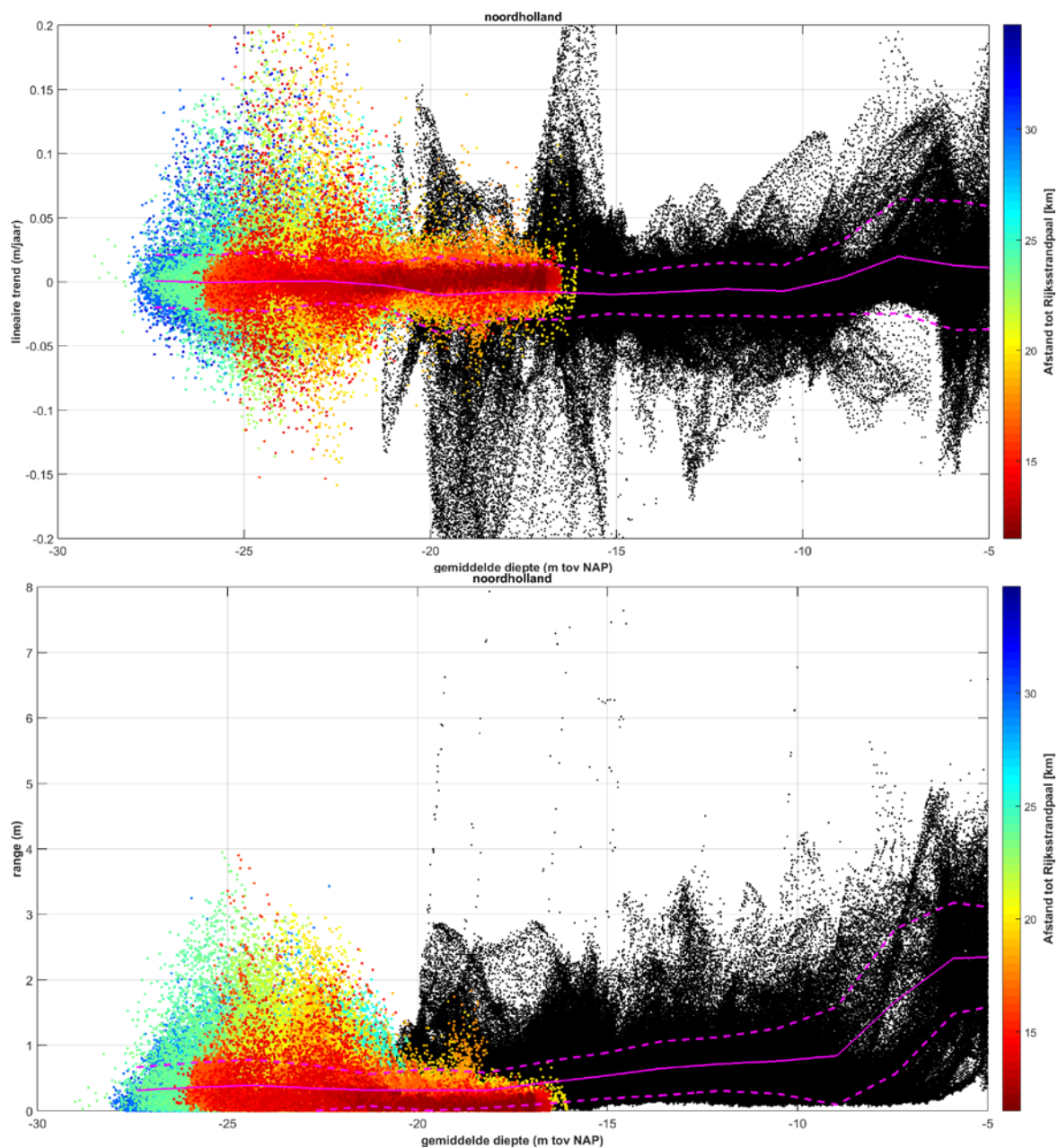
In de verticale bodemdynamiek (Figuur 3.14, onder) zijn de zandgolf velden duidelijk te herkennen aan de meer dynamische gebieden met afwisselende positieve en negatieve trends. Deze dynamische gebieden laten een dynamiek zien tussen -0,04 en +0,04 m/jaar (Figuur 3.15, boven). Tussen de zandgolfvelden in is de dynamiek bijzonder laag (grote delen in Figuur 3.14 onder zijn wit). Het ronde 'gat' wat in het zuiden van het gebied te zien is komt door het daar aanwezige windmolenpark, waardoor er niet genoeg bodemopnames zijn.

De scatterplot van de verticale bodemdynamiek (Figuur 3.15, boven) toont een kleine spreiding van de dynamiek op de ondiepe offshore delen (tot ca. -20 m NAP). Dit zijn voornamelijk de punten op de ondiepe kust-aangehechte banken, waar geen zandgolven op aanwezig zijn. Op grotere dieptes is een grotere spreiding te zien, veroorzaakt door de daar aanwezige zandgolven. De gemiddelde dynamiek ligt voor alle dieptes onder -10 m NAP rond de 0 m/jaar. Op dieptes boven -10 m NAP is wordt de gemiddelde trend groter en positief.

Ook in de range van de offshore data is een kleinere spreiding te zien tot ca. -20 m NAP en een grotere op de diepere delen (Figuur 3.15, onder). Gemiddeld blijft de range ongeveer hetzelfde en ligt die rond de 0,5 meter. Ondieper dan -15 m NAP neemt de range langzaam toe, en vanaf -10 m NAP sneller om ca. 2 meter te zijn op -5 m NAP.



Figuur 3.14 Boven: bathymetrie van de zandgolven morfologie in het offshore vak bij Noord-Holland met waterdiepten in m LAT. X- en Y-coördinaten zijn in UTM31N WGS84. Onder: Kaart van de gecorrigeerde verticale bodemdynamiek (lineaire trend in m/jr).



Figuur 3.15 Boven: de gecorrigeerde bodemdynamiek (m/jr) uitgezet tegen de gemiddelde waterdiepte (m NAP) van gecombineerde vakken bij Noord-Holland op basis van kustlodingen (zwarte punten) en offshore lodingen (gekleurde punten). De kleuren geven de afstand tot de strandpalen aan van de offshore data en zijn ter onderscheid van variërende waterdiepten. De gemiddelde waarden (doorgetrokken lijnen) en standaard deviatie (gestippelde lijnen) zijn weergegeven in roze. Onder: het verschil tussen minimum en maximum bodemhoogte (m) in de tijd van gecombineerde vakken bij Noord-Holland.

3.3.4 Ameland en Terschelling

De gebieden van zowel Ameland als Terschelling liggen aan de open Noordzeekust ten noorden van de eilanden, tussen de buitendelta's van de zeegaten. In de kustvakken zijn er de onderwateroevers en in de offshorevakken vormen kust-aangehechte banken de morfologie. De dynamische trends zijn zó laag dat data-artefacten de dynamiek in beide gebieden domineren.

Terschelling

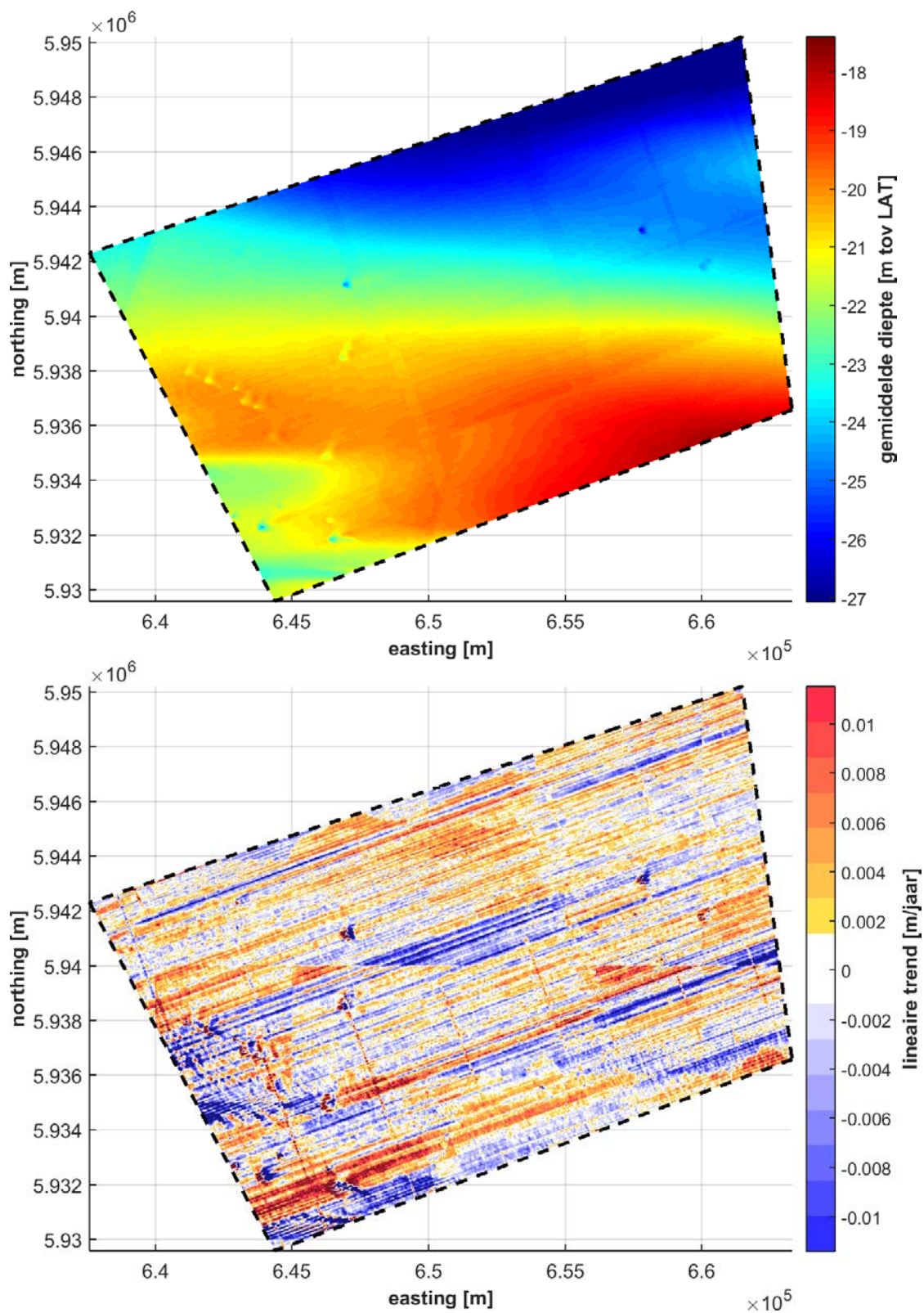
De kustmorfologie bestaat uit een rechte kust met een geleidelijke helling van de onderwateroever. Voor de kust komen kustlangse banken voor.

Offshore is een brede kustaangehechte bank te zien (de brede ondiepe zone) is zonder gesuperponeerde zandgolven (Figuur 3.16, boven). De opvallende kleine, ronde verdiepingen worden mogelijk veroorzaakt door scheepswrakken, maar dit is niet geverifieerd. De waterdiepte in het gebied ligt tussen de -18 en -27 m LAT.

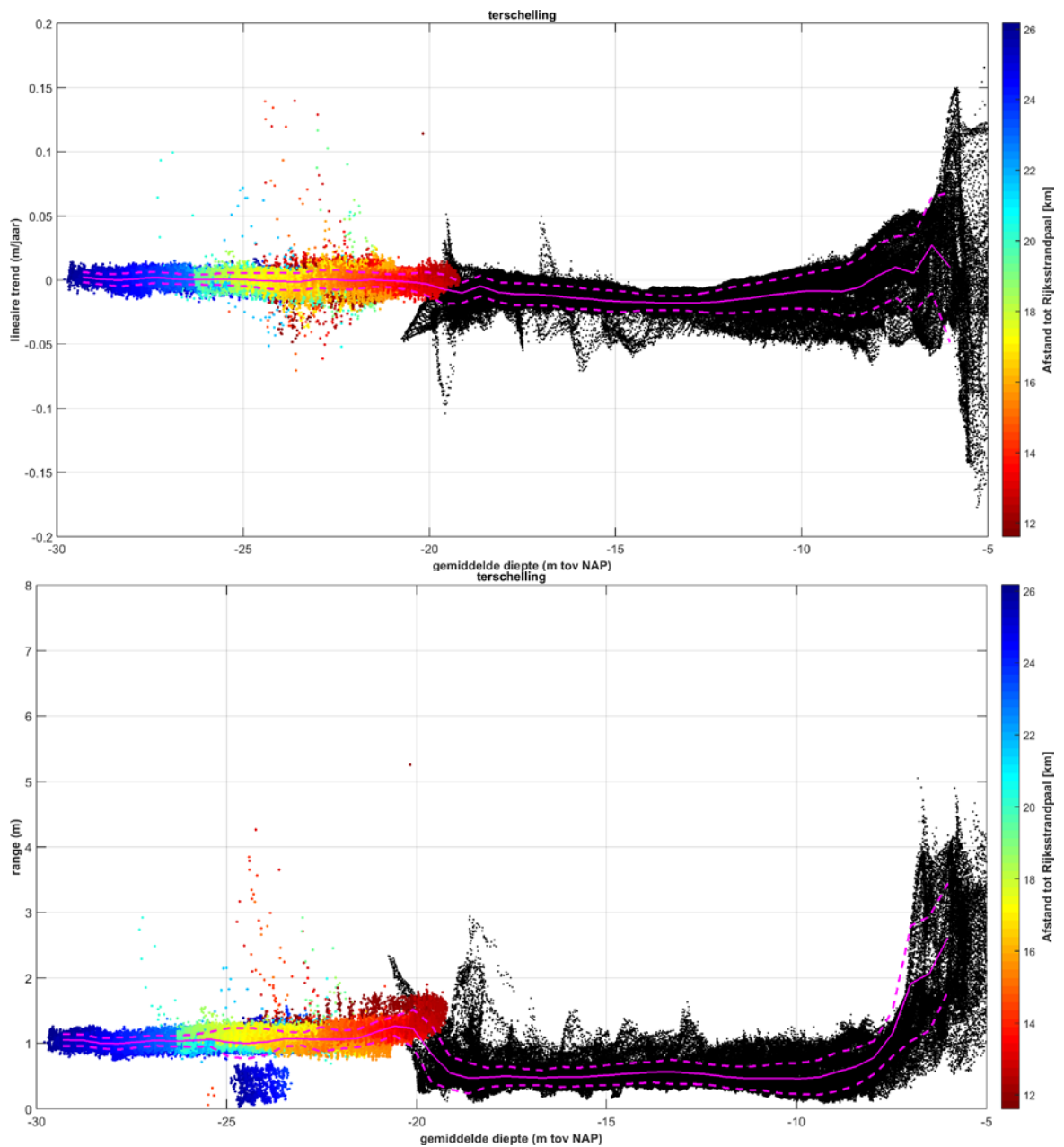
De dynamiek in dit gebied laat een opmerkelijk patroon zien van banen die ongeveer zuidwest-noordoost lopen (Figuur 3.16, onder) en banen daar loodrecht op. Ook loopt er een horizontale lijn ter hoogte van 5940000 en is de dynamiek heel laag in vergelijking met de andere beschreven gebieden: tussen -0,01 en +0,01 m/jaar (NB de schaal in Figuur 3.16 onder wijkt sterk af van andere vergelijkbare plots). De patronen worden hier veroorzaakt door data-artefacten: de ZW-NO banen weerspiegelen de vaarrichting, de banen loodrecht erop zijn controle lijnen, en de horizontale lijn is waarschijnlijk een grens van een opname.

In de scatterplot van de verticale bodemdynamiek (Figuur 3.17, boven) is er weinig spreiding in de puntenwolk offshore te zien en heeft de bodemdynamiek ook een zeer lage standaarddeviatie. De opeenvolging van rode punten rondom -20 m NAP naar blauwe punten bij -30 m NAP laat zien dat de diepte hier toeneemt in offshore richting. De dynamiek in het kustvak, is rondom -6 m NAP het grootste (en gemiddeld positief) en neemt af met de diepte. Vanaf ca. 10 tot 12 m NAP is de gemiddelde dynamiek vrijwel constant. Er is een kleine knik in de gemiddelde dynamiek te zien bij de overgang van kustdata naar offshore data. Mogelijk komt dit doordat de offshore trend is gecorrigeerd voor relatieve verschillen en de kust trend niet.

De scatterplot van de range (Figuur 3.17, onder) laat offshore een range van ca. 1 meter zien, met een zeer lage standaarddeviatie. De range in het offshore gebied is vrijwel gelijk op alle dieptes. De punten met afwijkend lage range (blauwe wolk rond -24 m NAP) worden veroorzaakt door een klein deel van het gebied waar een andere combinatie aan bodemopnames is. In de kustdata is een zeer duidelijke afname van de range met de diepte te zien. Tussen -6 m NAP en -10 m NAP neemt de range af van ruim 2 meter naar ca. 0,5 meter. Tussen -10 en -20 m NAP blijft de range vrijwel gelijk. Bij de overgang naar offshore data is er echter een duidelijke knik te zien. Dit is waarschijnlijk niet veroorzaakt door een natuurlijke verandering, maar doordat er in de offshore data verschillen zitten door andere reductievlakken. Voor de lineaire trend is hiervoor gecorrigeerd, maar voor de range was dat (nu) niet mogelijk.



Figuur 3.16 Boven: bathymetrie van de zandgolven morfologie in het offshore vak bij Terschelling met waterdiepten in m LAT. X- en Y-coördinaten zijn in UTM31N WGS84. Onder: Kaart van de gecorrigeerde verticale bodemdynamiek (lineaire trend in m/jr) – NB: de schaal wijkt sterk af van de andere kaarten met gecorrigeerde verticale bodemdynamiek.



Figuur 3.17 Boven: de gecorrigeerde bodemdynamiek (m/jr) uitgezet tegen de gemiddelde waterdiepte (m NAP) van gecombineerde vakken bij Terschelling op basis van kustlodingen (zwarte punten) en offshore lodingen (gekleurde punten). De kleuren geven de afstand tot de strandpalen aan van de offshore data en zijn ter onderscheid van variërende waterdiepten. De gemiddelde waarden (doorgetrokken lijnen) en standaard deviatie (gestippelde lijnen) zijn weergegeven in roze. Onder: het verschil tussen minimum en maximum bodemhoogte (m) in de tijd van gecombineerde vakken bij Terschelling.

Ameland

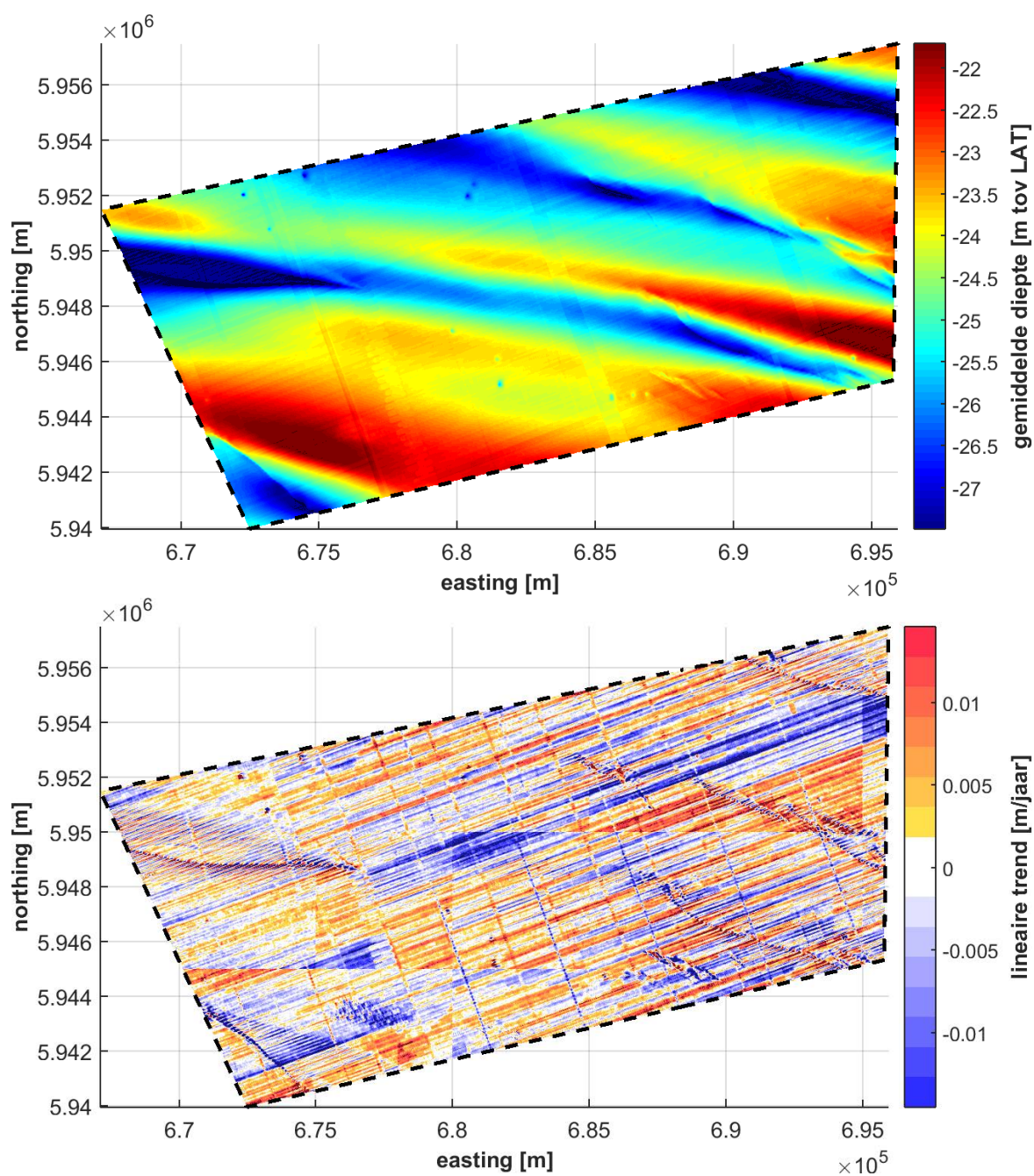
Het kustvak bij Ameland toont een vergelijkbare morfologie als bij Terschelling: een open kust met een geleidelijke helling van de onderwateroever en kustlangse banken.

In het offshore gebied zijn kust-aangehechte banken zonder gesuperponeerde zandgolven te zien (Figuur 3.18, boven). De west-noordwest naar oost-zuidoost georiënteerde banken en troggen hebben dieptes tussen -22 en -27 m LAT. Ook hier zijn weer kleine, ronde verdiepingen te zien die mogelijk worden veroorzaakt door scheepswrakken.

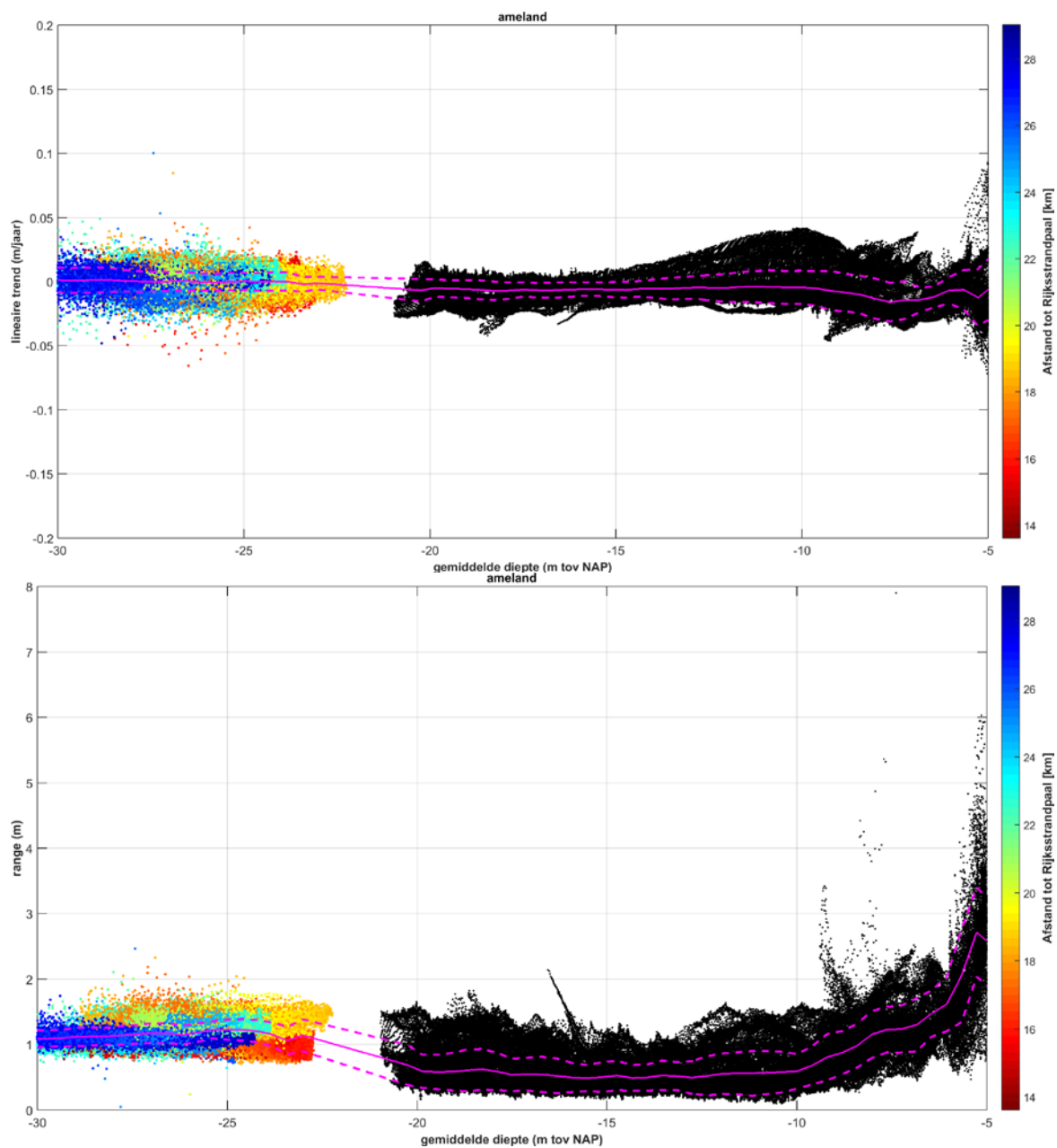
In de verticale bodemdynamiek (Figuur 3.18, onder) zijn dezelfde patronen als bij Terschelling te zien, veroorzaakt door data-artefacten. Naast de patronen door data-artefacten, zijn ook nog patronen te zien die samenhangen met de morfologie. Dit zijn de gebogen patronen die te zien zijn tussen de loodrechte lijnen van de data-artefacten. Deze liggen voornamelijk in de troggen, maar we kunnen nu geen eenduidige verklaring geven van de morfologische veranderingen die ze veroorzaken. De dynamiek is ook hier zeer laag te noemen, en heeft een vergelijkbare grootte als bij Terschelling (tussen -0,01 en +0,01 m/jaar). Van Dijk et al. (2011) hebben de horizontale verplaatsing van deze banken berekend en geven aan dat die lager ligt dan de nauwkeurigheid van de data en dus niet vastgesteld kan worden.

De lage offshore dynamiek wordt weerspiegeld in de smalle puntenwolk in de scatterplot (Figuur 3.19, boven) met een lage standaarddeviatie. De ondiepere punten die verder uit de kust liggen (blauwe punten rondom -25 m NAP) en diepere punten dicht bij de kust (oranje punten rond ca. -27 m NAP) laten een zelfde dynamiek zien als de andere punten. De dynamiek in het kustgedeelte is laag, ook in vergelijking met Terschelling. Enige verandering is er te zien tot -10 m NAP, dieper blijft de gemiddelde trend heel constant en sluit goed aan bij de offshore data. Opmerkelijk is dat hier de veranderingen ook ondieper dan -10 m NAP negatief blijven, wat in geen van de andere gebieden voorkomt. Het gat dat er tussen offshore en kustpunten zit komt doordat de gebieden helemaal niet aansluiten (Figuur 2.2) vanwege de aanwezigheid van zandwinputten.

De scatterplot van de range (Figuur 3.19, onder) is heel vergelijkbaar met die voor Terschelling. In de kustdata neemt de gemiddelde range af van ruim 2 meter rondom -6 m NAP naar ca. 0,5 meter bij -10 m NAP en blijft daarna constant. Weer is een knik te zien in de overgang naar offshore data, waar de range ca. 1 meter is. De oorzaak is ook hier waarschijnlijk het niet corrigeren voor relatieve verschillen tussen de verschillende bodemopnames.



Figuur 3.18 Boven: bathymetrie van de zandgolven morfologie in het offshore vak bij Ameland met waterdiepten in m LAT. X- en Y-coördinaten zijn in UTM31N WGS84. Onder: Kaart van de gecorrigeerde verticale bodemdynamiek (lineaire trend in m/jr).



Figuur 3.19 Boven: de gecorrigeerde bodemdynamiek (m/jr) uitgezet tegen de gemiddelde waterdiepte (m NAP) van gecombineerde vakken bij Ameland op basis van kustlodingen (zwarte punten) en offshore lodingen (gekleurde punten). De kleuren geven de afstand tot de strandpalen aan van de offshore data en zijn ter onderscheid van variërende waterdiepten. De gemiddelde waarden (doorgetrokken lijnen) en standaard deviatie (gestippelde lijnen) zijn weergegeven in roze. Onder: het verschil tussen minimum en maximum bodemhoogte (m) in de tijd van gecombineerde vakken bij Ameland.

3.4 Ondergrens dynamische deel van de kust

Langs de Nederlandse kust komen grote verschillen voor in verticale bodemdynamiek. Op macro-schaal is de verticale bodemdynamiek groot in de kustgebieden (met name estuaria en zeegaten) en is de offshore zone, of het continentaal plat, veel minder dynamisch (Van Dijk et al., 2011; Winter, 2011). De analyse in deze studie van gekoppelde datasets van kustdata en offshore data laat zien dat de verticale kustdynamiek in zowel dz/dt als de range zeewaarts afneemt. De offshore dynamiek is lokaal zeer laag (rond 0 m/jr) in gebieden zonder mobiele bodemvormen en het bereik van bodemdynamiek (positief/negatief) is $-0,2 - +0,2$ m/jr en ranges (verschil minimaal-maximaal) tot zo'n 4 m wanneer bodemvormen aanwezig zijn (Tabel 3.1). Zo zijn voor de gebieden Westerschelde, Grevelingen en Haringvliet in deze studie, de contrasten groot tussen alle toppen van zandbanken met daarop zandgolven (hoge dynamiek) en sommige dalen tussen banken waar zandgolven afwezig zijn. Aan de Hollandse kust en nabij Texel contrasteert de kust met relatief dynamische zandgolfvelden (al is de gemiddelde dz/dt laag). Bij Ameland en Terschelling is de offshore dynamiek zo laag dat data-artefacten domineren.

Tabel 3.1 Beknopt overzicht eigenschappen van de onderzochte deelgebieden

Gebied	Offshore morfologie	Offshore dynamiek (m/jaar)	Offshore range	Overgang actief naar stabiel (m NAP)
Westerschelde, Grevelingen, Haringvliet	Kust-parallele of kust-aangehechte banken met daarover zandgolven	-0,1 tot +0,1	1 a 2 m	-13 tot -15
Zuid-Holland, Texel	Zandgolfvelden met geringe onderliggende zandbanken	-0,08 tot +0,08	0,5 tot 1 m	-10 (Zuid-Holland) -13 (Texel)
Noord-Holland	Banken met daarover geïsoleerde zandgolfvelden	-0,04 tot +0,04	Ca. 0,5 m	-10 tot -15
Ameland, Terschelling	Kust-aangehechte banken zonder zandgolven	-0,01 tot +0,01	Ca. 1 m, vermoedelijk door verkeerd reductievlak	Ca. -12

Op basis van de relatie tussen de dynamiek en de diepte blijkt er een verandering in gedrag te zien te zijn op een diepte tussen de -10 en -15 m NAP, afhankelijk van het gebied, zie Tabel 3.1. Onder deze grenswaarde laten zowel de range als de dz/dt een lage gemiddelde dynamiek zien, die ook weinig tot niets verandert naarmate de diepte toeneemt. Dit is van toepassing op de 'uniforme' kustgebieden die in deze studie zijn geanalyseerd, waar de hoog-dynamische gebieden met grote geulen niet in zijn meegenomen. De spreiding die in sommige gebieden te zien is in de dynamiek wordt in de eerste plaats verklaard door de daar aanwezige morfologie. Gebieden met zandgolven laten een grotere dynamiek zien dan gebieden waar ze afwezig zijn. Deze dynamiek heeft echter geen effect op de *netto* veranderingen in de gebieden, die wordt gerepresenteerd door de gemiddelde dynamiek.

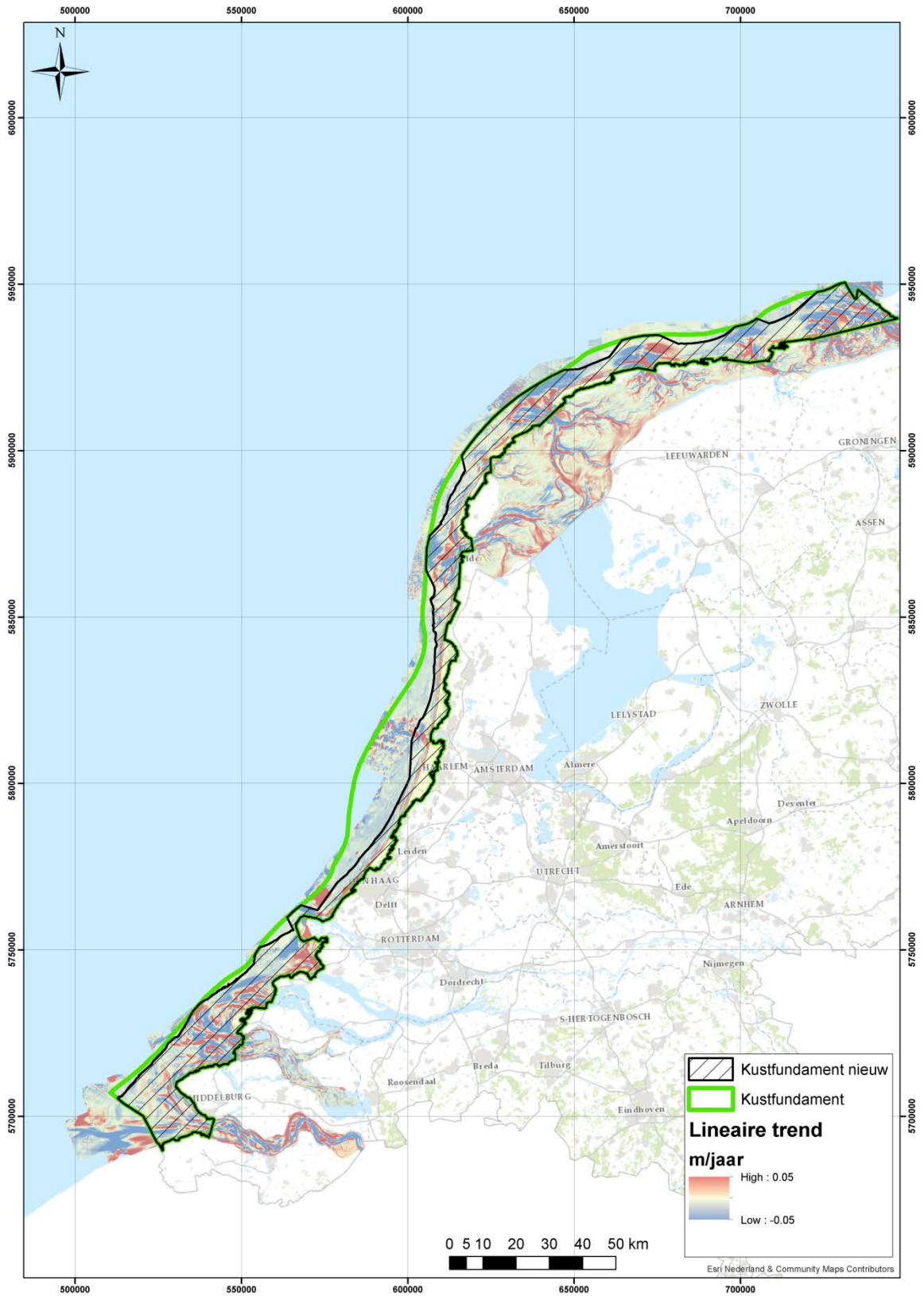
Vanwege de eenduidigheid is gekozen om de -15 m NAP voor de kust te hanteren als grens tussen het hoogdynamische en laagdynamische deel van het kustprofiel. Uitzondering hierop zijn de dynamische gebieden rondom de zeegaten, waar de -20 m NAP contour is aangehouden.

Zowel de -15 m contour als de -20 m contour zijn te zien in Figuur 3.20. Het grootste verschil komt voor langs de kust tussen Hoek van Holland en Den Helder. In de voordelta zijn slechts kleine veranderingen te zien: hier ligt de -15 m lijn dicht bij de -20 m lijn en zijn de buitendelta's van voornamelijk de Oosterschelde en Grevelingen dynamisch (te zien aan de grotere lineaire trends – de rode en blauwe kleuren). Ook bij de Waddeneilanden liggen de lijnen dicht bij elkaar, met name bij de buitendelta's van de zeegaten. Tussen deze delta's in liggen de lijnen verder uit elkaar.

De oppervlaktes van het huidige kustfundament en het op deze studie gebaseerde dynamische deel van de kust (voor de landwaartse grens is de grens van het kustfundament aangehouden) zijn te zien in Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Oppervlakte voor het huidige en het hoogdynamische gebied van de kust en het verschil daartussen

	Oppervlak (km²)
Huidig kustfundament	4396
Hoogdynamische gebied van de kust (voor de landwaartse grens is de grens van het kustfundament aangehouden)	3256
Verschil	1140



Figuur 3.20 Kustfundament met oude en nieuwe basis

4 Conclusies

4.1 Ruimtelijke variatie in kwantitatieve bodemdynamiek Nederlandse kust

Langs de Nederlandse kust komen grote verschillen voor in verticale bodemdynamiek. Op macro-schaal is de verticale bodemdynamiek groot in de kustgebieden (met name estuaria en zeegaten) en is de offshore zone, of het continentaal plat, veel minder dynamisch (Van Dijk et al., 2011; Winter, 2011). De analyse in deze studie van gekoppelde datasets van kustdata en offshore data laat zien dat de verticale kustdynamiek in zowel dz/dt als de range zeewaarts afneemt. De offshore dynamiek is lokaal zeer laag (rond 0 m/jr) in gebieden zonder mobiele bodemvormen en het bereik van bodemdynamiek (positief/negatief) is -0,2 - +0,2 m/jr en ranges (verschil minimaal-maximaal) tot zo'n 4 m wanneer bodemvormen aanwezig zijn. Zo zijn voor de gebieden Westerschelde, Grevelingen en Haringvliet in deze studie, de contrasten groot tussen alle toppen van zandbanken met daarop zandgolven (hoge dynamiek) en sommige dalen tussen banken waar zandgolven afwezig zijn. Aan de Hollandse kust en nabij Texel contrasteert de kust met relatief dynamische zandgolfvelden (al is de gemiddelde dz/dt laag). Bij Ameland en Terschelling is de offshore dynamiek zo laag dat data-artefacten domineren.

4.2 De rol van morfologie in de ruimtelijke variatie van bodemdynamiek

In alle geanalyseerde gebieden, was de verticale bodemdynamiek (dz/dt) hoog in gebieden waar zandgolven voorkomen en nagenoeg nul waar zandgolven afwezig zijn. Dit contrast was systematisch, en dus kan worden verondersteld dat de morfologie van de zeebodem bepalend is in de mate van verticale zeebodemdynamiek offshore. Aan de kust zijn vooral buitendelta's, zeegaten, brekerbanken en estuaria dynamisch, maar deze zijn buiten de geselecteerde datavakken gehouden.

4.3 Is de -20 m NAP lijn een goede ondergrens voor het dynamische deel van de kust?

In de resultaten is een overgang te zien van het ondiepe deel van de kust waar wel netto dynamiek optreedt naar het diepere deel waar dat niet gebeurt. Deze overgang is zowel in de range als in de lineaire trend te zien. Op dieptes groter dan deze overgang is te zien dat de netto verandering (de gemiddelde dynamiek) vrijwel gelijk blijft, tot ver onder de -20 m NAP. De overgang is in de verschillende gebieden te zien tussen -10 en -15 m NAP, duidelijk ondieper dan -20 m NAP.

De -20 m NAP lijn lijkt op basis van de in deze studie waargenomen dynamiek dieper te liggen dan de grens tussen het hoog- en laagdynamische deel van de kust.

Vanwege de eenduidigheid is gekozen om de -15 m NAP voor de kust te hanteren als grens tussen het hoogdynamische en laagdynamische deel van het kustprofiel. Uitzondering hierop zijn de dynamische gebieden rondom de zeegaten, waar de -20 m NAP contour is aangehouden.

Het oppervlak voor het hoogdynamische gebied van de kust is 26% kleiner dan het huidige kustfundament.

Deze analyseresultaten zijn gebaseerd op tijdreeksen van 20-45 jaar voor de kustvakken en 10-23 jaar voor de offshore vakken. Dit geeft een goede middellange termijn analyse. Voor aansluiting bij de beleidsdoelstellingen van het beheer en onderhoud van de kust op lange termijn (100-200 jaar), kunnen deze conclusies dienen voor uitspraken op de lange termijn.

4.4 Aanbevelingen

In deze studie zijn acht vrij grote deelgebieden langs de Nederlandse kust geanalyseerd. Tussen deze gebieden zijn verschillen waar te nemen in de mate van verticale bodemdynamiek en de diepte waarop de overgang ligt van hoog- naar laagdynamische delen. Om meer inzicht te krijgen in de ruimtelijke variatie van de bodemdynamiek langs de kust, zou een vergelijkbare analyse voor een serie kustprofielen, bv 20 km uit elkaar, of kleinere opeenvolgende vakken, een goed overzicht bieden. Op basis van een groter aantal profielen langs de kust, kan eventueel ook een ruimtelijk meer variabele grens voor de overgang van hoog- naar laagdynamische kustgebieden worden gebruikt.

Kustprofielen, waarin zowel de dynamiek als de range worden aangegeven afhankelijk van de afstand tot de kust op de x-as, zijn een goede aanvulling op de huidige studie om het inzicht in variatie in ondergrens in beeld te brengen.

Om uitspraken te doen over bodemdynamiek op de lange termijn (100-200 jaar) waarop de beleidsdoelstellingen zijn gebaseerd, zouden deze middellange-termijn resultaten kunnen worden gecombineerd met lange-termijn aspecten (criteria in beleid, extreme omstandigheden) om tot een inschatting van lange-termijn variaties in bodemdynamiek van de diepe onderwateroever te komen. Het onderzoeken van de impact van stormen op verschillende waterdiepten op de onderwateroever speelt daarbij een rol.

Referenties

Mulder, J.P.M., 2000. Zandverliezen in het Nederlandse kuststelsel - advies voor Dynamisch handhaven in de 21e eeuw. Rapport RIKZ/2000.36, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.

Van der Meulen, M.J., S.F. Van Gessel, J.J. Tiemersma and T.A.G.P. Van Dijk (2004). *Grind en stenen voor de kust van Texel en de winbare voorraad suppletiezand*. TNO-NITG, Report NITG 04-236-B1299: 25 pp.

Van Dijk, T.A.G.P., C. Van der Tak, W.P. De Boer, M.H.P. Kleuskens, P.J. Doornenbal, R.P. Noorlandt and V.C. Marges (2011). *The scientific validation of the hydrographic survey policy of the Netherlands Hydrographic Office, Royal Netherlands Navy*. Deltares, Report 1201907-000-BGS-0008: 165 pp.

<http://kennisonline.deltares.nl/3/m/search/products.html?q=hydrographic&qtype=1>.

Van Dijk, T.A.G.P., T. Vermaas en M. Hijma, 2014. KPP Onderzoek Bodemdynamiek 2014 - Effect van baggeren op bodemdynamiek locatie Maasgeul & Pilot koppeling Kust en Zee. Deltares rapport 1209377-010, Delft

V&W, 2000. 3e Kustnota: Traditie, Trends en Toekomst, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat.

Winter, C. (2011). Macro scale morphodynamics of the German North Sea coast. *Journal of Coastal Research* SI 64(Proceedings of the ICS2011, Poland): 706 - 710.