

**Meso schaal volumebalans
Westelijke Waddenzee**



Meso schaal volumebalans Westelijke Waddenzee

Bob Smits
Kees Nederhoff

Titel
Meso schaal volumebalans Westelijke Waddenzee

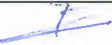



Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat	11202177-000	11202177-000-ZKS-0007	66

Trefwoorden
Waddenzee, morfologie, data analyse, geulen, platen, zeespiegelstijging

Samenvatting
Deze studie is onderdeel van KPP-programma Wadden Morfologie 2018 en bouwt verder op eerdere studies van Nederhoff et al. (2017) en Elias (2018). Het doel van deze studie is het opstellen van een volumebalans op mesoschaal van de Westelijke Waddenzee om de ontwikkeling van volume hoogte per deelgebied in kaart te brengen. Zo wordt beoogd meer inzicht te verkrijgen in de ontwikkeling van het beschouwde gebied en de variatie van deelgebieden. Hierin zijn de verhouding slib/zand en menselijke ingrepen expliciet meegenomen. Om de volumebalans en hoogteontwikkeling van de Westelijke Waddenzee te bepalen, zijn gegevens van de bodemligging van Elias (2018) gebruikt. De gehanteerde methode maakt onderscheid tussen 'geulen', 'subgetijdegebieden' en 'platen' op basis van temporeel-vaste begrenzingen. Dit is van belang aangezien er zo naar een gelijkblijvend gebied gekeken kan worden.

Het slibpercentage in de bodem van de Westelijk Waddenzee wordt geschat tussen de 13% (ondergrens) en 29% (bovengrens). Afhankelijk van de beschouwde periode lijkt de Westelijke Waddenzee als geheel te sedimenteren met 0,1 of 2,4 miljoen m³ per jaar (voor respectievelijk startjaar 1991 of 1986 tot 2015). Deze lineaire trends zijn echter statistisch niet significant waarbij in theorie moet worden gesteld dat de berekende trend op toeval berust. Daarnaast is de ruimtelijke variatie zeer groot en worden in Elias (2018) twijfels geplaatst bij de correctheid van de 1985 bodem. Om die reden is in meer detail gekeken naar individuele geulen, platen en subgetijdegebieden voor de periode 1991-2015.

Het merendeel van de geulen in de Westelijke Waddenzee sedimenteert. Het percentage slib in de geulen ligt rond 20%. Daarnaast sedimenteren sommige platen waarbij grote hoeveelheden slib worden afgezet. Over het algemeen lijken platen met lagere slibgehalten juist te eroderen. Niet alle platen in de Westelijke Waddenzee sedimenteren met een snelheid gelijk aan de historische zeespiegelstijging.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	dec. 2018	Bob Smits Kees Nederhoff	 	Edwin Elias		Frank Hoozemans	

Status
definitief

Inhoud

1	Introductie	1
1.1	Situatie	1
1.2	Probleemstelling	1
1.3	Doel van de studie	1
1.4	Leeswijzer	1
2	Methode	3
2.1	Algemeen	3
2.2	Formules en uitgangspunten	3
2.2.1	Balansformule	3
2.2.2	Gemeten, natuurlijke en kunstmatige sedimentatie	4
2.2.3	Sediment fracties	4
2.2.4	Trends volumeverandering en hoogteontwikkeling	5
2.3	Foutenbeschouwing	6
3	Meetgegevens	7
3.1	Beschikbare bathymetrische gegevens	7
3.2	Begrenzings morfologische eenheden	7
3.3	Zand / slib	10
3.4	Menselijke ingrepen	10
3.6	Zeespiegelstijging	12
4	Resultaten	13
4.1	Gehele Westelijke Waddenzee bekken	13
4.2	Geulen	15
4.3	Subgetijde (ondiepe delen)	19
4.4	Platen	19
4.5	Gevoeligheidsanalyse	25
4.5.1	Tijdsperiode	25
4.5.2	Ruimtelijke begrenzingen	25
5	Discussie	26
6	Conclusies en aanbevelingen	28
6.1	Conclusie	28
6.2	Aanbevelingen	28
	Referenties	30
	Bijlages	32
	Bijlage A: Samengestelde bodems 1985 – 2015	33
	Bijlage B: Geïnterpoleerde slibatlas inclusief meetpunten	34
	Bijlage C: Resultaten volumeverandering en hypsometrie geulen	36
	Bijlage D: Resultaten volumeverandering en hypsometrie subgetijdegebieden	46
	Bijlage E: Resultaten volumeverandering en hypsometrie platen	49
	Bijlage F: Gevoeligheidsanalyse begrenzingen	62

1 Introductie

Rijkswaterstaat en Programma naar een Rijke Waddenzee zijn in 2016 gestart met een programma voor de ontwikkeling van kennis over de morfologie van de Nederlandse Waddenzee en voor het inbedden hiervan in beleid en beheer. In het programma wordt morfologische kennis op een structurele manier verzameld, geanalyseerd, geordend en geborgd. Daarnaast wordt de kennis toegankelijk gemaakt voor beleids- en beheervraagstukken op het gebied van veiligheid, bereikbaarheid, natuur en overige gebruiksfuncties. Hiertoe wordt afstemming gezocht met beleidsmakers, beheerders, adviseurs, wetenschappers en gebruikers van het wad. Het voorliggende rapport wordt uitgebracht als onderdeel van dit kennisprogramma.

1.1 Situatie

De Westelijke Waddenzee wordt gekenmerkt door enerzijds grootschalig menselijk ingrijpen (e.g. afsluiting Zuiderzee) en anderzijds door autonome natuurlijke morfologische ontwikkelingen. Vanuit het beheer bestaat de behoefte om meer inzicht te krijgen in de effecten van menselijk ingrijpen en natuurlijke invloeden in de Waddenzee op de veiligheid, toegankelijkheid en natuurlijkheid van het systeem.

Diverse studies hebben de morfologische ontwikkeling van de (Westelijke) Waddenzee geanalyseerd op macroschaal (i.e. gehele bekken). Bijvoorbeeld, Nederhoff et al. (2017) en Elias et al. (2012) toonden aan dat grote sedimentatie in het Waddenzee bekken is opgetreden. In die laatste studie is aangetoond dat er ongeveer 573 miljoen m³ materiaal is gesedimenteerd tussen 1935 en 2005 in het Waddenzeebekken als gevolg van de afsluitingen en zeespiegelstijging. In de meest recente periode uit deze studie bedroeg de sedimentatie ongeveer 55 miljoen m³ tussen 1990 en 2005.

1.2 Probleemstelling

Morfologische analyses op macroschaal zijn niet geschikt voor het in detail analyseren hoe individuele platen en geulen zich ontwikkelen in de tijd. Dit is echter wel een van de vragen vanuit het beheer. Vragen die vaak opkomen tijdens discussies zijn: 1) Is de Waddenzee meegegroeid met historische zeespiegelstijging en 2) kan de Waddenzee potentieel mee blijven groeien met toekomstige (versnelde) zeespiegelstijging?

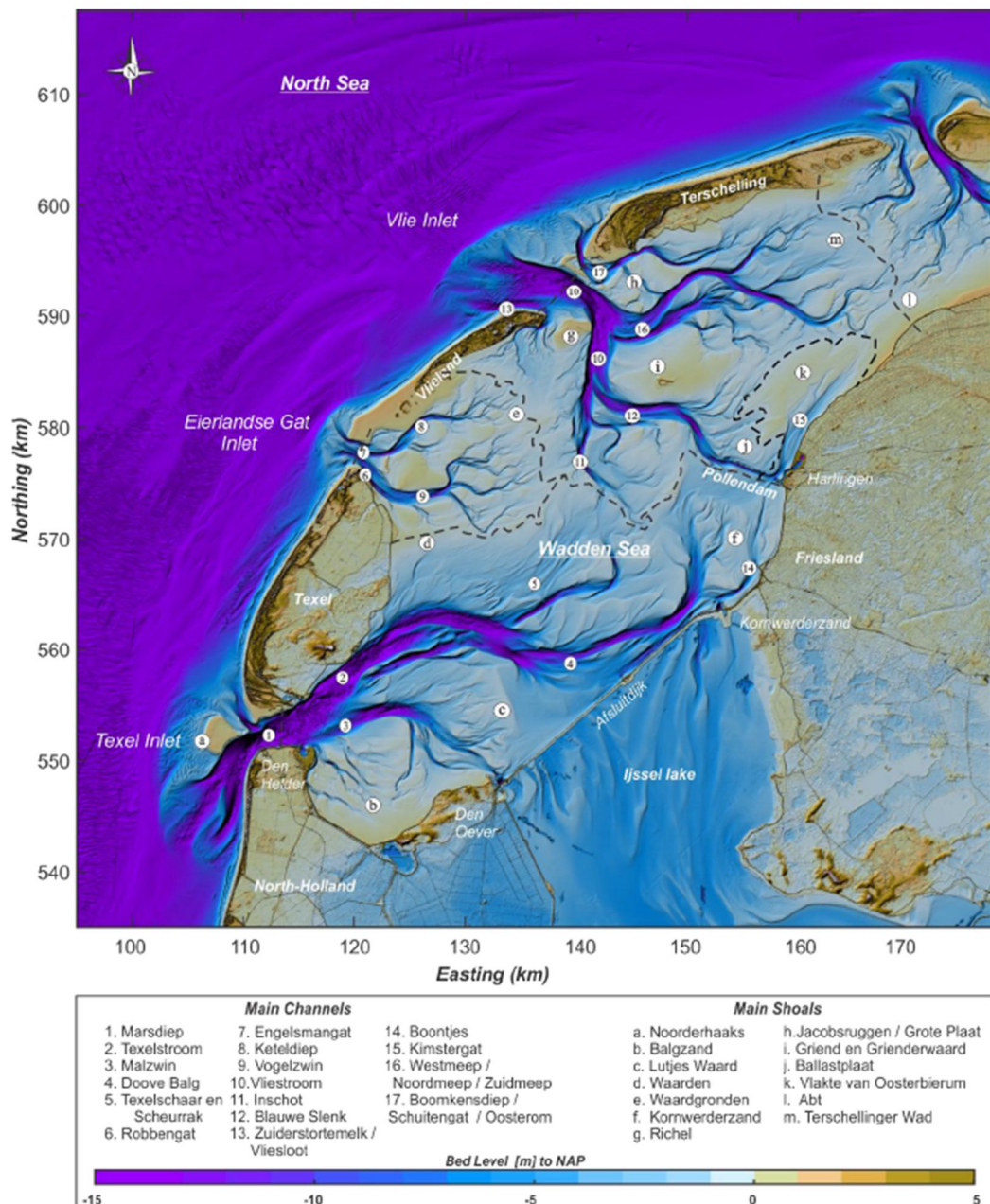
1.3 Doel van de studie

Deze studie is onderdeel van KPP-programma Wadden morfologie 2018 en bouwt verder op de ervaringen uit Nederhoff, et al. (2017) en de volumebalans in het kader van KPP Beheer & Onderhoud Kust 2018 (Elias, 2008). Het doel van deze studie is het opstellen van een volumebalans op mesoschaal van de Westelijke Waddenzee (Figuur 1.1). Dit maakt het mogelijk om zowel volumebalansen als hoogteontwikkelingen per deelgebied in kaart te brengen. De verhouding slib/zand is hierin expliciet meegenomen. Ook menselijke ingrepen, zoals baggervolumes en suppleties, zijn meegenomen. De studie beperkt zich tot analyse van de data. Deze rapportage beoogt dus niet de waargenomen ontwikkelingen te verklaren of een verwachting te geven over het al dan niet meegroeien van de Waddenzeebodem bij versnelde zeespiegelstijging, maar draagt wel bij aan het basismateriaal hiervoor.

1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt de methode beschreven die is gehanteerd om de volumebalans en hoogteontwikkeling op mesoschaal te bepalen. Het balansmodel wordt beschreven en er is

een aandacht voor de onzekerheden in methode en gegevens. De meetgegevens worden beschreven in Hoofdstuk 3. De resultaten in termen van volumebalans en hoogteontwikkeling worden gepresenteerd in Hoofdstuk 4, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen netto en bruto transporten, zand en slib en natuurlijke en kunstmatige veranderingen. Hoofdstuk 5 geeft een duiding van de resultaten en gaat in op de bruikbaarheid van de resultaten. Tot slot worden conclusies en aanbevelingen besproken in Hoofdstuk 6.



Figuur 1.1 Overzichtskartaal van de Westelijke Waddenzee met representatieve bodemligging voor 2015 en ligging van belangrijkste geulen en platen (Elias, 2018)

2 Methode

2.1 Algemeen

Om de volumebalans en hoogteontwikkeling van de Westelijke Waddenzee te bepalen, zijn gegevens van de bodemligging van Elias (2018) gebruikt. Een beschrijving van deze gegevens wordt gegeven in paragraaf 3.1. Om meer inzicht te krijgen in lokale variaties wordt in dit onderzoek gekeken op de mesoschaal. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen 'geulen', 'subgetijdegebieden' en 'platen' op basis van temporeel-vaste begrenzingen. Dit is van belang aangezien er zo naar een gelijkblijvend gebied gekeken kan worden en vermeden wordt dat een verandering van plaatareaal een vertekend beeld geeft in de ontwikkeling van de gemiddelde plaathoogte. Een nadere toelichting op de gekozen begrenzingen wordt gegeven in paragraaf 3.2.

De gemeten sedimentatie is het gevolg van natuurlijke en kunstmatige sedimentatie, waartussen onderscheid wordt gemaakt in deze studie. Natuurlijke sedimentatie is gedefinieerd als sedimentatie ten gevolge van stromingen door getij, wind, golven en rivierafvoer. Onder kunstmatige sedimentatie vallen de veranderingen die direct door menselijke activiteiten worden veroorzaakt. In dit onderzoek worden drie kunstmatige invloeden beschouwd: zandwinning, baggeren en storten. Tektonische beweging van de aardkorst en bodemdaling door gaswinning zijn relatief klein en worden genegeerd.

De formules en uitgangspunten die gebruikt zijn om de volumebalans en hoogteontwikkeling te bepalen zijn beschreven in paragraaf 2.2. In paragraaf 2.3 worden onzekerheden en meetfouten beschreven.

2.2 Formules en uitgangspunten

2.2.1 Balansformule

Om te komen tot een volumebalans voor natuurlijke processen wordt eerst uitgegaan van de (natuurlijke) sedimentbalans in de vorm van een diepte-gemiddelde massabalans:

$$\frac{\partial M_w}{\partial t} + \frac{\partial M_b}{\partial t} + \frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

waarin M_w de (natuurlijke) massa per eenheid van oppervlakte [kg/m^2] in de waterkolom is en M_b de (natuurlijke) massa per eenheid van oppervlakte [kg/m^2] in de bodem. T is het diepte-geïntegreerde sediment transport per eenheid van breedte [$\text{kg}/\text{m}/\text{s}$].

De massaverandering in de waterkolom is het gevolg van een verandering van de sedimentconcentratie en een verandering van de gemiddelde waterdiepte. De massaverandering in de waterkolom wordt hier verwaarloosd, omdat deze verwaarloosbaar klein zijn ten opzichte van veranderingen in de bodem.

De (positieve) massaverandering in de bodem is gelijk aan de natuurlijke sedimentatie (S_n). Het horizontale transport wordt gelijkgesteld aan de sedimentflux uit minus de sedimentflux in. Daarmee (en met verwaarlozing van de massaverandering in de waterkolom) reduceert vergelijking 2.1 tot de hoeveelheid sediment die per tijdseenheid in een bepaald compartiment sedimenteert (S_n), wordt geëxporteerd (E) en wordt geïmporteerd (I):

$$S_n(x, y) + (E - I) = 0 \quad (2.2)$$

2.2.2 Gemeten, natuurlijke en kunstmatige sedimentatie

De natuurlijke sedimentatie in de bodem is het verschil tussen de gemeten sedimentatie (S_m) en de kunstmatige sedimentatie (S_k):

$$S_n = S_m - S_k \quad (2.3)$$

De gemeten sedimentatie is een functie van de in situ gemeten droge dichtheid ρ_m [kg/m^3] en de gemeten diepteverandering van de bodem Δz_b [m]:

$$S_m = \rho_m \frac{\Delta z_b}{\Delta t} \quad (2.4)$$

De kunstmatige sedimentatie wordt opgesplitst in sedimentatie ten gevolge van zandwinning, baggeren en storten. Deze hoeveelheden worden meestal gemeten als volumes in middelen van vervoer. Er wordt uitgegaan van de in situ gemeten droge dichtheid van de bodem, waarbij opgemerkt moet worden dat de droge dichtheid in werkelijkheid sterk hiervan af kan wijken.

$$S_k = \rho_m \left(\frac{1}{A_z} \frac{V_z}{\Delta t} - \frac{1}{A_b} \frac{V_b}{\Delta t} + \frac{1}{A_s} \frac{V_s}{\Delta t} \right) \quad (2.5)$$

waarin de indices z , b en s betrekking hebben op respectievelijk zandwinning, baggeren en storten. V is het zandwinnings-, bagger- of stortvolume [m^3], A is de bijbehorende oppervlakte en ρ_m is de in situ gemeten droge de droge dichtheid [kg/m^3].

2.2.3 Sediment fracties

De in situ gemeten droge dichtheid is ruimtelijk variabel, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen zand en slib. Zand is hier gedefinieerd als de fractie met mediane korrelgrootte tussen 63 μm en 2 mm en slib als de fractie met mediane korrelgrootte kleiner dan 63 μm . De gegevens die gebruikt zijn voor de massaverhouding zand/slib worden beschreven in paragraaf 3.3.

Voor de bodemdaling en gebaggerde hoeveelheden wordt uitgegaan van de massaverhouding van de bodem ter plaatse. Tevens wordt aangenomen dat de massaverhouding zand/slib niet verandert over de tijd en dat deze representatief is voor het netto resultaat van een dynamische (bruto) uitwisseling. Dit is een aanzienlijke versimpeling van de werkelijkheid, aangezien sedimentatie en erosie de massaverhouding zand/slib beïnvloeden en het slibgehalte bovendien sterk fluctueert over de seizoenen.

De bodemsamenstellingsgegevens zijn beschikbaar op een lagere resolutie dan de bodemhoogtegegevens en zijn daarom geïnterpoleerd. Hiervoor bestaan verschillende methodes. In deze studie is gebruik gemaakt een CoKriging interpolatiemethode in ArcGis (Journal, 1989), waarbij data van een slecht bemonsterde variabele (i.e. slibpercentage) wordt geïnterpoleerd met behulp van een goed bemonsterde variabele (co-variabele: bathymetrie op basis van de Vaklodingen). Met deze methode wordt uitgegaan van het slibpercentages aan het oppervlak waarbij wordt aangenomen dat deze niet veranderen over de tijd.

De massafractie zand/slib is omgerekend naar een volumefractie op basis van de methode Mulder. Volgens Figuur 2.2 uit Mulder (1995) kan de in situ dichtheid van sediment bepaald worden middels:

$$D = 450 + 4,5m_{zand} + 0,065m_{zand}^2 \quad (2.6)$$

waarin D de droge dichtheid is en m_{zand} het zandgehalte als massapercentage. Deze formule moet de dichtheid in situ redelijk benaderen, maar zal waarschijnlijk niet van toepassing zijn voor een goed geconsolideerde, slibrijke bodem.

Als de droge dichtheid bekend is, kan met behulp van het zandgehalte het volumepercentage zand (t.o.v. al het sediment) worden bepaald:

$$V_{zand} = m_{zand} * D / D_{zand} \quad (2.7)$$

Hierin is D_{zand} de droge dichtheid van 100% zandig materiaal. Het volumepercentage slib kan dan worden bepaald als functie van het volumepercentage zand, met substitutie van vergelijking 2.1.

$$V_{slib} = 100 - V_{zand} \quad (2.8)$$

Hierbij moet worden opgemerkt dat het volume hier inclusief poriën is. De massa en het volume van het water in de poriën dragen verhoudingsgewijs bij aan de massa en het volume van slib en zand.

Op de resulterende slibgehalten zijn verschillende correcties mogelijk en beschikbaar in de literatuur. In deze studie wordt een boven- en ondergrens gepresenteerd (i.e. ofwel het weglaten van correctiefactoren, ofwel het meenemen van alle correctiefactoren). De hier toegepaste correctiefactoren betreffen het afkappen van slibpercentages onder 15% en het corrigeren voor gecompacteerd slib en zijn beide afkomstig uit Oost, et al. (2018):

- Correctiefactor 1: slibpercentages onder 15% dragen niet bij aan het volume, omdat er sprake is van een zandskelet waarbij slib de poriën opvult. Deze correctie is toegepast op basis van de volgende aannames:
 - (i) geuldynamiek veroorzaakt net zoveel sedimentatie als erosie van slib;
 - (ii) slibsedimentatie treedt vooral op in oude, opvullende geulen en luwe zones langs de kust, terwijl op platen daarbuiten slechts geringe sedimentatie optreedt in de orde grootte van de zeespiegelstijging;
 - (iii) er is sprake van homogene bioturbatie en dus geen afgezette laagjes van zand en slib (klopt niet echt voor oude, opvullende geulen).
- Correctiefactor 2: compactie van slib zorgt voor een hogere dichtheid. Als droge dichtheid van gecompacteerd slib is 1000 kg/m^3 gebruikt. De droge dichtheid van gemengd materiaal is naar rato van de slibfractie gecorrigeerd voor compactie van slib.

2.2.4 Trends volumeverandering en hoogteontwikkeling

Met behulp van regressieanalyse zijn lineaire trends bepaald van het volume en de gemiddelde hoogte over de tijd. Deze trends worden als significant beschouwd als ze binnen het 95% betrouwbaarheidsinterval liggen. Indien er met zes samengestelde bodems is gewerkt, zijn trends significant als de lineaire correlatiecoëfficiënt groter is dan 0.707. In het

geval van vijf datapunten geldt een trend als significant als de lineaire correlatiecoëfficiënt groter is dan 0.754.

Daarnaast moet de stochastische fout van elk datapunt worden meegenomen. Deze wordt onafhankelijk beschouwd voor de verschillende jaren, waardoor de regressielijn onzekerder wordt. In welke mate dit stochastische proces optreedt is onbekend en daarom in het vervolg buiten beschouwing gelaten.

2.3 Foutenbeschouwing

Voor alle gebruikte gegevens en berekende waarden geldt een bepaalde mate van onzekerheid. De individuele waarden kunnen worden uitgerukt in een gemiddelde waarde en een standaardafwijking. De standaardafwijking is een kwantificatie van de onnauwkeurigheid die kan bestaan uit een systematische en een stochastische fout. Een systematische fout is voor een verzameling van individuele metingen constant (i.e. volledig onderling afhankelijk). Een stochastische fout is onafhankelijk van een andere individuele waarde. In dit onderzoek worden beide fouten als standaardafwijkingen van een normale verdeling opgevat.

De berekening van de gemiddelde waarden gebeurt met de vergelijkingen uit paragraaf 2.2. De berekening van de systematische en stochastische fouten gebeurt op dezelfde manier als beschreven door Mulder & Mijwaard (1997).

De berekening van de stochastische standaardafwijking gebeurt volgens de wet van kwadratische foutvoortplanting. Hierbij wordt verondersteld dat de fouten relatief klein zijn. Voor de vaklodingen geldt dat de stochastische fout in de gemiddelde diepte van een gebied met m even grote cellen, gelijk is aan:

$$\sigma_{sto}(\bar{z}_b) = \frac{1}{m} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_{sto,i}^2(z_b)} \quad (2.9)$$

waarin σ_{sto} de stochastische fout is en z_b de bodemligging. Als alle cellen dezelfde stochastische fout σ_m hebben, dan reduceert de fout in de gemiddelde diepte tot $\sigma_{sto}(\bar{z}_b) = \sigma_m / \sqrt{m}$. Deze fout neemt dus af naarmate het gebied groter wordt. De systematische fout werk echter volledig door in de gemiddelde diepte:

$$\sigma_{sys}(\bar{z}_b) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sigma_{sys,i}(z_b) \quad (2.10)$$

waarin σ_{sys} de systematische fout is. De systematische fout zal in de praktijk slechts gelden voor een begrensd gebied. Voor grotere gebieden is hiervoor een stochastische aanpak mogelijk. Meestal zal voor relatief grote gebieden de systematische fout domineren.

Er wordt aangenomen dat de sedimentatie-termen in vergelijking 2.5 onderling onafhankelijk zijn. Alleen voor baggeren en storten is deze onafhankelijkheid niet volledig geldig, omdat gebaggerd materiaal soms in hetzelfde gebied wordt teruggestort.

3 Meetgegevens

3.1 Beschikbare bathymetrische gegevens

Voor het opstellen van de volumebalans en de analyse van de hoogteontwikkeling, beschreven in hoofdstuk 2, is gebruik gemaakt van bodems die zijn samengesteld door Elias (2018). Deze bodems zijn samengesteld uit geaggregeerde meetgegevens uit de Vaklodingen en zijn aangevuld met LIDAR metingen. Om een tweetal redenen is besloten gebruik te maken van bodems uit de periode van 1985 tot 2015. Ten eerste vanwege consistentie aangezien de meetgegevens sinds 1985 op 20x20m resolutie beschikbaar zijn (daarvoor was de resolutie 250x250 meter). Ten tweede om te focussen op de recente ontwikkeling en dus niet op het sterke signaal van menselijk ingreep ten tijden van de afsluiting van de Zuiderzee.

Op basis van de meetgegevens uit de periode van 1985 tot 2015 zijn door Elias (2018) zes representatieve bodems samengesteld voor de jaren 1985, 1991, 1997, 2003, 2009 en 2015. In Bijlage A: **Samengestelde bodems 1985 – 2015** zijn figuren van deze samengestelde bodems weergegeven.

Voor de Vaklodingen geldt een puntprecisie van 15 cm (2σ) voor singlebeam metingen, uitgaande van een gemiddelde diepte van 15 meter (QMS normen). Na verwerking, waarbij raaien geïnterpoleerd worden naar gridcellen, geldt een precisie van 40 cm (2σ) (Rijkswaterstaat, 2006). Het gaat hierbij dus om een stochastische fout. De systematische fout is daarentegen niet bekend, omdat er niet standaard op wordt gecontroleerd. Rijkswaterstaat (2006) stelt desondanks dat de inwinnauwkeurigheid van deze methode zeer hoog is. In deze rapportage wordt aangenomen dat er elk deelgebied een bodemhoogte onzekerheid is van +/- 15 cm (systematische fout). Dit is waarschijnlijk een te conservatieve aanpak.

3.2 Begrenzings morfologische eenheden

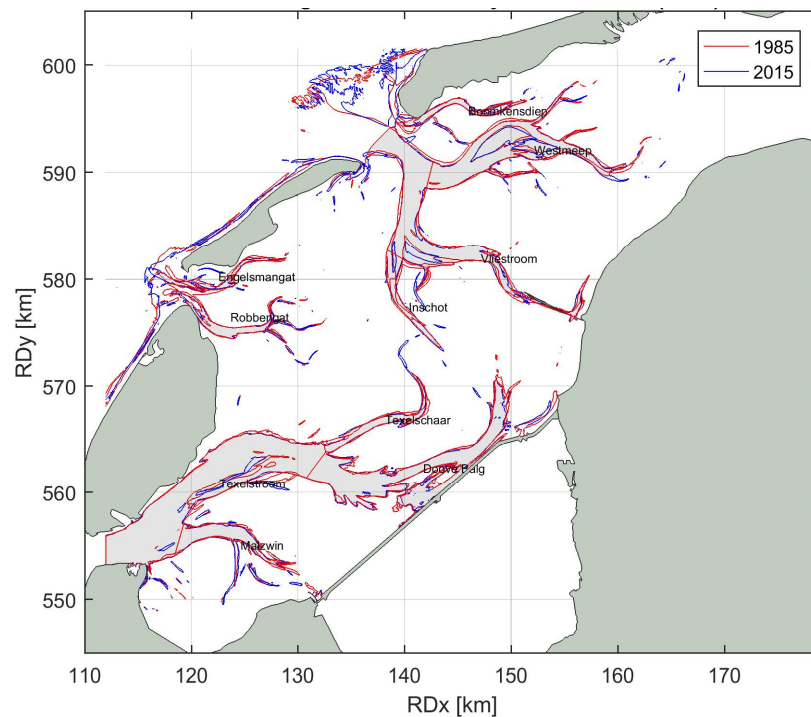
Zoals toegelicht in paragraaf 2.1, wordt er onderscheid gemaakt tussen morfologische eenheden op basis van vaste begrenzingen. Deze aanpak is gekozen om meer inzicht te verkrijgen in lokale variaties en maakt het mogelijk om de hoogteontwikkeling van een vast gebied te kwantificeren.

Het gebied onder de NAP -5 m dieptecontour is gedefinieerd als geulen, omdat de dynamiek als onafhankelijk van golven kan worden beschouwd. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen hoofdgeulen en neven- en zijgeulen. Het gebied boven de NAP -1 m dieptecontour (ongeveer gelijk aan Gemiddeld Laag Water; GLW) is gedefinieerd als plaatareaal, waarbij onderscheid is gemaakt tussen individuele platen. Gebieden tussen NAP -5 en NAP -1 m dieptecontour zijn gedefinieerd als subgetijdegebied, waarbij onderscheid is gemaakt in de verschillende kombergingsgebieden.

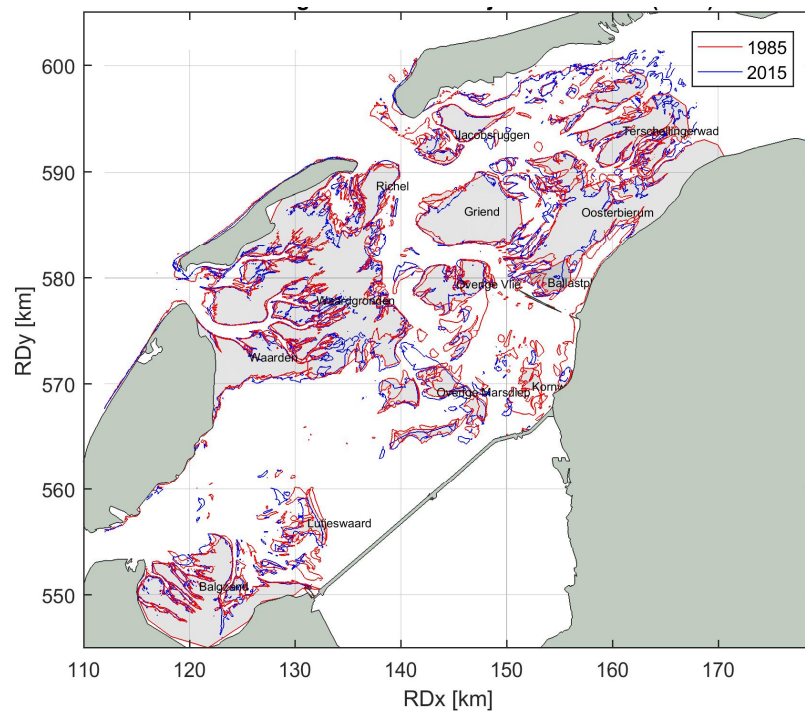
In Figuur 3.1 worden de gebiedsdefinities van geulen vergeleken voor de NAP -5 m dieptecontour uit de bodems van 1985 en 2015. Voor platen is eenzelfde vergelijking voor de NAP -1 m dieptecontour te zien in Figuur 3.2. De definitieve gebiedsdefinities zijn gebaseerd op de dieptecontouren van de samengestelde bodem uit 1985 en worden weergegeven in Figuur 3.3.

Om te bepalen hoe afhankelijk de resultaten zijn van de begrenzingen die gehanteerd zijn voor de verschillende morfologische eenheden, is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. In

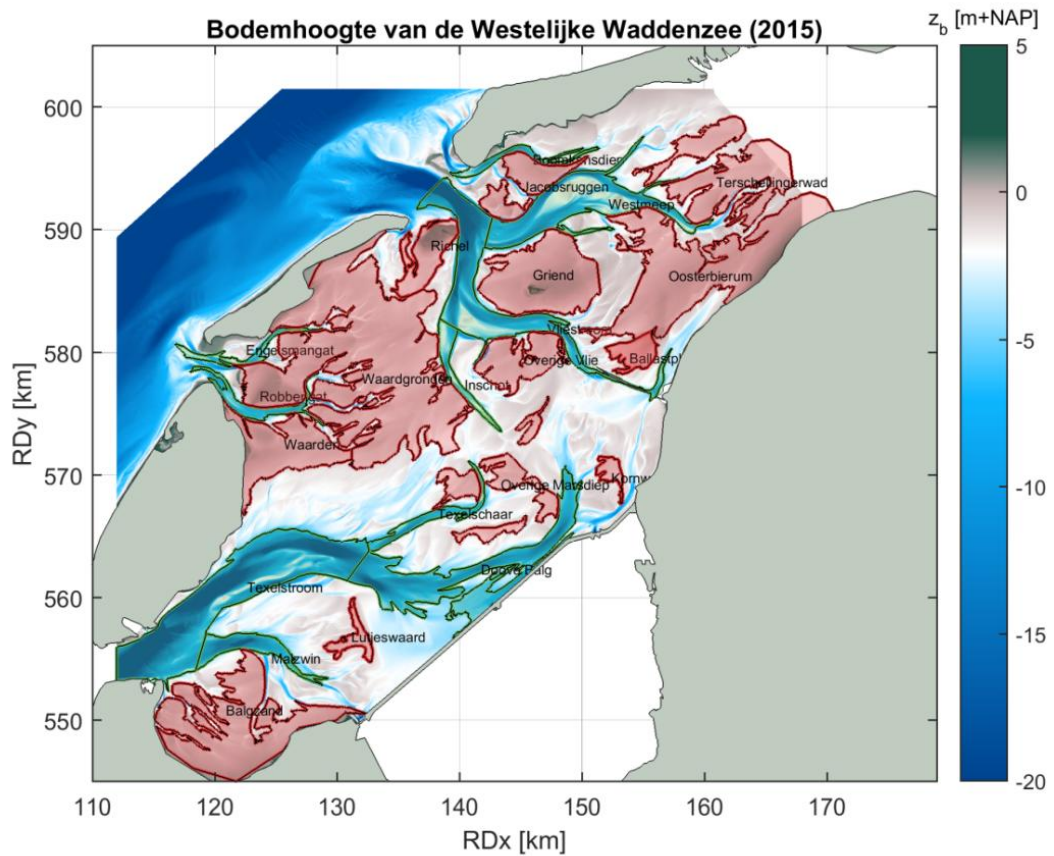
deze studie is voor de geulen gebruik gemaakt van een begrenzing op NAP -5 m diepte van de 1985 bodem. Voor de gevoeligheidsanalyse zijn begrenzingen gebruikt op NAP -4 m en -6 m diepte. Voor de platen is in deze studie gebruik gemaakt van een begrenzing op NAP -1 m diepte van de 1985 bodem. Voor de gevoeligheidsanalyse zijn begrenzingen gebruikt op NAP -0.5 m en -1.5 m diepte.



Figuur 3.1 Vergelijking van dieptecontourlijn op NAP -5 m voor de jaren 1985 (rood) en 2015 (blauw). De licht grijze gebieden zijn de gekozen geulen.



Figuur 3.2: Vergelijking van dieptecontourlijn op NAP -1 m voor de jaren 1985 (rood) en 2015 (blauw). De licht grijze gebieden zijn de gekozen platen.

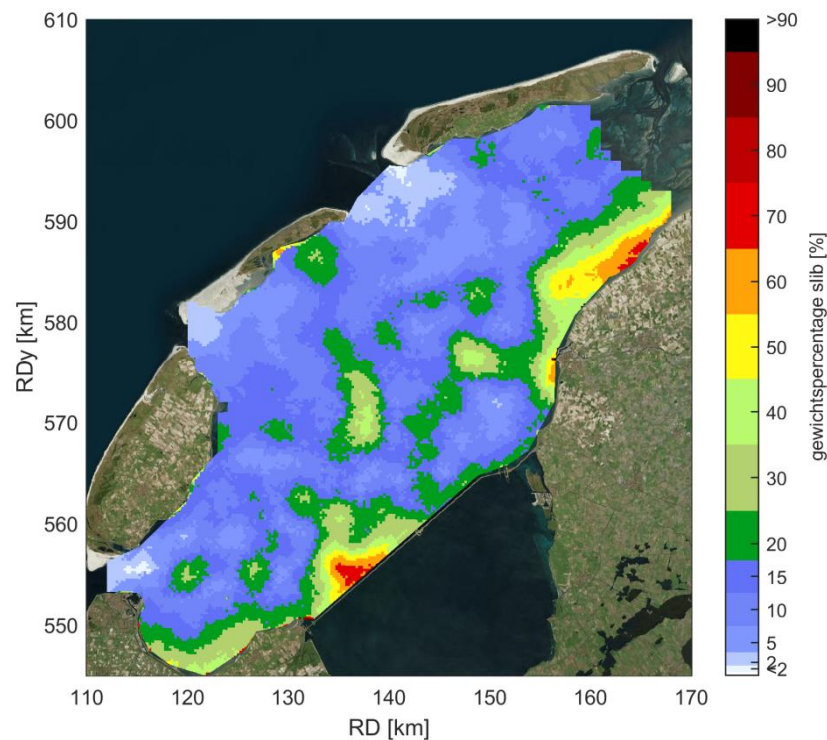


Figuur 3.3: Ruimtelijke vaste begrenzingen voor geulen en platen weergegeven op de 2015 bodem. Kleur representeert de bathymetrie waarin platen rood zijn gekleurd en geulen groen.

3.3 Zand / slib

Om de volumebalans uit te splitsen in zand en slib is gebruikt gemaakt van bodemsamenstelling gegevens uit de sedimentatlas (Rijkswaterstaat, 1998). Deze gegevens zijn geïnterpoleerd en omgerekend naar volumepercentages met de methode zoals uitgelegd in paragraaf 2.2.3. In deze studie presenteren we een bovengrens, waarbij geen verdere correcties zijn toegepast en een ondergrens, waarbij gecorrigeerd is voor slibpercentages onder 15% en voor gecompacteerd slib, zie paragraaf 2.2.3.

Figuur 3.4 toont een projectie van de meetgegevens op het rooster dat gebruikt wordt voor de dieptegegevens. Slibpercentages zijn het hoogste nabij de westkant van de Afsluitdijk en de Oosterbierum (>50%) en het laagste rondom de zeegaten (<20%). De resultaten van deze interpolatie ten opzichte van de oorspronkelijke meetgegevens zijn weergegeven in Bijlage B: Geïnterpoleerde slibatlas inclusief meetpunten.



Figuur 3.4: Slibgehalte als massapercentage in de bodem zonder correctiefactoren (Rijkswaterstaat, 1998).

3.4 Menselijke ingrepen

Voor het opstellen van een complete zandbalans is het ook noodzakelijk een goede schatting van de menselijke ingrepen zoals het baggeren van de vaargeulen en storten van dat sediment elders in het systeem, stortingen in de vorm van zandsuppleties en onttrekkingen (zand- en schelpenwinning) te verkrijgen. In deze studie is er gebruik gemaakt van de gegevens gepresenteerd in Elias (2018), zie Tabel 3.1. Er wordt aangenomen dat de menselijke ingrepen jaarlijks plaatsvinden. N.B. Deze getallen worden gehanteerd omdat het onduidelijk is of de oorspronkelijke gegevens van menselijke ingrepen correct zijn. Dit moet worden uitgezocht.

Tabel 3.1 Een overzicht van de ingrepen in de Westelijke Wadden in de periode 1985-2015 op basis van o.a. Elias (2018). Positieve getallen zijn import (e.g. storten) en negatieve getallen zijn export (e.g. baggeren). Zie Figuur 3.3 of Figuur 1.1 voor de ligging van de locaties.

Locatie (geulen, platen, subgetijde)	Tijdperiode [jaren]	Menselijke ingrepen [m ³ /jaar]
Texelstroom (geul Marsdiep)	1948-2002	+0.017 * 10 ⁶ m ³ /jaar
Texelstroom (geul Marsdiep)	2002-2015	-0.093 * 10 ⁶ m ³ /jaar
Robbengat (geul Eierlandse Gat)	1985-1995	-0.250 * 10 ⁶ m ³ /jaar
Vliestroom (geul Vlie)	1952-2002	-0.415 * 10 ⁶ m ³ /jaar
Vliestroom (geul Vlie)	2002-2015	-0.278 * 10 ⁶ m ³ /jaar

3.6 Zeespiegelstijging

Diverse bronnen voor cijfers over de huidige zeespiegelstijging in de Waddenzee geven waarden tussen de 1.1 en 1.8 mm/jaar op basis van de periode 1890 tot heden, zie Tabel 3.2. De verwachting is dat de zeespiegelstijging zich verder doorzet en versnelt als gevolg van klimaatverandering. Hoe snel de zeespiegel zal stijgen is echter onzeker. Tegen het eind van de 21e eeuw kan dit tussen de 30 en 300 cm zijn (e.g. Meehl et al., 2007; KNMI, 2017; Le Bars et al., 2017). Bodemdaling als gevolg van gas- en zoutwinning kan echter lokaal maar tijdelijk resulteren in een hogere relatieve zeespiegelstijging (e.g. Hoeksema et al., 2004; Cleveringa & Grasmeijer, 2010).

Tabel 3.2: Overzicht van bronnen voor historische zeespiegelstijging

Waarde [mm/jaar]	Locatie	Methode	Rapport
1.74	Delfzijl	meervoudig lineaire regressiemodel toegepast op jaargemiddelde zeespiegel in de periode 1890-2013	Baart et al. (2014)
1.10	Harlingen		
1.37	Den Helder		
1.40	Gemiddelde Delfzijl, Harlingen, Den Helder		
1.76	Gemiddelde Delfzijl, Harlingen, Den Helder, IJmuiden, Hoek van Holland, Vlissingen		
1.50	Den Helder	Observatie 1890-2008	Cleveringa & Oost (2018)
1.30	Harlingen		
1.60	Gehele Waddenzee	Doorverwijzing "Wadden academy, in prep."	Oost, et al. (2018)

4 Resultaten

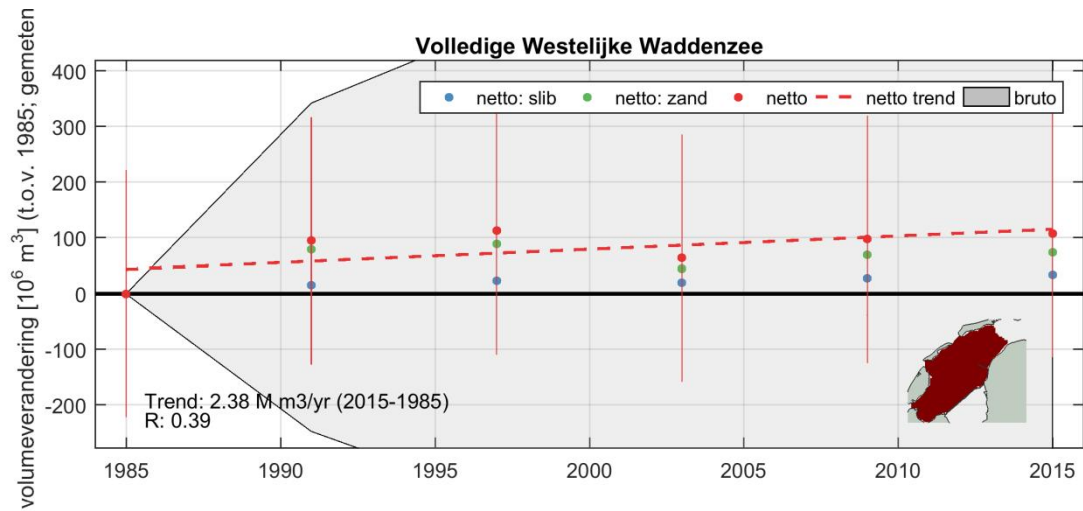
4.1 Gehele Westelijke Waddenzee bekken

Tabel 4.2 geeft de resultaten van de ontwikkeling van de volledige Westelijke Waddenzee met de berekende trends van 1991-2015 in volume- en hoogteontwikkeling en de totale volumeverandering uitgesplitst in zand en slib. Voor de periode tussen 1985 en 2015 is een volumebalans opgesteld voor de gehele Westelijke Waddenzee, bestaande uit de bekkens Marsdiep, Eierlandse Gat en 't Vlie. Het gemeten sedimentvolume is over 30 jaar toegenomen met in totaal 108 miljoen m³ (op basis van verschilbodem 2015 en 1985). Op basis van de verschilbodem 1991-2015 is het gemeten sedimentvolume over 23 jaar echter maar toegenomen met in totaal 13 miljoen m³. Dit komt (logischerwijs) overeen met Elias (2018), aangezien dezelfde bodems zijn gebruikt.

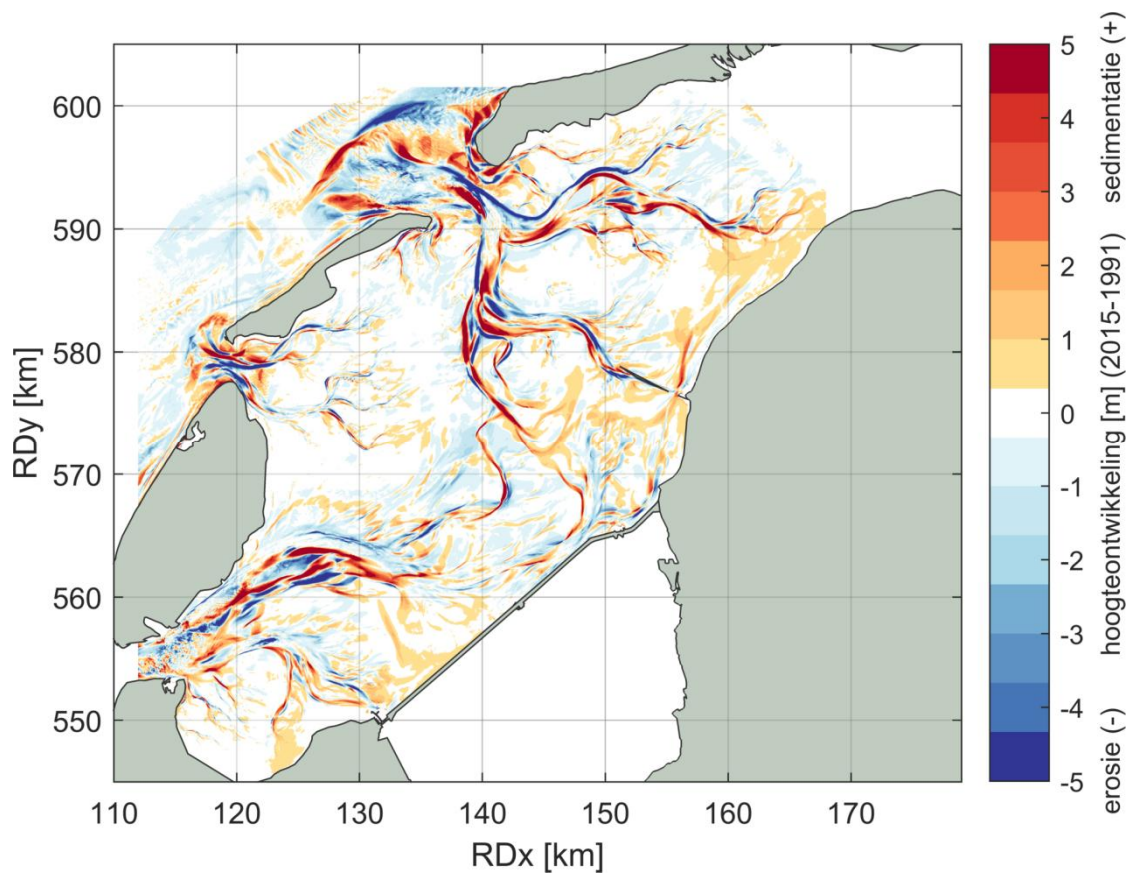
Het verschil tussen de bodemligging van 2015 en 1991 is weergegeven in Figuur 4.2. Blauwe kleuren tonen erosie (i.e. meer water) en rode kleuren tonen sedimentatie. Voor alle zes de beschikbare bodems tussen 1991 en 2015 is de bodemligging geanalyseerd, waarna de trends in de volume- en hoogteontwikkeling zijn bepaald. Voor de gehele Westelijke Waddenzee kan op basis van de periode 1985-2015 geen significante lineaire trend worden bepaald voor de volumeverandering (trend van +2.4 miljoen m³ of +1.6 mm per jaar met R-waarde 0.39, zie Figuur 4.1). Op basis van de periode 1991-2015 is er ook geen significante trend te bepalen, maar het valt op dat voor deze periode de lineaire trend resulteert in nauwelijks sedimentimport (trend van +0.2 miljoen m³ of +0.1 mm per jaar met R-waarde 0.01). Voor beide perioden is de (lineaire) trend *niet* significant, dit betekent we moeten stellen dat de gevonden correlatie op toeval berust¹. Een verdere toelichting op de gevoeligheid van de resultaten voor het startjaar is te vinden in paragraaf 4.5.1. Er is voor gekozen om voor de hieronder gepresenteerde resultaten verder te werken op basis van de periode 1991-2015, aangezien de berekende lagere sedimentimport voor periode 1991-2015 t.o.v. 1985-2015 beter overeen komt met het beeld dat geschetst is in Elias (2018). Afhankelijk van welke berekende trend er wordt gebruikt, sedimenteert de Westelijk Waddenzee met een trend vergelijkbaar (1985-heden) of minder (1991-2015) dan de gemeten (huidige) zeespiegelstijging.

Afhankelijk van welke methode gebruikt wordt om van massapercentage in de slibatlas naar een volumepercentage te komen, bestaat hiervan ongeveer 24 à 28 miljoen m³ uit slib. Dit is gebaseerd door de totale bodemverandering per bodemcel te combineren met de geïnterpoleerde slibvolumepercentage. Het gemiddelde slibpercentage in de bodem ligt daarnaast tussen de 13 en 29%. Het gemiddelde slibpercentage in de bodem ligt dus *lager* dan het slibpercentage van de totale volumeverandering. De orde grootte van het slibpercentage is echter wel vergelijkbaar met gerapporteerde waarden in andere studies (e.g. Oost *et al.* (2018) rapporteerde een bijdrage van 8-37% slib in totale sedimenthuishouding van de Waddenzee).

¹ *Significantie is een term uit de statistiek. Dit geeft aan of aangenomen kan worden dat een verschil wel of niet door toeval is ontstaan. Men spreekt van een significante uitkomst als deze uitkomst in een bepaalde mate de veronderstelling ondersteunt dat het verschil niet door toeval is ontstaan. In deze studie is een 95% betrouwbaarheidsinterval gebruikt.*



Figuur 4.1: De gemeten volumeontwikkeling tussen 1985 en 2015 voor de gehele Westelijke Waddenzee inclusief conservatieve schatting voor slib (bovengrens).



Figuur 4.2: Diepteverschil bodemligging Westelijke Waddenzee tussen 2015 en 1991 met erosie in blauw en sedimentatie in rood

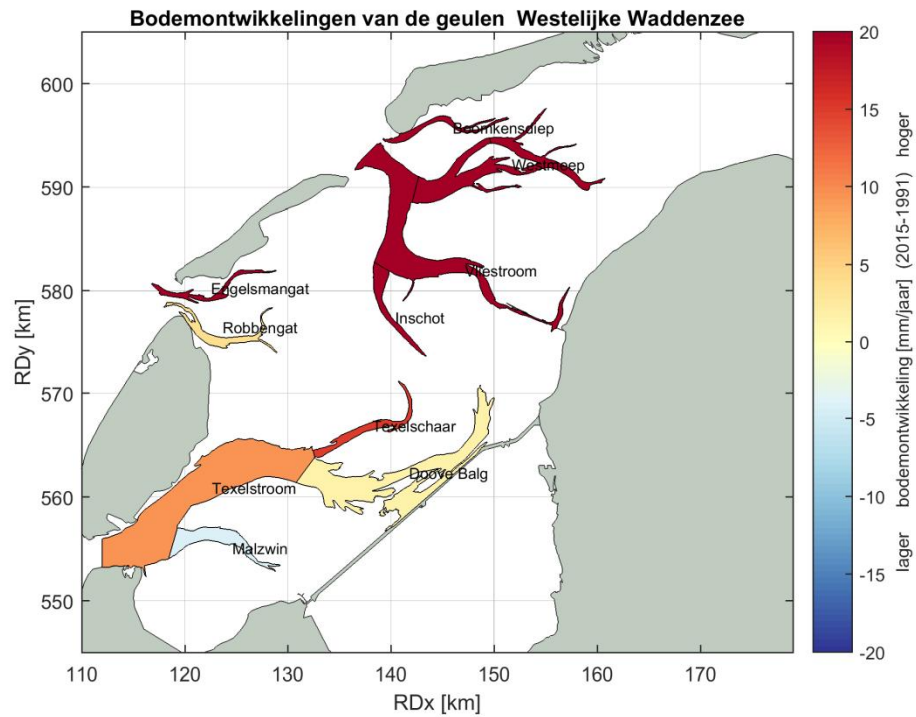
4.2 Geulen

Tabel 4.2 geeft de resultaten van de ontwikkeling van de geulen met de berekende trends van 1991-2015 in volume- en hoogteontwikkeling en de totale volumeverandering uitgesplitst in zand en slib. Significante trends zijn vetgedrukt ($R > 0.754$). De meeste geulen sedimenteren maar de morfologische ontwikkeling en daarmee de trend in de hoogteontwikkeling varieert van geul tot geul. Bijlage C geeft een overzicht van alle resultaten van volumeverandering en hypsometrie van de geulen.

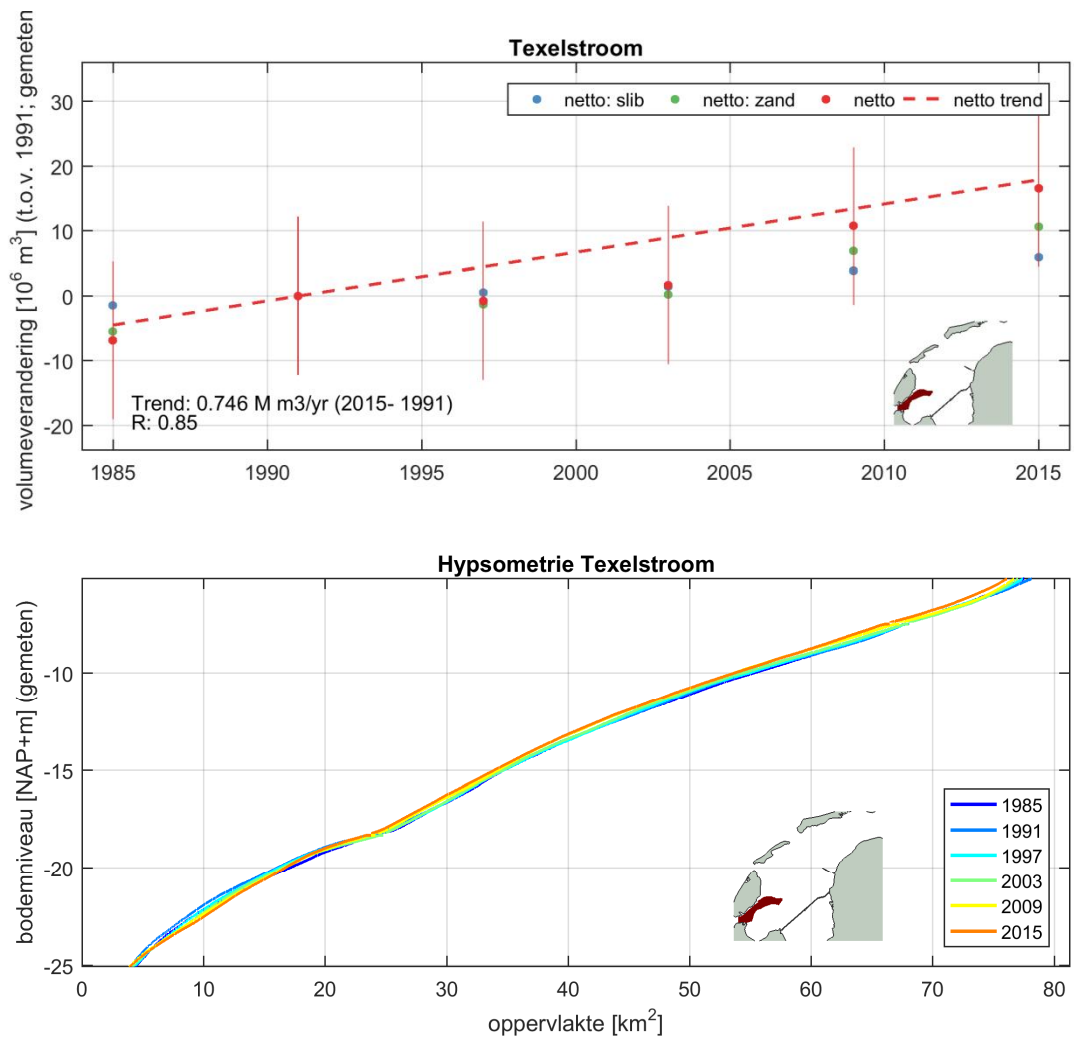
Texelstroom sedimenteerde bijvoorbeeld sterk tussen 1985-2015 (Figuur 4.4 bovenpaneel) wat resulteerde in een trend in de bodemverandering van bijna 9 mm per jaar ($R: 0.90$). Het merendeel van gesedimenteerde materiaal betreft zand. Het merendeel van het materiaal in de bodem van Texelstroom is zandig (81-97%), hoewel dit percentage lager is in de berekening van het slibpercentage van het gesedimenteerde materiaal (64-88%). Het opvullen van de geul is ook zichtbaar gemaakt in de hypsometrische curve in het onderste paneel van Figuur 4.4. Hierin is te zien dat er geen algehele sedimenterende trend optreedt, maar dat dit varieert per dieptecontour. De diepere delen (beneden 20 meter waterdiepte) in Texelstroom verdiepen bijvoorbeeld juist.

Een ander voorbeeld is Vliestroom, dat ook sedimenteerde tussen 1985-2015 (Figuur 4.5 bovenpaneel), alhoewel er geen significante lineaire trend kon worden bepaald. Voor 1991-2015 is er wel een significante trend gevonden met een hogere sedimentatiesnelheid (+19.5 mm per jaar). Ook in Vliestroom is het merendeel van het materiaal in de bodem zandig (79-94%).

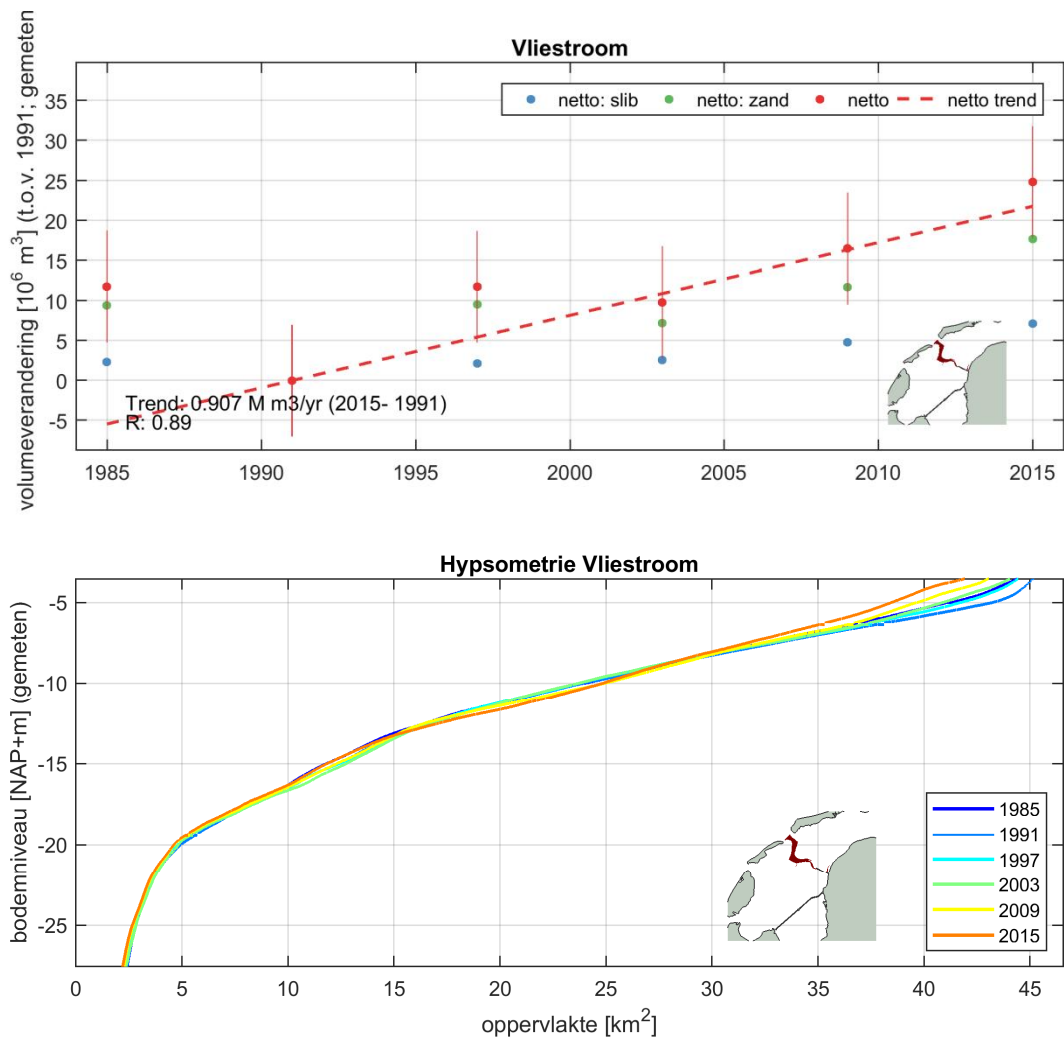
De resultaten van de andere geulen zijn opgenomen in Bijlage C. Al met al variëren de trends in de natuurlijke bodemverandering tussen +100 en -4 mm/jaar. Het merendeel van de geulen sedimenteert (wordt ondieper) volgens de gekozen gebiedsbegrenzingsen, maar niet alle berekende trends zijn statistisch significant. Deze informatie is samengevat in Figuur 4.3 waarin een ruimtelijk overzicht van de hoogteontwikkeling van de geulen in de Westelijke Waddenzee is weergegeven. Over het algemeen sedimenteren geulen sterker dan de huidige zeespiegelstijging in de Waddenzee die tussen de 1 a 2 mm/jaar ligt. Het gemiddelde slibpercentage in de bodem van geulen in de Westelijke Waddenzee wordt daarnaast geschat op de 7-22%.



Figuur 4.3 Ruimtelijk overzicht natuurlijke hoogteontwikkeling van de geulen in de Westelijke Waddenzee voor de periode 1991-2015



Figuur 4.4 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor geul Texelstroom tussen 1991-2015. Bollen zijn de datapunten. Lijnen op de rode bollen geven de onzekerheid in de bodem op basis van paragraaf 2.3



Figuur 4.5 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor geul Robbengat tussen 1991-2015. Bollen zijn de datapunten. Lijnen op de rode bollen geven de onzekerheid in de bodem op basis van paragraaf 2.3

4.3 Subgetijde (ondiepe delen)

Voor het subgetijdegebied is onderscheid gemaakt in de verschillende kombergingsgebieden. Tabel 4.3 geeft de resultaten van de ontwikkeling van subgetijdegebieden. De resultaten van de volumeontwikkeling en hypsometrie van de subgetijdegebieden zijn opgenomen in bijlage D.

Voor de subgetijdegebieden konden geen significante trends worden bepaald op basis van de tijdsperioden 1985-2015 en 1991-2015. Afhankelijk van de gekozen tijdsperiode lijkt er netto natuurlijke sedimentatie of erosie plaats te vinden in het Marsdiep (respectievelijk +0.3 mm per jaar versus -1.8 mm per jaar). Beide trends zijn echter niet significant. Daarnaast ligt het gemiddelde slibpercentage in de bodem van de ondiepe delen van het Marsdiep rond de 13-29% (onder- en bovengrens).

Het subgetijdegebied van het Eierlandse Gat erodeerde juist met een niet-significante trend in de natuurlijke hoogteontwikkeling van -1.3 tot -3.1 mm per jaar (voor respectievelijk startjaar 1985 of 1991). Slibpercentages in de bodem liggen rond de 1-11%.

Vergelijkbaar met het Marsdiep, vond er in 't Vlie of netto natuurlijke sedimentatie of erosie plaats afhankelijk van het gekozen startjaar. Zandwinning (totaal -7 miljoen m³) is een belangrijke factor in de totale sedimenthuishouding van de ondiepe delen van 't Vlie. De berekende trends zijn echter niet significant en het slibpercentages in de bodem wordt geschat rond de 11-24%.

Uit de hypsometrie van alle deelgebieden komt daarnaast duidelijk naar voren dat voornamelijk boven NAP -3 m sedimentatie plaatsvond en onder NAP -3 m juist erosie. Dit eenduidige beeld ontstaat mede doordat op het schaalniveau van kombergingsgebieden is gekeken naar de subgetijdegebieden. Als ook hiervoor onderscheid gemaakt zou worden in morfologische eenheden zouden er waarschijnlijk lokaal, net als voor geulen en platen, grotere variaties worden gevonden.

4.4 Platen

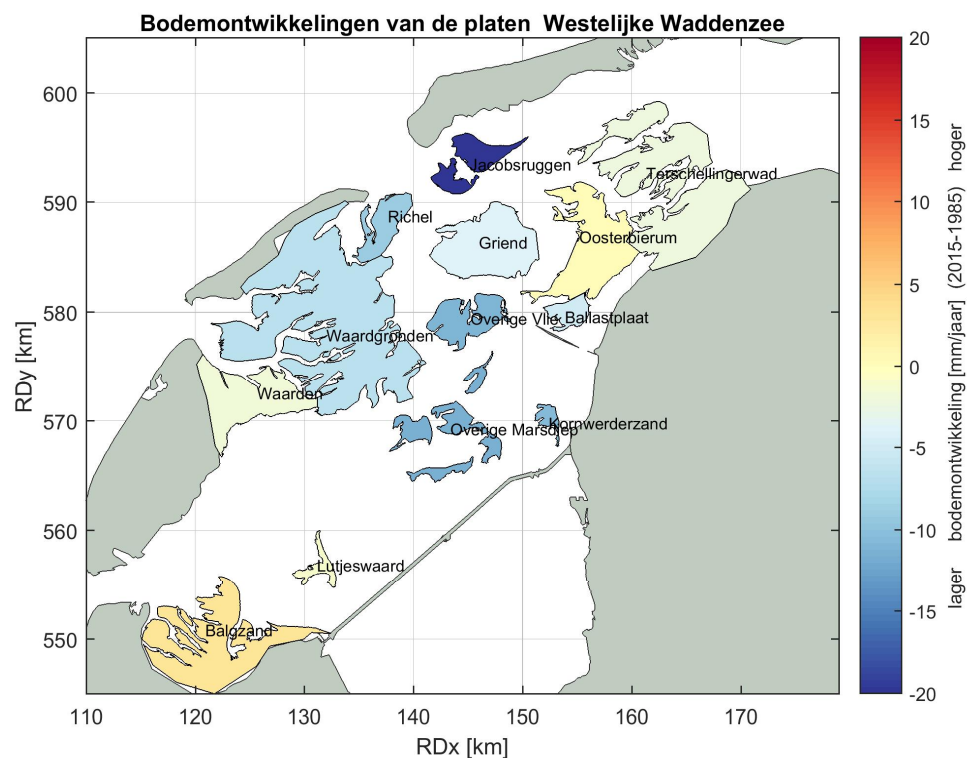
Tabel 4.4 geeft de resultaten van de ontwikkeling van de platen met de berekende trends in volume- en hoogteontwikkeling en de totale volumeverandering uitgesplitst in zand en slib. Significante trends zijn vetgedrukt ($R > 0.754$). Er komt geen eenduidig beeld uit naar voren: sommige platen eroderen terwijl andere platen juist sedimenteren. Voor de platen verschilt de morfologische ontwikkeling en daarmee de trend in de hoogteontwikkeling nog sterker dan voor de geulen het geval was. Er zijn geen menselijke ingrepen zodat de gemeten bodemveranderingen gelijk zijn aan de natuurlijke bodemveranderingen. Bijlage E geeft een overzicht van alle resultaten van volumeverandering en hypsometrie van de geulen.

De plaat Balgzand sedimenteerde bijvoorbeeld tussen 1985-2015 (Figuur 4.7 bovenpaneel) wat resulteerde in een trend in de bodemverandering van ongeveer 3.0 mm per jaar ($R: 0.82$). Het gesedimenteerde materiaal bestaat voor een deel uit zand (46-59%) en voor een deel uit slib (41-54%). Dit is echter hoger dan het gemiddelde percentage in de bodem (23-38%) wat betekent dat in de slibrijke gebieden er meer depositie heeft plaatsgevonden. Het aangroeien van de plaat is ook zichtbaar gemaakt in de hypsometrische curve in het onderste paneel van Figuur 4.7.

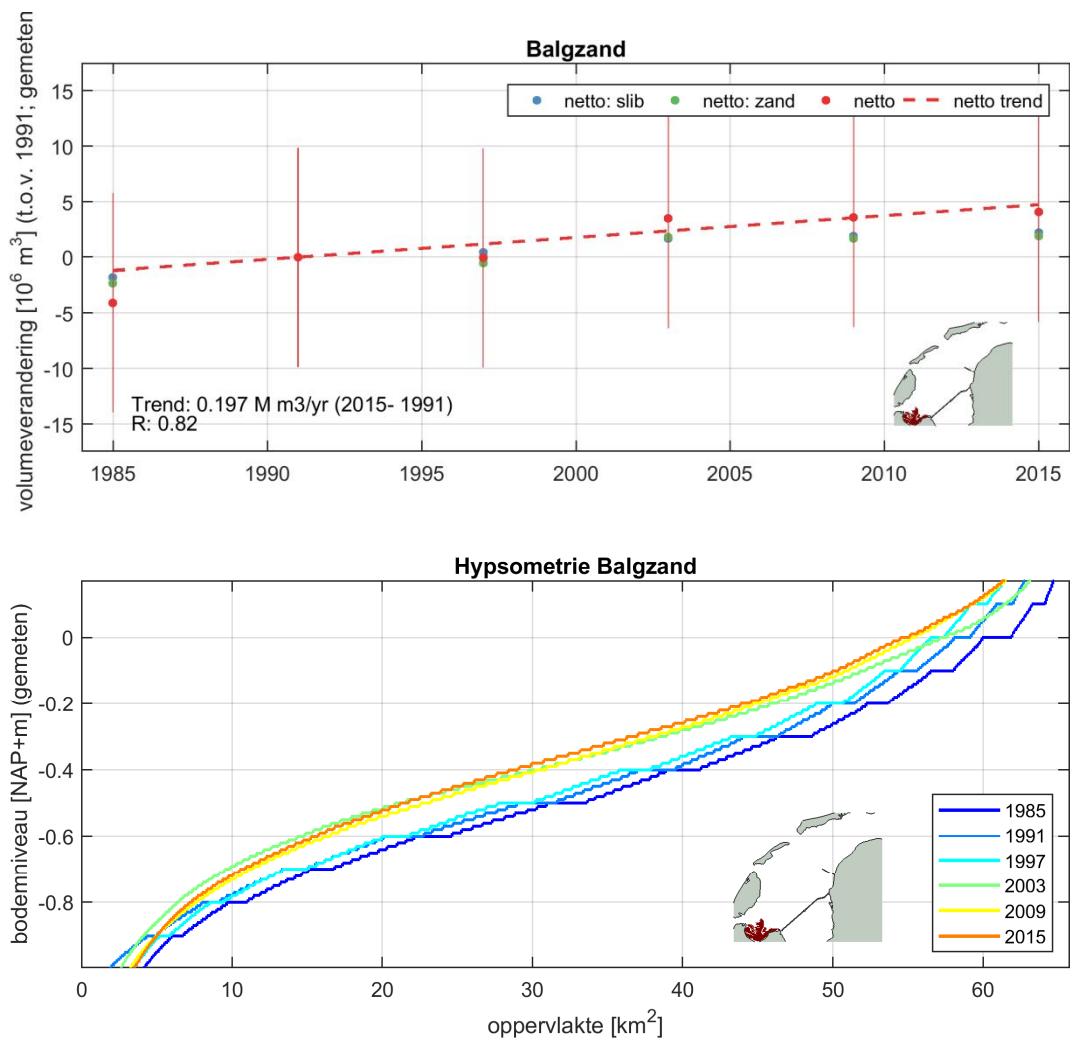
Een ander voorbeeld is de plaat Griend, die licht erodeerde tussen 1985-2015 (Figuur 4.8 bovenpaneel)), alhoewel er geen significante lineaire trend kon worden bepaald. Voor de periode 1991-2015 lijkt de plaat nog sterker te eroderen, maar ook hiervoor kon er geen

significante lineaire trend worden bepaald. Het geërodeerde materiaal bestaat vooral uit zand (77-92%). In de ontwikkeling van de hypsometrie, in het onderste paneel van Figuur 4.8, is terug te zien dat er tussen 1985 en 2015 periodes van erosie en sedimentatie hebben plaatsgevonden.

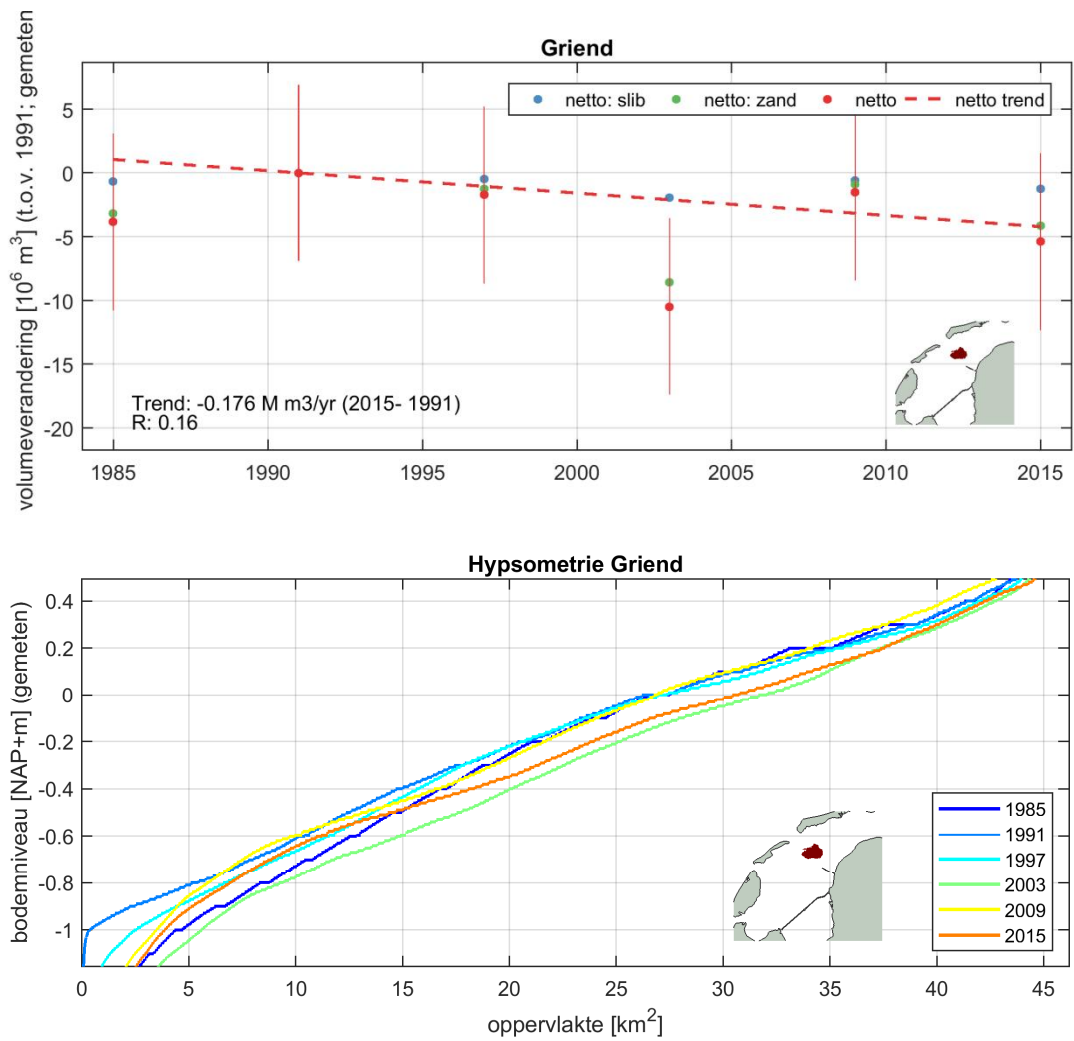
De resultaten van de andere platen zijn opgenomen in Bijlage E. Al met al variëren de trends in de natuurlijke bodemverandering tussen +3.0 en -26 mm/jaar), maar niet alle berekende trends zijn statistisch significant. Het merendeel van de platen erodeert (verlaging). Deze informatie is samengevat in Figuur 4.6, waarin een ruimtelijk overzicht van de hoogteontwikkeling van de platen in de Westelijke Waddenzee is weergegeven. Over het algemeen sedimenteren geulen dus niet met waarden vergelijkbaar met de huidige zeespiegelstijging van 1 a 2 mm/jaar. Het gemiddelde slibpercentage in de bodem van platen wordt geschat op 13-28%.



Figuur 4.6 Ruimtelijk overzicht natuurlijke hoogteontwikkeling van de platen in de Westelijke Waddenzee voor de periode 1991-2015



Figuur 4.7 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor plaat Balgzand tussen 1991-2015



Figuur 4.8 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor plaat Griend tussen 1991-2015

Tabel 4.1 Overzicht van berekende trends in de ontwikkeling van het volume en de hoogte van de volledige Westelijke Waddenzee uitgesplitst in zand en slib

Naam	Oppervlakte [km ²]	Gemeten (1991- 2015)			Kunstmatig [10 ⁶ m ³]	Natuurlijke trend (2015-1991) mm/jaar	R	Slib bodem	
		Totaal [10 ⁶ m ³]	Slib laag [10 ⁶ m ³]	Slib hoog [10 ⁶ m ³]				Laag [%]	Hoog [%]
Volledig	1480,9	13,38	24,43	27,52	-12.4	0,1	0,01	13	29

Tabel 4.2 Overzicht van berekende trends in de ontwikkeling van het volume en de hoogte van geulen uitgesplitst in zand en slib

Naam	Oppervlakte [km ²]	Gemeten (1991- 2015)			Kunstmatig [10 ⁶ m ³]	Natuurlijke trend (2015-1991) mm/jaar	R	Slib bodem	
		Totaal [10 ⁶ m ³]	Slib laag [10 ⁶ m ³]	Slib hoog [10 ⁶ m ³]				Laag [%]	Hoog [%]
Boomkensdiep	4,3	5,94	0,12	0,54	0.00	55.2	0,86	4	15
Doove Balg	50,7	3,03	1,42	1,75	0.00	1.3	0,20	26	39
Engelsmangat	5,2	12,50	0,00	0,65	0.00	101.4	0,98	0	8
Inschot	6,8	17,69	1,36	4,89	0.00	108	1,00	9	28
Malzwin	11,9	-1,48	-0,24	-0,45	0.00	-4.3	0,50	16	32
Robbengat	7,9	-1,02	0,05	-0,07	-2.75	3.8	0,04	0	18
Texelschaar	7,8	2,82	0,18	0,84	0.00	15.3	0,96	5	26
Texelstroom	81,3	16,62	1,92	5,92	-0.37	9.3	0,85	3	19
Vliestroom	46,6	24,82	1,96	7,15	-9.28	27.5	0,89	6	21
Westmeep	40,9	30,73	2,04	7,01	0.00	29.9	0,99	3	19

Tabel 4.3 Overzicht van berekende trends in de ontwikkeling van het volume en de hoogte van subgetijde uitgesplitst in zand en slib

Naam	Gemeten (1991- 2015)				Kunstmatig [10 ⁶ m3]	Natuurlijke trend (2015-1991)		Slib bodem	
	Oppervlakte [km ²]	Totaal [10 ⁶ m ³]	Slib laag [10 ⁶ m ³]	Slib hoog [10 ⁶ m ³]		mm/jaar	R	Laag [%]	Hoog [%]
Marsdiep	401,6	-12,92	4,30	1,26	0	-1,9	0,68	17	33
Eierlandse Gat	35,7	-3,05	0,27	-0,01	0	-3,2	0,69	1	15
Vlie	281,3	-14,46	7,41	4,76	0	-2.8	0,46	11	24

Tabel 4.4 Overzicht van berekende trends in de ontwikkeling van het volume en de hoogte van platen, uitgesplitst in zand en slib

Naam	Gemeten (1991- 2015)				Kunstmatig [10 ⁶ m3]	Natuurlijke trend (2015-1991)		Slib bodem	
	Oppervlakte [km ²]	Totaal [10 ⁶ m ³]	Slib laag [10 ⁶ m ³]	Slib hoog [10 ⁶ m ³]		mm/jaar	R	Laag [%]	Hoog [%]
Balgzand	65,7	4,09	1,69	2,19	0	3	0,82	23	38
Ballastplaat	7,9	-0,73	0,07	-0,07	0	-5	0,701	20	35
Griend	46,2	-5,38	-0,43	-1,25	0	-3,8	0,157	3	17
Jacobsruggen	17,6	-11,01	0,00	-1,52	0	-25,5	0,98	1	10
Kornwerderzand	3,6	-0,85	-0,02	-0,17	0	-10,8	0,655	1	19
Lutjeswaard	5,5	-0,13	-0,03	-0,05	0	-1,2	0,16	8	25
Overige Marsdiep	24,1	-6,23	-1,02	-1,94	0	-11,6	0,936	14	29
Overige Vlie	20,7	-5,93	-0,07	-1,15	0	-11,1	0,892	3	22
Oosterbierum	49,2	-0,48	2,41	2,24	0	0,2	0,008	32	47
Richel	16,2	-4,36	-0,05	-0,77	0	-8,9	0,56	1	15
Terschellingerwad	69,1	-0,82	4,11	3,62	0	-2,1	0,158	40	54
Waarden	30,7	-2,28	-0,05	-0,58	0	-1,9	0,262	12	30
Waardgronden	160,3	-29,03	-2,99	-7,38	0	-6,7	0,933	9	26

4.5 Gevoeligheidsanalyse

4.5.1 Tijdsperiode

Op basis van de gegevens uit de periode van 1985 tot 2015 zijn voor alle morfologische eenheden zes datapunten in de tijd beschikbaar. Een trendlijn die op basis van deze datapunten wordt bepaald, geldt bij een 95% waarschijnlijkheidsinterval als significant wanneer de lineaire correlatiecoëfficiënt groter is dan 0.707. Voor slechts drie geulen en drie platen kon op deze manier een significante lineaire trendlijn worden bepaald.

Op basis van de gegevens uit de periode van 1991 tot 2015 zijn voor alle morfologische eenheden slechts vijf datapunten in de tijd beschikbaar. Een trendlijn die op basis van deze datapunten wordt bepaald, geldt bij een 95% waarschijnlijkheidsinterval als significant wanneer de lineaire correlatiecoëfficiënt groter is dan 0.754. Op deze manier kon voor zeven geulen en drie platen een significante lineaire trendlijn worden bepaald.

4.5.2 Ruimtelijke begrenzingen

Zoals beschreven in paragraaf 3.2 is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Voor de geulen is gebruik gemaakt van een begrenzing op NAP -5 m diepte van de 1985 bodem. Voor de gevoeligheidsanalyse zijn begrenzingen gebruikt op NAP -4 m en -6 m diepte. De trend in de ontwikkeling van de gemiddelde geuldiepte is voor de verschillende begrenzingen gegeven in bijlage F.

Over het geheel zijn de precieze (kwantitatieve) trends voor de platen vrij sterk afhankelijk van de gekozen begrenzing. Kwalitatief valt er wel degelijk een uitspraak te doen over de ontwikkeling van specifieke geulen. Zo zijn de sterk sedimenterende geulen Engelsmangat, Inschot en Westmeep consequent voor alle begrenzingen (i.e. deze geulen sedimenteren altijd meer dan 25 mm/jaar). Evenzo zijn er 'matig' sedimenterende geulen Texelstroom, Vliestroom en Robbengat (trend tussen 1 en 12 mm/jaar). Voor Boomkensdiep, Doove Balg, Malzwin en Texelschaar hangt het resultaat sterk af van de gekozen begrenzing.

Voor de platen is in deze studie gebruik gemaakt van een begrenzing op NAP -1 m diepte van de 1985 bodem. Voor de gevoeligheidsanalyse zijn begrenzingen gebruikt op NAP -0.5 m en -1.5 m diepte. De trend in de ontwikkeling van de gemiddelde plaathoogte is voor de verschillende begrenzingen gegeven in bijlage C.

Over het geheel zijn de precieze (kwantitatieve) trends voor de platen ook vrij sterk afhankelijk van de gekozen begrenzing. Kwalitatief valt er wel degelijk een uitspraak te doen over de ontwikkeling van specifieke platen. Balgzand, Kornwerderzand en Oosterbierum sedimenteren. Griend, Jacobsruggen, Richel, Waarden en Waardgronden eroderen. Voor Ballastplaat, Lutjeswaard en Terschellingerwad is het resultaat sterk afhankelijk van de gekozen begrenzing, aangezien erosie of sedimentatie heeft plaatsgevonden op een specifiek gedeelte van de diepte.

5 Discussie

In deze studie is er op basis van samengestelde bodems uit Elias (2018) een aanvullende mesoschaal analyse uitgevoerd naar ontwikkeling van individuele morfologische eenheden in de Westelijke Waddenzee (i.e. individuele platen en geulen). Het voordeel van deze methode is dat de volumebalans een-op-een overeenkomt met Elias (2018). Er is immers gebruik gemaakt van dezelfde bathymetrische gegevens. Daarnaast heeft de samengestelde bodem die met de hand is gemaakt (afkomstig van Elias, 2018) waarschijnlijk een hogere nauwkeurigheid dan een samengestelde bodem op basis van de gangbare algoritmes. Het nadeel is echter dat samengestelde bodems op basis van expert judgement niet eenduidig te reproduceren zijn. Dit is altijd onderdeel van discussie wanneer volumebalansen worden uitgevoerd, aangezien bodemdata nooit volledige dekking is in de tijd en/of ruimte. In Nederhoff et al. (2017) was er juist gekozen om juist op basis van een tijd-ruimte interpolatie algoritme samengestelde bodems te maken. Voor consistentie met het werk van Elias (2018) is daar in deze rapportage juist vanaf geweken. Losstaand van de constructie van de samengestelde bodem is de foutenbeschouwing. In deze studie is de fout geschat op 15 centimeter. Dit is waarschijnlijk een te conservatieve schatting, aangezien fouten uiteen vallen in stochastische fouten (die uitmiddelen voor grote gebieden) en systematische fouten (die niet uitmiddelen). Door de fout in de geschatte bodemhoogte (en daarmee volumeverandering) te laten zien, is het duidelijk dat de fout in de gemeten bodemhoogte wel degelijk van belang is. Het aannemen dat alle fouten stochastisch zijn en daarmee wel zouden uitmiddelen is dan ook te simpel geredeneerd.

De gehele Westelijke Waddenzee vertoont een nauwelijks tot licht sedimenterende trend, afhankelijk van de beschouwde periode. Door volumeveranderingen te combineren met de sedimentatlas was het daarnaast ook mogelijk om het slibpercentage te schatten. Om het slibpercentage te kwantificeren waren echter vele aannames nodig. Zo wordt er vanuit gegaan dat de verhouding zand/slib niet varieert over de tijd. Hoewel dat een redelijke aanname lijkt op basis van de bevindingen van Zwarts (2004), geeft de sedimentatlas een alleen een representatief slibgehalte voor de bovenste laag (30 cm). Bij grote hoogteveranderingen is dit slibgehalte dus niet noodzakelijk geldig. Er moet nader worden uitgezocht hoe het slibgehalte en de dichtheid afhangen van de diepte. Daarnaast zijn er verschillende interpolatietechnieken beschikbaar om tot realistische slibgehalten te komen op een 20 m resolutie, die allemaal om uiteenlopende redenen niet ideaal zijn. In deze studie is gekozen voor een CoKriging methode, waarbij de bathymetrie als secundaire dataset wordt gebruikt. Gezien de niet geringe invloed al deze aannames/keuzes op de resultaten lijkt het wenselijk om verschillende interpolatietechnieken nader te bestuderen en onderling te vergelijken. Daarnaast is gekozen om een droge dichtheid van slib aan te nemen van 450 kg/m^3 op basis van de methode Mulder (1995). In deze studie wordt een ondergrens (zonder correcties) en bovengrens (met correctie voor slibpercentages onder 15% en compactie van slib) gegeven. De onzekerheden die met deze aannames gepaard gaan, maken de gepresenteerde waarden van slib in de volumeveranderingen en bodem dan ook eerder kwalitatief dan kwantitatief van aard. Het sterke punt van deze analyse is echter dat er is aangetoond dat slib wel een factor is in de totale sedimenthuishouding van de Westelijke Waddenzee. Dit geldt vooral voor de platen.

De totale sedimentatie van de Westelijke Waddenzee betekent echter niet dat alle gebieden in de Westelijke Waddenzee sedimenteren. De ruimtelijke variatie is groot en wordt sterk gestuurd door de complexe lokale morfologie. Ruimtelijke variatie is geanalyseerd door mesoschaal volumeveranderingen en hypsometrie uit te rekenen. Dit maakt het mogelijk om

voor individuele platen en geulen trendberekeningen uit te voeren. Op mesoschaal is er een duidelijke trend dat de hoofdgeulen per zeegat, gegeven de gebruikte gebiedsbegrenzing, licht sedimenteren en dat nevengeulen en zijtakken sterk sedimenteren en/of migreren. Een sedimenterende trend voor individuele geulen betekent echter niet dat er een algehele sedimenterende trend optreedt. Door in de hypsometrische curves te kijken, is te zien dat sedimentatie (of erosie) varieert per dieptecontour. Sedimentatie of migratie van de zijgeulen hangt mogelijk samen met de grootschalige afsluiting van de Zuiderzee en de heroriëntatie van geulen in de Westelijke Waddenzee. Bij geulmigratie schiet de gebruikte methode echter tekort, omdat de geul buiten de gekozen gebiedsbegrenzing komt te liggen. Dat resulteert binnen de gebiedsbegrenzing dus in sedimentatie (opvulling van de voormalige geul), terwijl de werkelijke geul niet verondiept. Voor nevengeulen en zijtakken was het hierdoor niet mogelijk om een eenduidige trend te destilleren. Platen nabij het zeegat lijken voornamelijk te eroderen, terwijl platen aan de landzijde van het kombergingsgebied sedimenteren. Dit lijkt sterk samen te vallen met het slibgehalte in de bodem, al moeten bovengenoemde aannames omtrent het slibgehalte eerst nader worden uitgezocht. Een mogelijke verklaring is dat slib vooral neerslaat in gebieden met lage hydrodynamische energie, waar dus ook sedimentatie kan plaatsvinden. Zandige locaties zijn veelal aan meer hydrodynamische energie onderhevig, waardoor hier ook meer erosie plaatsvindt. Voor het subgetijdegebied bleek dat sedimentatie vooral boven NAP -3 m plaatsvond. In het Marsdiep en 't Vlie kon geen eenduidige trend qua erosie of sedimentatie worden bepaald voor het subgetijdegebied. In het Eierlandse Gat erodeerde het subgetijdegebied juist.

In paragraaf 4.5.1 is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor de gehanteerde tijdsperiode. Hieruit bleek dat er voor de periode van 1985 tot 2015 slechts enkele significante lineaire trends te bepalen waren, terwijl voor de periode 1991 tot 2015 meerdere en significantere lineaire trends te identificeren zijn. Het is echter niet verwonderlijk dat de significantie toeneemt wanneer er een datapunt wordt weggelaten. De analyse van Elias (2018) op lange-termijntijdreeksen (1933-2015) geeft echter reden om aan te nemen dat 1985 een uitschieter is en daarom niet het meest representatieve startjaar voor een meso schaal volumeanalyse.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusie

Afhankelijk van de beschouwde periode lijkt de Westelijke Waddenzee te sedimenteren met 0,1 of 2,4 miljoen m³ per jaar (0.1-1.5 mm per jaar) voor respectievelijk startjaar 1985 of 1991 tot heden. Deze lineaire trends zijn echter statistisch niet significant waarbij in theorie moet worden gesteld dat de berekende trend op toeval berust. Daarnaast wordt op basis van de slibatlas geschat dat het gemiddelde slibpercentage in de bodem van de Waddenzee tussen de 13-29% bedraagt. Dit is echter niet hetzelfde als het slibpercentage van de totale volumeverandering, omdat het slibpercentage dan gewogen wordt naar de lokale hoeveelheid sedimentatie/erosie. Daarnaast is de ruimtelijke variatie zeer groot. Om die reden is in meer detail gekeken naar individuele geulen, platen en subgetijde gebieden.

Het merendeel van de geulen in de Westelijke Waddenzee sedimenteert. Uitzonderingen zijn Malzwin (Marsdiep) en Robbengat (Eierlandse Gat) die eroderen. Het percentage slib in de bodem van de geulen ligt gemiddeld rond de 7-22% (onder- en bovengrens).

Voor de subgetijdegebieden konden geen significante trends worden bepaald op basis de tijdsperiodes 1985-2015 en 1991-2015. In de subgetijdegebieden van het Marsdiep en 't Vlie vond afhankelijk van het startjaar juist netto erosie of sedimentatie plaats. Het subgetijdegebied van het Eierlandse Gat erodeerde voor beide tijdsperiodes. Het slibpercentage in de bodem wordt voor de ondiepe delen geschat rond de 1-33%.

Enkele platen sedimenteren (e.g. Balgzand & Oosterbierum), waarvan het sediment bestaat uit grote hoeveelheden slib. De andere platen eroderen echter waarvan het sediment in mindere mate slibrijk materiaal bevat. Niet alle platen in de Westelijke Waddenzee sedimenteren met een snelheid gelijk aan de historische zeespiegelstijging. Het gemiddelde slibpercentage in de bodem van platen wordt geschat rond de 13-28%.

6.2 Aanbevelingen

Deze studie geeft een beter inzicht in de huidige sedimentvraag in de Westelijke Waddenzee, die onder andere wordt gestuurd door zeespiegelstijging. Dat is belangrijk met het oog op de toekomstige ontwikkeling, maar niet voldoende om hier harde uitspraken over te kunnen doen. Daarvoor moet verder worden onderzocht welk aandeel van de ontwikkeling verklaard kan worden door zeespiegelstijging en hoe de verhouding zand/slib varieert in de plaats, diepte en tijd.

Daarnaast bestaat er de nodige onzekerheid gerelateerd aan de (lineaire) trend analyses en het slibpercentage. In welke mate de niet-significantie van de trends samenhangt met fouten/afwijkingen in de originele bathymetrische data, inconsistentie in de geconstrueerde bodems of niet-lineariteit van morfologische processen dient nader te worden onderzocht. Daarnaast verdient het aanbeveling in meer detail na te gaan welke aannames allemaal een rol spelen in de uiteindelijke slibberekening. Er is verder onderzoek nodig naar de aannames in de omzetting van de massa- naar volumepercentage. Ook moet er, gezien de niet geringe invloed op de resultaten uit dit rapport, een goede vergelijking worden gemaakt van verschillende interpolatietechnieken. Hierbij kan worden gedacht aan de gevoeligheden van de CoKriging interpolatie. Idealiter worden de resulterende slibgehalten vergeleken met in-situ observaties (e.g. SIBES database en/of boringen) en modelberekeningen. Om ook uitspraken te kunnen doen over de diepteafhankelijkheid van de droge dichtheid van het

bodemmateriaal (vanwege compactie) zijn nieuwe boringen benodigd op de meest slibrijke locaties, waarbij dichtheid en slibgehalte op verschillende dieptes moeten worden bepaald.

De analyses in dit rapport zijn uitgevoerd op mesoschaal niveau wat het mogelijk maakt volume- en hoogte-ontwikkeling van individuele platen en geulen te berekenen. Het is echter niet mogelijk om transportmechanismen te analyseren. Bodemveranderingen zijn immers een gevolg van transportgradiënten (zie ook paragraaf 2.2). Om beter inzicht te verkrijgen in de transportpaden in de (Westelijke) Waddenzee vindt het de aanbeveling om de samenhang tussen de verschillende deelgebieden in kaart te brengen met een modelleringstudie.

Door het opstellen van een soortgelijke analyse voor de Oostelijke Waddenzee kan het begrip over hoe geulen en platen zich ontwikkelen worden uitgebreid van de Westelijke Waddenzee naar de gehele Waddenzee als geheel.

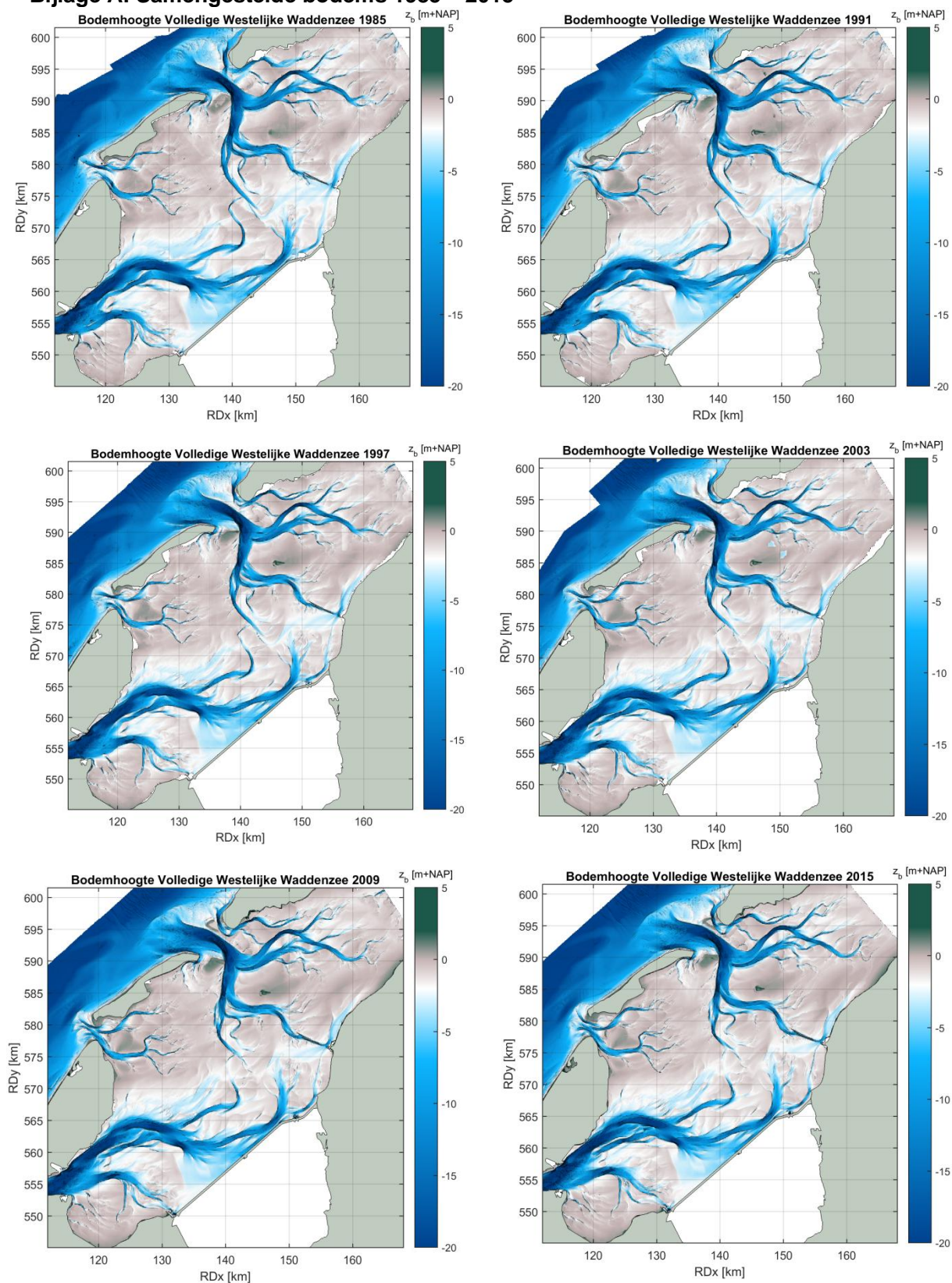
Referenties

- Baart, F., Leander, R., De Ronde, J., De Vries, H., Vuik, V., Nicolai, R. 2015: Zeespiegelmonitor 2014. Rapport 1209426-202, Deltares, HKV en KNMI
- Bars, Le, D., Drijfhou, S. & de Vries, H., 2017: A high-end sea level rise probabilistic projection including rapid Antarctic ice sheet mass loss, Environmental Research Letters: Vol 12, Nr 4. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aa6512>
- Cleveringa, J. & Grasmeyer, B., 2010: Meegroeivermogen en gebruiksruimte in de getijbekkens Vlie en Marsdiep; Grootschalige morfologische ontwikkelingen westelijke Waddenzee, Arcadis, Rapport A2062R3r5.
- Cleveringa, J., Oost, A.P., 2018: Morfologie Kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B., De Ronde, J., 2012: Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. Netherlands Journal of Geosciences 91-3. 293-310.
- Elias, E.P.L., 2018: Een actuele sedimentbalans van de Westelijke Waddenzee (1926-2015). Rapport 11202190-002, Deltares
- Hoeksema, H.J., Mulder, H.P.J., Rommel, M.C., De Ronde, J.G. & De Vlas, J., 2004: Bodemdalingstudie Waddenzee 2004. Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd. Report RIKZ/2004.025. Rijkswaterstaat, National Institute for Coastal and Marine Management RIKZ (Haren): 138 pp.
- Journel, A.G., 1989. Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons. Short Course in Geology, AGU, Washington, DC, 8, 40.
- KNMI, 2017: Extreme zeespiegelstijging in de 21e eeuw. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). News item 06-04-2017. URL: <http://knmi.nl/over-hetknmi/nieuws/extreme-zeespiegelstijging-in-de-21e-eeuw>.
- Meehl, G., Stocker, T.F., Collins, W.D., Friedlingstein, P., Gaye, A.T., Gregory, J.M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J.M., Noda, A., Raper, S.C.B., Watterson, I.G., Weaver, J. & Zhao, Z.-C., 2007. Global climate projections. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Mille, H.L. (eds): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge. University Press (Cambridge, UK and New York, USA), 996 pp.
- Mulder, H.P.J., 1995: De droge dichtheid als functie van het slibgehalte t.b.v. een sediment balans. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat RIKZ Werkdocument RIKZ/OS -95.614x.
- Mulder, H.P.J., Mijwaard, B., 1997: Een methode om een twee-dimensionale sedimentbalans te maken, gebaseerd op meetgegevens, met gebruikmaking van een GIS en toegepast op de Eems-Dollard voor de periode 1985-1990. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat RIKZ Werkdocument RIKZ/OS-97.609x

- Nederhoff, C., Smits, B.P., Wang, Z.B., 2017: Kennisontwikkeling morfologie en baggerhoeveelheden: data analyse hypsometrie en getij. Rapport 11200521-000, Deltares
- Oost, A.P., Van der Spek, A.J.F., Van Oeveren-Theewes, C., Tonnon, P.K., 2018: The contribution of mud to the net yearly sedimentation volume in the Dutch Wadden Sea
- Rijkswaterstaat, 1998: Sedimentatlas Waddenzee, Ministerie van Verkeer en Waterstaat Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor kust en zee; cd-rom.
- Rijkswaterstaat, 2006: Opnametechnieken Waddenzee. Rapport AGI-2006-GPMP-004. Auteurs: Perluka, R., Wiegmann E.B., Jordans R.W.L. en Swart L.M.Th.

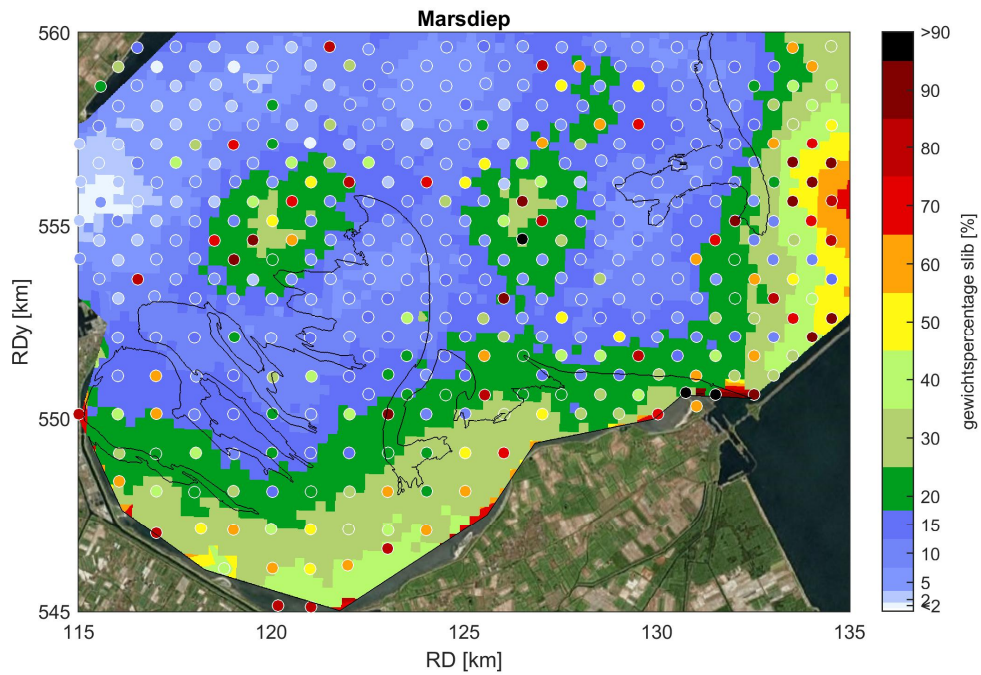
Bijlages

Bijlage A: Samengestelde bodems 1985 – 2015	33
Bijlage B: Geïnterpoleerde sliatlas inclusief meetpunten	34
Bijlage C: Resultaten volumeverandering en hypsometrie geulen	36
Bijlage D: Resultaten volumeverandering en hypsometrie subgetijdegebieden	46
Bijlage E: Resultaten volumeverandering en hypsometrie platen	49
Bijlage F: Gevoeligheidsanalyse begrenzingen	62

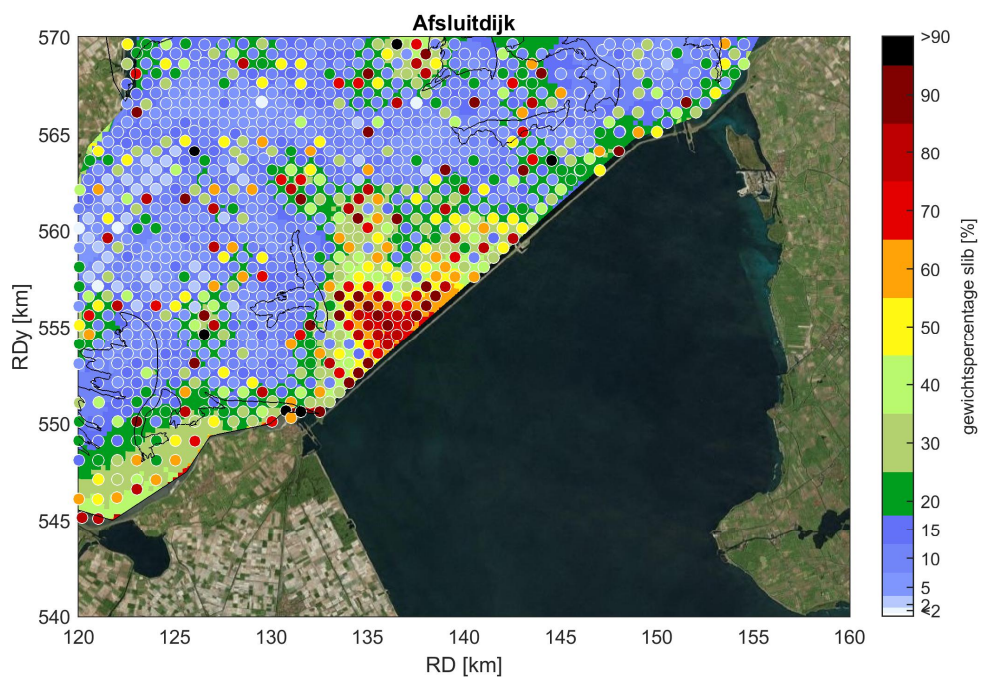
Bijlage A: Samengestelde bodems 1985 – 2015

Figuur A.0.1 Representatieve bodems voor de Westelijke Waddenzee voor de jaren 1985, 1991, 1997, 2003, 2009 en 2015 (Elias, 2018)

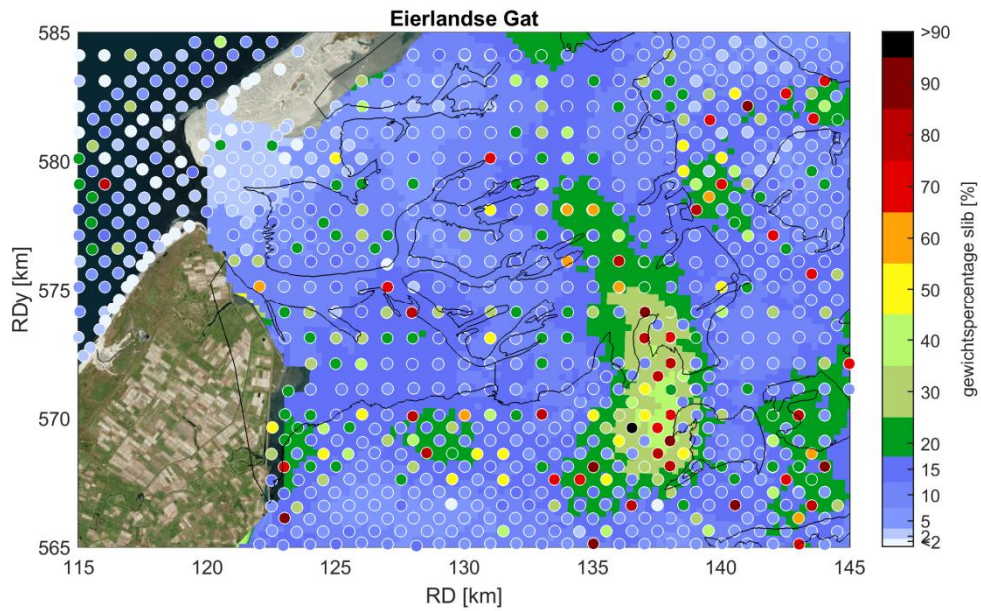
Bijlage B: Geïnterpoleerde slibatlas inclusief meetpunten



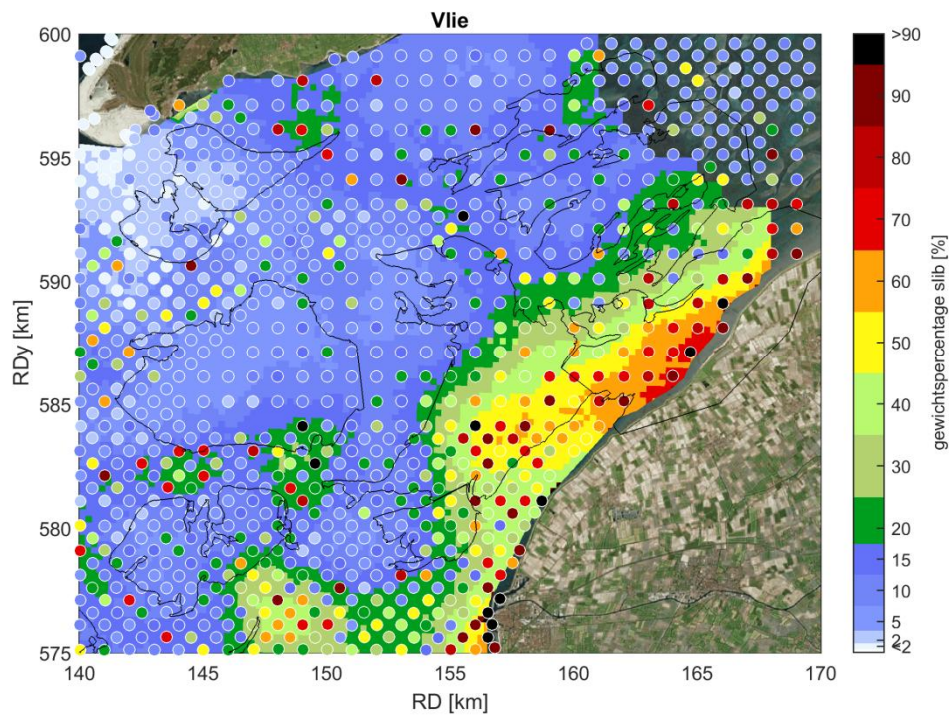
Figuur B. 0.2 Slibgehalte als massapercentage in de bodem bij de Afsluitdijk zonder correctiefactoren zoals gebruikt in deze studie (veld) inclusief meetpunten (cirkels met witte randen)



Figuur B. 0.3 Slibgehalte als massapercentage in de bodem bij de Afsluitdijk zonder correctiefactoren zoals gebruikt in deze studie (veld) inclusief meetpunten (cirkels met witte randen)

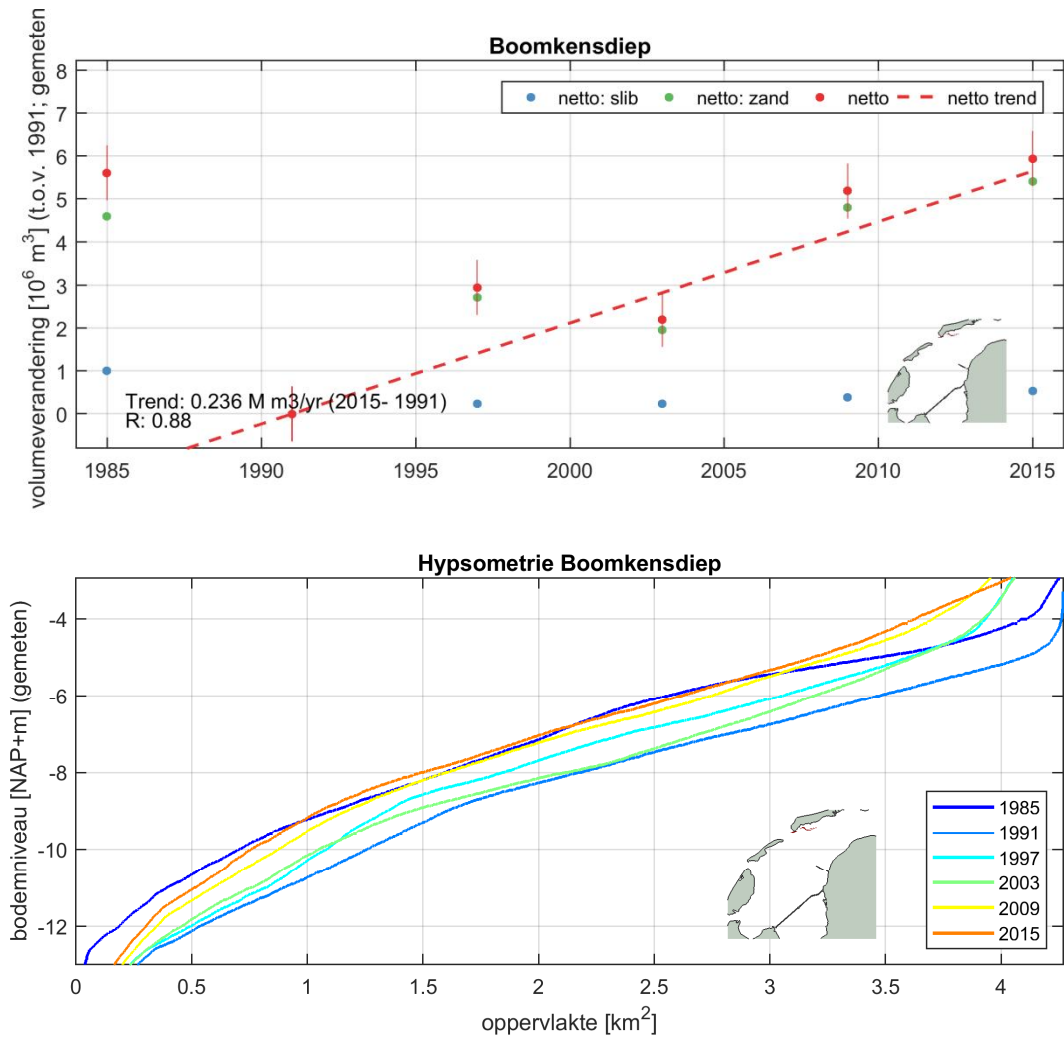


Figuur B. 0.4 Slibgehalte als massapercentage in de bodem bij het Eierlandse Gat zonder correctiefactoren zoals gebruikt in deze studie (veld) inclusief meetpunten (cirkels met witte randen)

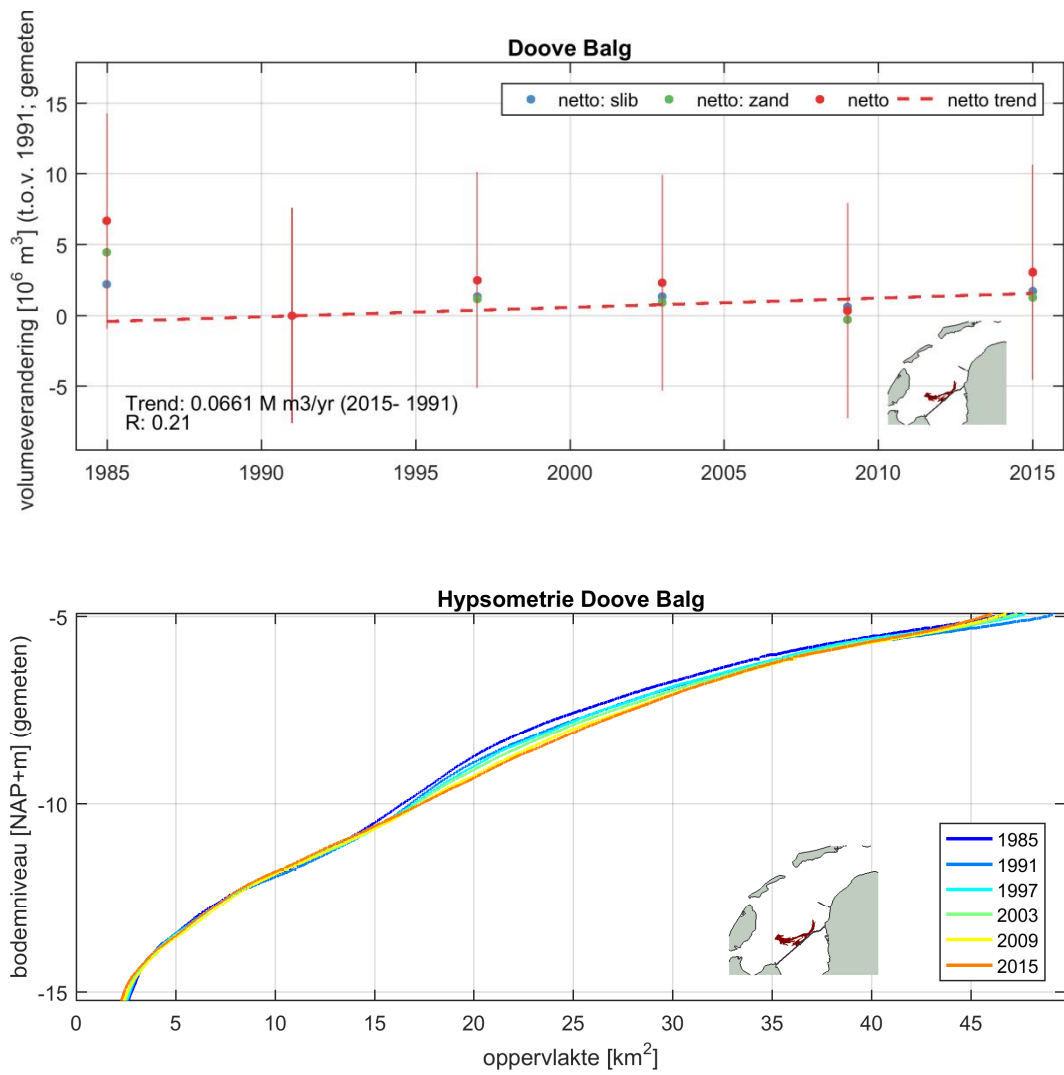


Figuur B. 0.5 Slibgehalte als massapercentage in de bodem bij het Vlie zonder correctiefactoren zoals gebruikt in deze studie (veld) inclusief meetpunten (cirkels met witte randen)

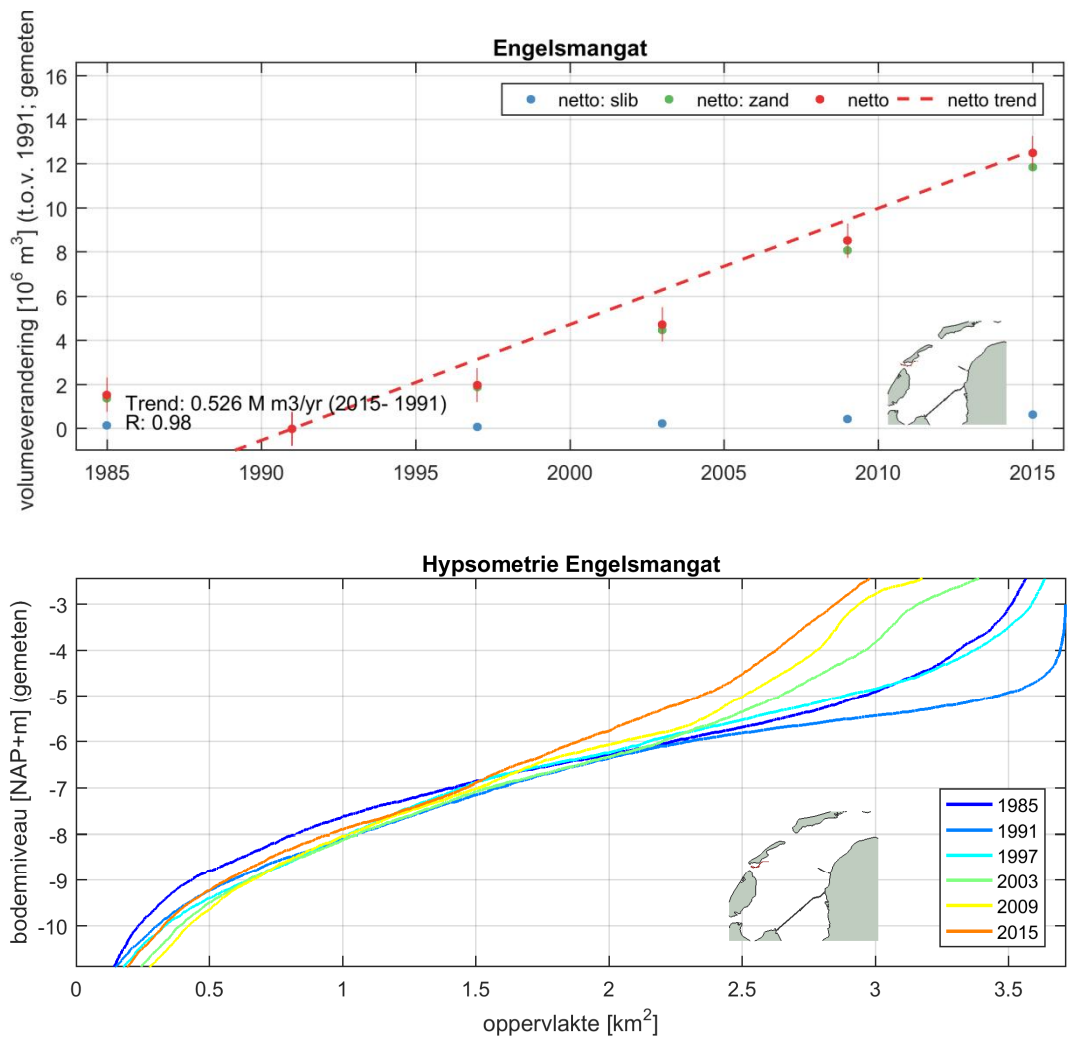
Bijlage C: Resultaten volumeverandering en hypsometrie geulen



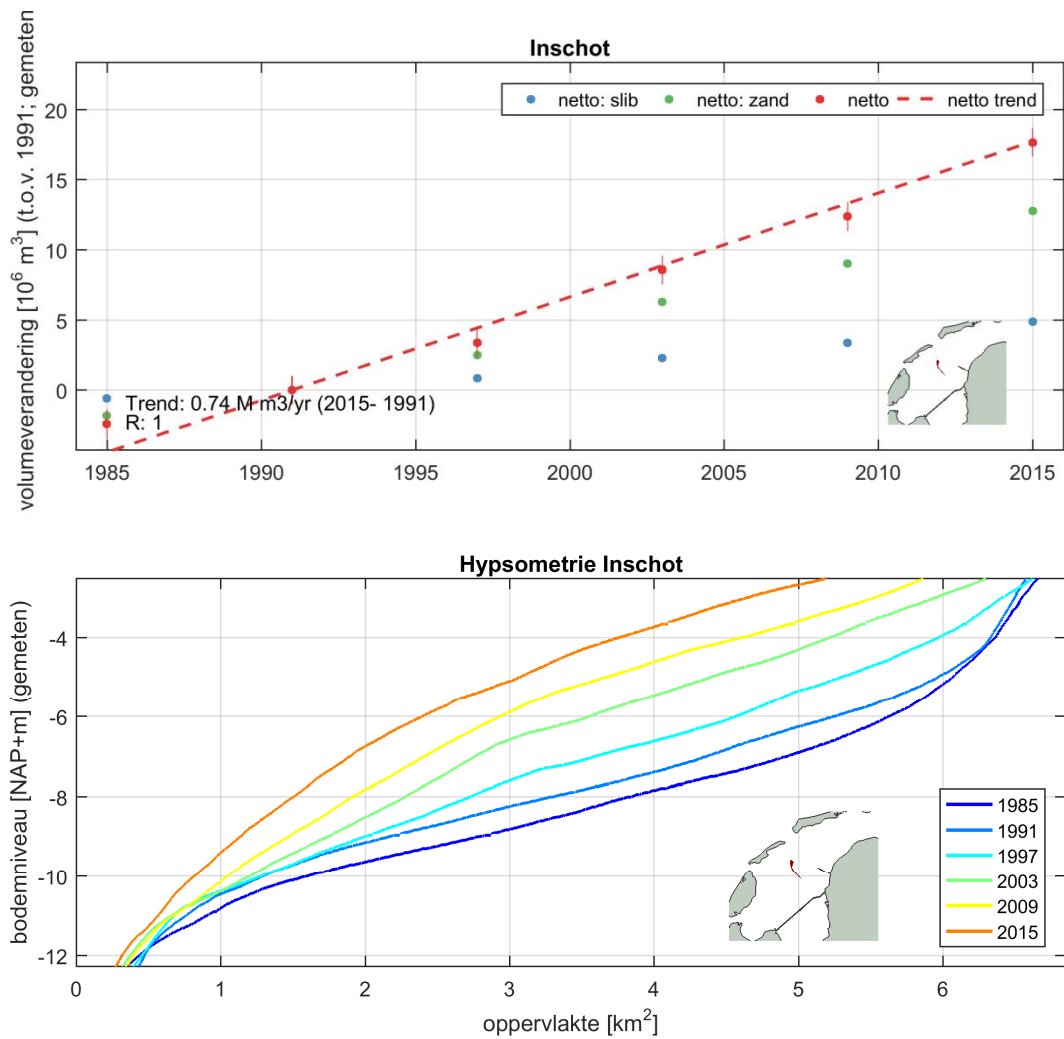
Figuur C.0.1 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor geul Boomkensdiep tussen 1991-2015



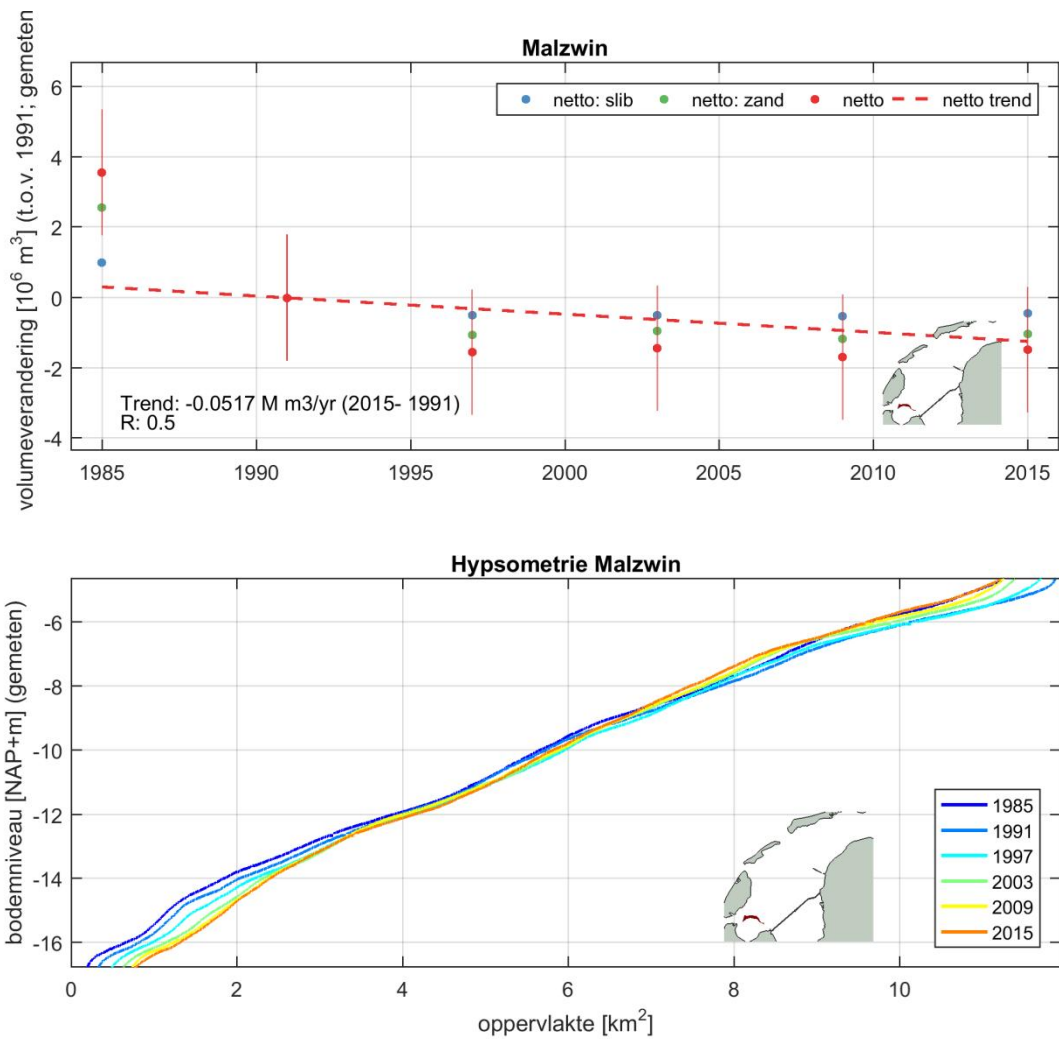
Figuur C.0.2 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor geul Doove Balg tussen 1991-2015



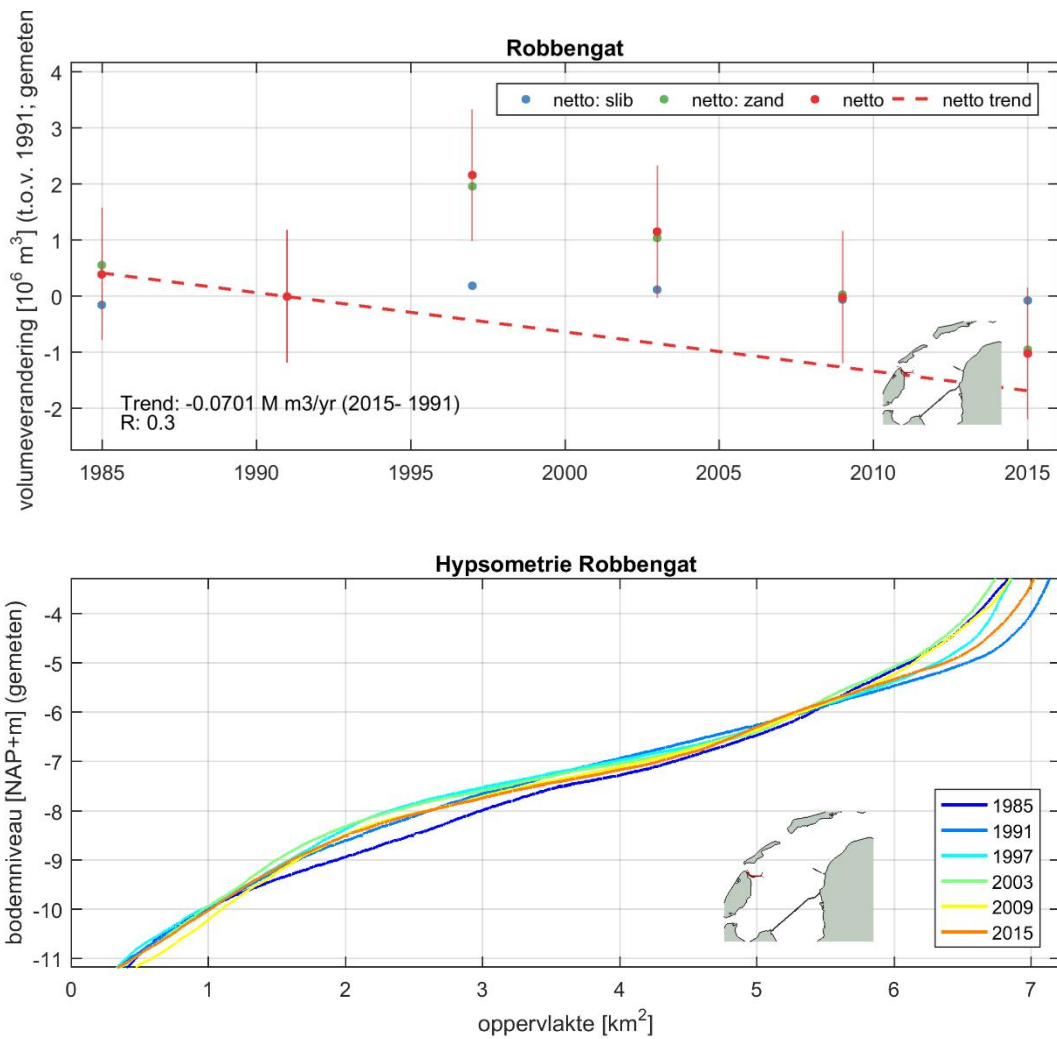
Figuur C.0.3 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor geul Engelsmangat tussen 1991-2015



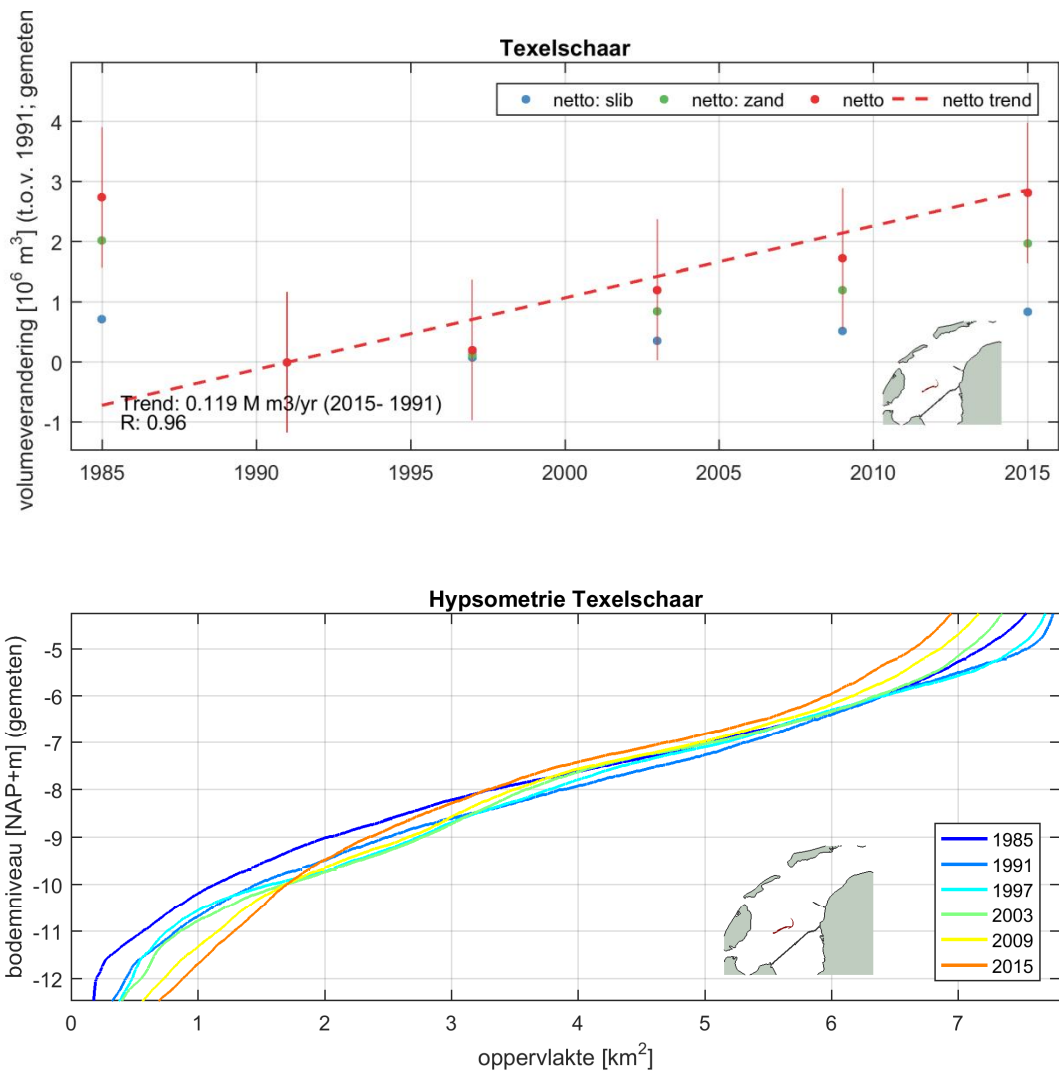
Figuur C.0.4 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor geul Inschot tussen 1991-2015



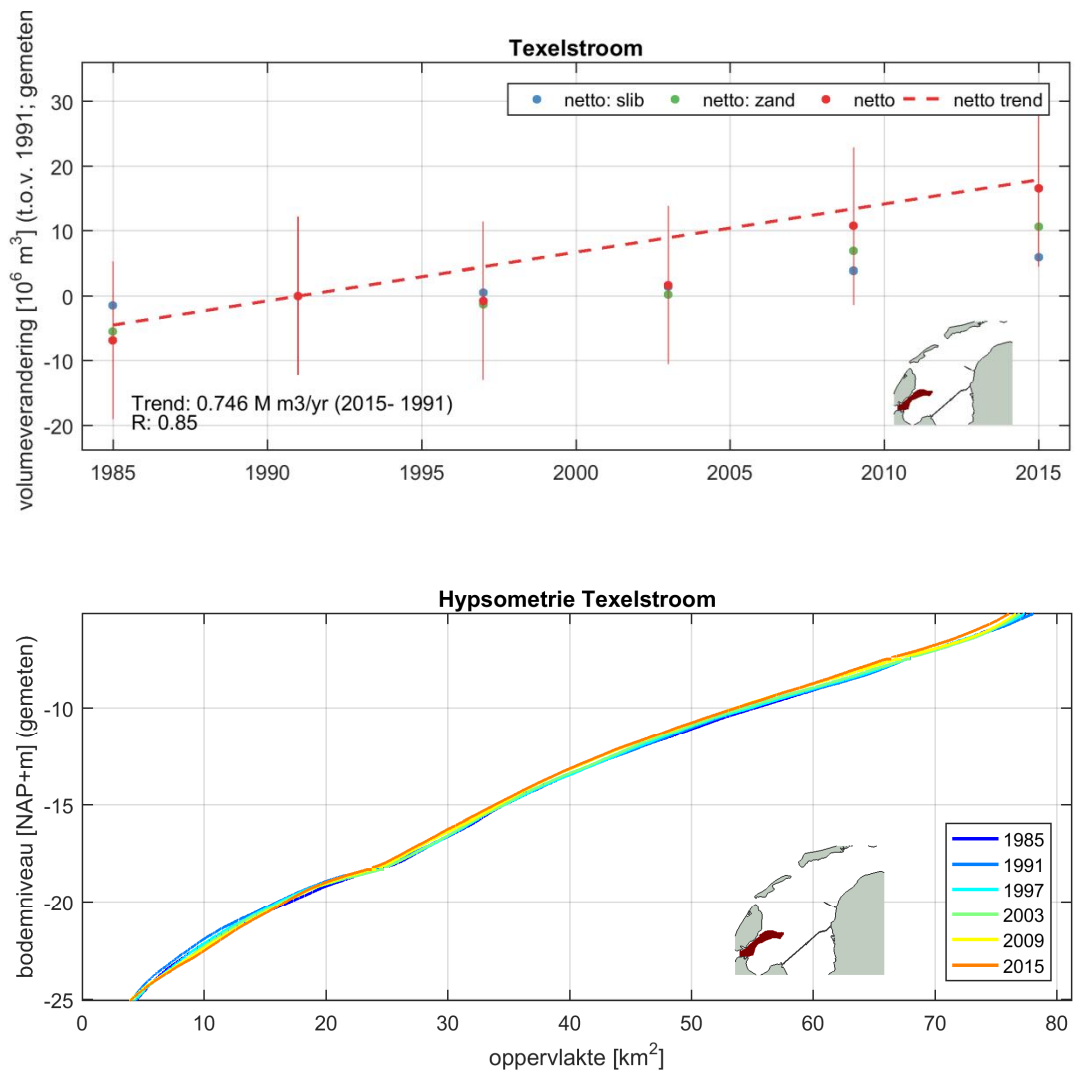
Figuur C.0.5 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor geul Malzwin tussen 1991-2015



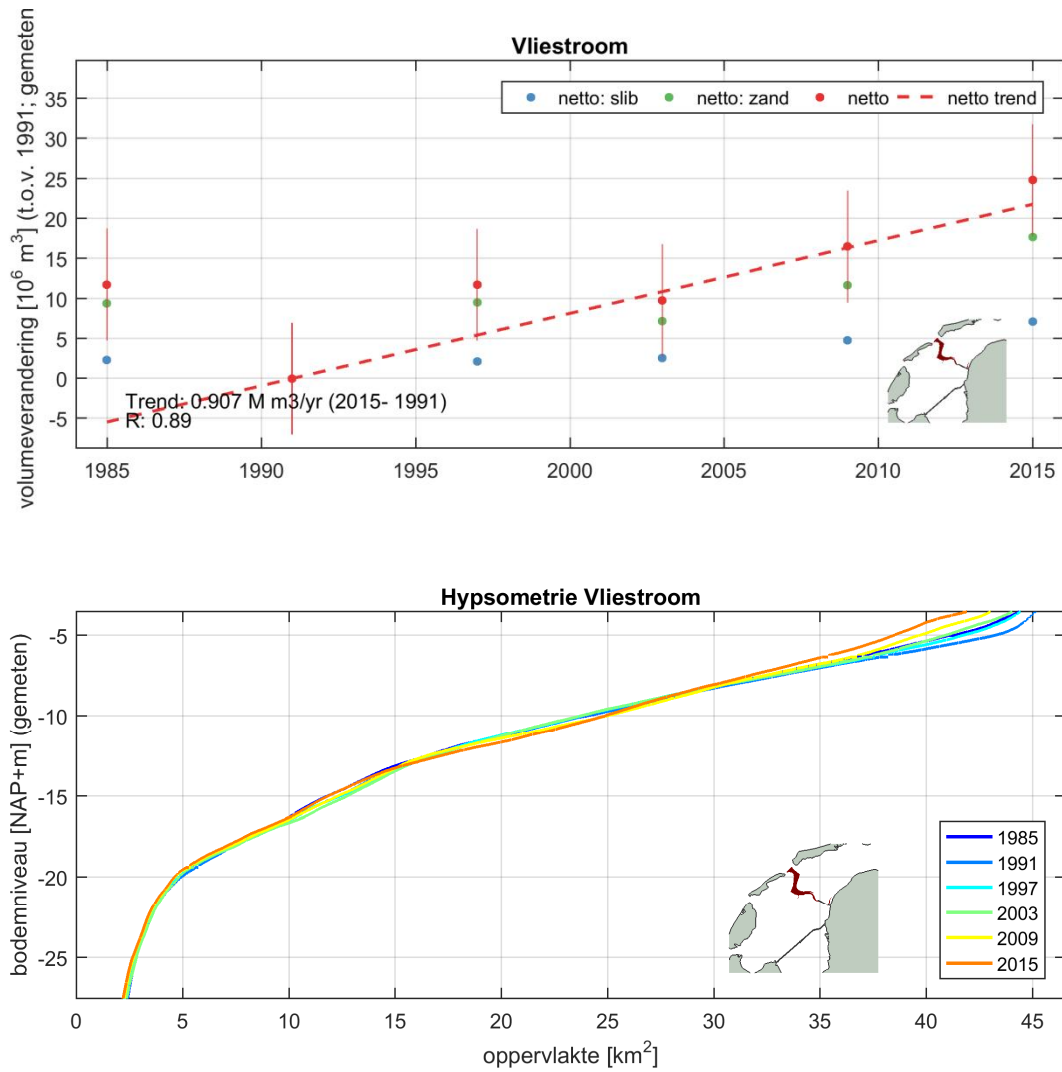
Figuur C.0.6 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor geul Robbengat tussen 1991-2015



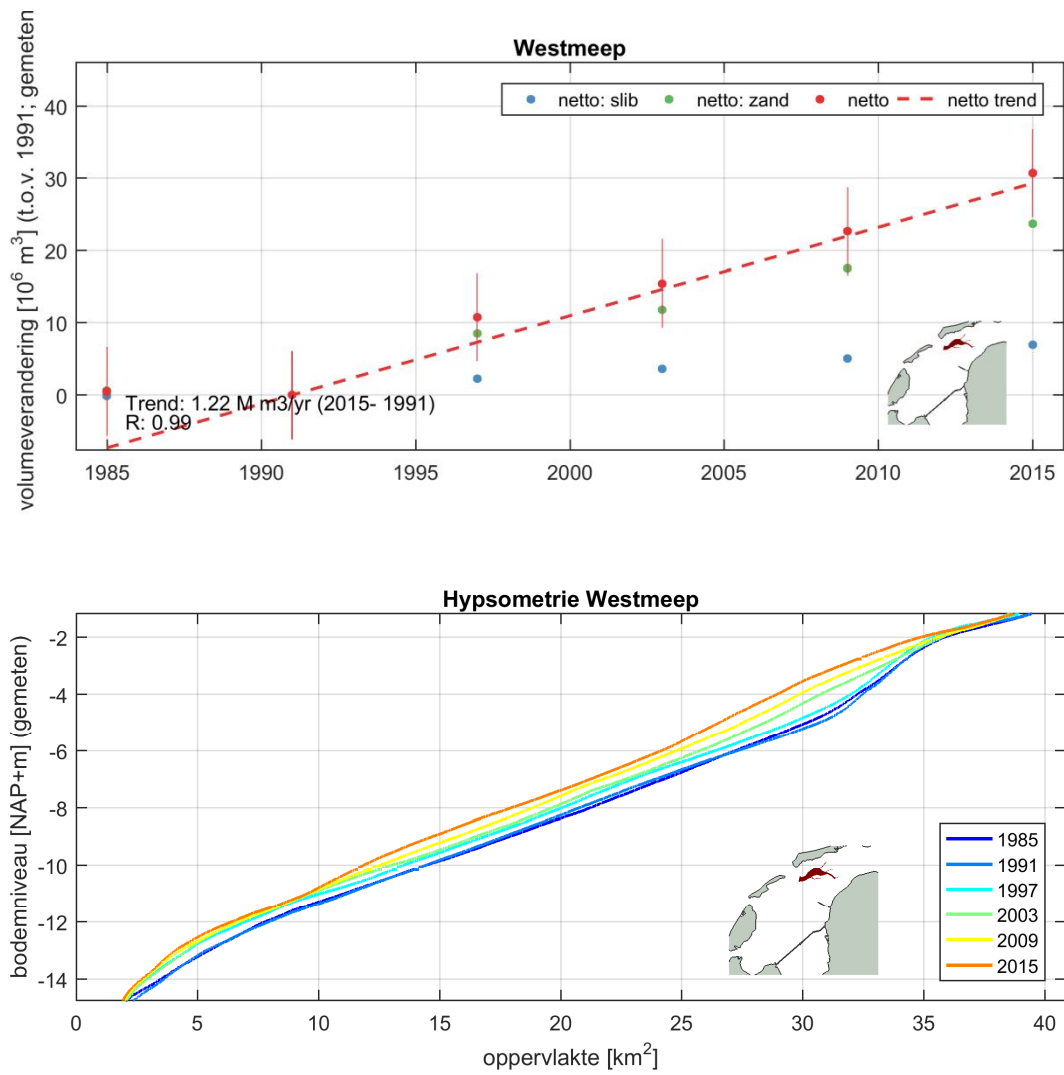
Figuur C.0.7 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor geul Texelschaar tussen 1991-2015



Figuur C.0.8 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor geul Texelstroom tussen 1991-2015

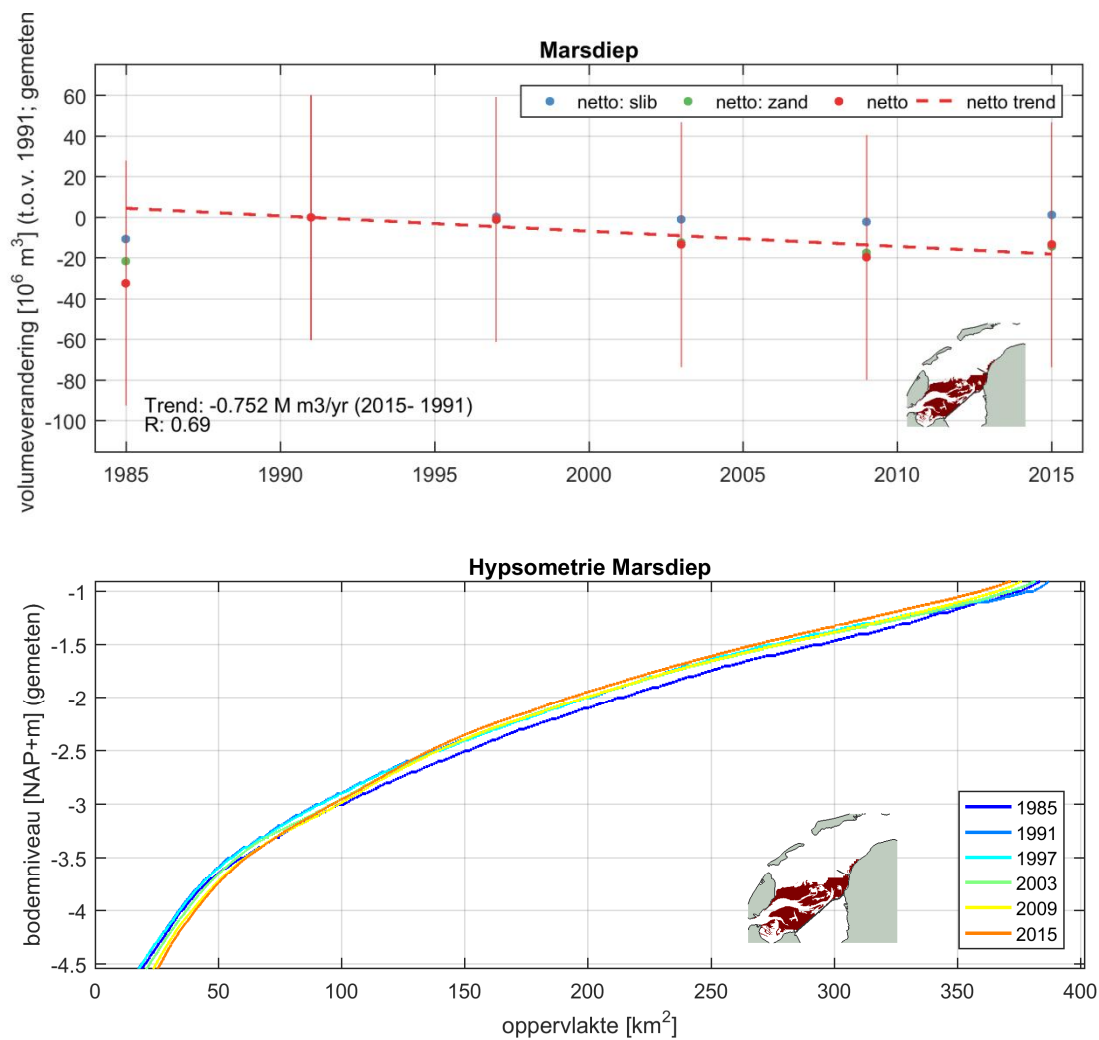


Figuur C.0.9 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor geul Vliestroom tussen 1991-2015

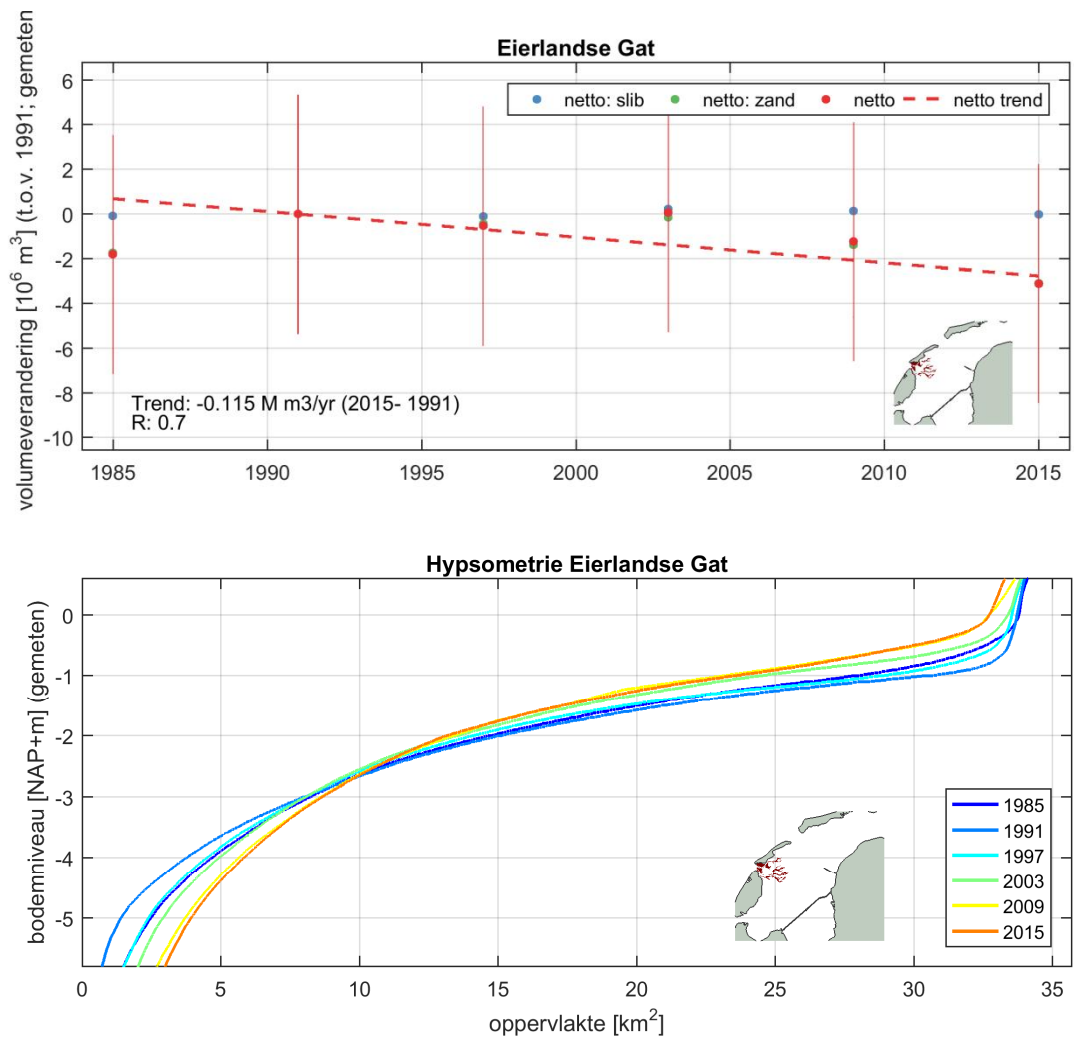


Figuur C.0.10 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor geul Westmeep tussen 1991-2015

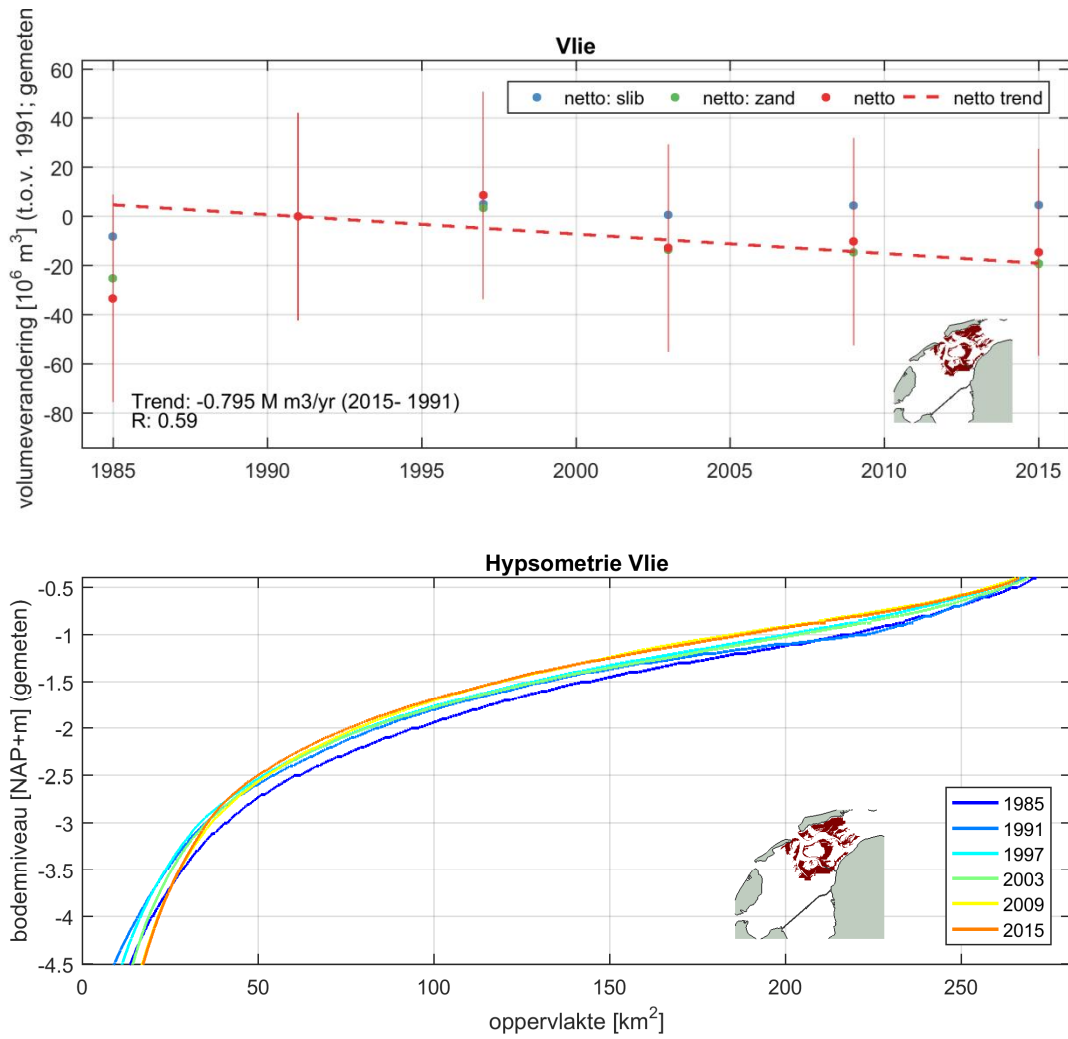
Bijlage D: Resultaten volumeverandering en hypsometrie subgetijdegebieden



Figuur D.0.1 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor subgetijdegebied Marsdiep tussen 1991-2015

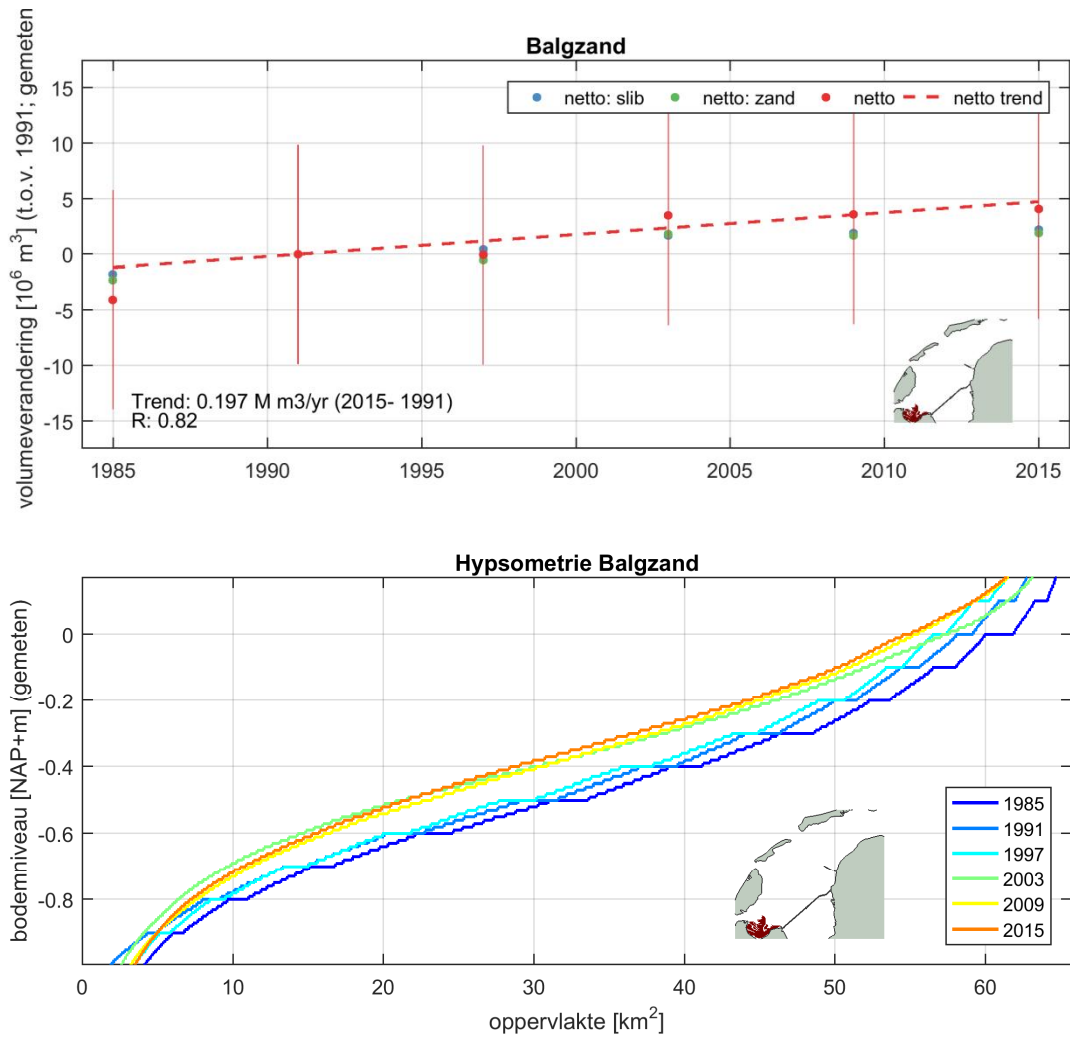


Figuur D.0.2 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor subgetijdegebied Eierlandse Gat tussen 1991-2015

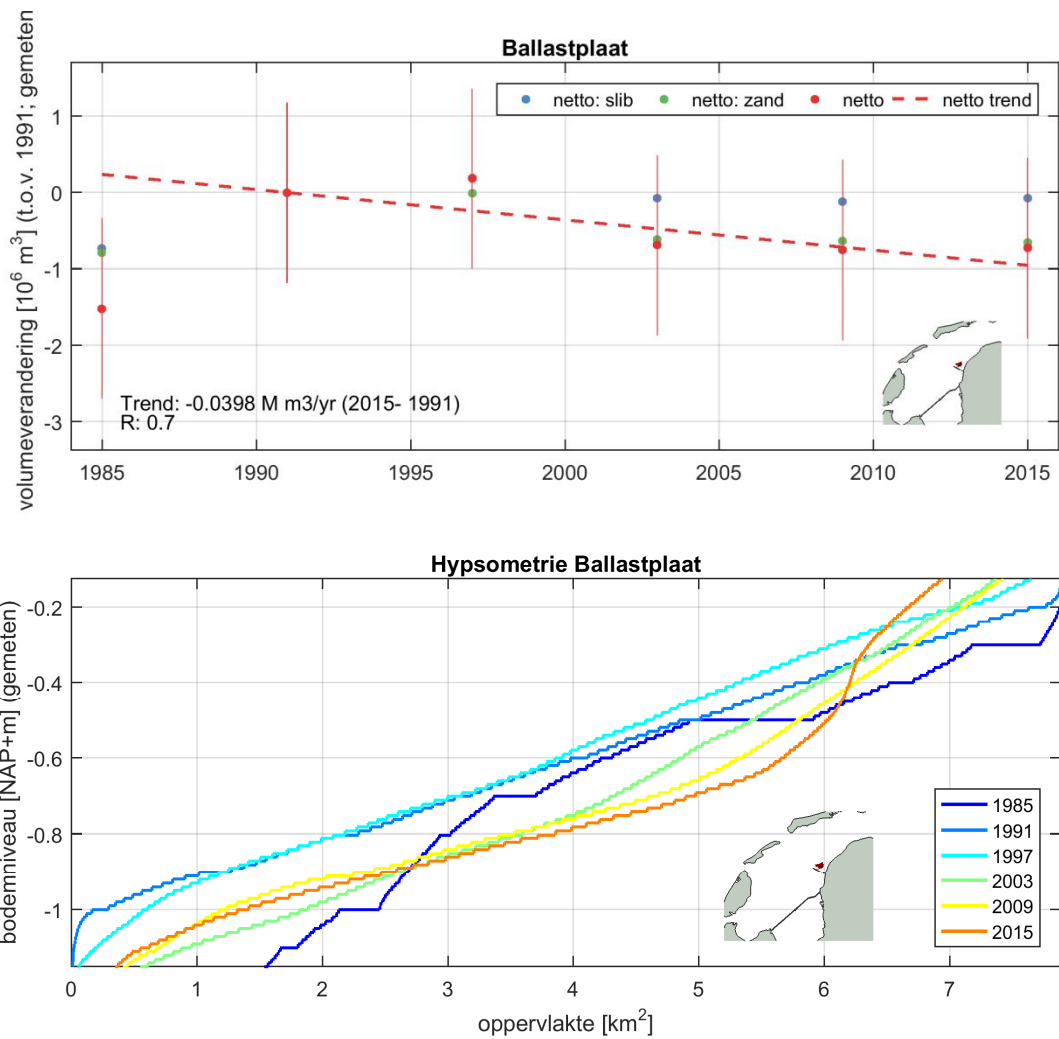


Figuur D.0.3 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor subgetijdegebied Vlie tussen 1991-2015

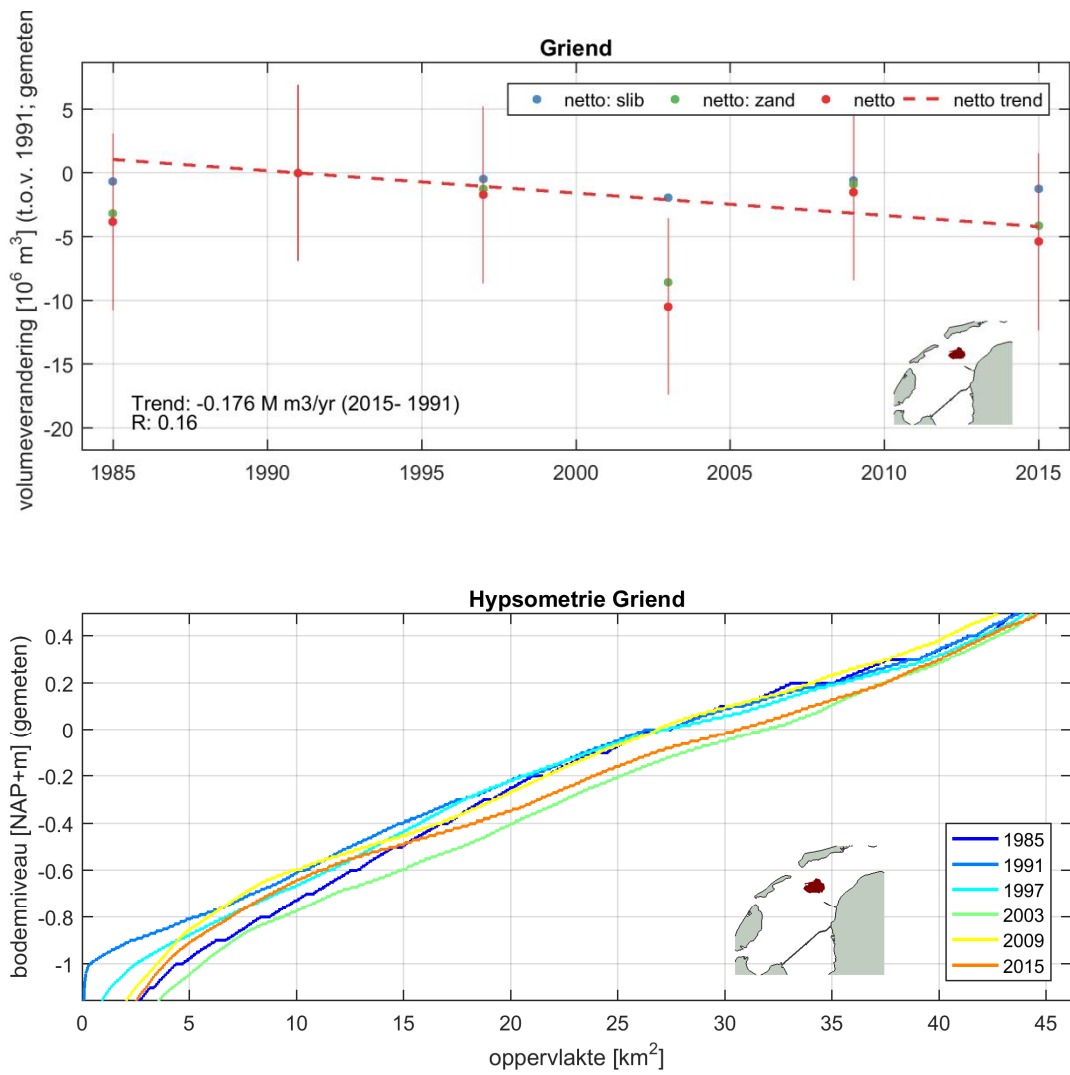
Bijlage E: Resultaten volumeverandering en hypsometrie platen



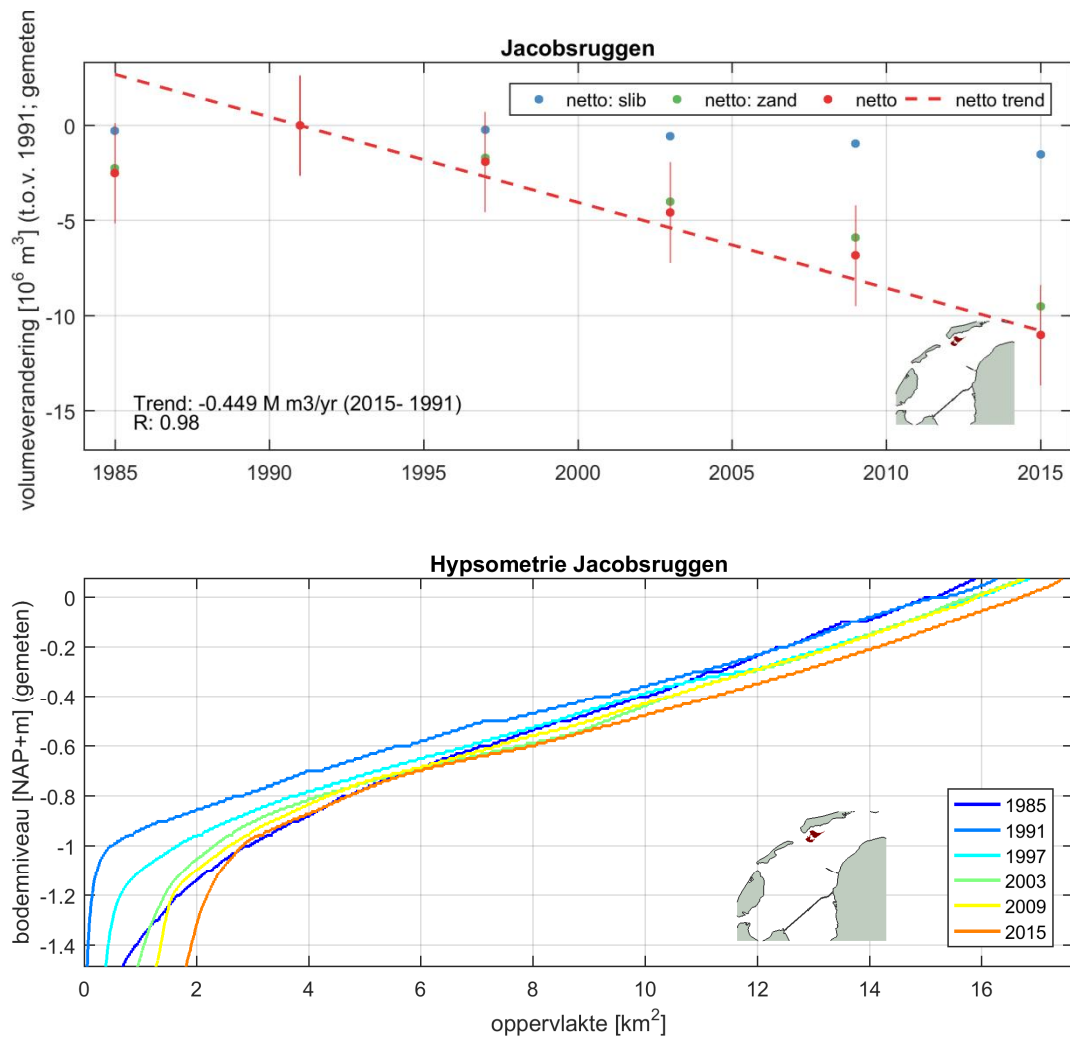
Figuur E.0.1 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor plaat Balgzand tussen 1991-2015



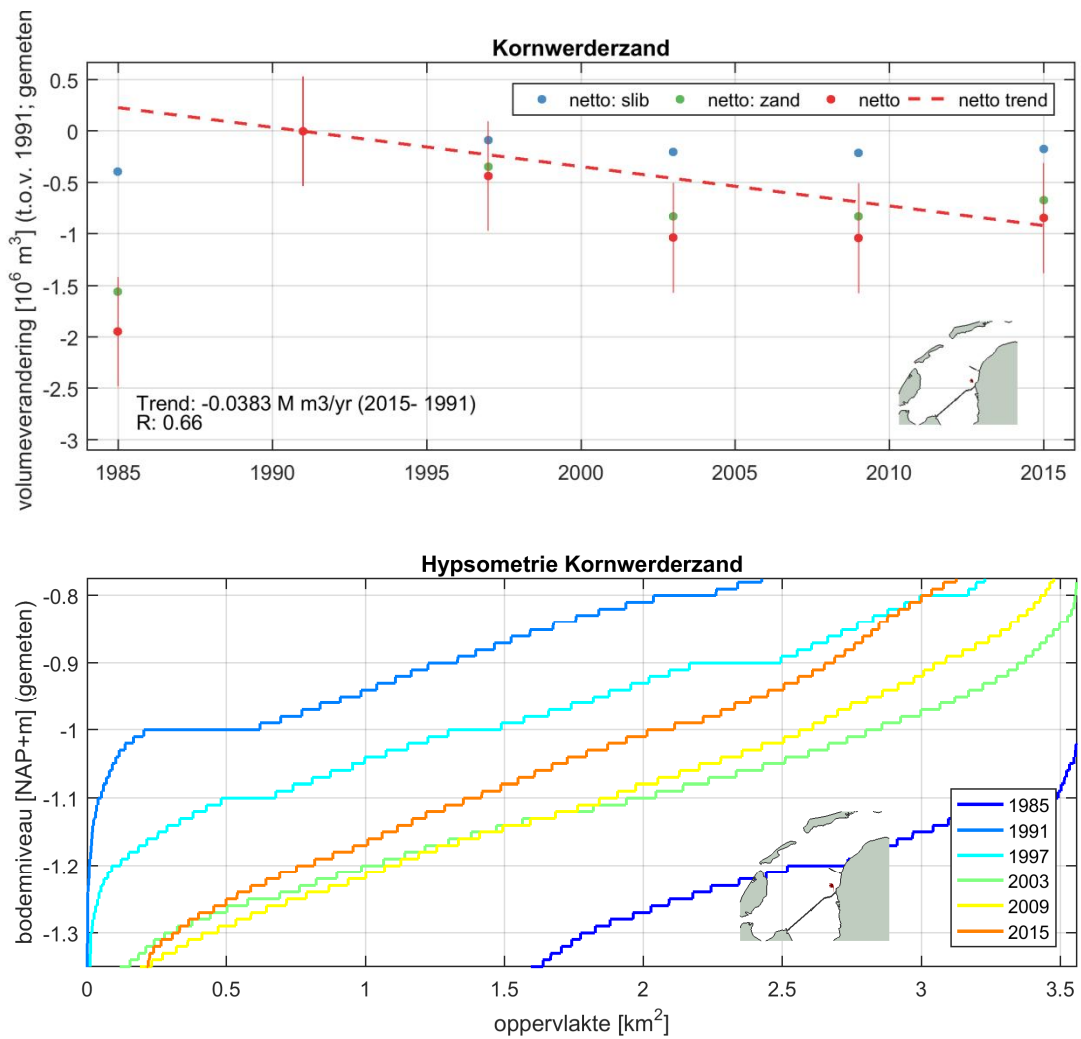
Figuur E.0.2 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor plaat Ballastplaat tussen 1991-2015



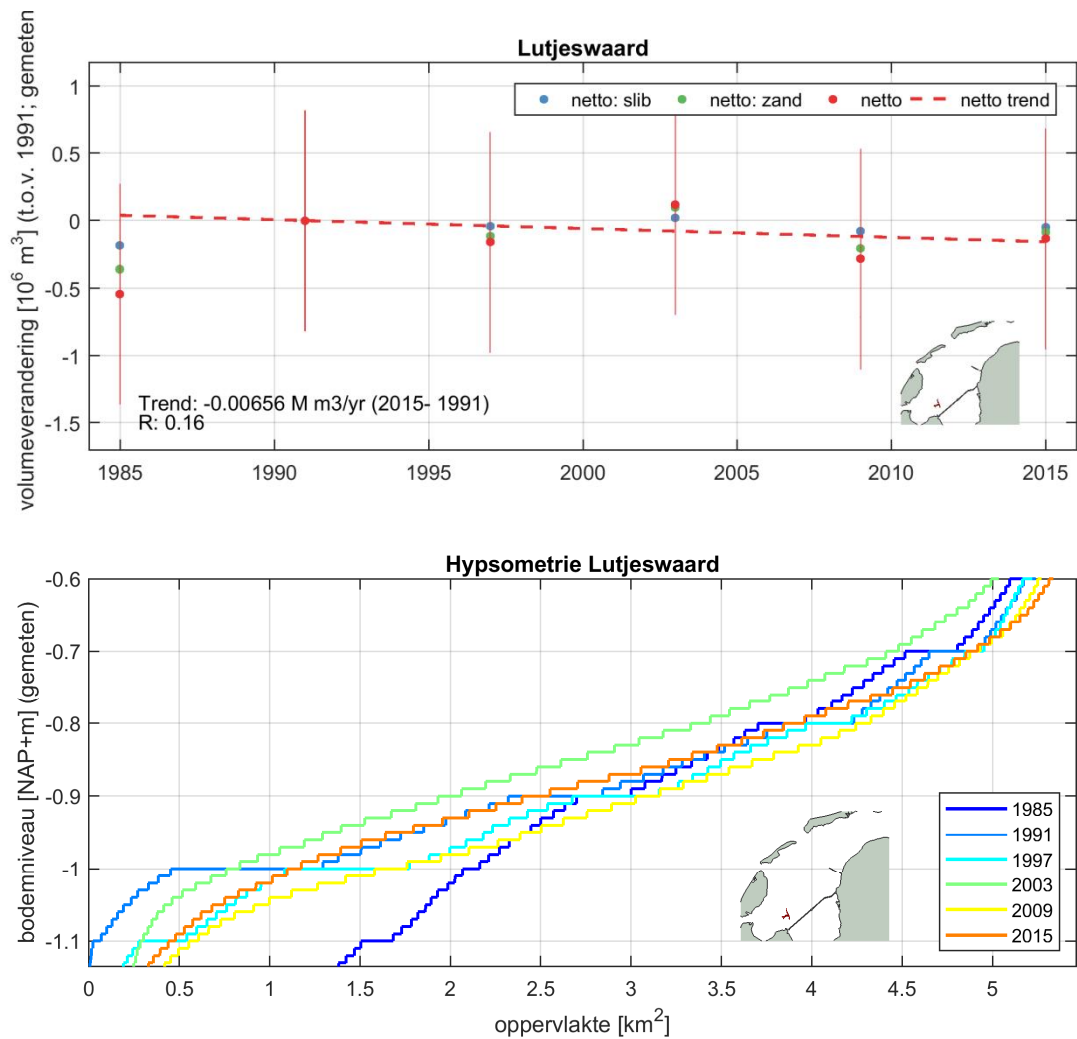
Figuur E.0.3 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor plaat Griend tussen 1991-2015



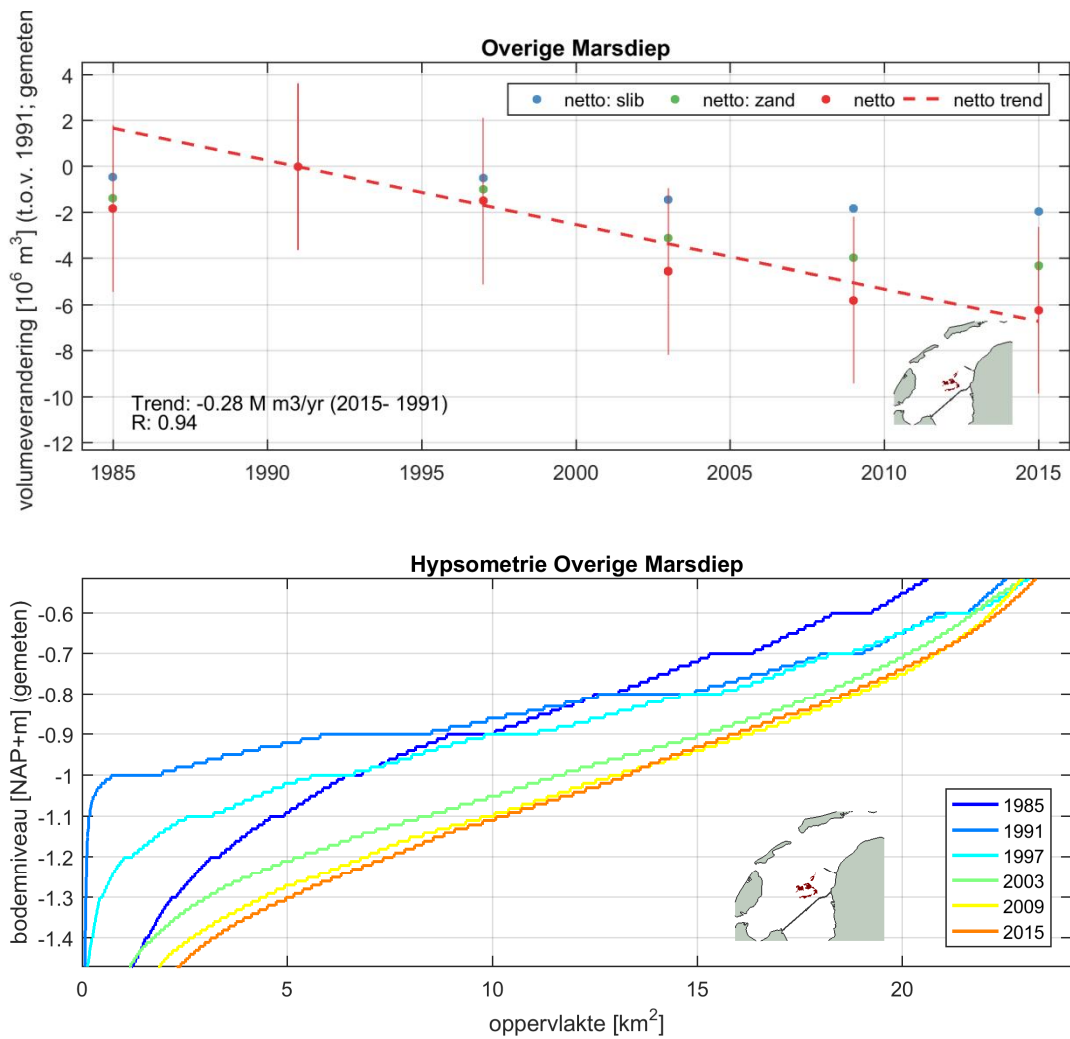
Figuur E.0.4 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor plaat Jacobsruggen tussen 1991-2015



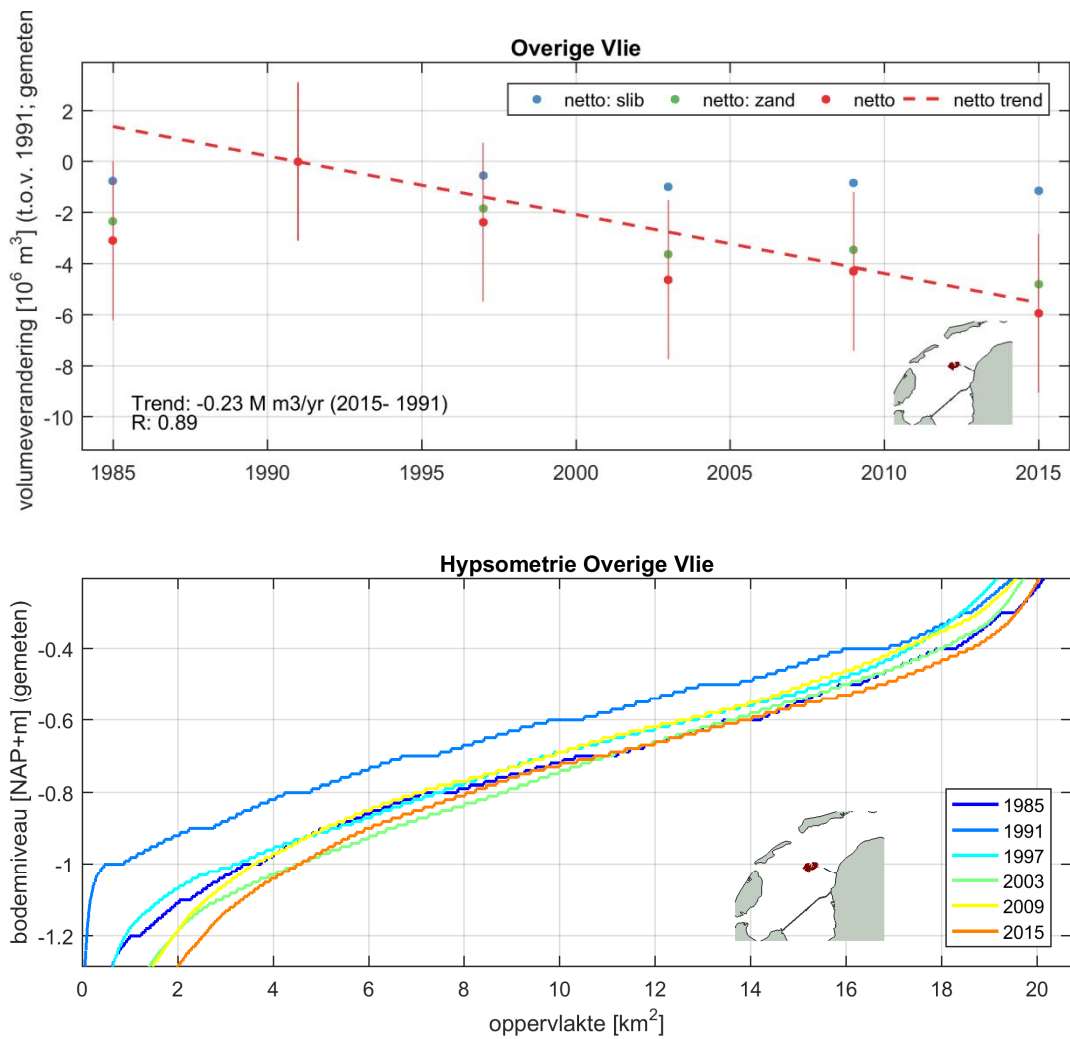
Figuur E.0.5 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor plaat Kornwerderzand tussen 1991-2015



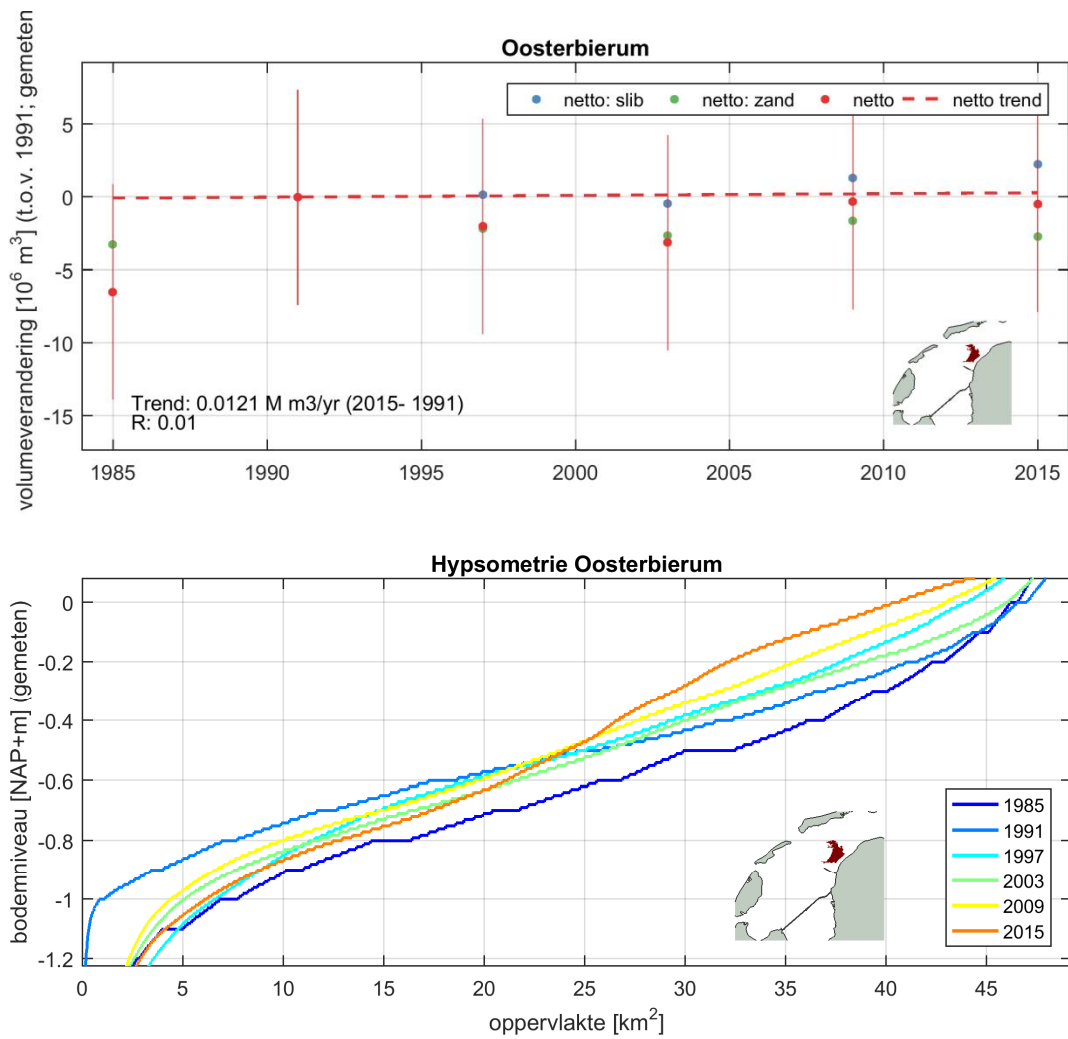
Figuur E.0.6 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor plaat Lutjeswaard tussen 1991-2015



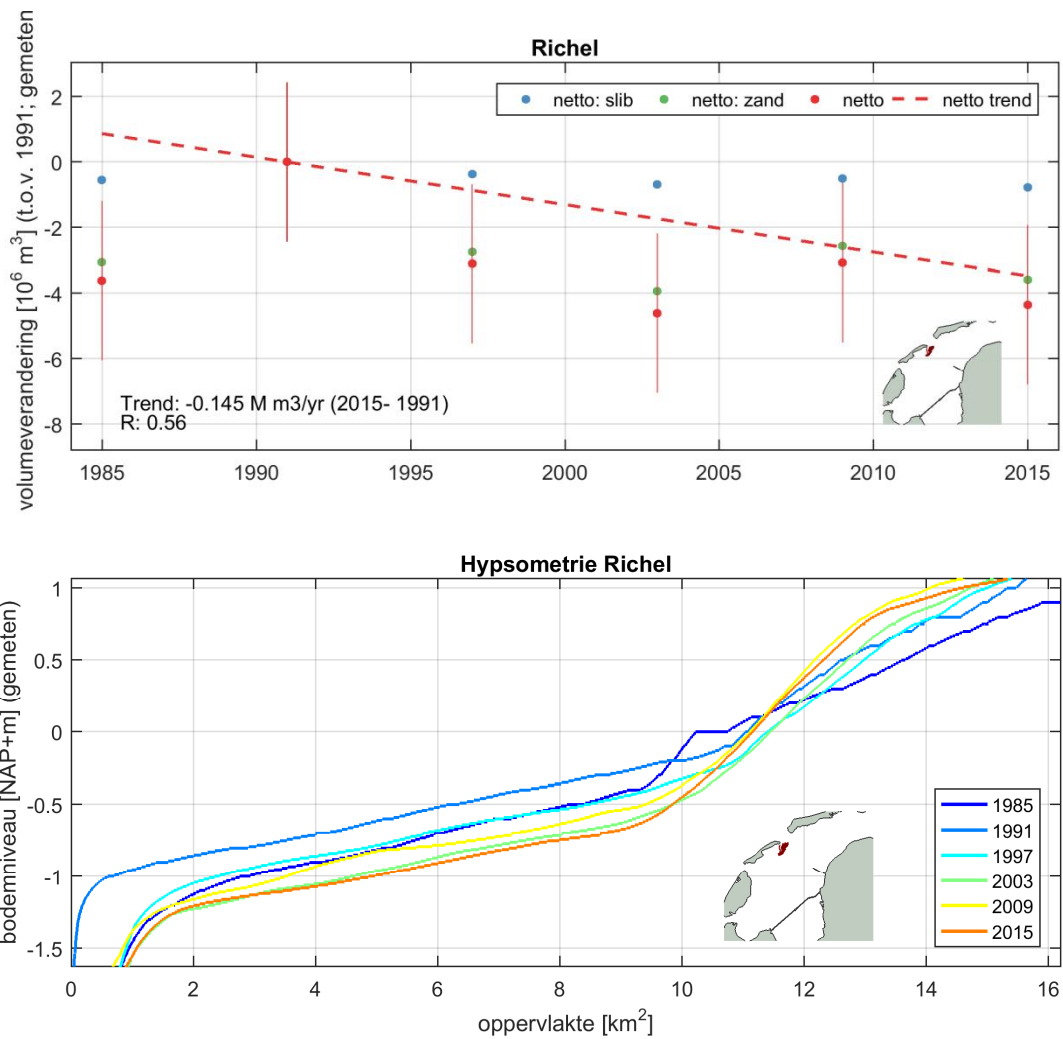
Figuur E.0.7 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor overige platen Marsdiep tussen 1991-2015



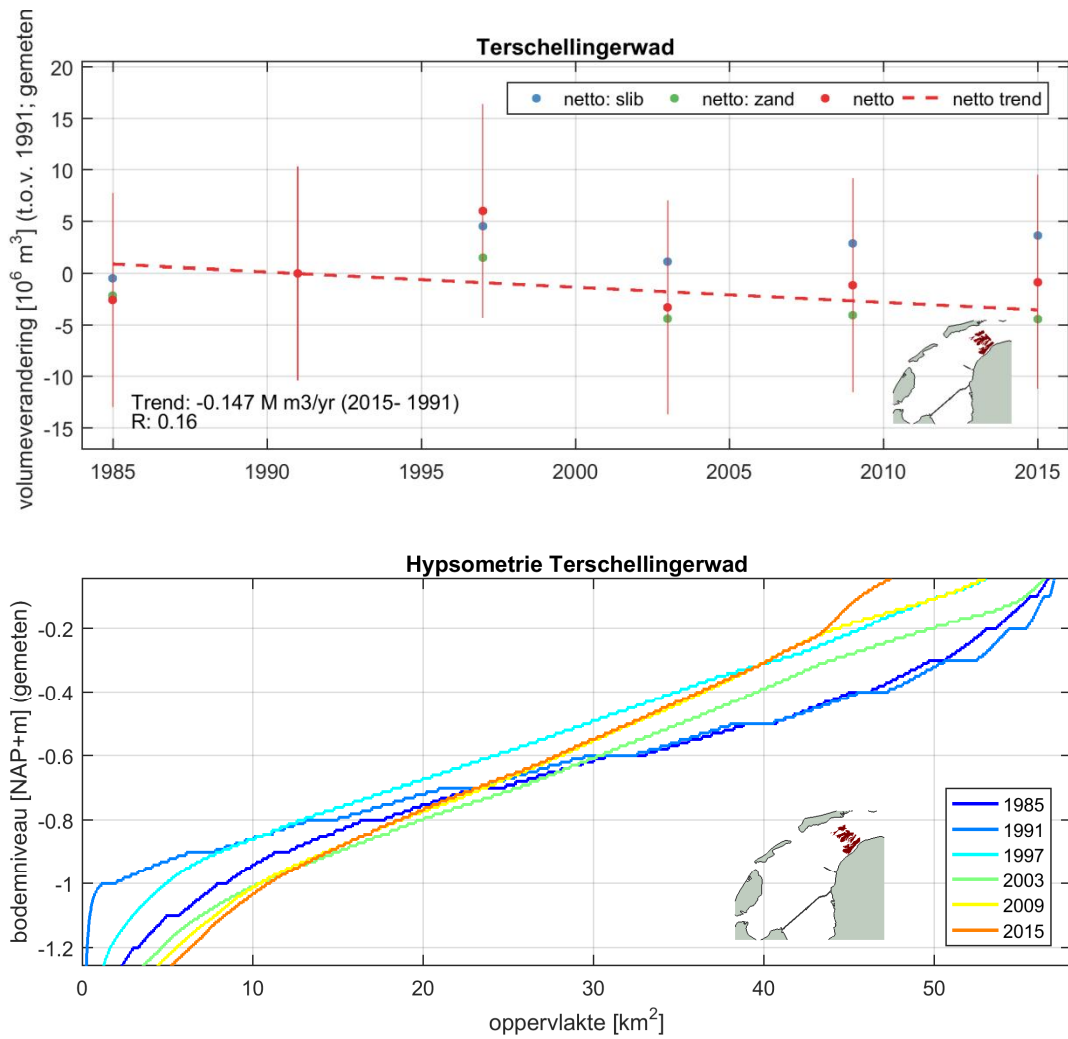
Figuur E.0.8 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor overige platen Vlie tussen 1991-2015



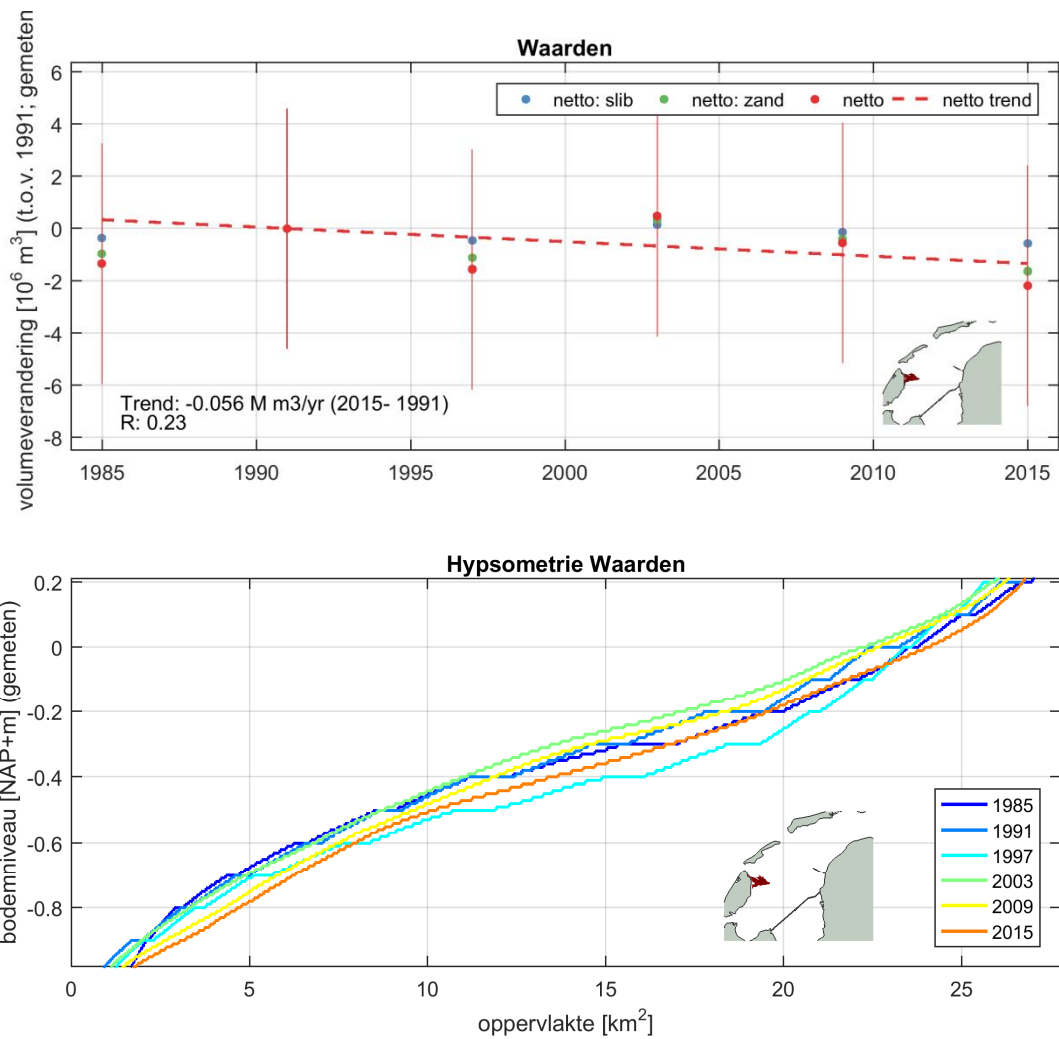
Figuur E.0.9 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor vlakte van Oosterbierum tussen 1991-2015



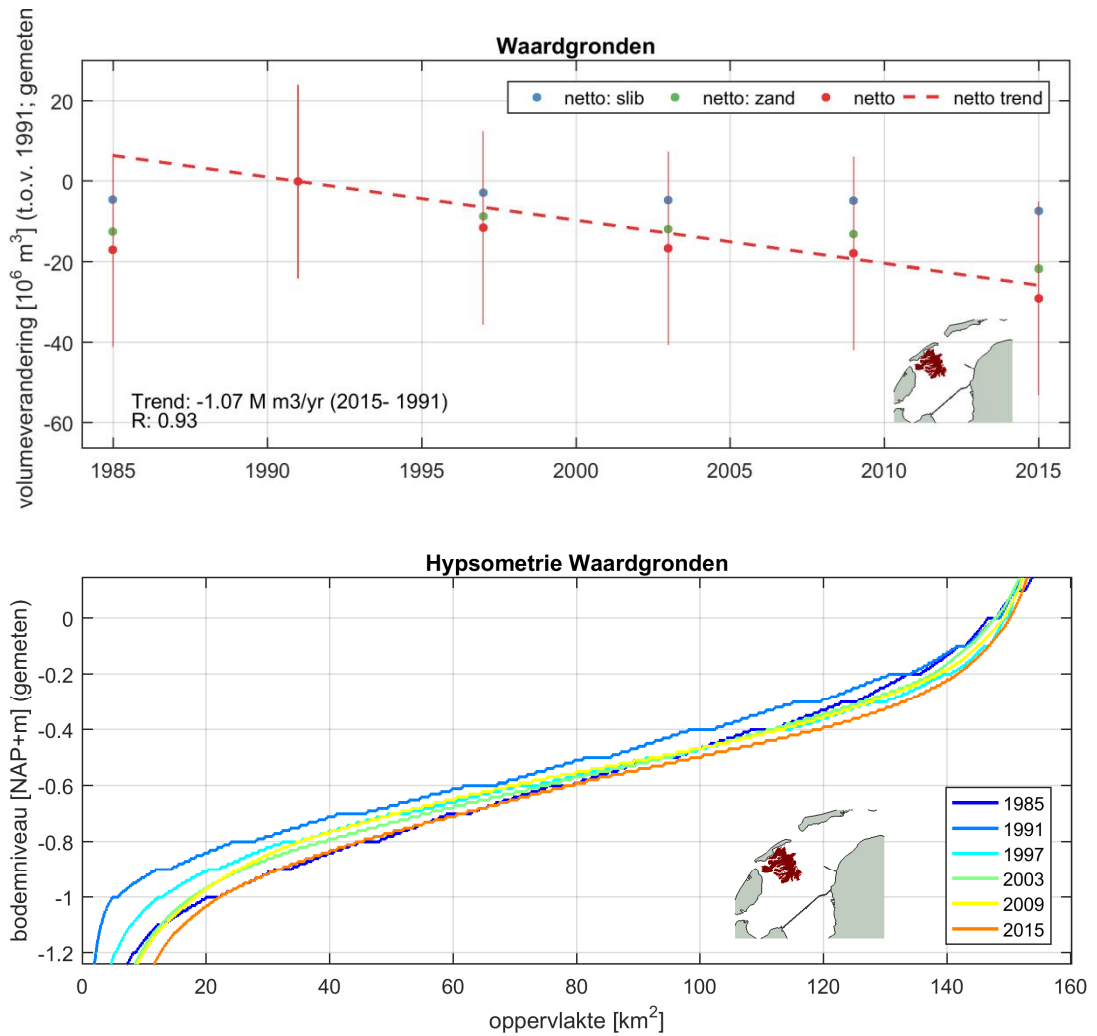
Figuur E.0.10 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor plaat Richel tussen 1991-2015



Figuur E.0.11 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor plaat Terschellingervad tussen 1991-2015



Figuur E.0.12 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor plaat Waarden tussen 1991-2015



Figuur E.0.13 Volumeverandering (boven) en hypsometrische curve (onder) voor plaat Waardgronden tussen 1991-2015

Bijlage F: Gevoeligheidsanalyse begrenzingsTrend gem. hoogte geulen (2015-1985) [mm/jaar]. Significante waarden zijn dikgedrukt ($R > 0.707$)

Naam	Diepte contour			Toelichting
	NAP -6 m	NAP -5 m	NAP -4 m	
Boomkensdiep	+60.1	+18.4	+18.7	<i>Tussen NAP-4m en NAP-6m niet voor alle jaren sedimentatie</i>
Doove Balg	+5.1	-1.6	+1.7	
Engelsmangat	+134.2	+76.3	+77.9	<i>Tussen NAP-4m en NAP-6m niet voor alle jaren sedimentatie</i>
Inschot	+109.4	+99.4	+96.3	
Malzwin	-9.8	-12,0	+9,9	<i>Sterke sedimentatie tussen NAP-4m en NAP-5m</i>
Robbengat	+7.6	+5.2	+0.8	<i>Erosie tussen NAP-4m en NAP-6m</i>
Texelschaar	+28.2	+3.99	+15.0	<i>Geulmigratie buiten polygoon 1985, dus sedimentatie waargenomen</i>
Texelstroom	+16.9	+8.8	+9.7	
Vliestroom	+26.2	+11.5	+17.0	<i>Sedimentatie tussen NAP-4m en NAP-5m</i>
Westmeep	+48.6	+26.1	+35.9	

Trend gem. hoogte platen (2015-1985) [mm/jaar]. Significante waarden zijn dikgedrukt ($R > 0.707$)

Naam	Diepte contour			Toelichting
	NAP -1.5 m	NAP -1.0 m	NAP -0.5 m	
Balgzand	+2.3	+4.0	+3.1	<i>Erosie tussen NAP -1.5 en NAP -1.0 m</i>
Ballastplaat	-5.6	+0.5	-11.5	
Griend	-3.6	-2.2	-3.7	<i>Trend niet significant door afwijkende waarde in 2003 bodem</i>
Jacobsruggen	-26.5	-17.7	-6.9	<i>Erosie grotendeels tussen NAP -1.5 en NAP -0.5 m</i>
Kornwerderzand	+3.4	+2.4	N/A	<i>Geen plaatdefinitie boven NAP -0.5 m</i>
Lutjeswaard	-1.5	+1.3	N/A	<i>Geen plaatdefinitie boven NAP -0.5 m; Erosie tussen NAP -1.5 en NAP -1.0 m</i>
Overige Marsdiep	-16.0	-8.4	N/A	<i>Geen plaatdefinitie boven NAP -0.5 m; Erosie tussen NAP -1.5 en NAP -1.0 m</i>
Overige Vlie	-4.3	-6.7	N/A	<i>Geen plaatdefinitie boven NAP -0.5 m; Sedimentatie tussen NAP -1.5 en NAP -1.0 m</i>
Vlakte van Oosterbierum	+2.1	+2.7	+1.6	
Richel	-5.4	-4.2	-3.6	
Terschellingerwad	-5.9	+0.7	+2.7	<i>Sedimentatie vooral aan kustlijnen Terschelling & Friesland; Erosie in het iets diepere deel ertussen</i>
Waarden	-2.2	-0.5	-2.0	