



# Eindrapport

Analyse van waterstanden in het Schelde-  
estuarium gedurende windluwe periodes

Opdracht Nr. MT/01357\_10

Antea Group

Understanding today.  
Improving tomorrow.



# Eindrapport Analyse Waterstanden

## Opdrachtgever

Vlaamse Overheid  
Departement Mobiliteit en Openbare Werken  
Maritieme Toegang  
Thonetlaan 102, bus 2  
2050 Antwerpen

## Contact

Jürgen Suffis  
Jurgen.suffis@mow.vlaanderen.be

## Inschrijver - maatschappelijke zetel

Antea Belgium nv  
Roderveldlaan 1  
2600 Antwerpen  
T: +32(0)3 221 55 00  
[www.anteagroup.be](http://www.anteagroup.be)  
Antea Group is gecertificeerd volgens ISO9001

## Contact

Antea Belgium nv  
Ivo Van de Moortel  
Buchtenstraat 9  
9051 Gent  
T: +32 (0)9 261 63 48  
M: +32 (0)497 25 11 81

## Identificatienummer

230217 3028

## Medewerkers

Ivo Van de Moortel  
Martinus Van den Berg  
Ferdinand Messens  
Silvy Thant  
Stef Michielsen  
Melanka Brackx  
Philippe Hyde  
Bob De Clercq  
Patrick Willems

## Datum

31 maart 2021

## Auteur

Zie medewerkers

## Status/ revisie

Versie 3.0

## Vrijgave

Philippe Hyde

---

# Inhoudsopgave

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Inleiding</b>                               | <b>5</b>  |
| 1.1      | Opdracht                                       | 5         |
| 1.2      | Leeswijzer                                     | 5         |
| 1.3      | Definities & Conventies                        | 5         |
| <b>2</b> | <b>Data</b>                                    | <b>6</b>  |
| 2.1      | Inleiding                                      | 6         |
| 2.2      | Waterpeil en Getij                             | 8         |
| 2.2.1    | Referentiepeilen & Peilschaalcorrecties        | 8         |
| 2.2.2    | Hoog- en Laagwaterpeil                         | 13        |
| 2.2.3    | Astronomisch getij                             | 15        |
| 2.2.4    | Gemiddelde zeespiegel (PSMSL)                  | 16        |
| 2.3      | Bodemdaling                                    | 16        |
| 2.3.1    | Noordzeekust                                   | 17        |
| 2.3.2    | Zeescheldebekken                               | 20        |
| 2.4      | Windklimaat                                    | 21        |
| 2.5      | Bovenafvoer                                    | 22        |
| 2.6      | Ingrepen                                       | 24        |
| <b>3</b> | <b>Zeespiegelstijging voor de Kust</b>         | <b>28</b> |
| 3.1      | Inleiding                                      | 28        |
| 3.2      | Literatuurstudie                               | 28        |
| 3.2.1    | Van Cauwenberghe (1999)                        | 28        |
| 3.2.2    | Zeespiegelmonitor (Baart <i>et al.</i> , 2018) | 30        |
| 3.2.3    | Willems <i>et al.</i> (2019)                   | 31        |
| 3.2.4    | CREST (2020)                                   | 32        |
| 3.3      | Dataverwerking                                 | 33        |
| 3.4      | Statistische Modellerings                      | 34        |
| 3.4.1    | Lage Resolutie                                 | 34        |
| 3.4.2    | Hoge Resolutie                                 | 48        |
| 3.5      | Besluit Zeespiegelstijging voor de Kust        | 57        |
| <b>4</b> | <b>Impact van Ingrepen in het Estuarium</b>    | <b>59</b> |
| 4.1      | Inleiding                                      | 59        |
| 4.2      | Literatuurstudie                               | 59        |
| 4.2.1    | Van Braeckel <i>et al.</i> (2012)              | 59        |
| 4.2.2    | Agenda Van de Toekomst – Schelde estuarium     | 67        |
| 4.3      | Dataverwerking                                 | 71        |
| 4.4      | Verkenning van de data                         | 73        |
| 4.5      | Methodologie Impactstudie                      | 77        |
| 4.5.1    | Modelopbouw                                    | 77        |
| 4.5.2    | Trendbreukanalyse                              | 104       |
| 4.5.3    | Combinatie met gekende ingrepen                | 112       |
| 4.5.4    | Andere uitgeteste technieken                   | 113       |
| 4.5.5    | Verbetermogelijkheden                          | 113       |
| 4.5.6    | Besluit Methodologie                           | 115       |
| 4.6      | Resultaten                                     | 117       |
| 4.6.1    | Algemene trend onverklaarde component          | 117       |

|           |                                    |            |
|-----------|------------------------------------|------------|
| 4.6.2     | Probabilistische impactstudie      | 118        |
| 4.7       | Besluit Impactstudie               | 141        |
| <b>5</b>  | <b>Referentielijst</b>             | <b>143</b> |
| <b>6</b>  | <b>Bijlagen</b>                    | <b>148</b> |
| Bijlage 1 | Inventarisatie Menselijke Ingrepen | 149        |
| Bijlage 2 | Lineaire Regressie Windeffecten    | 160        |
| Bijlage 3 | Figuren Impactstudie               | 161        |

# 1 Inleiding

## 1.1 Opdracht

Bij de beoordeling van trends in hoog- en laagwaterstanden en het onderzoek naar toe- of afname van de getijslag wordt klassiek gewerkt met jaargemiddelde waarden (vb. T2009 en T2015). Dit biedt de mogelijkheid om op een langere tijdschaal trends, betrouwbaarheids- en predictie-intervallen af te leiden.

Door toepassing van deze methode worden jaren met veel stormen en sterke windopzet op gelijke wijze beschouwd in trendanalyses aan jaren met meer windluwe periodes en weinig stormen. De invloed van windrichting en windkracht kan echter de besluitvorming aanzienlijk beïnvloeden. Zo concludeerde men in T2015 (Barneveld *et al.*, 2018b) dat de relatief lage hoogwaterstanden in de Westerschelde en afvlakkende trend tussen 2010 en 2015, voor een groot deel toegeschreven kan worden aan de relatief lage windopzet buiten het estuarium.

Deze opdracht omvat de herevaluatie van de dataset aan waterstanden voor de meetstations in de Westerschelde, Beneden- en Boven-Zeeschelde waarbij enkel gewerkt wordt met data van windluwe dagen of windluwe delen van dagen. Met deze methode wordt de component meteo als invloed op de waterstand uit de getij-analyse gehaald. Er wordt nagegaan of menselijke ingrepen in het Schelde-estuarium mogelijk te onderscheiden zijn op basis van de analyse van deze gereduceerde getijdata.

Aanvullend zijn meer diepgaande trendanalyses uitgevoerd op het waargenomen zeespiegelpeil voor de Belgische Kust. De te beantwoorden **onderzoeksvragen** zijn:

1. Zien we een versnelling in de zeespiegelstijging voor de (Belgische) Kust?
2. Kan men de impact van menselijke ingrepen in het estuarium beter onderzoeken door de factor 'wind' uit te filteren?

## 1.2 Leeswijzer

Het rapport start met een beschrijving van de behandelde gegevens (§2). Beide onderzoeksvragen worden in afzonderlijke hoofdstukken behandeld: de zeespiegelstijging in §3 en in de impact van ingrepen in §4 – steeds met een afzonderlijke literatuurstudie, methodologie en bespreking van de resultaten.

## 1.3 Definities & Conventies

Bij het opstellen van dit rapport zijn volgende conventies gehanteerd:

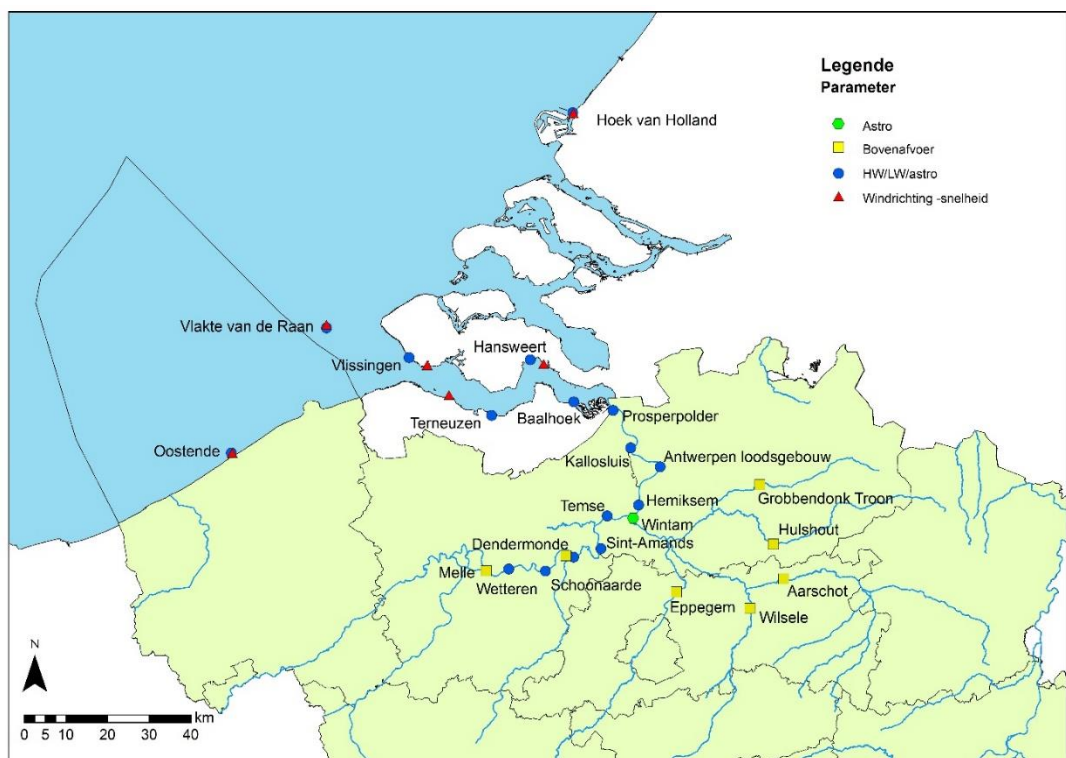
- Waterstand en windopzet worden uitgedrukt in meter (m). Het gebruikte referentievlak kan verschillen per locatie.
- Windsnelheid wordt uitgedrukt in meter per seconde (m/s).
- Windrichting wordt gedefinieerd als de richting waaruit de wind waait. De analyses werden uitgevoerd op windrichting in graden, indien weergegeven in streken wordt deze omgezet m.b.v. een windroos, waarbij de streken worden uitgezet in graden t.o.v. het Noorden (90° = O, 180° = Z, 270° = W, 360° = N). Windstille en veranderlijke metingen komen sporadisch voor en werden voor de analyse uit de data verwijderd.
- Coördinaten staan weergegeven in decimale graden, vb. Lat: 51° 15' 56.07"; Long: 4° 54' 20.12"

## 2 Data

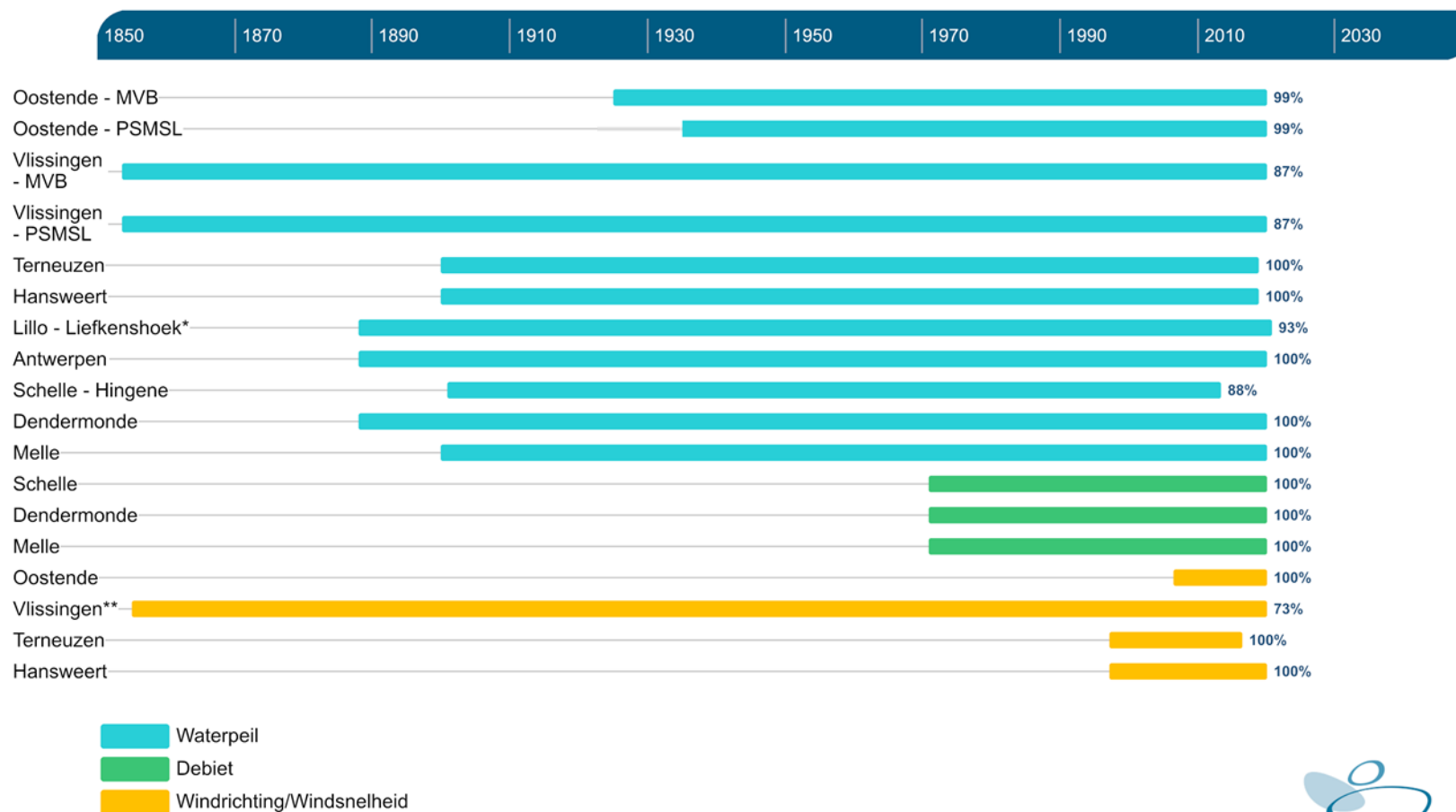
### 2.1 Inleiding

Voor deze opdracht werden er gegevens verzameld bij meerdere Belgische en Nederlandse instanties: Meetnet Vlaamse Banken van de Vlaamse Hydrografie (MVB, VH), het Hydrologisch Informatiecentrum van het Waterbouwkundig Laboratorium (HIC, WL), Rijkswaterstaat (RWS) en het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). Ook de benodigde metadata werd opgevraagd: welke metingen er beschikbaar zijn, op welke locaties, hoe (incl. veranderingen in het meetnet) en sinds wanneer er gemeten wordt. Het is uitermate belangrijk een goed beeld te hebben van deze metadata. De meetmethode, verwerkings- en validatiemethode kunnen immers een invloed hebben op de nauwkeurigheid, maar ze kunnen ook kunstmatige sprongen in de tijdreeks verklaren. Wanneer deze niet gekend zijn, zouden deze sprongen later verkeerdelijk aan menselijke ingrepen in het Schelde-estuarium gekoppeld kunnen worden.

Figuur 1 situeert de meetlocaties van de geïnventariseerde parameters. Figuur 2 geeft een tijdsoverzicht van de geanalyseerde meetgegevens. Deze worden thematisch behandeld in de volgende deelhoofdstukken.



*Figuur 1: Overzicht van de gebruikte meetstations en parameters met de debietsmeetposten (Bovenafvoer), Peilstations (HW/LW) en/of voorspelde waterstanden (Astro) en meteostations (Windrichting – snelheid)*



\*Geen brondata voor de jaren 1945-1947; \*\* Windrichting ook beschikbaar voor de periode 1768 - 1773  
 Percentages geven weer hoeveel jaren van de opgegeven periode beschikbaar zijn



Figuur 2: Overzicht geanalyseerde meetgegevens (MVB = Meetnet Vlaamse Banken §2.2.2.1, PSMSL = Permanent Service for Mean Sea Level §2.2.4)

## 2.2 Waterpeil en Getij

De getijmetingen in Vlaanderen worden verzorgd door het Hydrologisch Informatiecentrum (HIC) van het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) die heden het referentiepeil TAW (Tweede Algemene Waterpassing) toepassen. Rijkswaterstaat (RWS) staat in voor de getijmetingen op de Westerschelde. RWS hanteert heden het referentiepeil NAP (Normaal Amsterdams Peil), dit wordt in het kader van deze opdracht geconverteerd naar TAW. Voor het Belgisch deel van de Noordzee stelt de Vlaamse Hydrografie data beschikbaar van het Meetnet Vlaamse Banken (MVB).

De nodige getijmetingen werden opgevraagd bij bovenstaande instanties, voor de gehele beschikbare meetperiode. Volgende hoofdstukken geven meer duiding bij de gehanteerde meetmethodes en -nauwkeurigheid doorheen de loop der jaren.

### 2.2.1 Referentiepeilen & Peilschaalcorrecties

Doorheen de tijd zijn zowel de referentiepeilen gewijzigd, als peilschaalcorrecties doorgevoerd die artificiële sprongen in de meetreeksen kunnen veroorzaken. Het is belangrijk om hiermee rekening te houden alvorens trendbreuken te linken aan menselijke ingrepen.

Bij het corrigeren van meetgegevens en/of gevoeligheidsanalyses wordt er steeds van uitgegaan dat de recente meetgegevens het meest correct zijn. Correcties worden dan ook doorgevoerd op de oudere periode.

Volgende hoofdstukken behandelen de doorgevoerde wijzigingen naar geografische spreiding: Nederland, Belgische Kust en de Zeeschelde. Deze laatste 2 worden namelijk gekenmerkt door een verschillende evolutie en referentiepeilen (of hydrografische reductievlakken).

#### 2.2.1.1 Nederland

In Nederland hanteert men al sinds 1891 het Normaal Amsterdams Peil als opvolger van het Amsterdams peil. De wijziging van AP naar NAP zit al correct verwerkt in de aangeleverde tijdsreeksen en dienen we niet in acht te nemen bij verdere analyses. NAP kwam overeen met de gemiddelde zomervloedstand van het IJ voor Amsterdam toen het nog in vrije gemeenschap stond met de Zuiderzee. De landelijke verspreiding van het NAP-vlak wordt geïdentificeerd door een netwerk van ondergrondse merken: palen of buizen die in geologisch stabiele gebieden stevig in het pleistoceen gefundeerd zijn en waarvan de hoogten zijn bepaald met een zogenaamde primaire waterpassing. Hierbij wordt er onderscheid gemaakt tussen primaire en secundaire ondergrondse merken:

- Een primair ondergronds merk bestaat uit een groepje van vier zuilen van beton of graniet op een betonnen fundering met een onderlinge afstand van 10-20m. Ze zijn geplaatst in de periode 1926-1940 (2<sup>de</sup> Nauwkeurigheidswaterpassing).
- Een secundair ondergronds merk bestaat uit een enkele paal. De hoogten van de gewone peilmerken voor het dagelijks gebruik, en aangebracht in bestaande bouwwerken waarvan de fundering niet altijd even stabiel is, worden afgeleid van de hoogten van de ondergrondse merken.

Sinds 1891 is de benaming niet meer gewijzigd, doch betekent dit niet dat er geen correcties zijn doorgevoerd. In de literatuur (Deltares, 2010) vinden we één belangrijke correctie terug. Na de 4de NWP (1965-1978) werd het reeds vermoede bestaan van bewegingen aangetoond. Na analyse van de resultaten van de 5e NWP (1996-1999) is vast komen te staan dat er verschillen bestaan tussen de formeel bestaande hoogtes van ondergrondse merken en de werkelijke hoogtes uit de recente metingen ten opzichte van het NAP. De oorzaak hiervan wordt voornamelijk gezocht in de onderlinge beweging van de ondergrondse merken, al kunnen ook fouten in de nauwkeurigheidswaterpassingen mogelijk een (kleine) rol gespeeld hebben. Op 1 januari 2005 is de nieuwe NAP-publicatie ingevoerd en zijn de hoogtes van de NAP-bouten en -peilmerken aangepast.



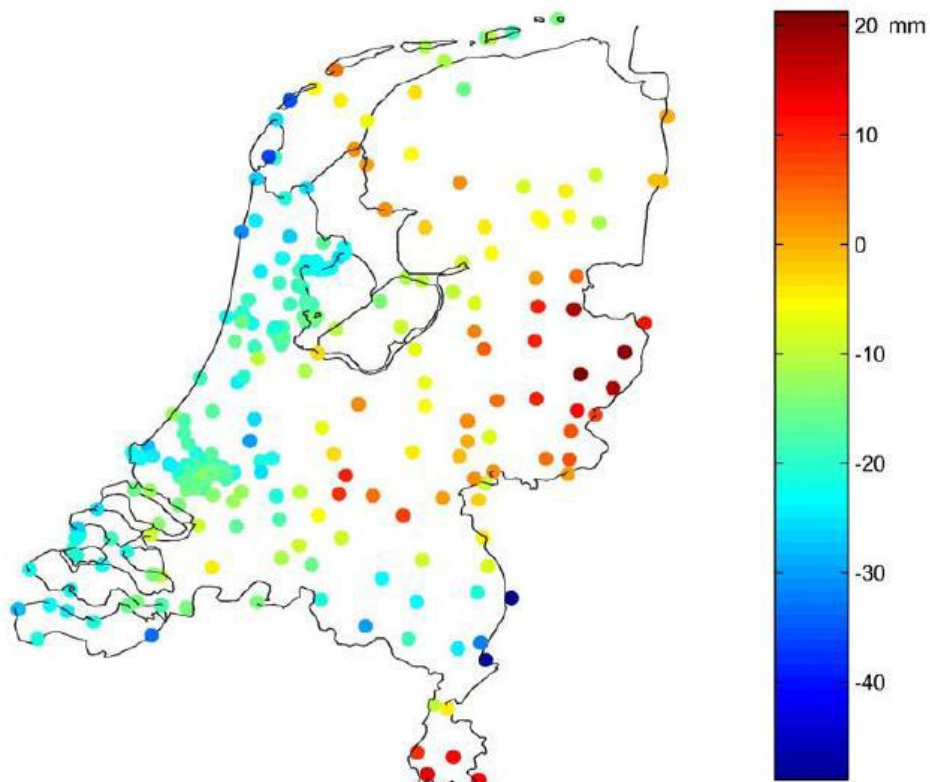
Men voerde dus een herinmeting van de nulpalen nabij de peilmeetstations door, gebruikmakend van de ondergrondse NAP merken die aangebracht zijn in 1926.

Door deze NAP aanpassing kregen de waterstanden vanaf 2005 een lagere waarde toegekend. M.a.w. om voorgaande waterpeilen om te zetten naar het nieuwe NAP moet je de voorgaande ook naar onder toe corrigeren. Figuur 3 toont het verschil tussen de hoogten van het primaire net voor en na de NAP-publicatie van 01-01-2005.

In de studie wordt er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om het effect op de trendanalyse – en bijgevolg onze conclusie m.b.t. zeespiegelstijging – te begroten. Hiervoor corrigeren we deze plotse – artificiële – sprong, door ze ook op de jaren vóór 2005 toe te passen. Tabel 1 presenteert de hiervoor doorgevoerde herwerkingen.

*Tabel 1: Herwerking herinmeting nulpalen met het oog op een gevoeligheidsanalyse (Bron: Deltares, 2010).*

| Meetlocatie      | Correctie voor alle data vóór 2005 [cm] |
|------------------|---|
| Hoek Van Holland | -2,77                                   |
| Cadzand          | -2,74                                   |
| Vlissingen       | -2,97                                   |
| Terneuzen        | -2,11                                   |
| Hansweert        | -1,39                                   |
| Bath             | -1,71                                   |



*Figuur 3: De verschillen tussen de hoogten van het primaire net voor en na de NAP-publicatie van 1-1-2005. De figuur geeft een redelijke indicatie voor de relatieve bewegingen die hebben plaats gevonden (Bron: Deltares, 2010, overgenomen uit Barends et al., 2008).*

Niet enkel de nulpalen kunnen verzakken, men kan zich bij dergelijke nivelleringsen ook afvragen of het NAP-vlak in zijn geheel niet in verticale zin beweegt ten opzichte van een referentie-ellipsoïde. Deltares (2010) stelt: *De verticale bewegingen van de ondergrondse merken, waarover in het voorgaande is gesproken, zijn altijd beschouwd in onderlinge samenhang en niet ten opzichte van een absoluut referentievlak, bijvoorbeeld ten opzichte van het gemiddelde van het cluster stabiele ondergrondse merken op de Veluwe of ten opzichte van het gemiddelde van de primaire ondergrondse merken. Dan dient nog de vraag gesteld te worden of het NAP-vlak als geheel in verticale zin beweegt ten opzichte van een referentie-ellipsoïde of ten opzichte van het centrum van de aarde. Met andere woorden: zijn de gemeten stijgsnelheden van de gemiddelde zeespiegel absoluut of zit er een gemiddelde bodemdalingscomponent van heel Nederland in. Inzicht daarin kan worden verkregen met behulp van permanente GPSmetingen en zwaartekrachtmetingen. De tijdreeksen van deze metingen zijn echter nog te kort om daarover een betrouwbare uitspraak te doen (Reudink & Klees, 2009).*

Ze namen dan ook aan dat: *het cluster ondergrondse merken op de Veluwe, waaraan het NAP is opgehangen, niet of verwaarloosbaar in verticale zin ten opzichte het centrum van de aarde beweegt. Dat betekent dat de zeespiegelstijging ten opzichte van het NAP bij grote benadering gelijk gesteld wordt aan de absolute zeespiegelstijging.*

Echter, op basis van eerdere studies constateerden Taverniers & Mostaert (2009) dat *Het hoogteverschil met onze Belgische vergelijkingsvlakken varieert in de loop der vele jaren, zowel door de (on-)nauwkeurigheden en methodieken van oude en jonge nivellementen, als door de verandering van vertrekpunt van de Belgische nivellementen, als door de resultaten van de opeenvolgende nauwkeurigheidswaterpassingen van NAP in Nederland.*

Deze evolutie staat gepresenteerd in Tabel 2. Dergelijk verschil zal een impact hebben wanneer men de Nederlandse en Belgische meetreeksen vergelijkt, wat het geval is bij de analyse van ingrepen in het estuarium (§4). Bij deze analyse worden de gepresenteerde conversiefactoren dan ook correct toegepast. De zeespiegelstijging voor de Kust omvat louter een tijdsreeksanalyse op een individuele meetpost zonder bijkomende informatie van een andere meetlocatie mee in rekening te brengen, waardoor het niet nodig is om dergelijke correctie toe te passen.

Tabel 2: omzetting van NAP naar KD/NKD/TAW (Bron: Taverniers & Mostaert, 2009).

|                   | o.b.v. Codde & De Keyser (1954) |                          |                       | o.b.v. Taverniers (2009) |                       |                       |
|-------------------|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                   | ... - 1930                      | 1931 - 1940              | 1941 - 1950           | 1951 - 1980              | 1981 - 2005           | 2005 - ...            |
| <b>KD/NKD/TAW</b> | KD/NKD =<br>NAP + 2.33 m        | KD/NKD =<br>NAP + 2.44 m | NKD =<br>NAP + 2.40 m | NKD =<br>NAP + 2.40 m    | TAW =<br>NAP + 2.33 m | TAW =<br>NAP + 2.35 m |
| <b>Enkel TAW</b>  | TAW =<br>NAP + 2.25 m           | TAW =<br>NAP + 2.36 m    | TAW =<br>NAP + 2.32 m |                          | TAW =<br>NAP + 2.33 m | TAW =<br>NAP + 2.35 m |

### 2.2.1.2 Belgische Kust

De meetgegevens voor de Belgische Kust (hier Oostende) zijn doorheen de geschiedenis gerefereerd ten op zichte van onderstaande referentieniveaus en/of hydrografische reductievlakken:

1. Het oud vergelijkingsvlak van Bruggen en Wegen te Oostende: **“Nul Z”**, het zogenaamde eerste groot landelijk nivellement van 1840 tot 1848, met vertrekpunt te Oostende. Het is gedefinieerd als de hoogte van een langjarig gemiddeld laagwater bij springtij gedurende een onbekende periode. Nul Z ligt 10,8 cm onder TAW.

2. **“H” of “GGLWS”** komt overeen met het Gemiddeld laag laagwater bij spring en was het hydrografisch reductievlak voor België. Te Oostende lag het toenmalige reductievlak (gedefinieerd tussen 1925-1943), 38,8 cm onder TAW.
3. **“LAT”** of “Lowest Astronomical Tide”, is de laagst mogelijke waterstand van het astronomisch getij op een gegeven locatie en bij gemiddelde meteorologische condities. Dit was/is het hydrografisch reductievlak voor Groot-Brittannië, Frankrijk, België en Nederland. Te Oostende lag LAT (gedurende 1996-2014), 50 cm onder TAW
4. **“TAW”** of de Tweede Algemene Waterpassing en het huidige Nationaal referentieniveau in België; Het vergelijkingsvlak van dit referentieniveau gaat uit van een vertrekpunt te Ukkel.

Tot slot diende men ook een aantal correcties door te voeren op de geregistreeerde meetgegevens. Tabel 3 beschrijft alle doorgevoerde correcties om de historische metingen te herwerken naar waterpeil t.o.v. TAW.

Tabel 3: Overzicht correcties om de ruwe metingen te Oostende naar TAW te herleiden (Bron: Vlaamse Hydrografie, 2011; Technum et al.,2002)

| Periode                  | Correctie naar TAW [cm] | Reden               |
|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1925 tem 28/02/1927      | -9,8                    | Z & +1 cm correctie |
| 1/03/1927 tem 02/01/1946 | -10,8                   | Z                   |
| 03/01/1946 tem 1951      | -38,8                   | H                   |
| 1952 tem 1971            | -43,8                   | H & -5 cm correctie |
| 1972 tem 1980            | -38,8                   | H                   |
| 1981 tem heden           | 0                       | TAW                 |

### 2.2.1.3 Zeeschelde

Gezien de meetposten op de Zeeschelde door andere instanties beheerd werden, kennen deze metingen een andere evolutie dan deze voor de Belgische Kust. De gehanteerde referentiepeilen zijn:

1. **“Nul D”, “Zéro du Depot de la Guerre” of “Krijgsdepot” en “KD”**, was het vergelijkingsvlak van het Militair Geografisch Instituut, ontstaan uit de uit de zogenoemde waterpassing *Nivellement Général* van of van 1840-1873 (Vlaamse Hydrografie, 2011) of van 1840 tot 1879 (Vereycken et al., 2015). We aanzien dit als dusdanig als een uitbreiding op “Nul Z (zie §2.2.1.2). Ook dit nivellement neemt Oostende als vertrekpunt en steunt op het gemiddeld laagwater springtij te Oostende berekend tussen 1834 en 1853. Taverniers & Mostaert (2009) melden: *“Te Antwerpen werd dit vlak uit waterpassing bepaald als zijnde gelegen op 2.978 m boven de drempel van de Kattendijkzeesluis, of in praktijk op +7.900 m onder het bronzen merkplaatje nr. 15/3p10 op de arduinen deksteen van het noordelijke buitenhoofd van deze sluis. Hierbij weze opgemerkt dat een fout zou geslopen zijn bij het aannemen van die hoogte (+7.900m), meerbepaald in het daarbij veronderstellen van het betrokken referentievlak (m.n. “nul D” in plaats van “nul Z”).”*
2. **“Nul Krijgsdepot” of “NKD”** is het vergelijkingsvlak dat is vastgelegd nabij de Kattendijksluis te Antwerpen en dat in gebruik was bij de Antwerpse Zeediensten. Hierover melden Taverniers & Mostaert (2009): *“Tussen 1942 en 1948 (1944 cfr. Vekemans, 1946) werden langs bijna alle waterwegen van België nieuwe nauwkeurige waterpassingen uitgevoerd, uitgaande van precies het [eerder vermeldde] bronzen merkplaatje te Antwerpen, met per definitie het (juist veronderstelde) peil +7,900 m (men schrijft dat inderdaad steeds tot op drie cijfers na de komma, om duidelijk aan te geven dat het tot op millimeters aldus werd aangenomen). Het*

nivellement werd N.K.D. genoemd (Nul Krijgsdepot) en aangenomen werd dat het in wezen met het vergelijkingsvlak “nul D” overeen komt. In de tabellen werd daarom steeds N.K.D. gebruikt voor zowel “nul D” als “N.K.D.” zelf. [...] De aannahme van basishoogte voor de NKD van 7,900m voor het bronzen getuigplaatje 15/3p10 aan de Kattendijksluis te Antwerpen, is discutabel, want die waarde zou in “Nul Z” gelden en dus niet in “Nul D”, met een verschil van 16,65 cm. Er is daarover heel wat discussie geweest, maar de waarde 7,900m bleef definitief aangehouden. Er werd daarbij aangehouden dat de waarde van 7,900m aansluit op de hoogte van 2,978m boven de drempel van deze sluis, hoogte dat in oude Tienjarige Overzichten wordt aangegeven als zijnde het nulvlak van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken.”

3. **“TAW”** of de Tweede Algemene Waterpassing en het huidige Nationaal referentieniveau in België; Het vergelijkingsvlak van dit referentieniveau gaat uit van een vertrekpunt te Ukkel. Taverniers & Mostaert (2009) vermelden: *“Het vergelijkingsvlak T.A.W. gaat uit van een vertrekpunt te Ukkel, waar een basisverkenmerk per definitie heeft welke nog van de beide al vernoemde waterpassingen uitgaat. Aangezien de waterpassingslijnen (driehoeken) en de doorgevoerde vereffeningen vertrekken vanuit Ukkel i.p.v. Oostende of Antwerpen, en eerder langs de wegen i.p.v. de waterwegen, liggen de hoogtevlakken N.K.D. en T.A.W. niet perfect aan elkaar evenwijdig. Er zijn onderlinge verschillen die van plaats tot plaats verschillen. Maar algemeen kan gesteld worden dat het vergelijkingsvlak T.A.W. 8 cm hoger ligt dan N.K.D. Dit is niet alleen het verschil zoals bij de waterpassing werd opgemeten aan het bronzen merkplaatje van N.K.D. te Antwerpen, maar is ook het gemiddelde van de verschillen op de andere locaties.”*

Het is duidelijk dat deze referentieniveaus niet vrij staan van discussie. De door het WL aangeleverde tijdsreeksen zijn echter al gecorrigeerd voor de wijzigende referentieniveaus. In deze analyse wordt er dan ook van uitgegaan dat hun correctie het dichtst de waarheid benadert. We nemen deze dan ook niet meer in acht bij verdere analyses.

Men voerde echter ook een aantal peilschaalcorrecties door die wel een artificiële sprong in de meetgegevens met zich mee brengen. In de studie wordt er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om het effect op de trendanalyse te begroten. Tabel 4 presenteert de hiervoor doorgevoerde herwerkingen.

*Tabel 4: Overzicht herwerking peilschaalcorrecties met het oog op een gevoeligheidsanalyse (Bron: Vereycken et al., 2015; Vandenbruwaene, 2019a).*

| Locatie              | Correctie bovenop omschaling KD-NKD [cm] | Peilschaalcorrectie 2011[cm] |
|----------------------|--|------------------------------|
|                      | (1940 <sup>1</sup> - ca. 1981)           | Alle metingen vóór 2011      |
| Lillo - Liefkenshoek | 0 (18/06/1981)                           | -3,4                         |
| Antwerpen            | 0 (19/06/1981)                           | -3,0                         |
| Hingene - Schelle    | +1 (20/05/1981)                          | -3,1                         |
| Dendermonde          | 0 (1/06/1981)                            | +0,8                         |
| Melle                | +1 (13/05/1981)                          | -1,1                         |

<sup>1</sup> Vereycken et al. (2015): De peilschaalverschillen die in de jaren '70 en '80 werden opgemeten gelden niet voor data pre-1940. Na de Wereldoorlog II werden alle peilschalen vervangen, voor zover er nog veel van de peillatten in Nul D overschoot. Bij verdere herbouwingswerken werden ook vaak nieuwe peilschalen voorzien. Beide soorten werden meteen in NKD geplaatst, dus hebben niet van doen met het vroegere “Nul D”. Het is dan ook logisch dat men enkel de referentievlakverschillen incorporeert en niet de peillatverschillen.

## 2.2.2 Hoog- en Laagwaterpeil

Voor de analyses in deze studie zijn de hoogwater – laagwater (HWLW) datareeksen gebruikt i.p.v. hoogfrequente continue meetreeksen. Hoogfrequente meetreeksen zijn voor de Zeeschelde pas beschikbaar vanaf 2005, ervoor zijn er louter hoog- en laagwaterreeksen beschikbaar. Om toch meerjarige trendanalyses toe te laten, is er geopteerd om de methode gerelateerd aan deze van Vandenbruwaene *et al.* (2019b) en Wang *et al.* (2019) toe te passen. Deze focust op het gebruik van hoog- en laagwaterstanden.

Hoog- en laagwaterstanden zijn opgevraagd voor verschillende meetlocaties binnen elk van de 3 zones, de Belgische kust, de Westerschelde en de Zeeschelde.

### 2.2.2.1 Belgisch - Nederlandse Kust

De meetlocaties Oostende en Hoek van Holland, gelegen in respectievelijk het Belgische en Nederlandse deel van de Noordzee (Figuur 1), zijn gekozen op basis van ligging en databeschikbaarheid. In de haven van Oostende voorziet een tijmeter data vanaf 1925. Voor Oostende heeft men recent nog oudere data teruggevonden, deze moeten echter eerst nog geïnventariseerd en geanalyseerd worden om hun bruikbaarheid te bepalen (Persoonlijke communicatie J. Vercruyse – 21/02/2020).

De getijmeetreeks (gevalideerde data) van **Oostende** is echter niet continu doorheen de tijd. Voor de periode 1925 – 2018 betreft het OSTVL1 (51° 14' 2"N, 2° 55' 26"E), vanaf 2018 zijn er metingen te OKGVL1 (51° 14' 3"N, 2° 55' 36"E). Voor gedetailleerde informatie omtrent kleinschalige variaties in de meetlocatie vóór 2018, vanwege infrastructuurwerken, wordt verwezen naar Van Cauwenberghe (1977, 1985, 1993). Ook de meetmethode varieert doorheen de tijd (Van Cauwenberghe, 2000; aangevuld met Pers. Comm. J. Vercruyse, 21/02/2020):

- 1820-1925: Betrouwbare getijobservaties begonnen in Oostende al in 1820 door het waterpeil af te lezen op een peillat. Deze oudste gegevens zijn echter verloren gegaan. Tijdens de periode 1835 tot 1852 registreerde men maandelijks gemiddelde HW/LW op basis van continue HW/LW aflezingen van een peillat die gerefereerd was t.o.v. een referentiepunt op de kaaimuur. Van de periode 1878-1914 zijn er opnieuw veel gegevens verloren gegaan, bovendien is het gehanteerde referentiepeil onzeker. Vanaf de start van de Eerste Wereldoorlog, zijn er geen meetgegevens beschikbaar. Merk op dat men al in 1878 startte met het registreren van het getij aan de hand van automatische getijmeter (Van Cauwenberghe, 2000).
- 1925 - 1980: Registratie van HW/LW standen via logboeken en maregraafbladen. Voor het overgrote deel van Wereldoorlog II zijn de meetgegevens enkel discontinu of niet beschikbaar.
- 1980 – 2017: Registratie van HW/LW standen via een vlotter, registratie gebeurd op papieren rollen die nadien gedigitaliseerd werden. Deze methode werd op een laatste meetlocatie toegepast tot in 2017.
- Vanaf 2008: Testen opgezet voor online registratie van vlotterdata en vervolgens radardata.
- De bepaling van HW en LW<sup>2</sup> werd, vóór september 2000, bepaald op de gedigitaliseerde waarden, hierna zijn er 1', 5' en 10' gemiddelde reeksen beschikbaar waarbij de bepaling van HW/LW op de 1' gemiddelde reeks wordt uitgevoerd.

Bij het digitaliseren van de op papier geregistreerde data komt de meetonzekerheid overeen met het verkeerd prikken door de digitalisator van één rasterpunt, wat gelijk staat aan een meeton nauwkeurigheid van 4 cm. Dit verschilt echter naargelang het type gebruikte

---

<sup>2</sup> Gezien tegenstrijdige informatie werd ontvangen, is er bevestiging opgevraagd bij de Vlaamse Hydrografie

registratiepapier. Bij het WL wordt millimeter papier gebruikt waarbij 1 mm verkeerd prikken gelijk staat aan een fout van 2 cm. Het digitaliseren van dergelijke data is echter een manueel proces, waarbij de eindnauwkeurigheid van de data mede bepaald wordt door de accuraatheid van de digitalisator. Voor de automatische registratie van data bedraagt de meetonzekerheid 1 cm.

Over de Nederlandse getijposten schrijft Baart *et al.* (2018): In **Nederland** zijn de peilmeetstations rond 1884 uitgerust met een zgn. peilschrijver, waarbij de waterstand geregistreerd werd op maregraafbladen. Voordien noteerde een waarnemer de dagelijkse hoog- en laagwaters die hij aflas van een peillat. Van alle getijstations zijn de registratiebladen vanaf 1-1-1971 gedigitaliseerd op uurwaarden. Deze waarden, 24 per etmaal, zijn opgeslagen in elektronische bestanden. In 1987 zijn de peilschrijvers vervangen door digitale niveaumeters, waarmee de inwinning van tienminuutsgemiddelden van de waterstanden volledig automatisch geschiedt.

Dit station ligt aan de kade in Vlissingen (51.44210°N, 3.59610°O), nabij de buitenhaven. Het fundament is een stalen damwand met een diepte van -17,6m NAP, en een breedte van 2,2m. Binnen deze damwand liggen de meetinstrumenten. De onderwater kamer is een afgesloten betonnen plaat die zich bevindt op -4.0m NAP tot -5.0m NAP. Het station heeft een GNSS.

De meetlocatie Hoek van Holland (51°59'N, 4°7'E) ligt bij de haven van Rotterdam aan de monding van de rivier en de Nederlandse kust. Hoog- en laagwater data zijn reeds beschikbaar vanaf augustus 1887. Door gaswinning is de meetpost echter 2 cm gezakt t.o.v. de beginsituatie. Voor deze impact werd al gecorrigeerd in de data, waardoor de opgevraagde data rechtstreeks bruikbaar zijn.

#### 2.2.2.2 Westerschelde

De meetstations in de Westerschelde zijn geselecteerd op basis van (a) databeschikbaarheid en (b) optimale spreiding. Het betreft de stations op de Vlake van de Raan, te Vlissingen, Terneuzen, Hansweert en Baalhoek. Het overgrote deel van de brondata zijn gevalideerd en kunnen als volledig betrouwbaar beschouwd worden. Het andere, beperkte deel van de data doorliep deze kwaliteitscheck nog niet, waardoor we een controle uitvoeren tijdens de verdere analyses. Voor bijna alle posten, is zowel de meetlocatie als -methode niet gewijzigd doorheen de tijd. Louter te Vlissingen werd in de beginperiode enkel een peilschaal gebruikt, maar later werd ook hier overgeschakeld op vlotter niveaumeters. De hoog- en laagwaters zelf worden bepaald uit 1 minuut waterhoogten gefilterd uit 10 minuut gemiddelde waarden. De oudste beschikbare meting gaat voor Vlissingen terug tot 1853 - 1854, toen men nog louter dagelijkse hoogwaterstanden registreerde. Sinds 1877 is er een consistente hoog- en laagwater reeks.

#### 2.2.2.3 Zeeschelde

De eerste metingen op de Zeeschelde startten te Antwerpen in 1888, waarna men het meetnet stelselmatig uitbreidde naar andere meetlocaties.

Voor de Zeeschelde zijn alle beschikbare metingen van de MONEOS (Monitoring Effecten Ontwikkelingsschets) -meetposten opgevraagd. Dit zijn: Prosperpolder, Kallosluis, Antwerpen 'Loodsgebouw', Temse, Sint-Amands, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren, Melle en Hemiksem (volledig gevalideerde datareeksen). Deze posten zijn ook opgenomen in de rapportering "Monitoring Effecten Ontwikkelingsschets (MONEOS)" van het Waterbouwkundig Laboratorium t.b.v. het continue systeem monitoringsprogramma. Bij het onderzoek naar het effect van ingrepen in het estuarium (§4), werd deze selectie afgestemd op de recent verschenen publicaties voor de Agenda voor de Toekomst, Vandenbruwaene *et al.* (2020a; 2020b). Zo werden de meetreeksen van Lillo en Liefkenshoek gekoppeld, net als deze van Hingene en Schelle om langere meetreeksen te bekomen.

Volgende meetmethodes werden gehanteerd doorheen de tijd:

- 1888-2004: het getij wordt analoog opgemeten met behulp van mechanische tijmeters (mechanische/pneumatische vlotterlimnigrafen), waarbij het getij continu op millimeterpapier geregistreerd wordt. Deze registratie vormt de basis om dagelijkse hoog- en laagwaters handmatig te digitaliseren: eerst door deze op de registratiebladen aan te duiden, later via een digitaliseertafel en –pen.
- 2005 – heden: Vanaf 2005 worden de meetposten voorzien van een radar (OTT-RLS), waarbij men digitaal registreert en de data rechtstreeks naar de databank doorstuurt via telemetrie. De hoog- en laagwaters worden bepaald a.d.h.v. een intern gedefinieerd algoritme – dat het lokale minimum en maximum binnen een tijdsvenster van 6u bepaald – waardoor er geen handmatige tussenkomst meer noodzakelijk is. Merk op dat de periode 2005-2008 als een overgangperiode kan beschouwd worden waarbij nog deels gewerkt werd met prikdata.

Onderstaande meeton nauwkeurigheden treden op bij de verschillende methoden (Vandenbruwaene *et al.*, 2019a):

- Registratie op papier en digitalisatie met pen: een afwijking bij het “prikken” van 1 mm wordt vertaald in een fout van 2 cm of 2 minuten in de realiteit. Men kan veronderstellen dat de werkelijke foutenmarge hoger is, door de onzekerheid op de nivellering van de meetstations.
- Digitale registratie: meeton nauwkeurigheden zijn <1 cm.

De bovenvermelde meeton nauwkeurigheden gelden niet enkel voor de meetposten van het Waterbouwkundig Laboratorium. Deze onnauwkeurigheden kunnen worden doorgetrokken voor andere dataleveranciers die gebruikmaken van dezelfde meetmethode, zolang men rekening houdt met het type registratiepapier bij de mechanische tijmeters.

Een belangrijke opmerking is het voorkomen van een tijdsverschuiving van 1u bij de geregistreerde hoog- en laagwaters (tot 1965) bij verschillende posten van het HIC meetnet, inclusief de hier geanalyseerde MONEOS posten (Michielsen, 2019). Bij het digitaliseren van oude metingen uit maandtabellen (registratie op papier) werd aangenomen het tijdstip de lokale tijd (excl. winter- en zomertijd: MET) aangaf, maar men hanteerde UTC. Deze fout werd als dusdanig ingeladen in de hydrografische databank.

Voor meer informatie m.b.t. de meetmethoden van de MONEOS tij-posten wordt verwezen naar het rapport van Vandenbruwaene *et al.* (2019a).

### 2.2.3 **Astronomisch getij**

Het astronomisch getij wordt beschouwd als het “effectieve basisgetij”, waarbij louter de astronomische effecten – het samenspel van aarde, zon en maan – in acht worden genomen. Het astronomisch getij wordt berekend aan de hand van een harmonische analyse (Fourier decompositie), waarbij men enkel de gewenste harmonische componenten overhoudt (Dillingh *et al.*, 1993). Het aantal componenten dat wordt gebruikt voor de berekening van het astronomisch getij is locatie specifiek.

#### 2.2.3.1 **Belgisch - Nederlandse Kust**

De berekeningswijze voor het astronomisch getij te Oostende is nauwelijks veranderd sinds 1980. Voor de harmonische analyse worden er 50 componenten gebruikt. Enkel in 2010 is hiervan afgeweken, door het weglaten van 1 component (3Mo5). Eens het astronomisch getij is berekend,

wordt er geen herziening meer gedaan (Persoonlijke communicatie J. Vercruyssen – 21/02/2020). Meer informatie over de harmonische analyse kan men terugvinden in Dillingh *et al.* (2013).

Het astronomische getij te Hoek van Holland werd in de periode 1887 – 2010 berekend via de culminatie methode. Vanaf 2011 werd overgeschakeld naar het gebruik van de harmonische analyse.

#### 2.2.3.2 Westerschelde

Doorheen de tijd werd het astronomisch getij voor de verschillende meetlocaties van RWS op de Westerschelde op 2 manieren berekend:

- Vóór 1986: HW/LW standen werden berekend op basis van de culminatie analyse = “De methode zet de tijd en de stand van hoog- en laagwater af tegen astronomische waarden en dan met name het tijdstip waarop de maan op het hoogste punt staat” (Burgers & Hisgen, g.d.). Deze methode kan, i.t.t. de harmonische analyse, geen volledige astronomische getijkromme bepalen.
- Vanaf 1986: HW/LW standen worden berekend op basis van een harmonische analyse met 94 componenten. Deze methode laat toe een volledige getijkromme te bepalen en bijgevolg nauwkeurigere voorspellingen per post uit te voeren.

Meer detail over de harmonische - en culminatie analyse is terug te vinden in van Urk & de Ronde (g.d.) en Dillingh *et al.* (1993).

#### 2.2.3.3 Zeeschelde

Op de Zeeschelde wordt het astronomisch getij voor slechts 3 posten (Prosperpolder, Antwerpen Loodsgebouw en Wintam) berekend. Het astronomisch getij wordt eerst bepaald door middel van een harmonische analyse en daarna ingevoerd als afwaartse randvoorwaarde in een 1D hydraulisch model. Met behulp van dit hydraulisch model kan men vervolgens het astronomisch getij bepalen voor elke tussenliggende meetlocatie. Meer informatie over de berekeningswijze van het astronomisch getij op de Zeeschelde kan men terugvinden in Vanlede *et al.* (2014).

#### 2.2.4 Gemiddelde zeespiegel (PSMSL)

De Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL), gevestigd in het National Oceanography Centre in Liverpool (UK), verzamelt sinds 1993 data van getijmeters wereldwijd (aangeleverd door bedrijven, onderzoeksinstituten, particulieren, ...) en analyseert/publiceert deze informatie. De PSMSL stelt deze globale data m.b.t. de gemiddelde zeespiegelstand vrij ter beschikking.

Voor deze opdracht werd data via de website<sup>3</sup> van het PSMSL gedownload voor de meetlocaties Oostende, Vlissingen en Hoek van Holland. Gedetailleerdere informatie over deze meetlocaties kan worden teruggevonden in §2.2.2.

### 2.3 Bodemdaling

Zeespiegelstijging kan betrekking hebben op de eustatische (globale) zeespiegelstijging of de relatieve zeespiegelstijging. De absolute (eustatische) zeespiegelstijging refereert naar de hoogte ten opzichte van de geoïde. De relatieve zeespiegelstijging is de waargenomen zeespiegelstijging ten opzichte van, één welbepaald punt op het land – de bodemhoogte. Voor het bepalen van de relatieve zeespiegelstijging houdt men meestal rekening met 3 regionale factoren: de absolute (eustatische) zeespiegelstijging vanwege o.a. klimaatsveranderingen, isostasie (glacio- of hydro-isostasie) en/of tektonische subsidentie of uplift van de aardkorst (Di Marcantonio *et al.*, 2018).

---

<sup>3</sup> Data download PSMSL : <https://www.psmsl.org/data/obtaining>



Een bodemdaling kan naast de hierboven aangehaalde regionale factoren, ook veroorzaakt worden door lokale effecten zoals autocompactie of zelfs antropogene factoren zoals olie- of gaswinning, zoutwinning, grondwaterwinning of peilbeheer en zetting (Baart *et al.*, 2019).

### 2.3.1 Noordzeekust

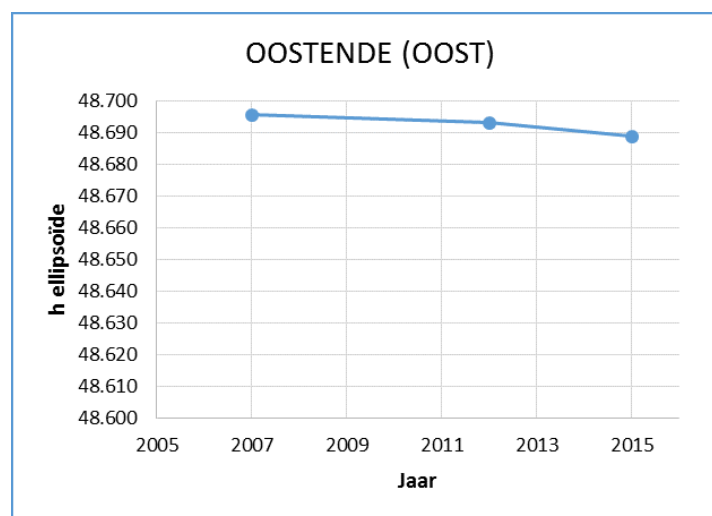
Voor **Vlissingen** werden onderstaande conclusies beschreven in Baart *et al.* (2019):

- De bodemdaling vanwege autocompactie en tektoniek bedraagt minder dan 1 mm/jaar langs de Nederlandse kust (Hijma & Kooi, 2017).
- De bodemdaling vanwege isostasie bedraagt 0,2 – 0,5 mm/jaar in Zuid Nederland (Hijma & Kooi, 2017).
- Te Vlissingen bedraagt de totale – vanwege tektoniek en isostasie – bodemdaling 0,24 mm/jaar (Baart *et al.*, 2019).

In **Oostende** worden sporadisch (geen vastgelegde frequentie) een aantal vaste meetpunten (zowel nabij de oude maregraaf, als recent ook nabij de nieuwe maregraaf op het Maritiemplein) ingemeten door het Nationaal Geografisch Instituut (NGI) met behulp van statische GNSS (Global Navigation Satellite System) metingen. De landmeter van afdeling Kust voert ook tussentijdse metingen (meerdere malen per jaar) uit om plotse verzakkingen op te sporen.

Uit verslagen van de opmetingen (NGI, 2015) en persoonlijke communicatie met de heer J. Vercruyssen (Vlaamse Hydrografie), blijkt dat er zich nabij Oostende een bodemdaling van maximaal < 1 mm/jaar zou optreden. Het verschil in bodemhoogte tussen de meting in 2007 en deze in 2015 bedraagt -7 mm (Figuur 4). Dit kan echter ook het gevolg zijn van een andere meetmethode, gezien men in 2015 een ander type antenne hanteerde (NGI, 2015). In de loop van 2020 staan bijkomende metingen ingepland die meer uitsluitsel kunnen geven over het al-dan-niet voorkomen van een trend<sup>4</sup>. Algemeen wordt echter besloten dat er geen bodemdaling wordt vastgesteld te Oostende (Persoonlijke communicatie J. Vercruyssen – 21/02/2020). Dit wordt bevestigd door de literatuur:

- Vink *et al.* (2007): Besluiten dat zowel de lokale tektonische- als isostatische component beperkt zijn en de Belgische kustvlakte hier nauwelijks invloed van ondervindt.
- Van Camp *et al.* (2011): Besluiten dat de tektonische bewegingen aan de Belgische kustvlakte verwaarloosbaar zijn.



<sup>4</sup> Mogelijk liepen deze vertraging op gezien de COVID-19 situatie.

Figuur 4 : Overzicht niveaumetingen te Oostende voor het bepalen van een eventuele bodemdaling (NGI, 2015)

De SONEL campagnes laten ons toe om deze inschattingen verder te verfijnen. Deze data zijn door de Universiteit van La Rochelle ingewonnen door vaste stations – welke aan de bodem gekoppeld zijn nabij getijstations verspreid over de wereld – in te meten via GPS en te aggregeren tot op dagelijks. Vervolgens worden deze data dan door middel van *reanalysis* omgevormd tot een betrouwbare meetreeks van verticale landbewegingen. Voor een volledige beschrijving rond de betrouwbaarheid van deze data verwijzen wij de lezer naar Santamaría-Gómez *et al.* (2017) en de Sonel website ([www.sonel.org](http://www.sonel.org)). Afhankelijk van locatie zijn er meerdere producten beschikbaar, elk met hun eigen tijdsduur.

De resultaten staan samengevat in Tabel 5, Figuur 5 en Figuur 6. Deze bevestigen bovenstaande bevindingen voor Vlissingen en Oostende: de bodemdaling is daadwerkelijk lager dan 1 mm/jaar. Doch, voor onze doeleinden kan dit toch een aanzienlijke afwijking tussen waargenomen relatieve en eustatische zeespiegelstijging veroorzaken en bijgevolg foute berekening van de zeespiegelstijging over 100 jaar. Ook opvallend is de seizoenale cyclus met minima ca. in de winter en maxima in de zomer. Het zoeken naar een verklaring valt buiten de scope van deze opdracht, maar het lijkt ons toch interessant om dit te onderzoeken – zeker in het kader van (her)kalibratie van getijdemeters. Een quick-search leert ons in alle geval dat meerdere locaties in de Noordelijke Hemisfeer eenzelfde seizoenaliteit vertonen – niet altijd even sterk – terwijl deze in Sydney net maxima in de winter en minima in de zomer vertonen. Tot slot geeft men te Vlissingen ook een plotse daling aan in oktober 2014 ten gevolge van *een wijzigende sensor of storing*. Gezien ook de X en Y coördinaten een sprong vertonen, vermoeden we dat dit punt verplaatst is.

Deze tijdsreeksen zijn te kort, terwijl de onzekerheid op waargenomen trends relatief te groot is om daadwerkelijk toe te passen voor onze analyse van de lange termijn zeespiegelstijging (S3). Doch, ze wijzen uit dat men de waargenomen relatieve zeespiegelstijging zeker niet gelijk mag stellen aan de relatieve zeespiegelstijging.

Tabel 5: Samenvatting SONEL metingen omtrent bodembeweging te Oostende en Vlissingen. Dit betreft metingen van de ULR (University of La Rochelle), GFZ (German Research Centre for Geosciences) en NGL (Nevada Geodetic Laboratory) (Bron: <https://www.sonel.org/>; geraadpleegd op 11/12/2020).

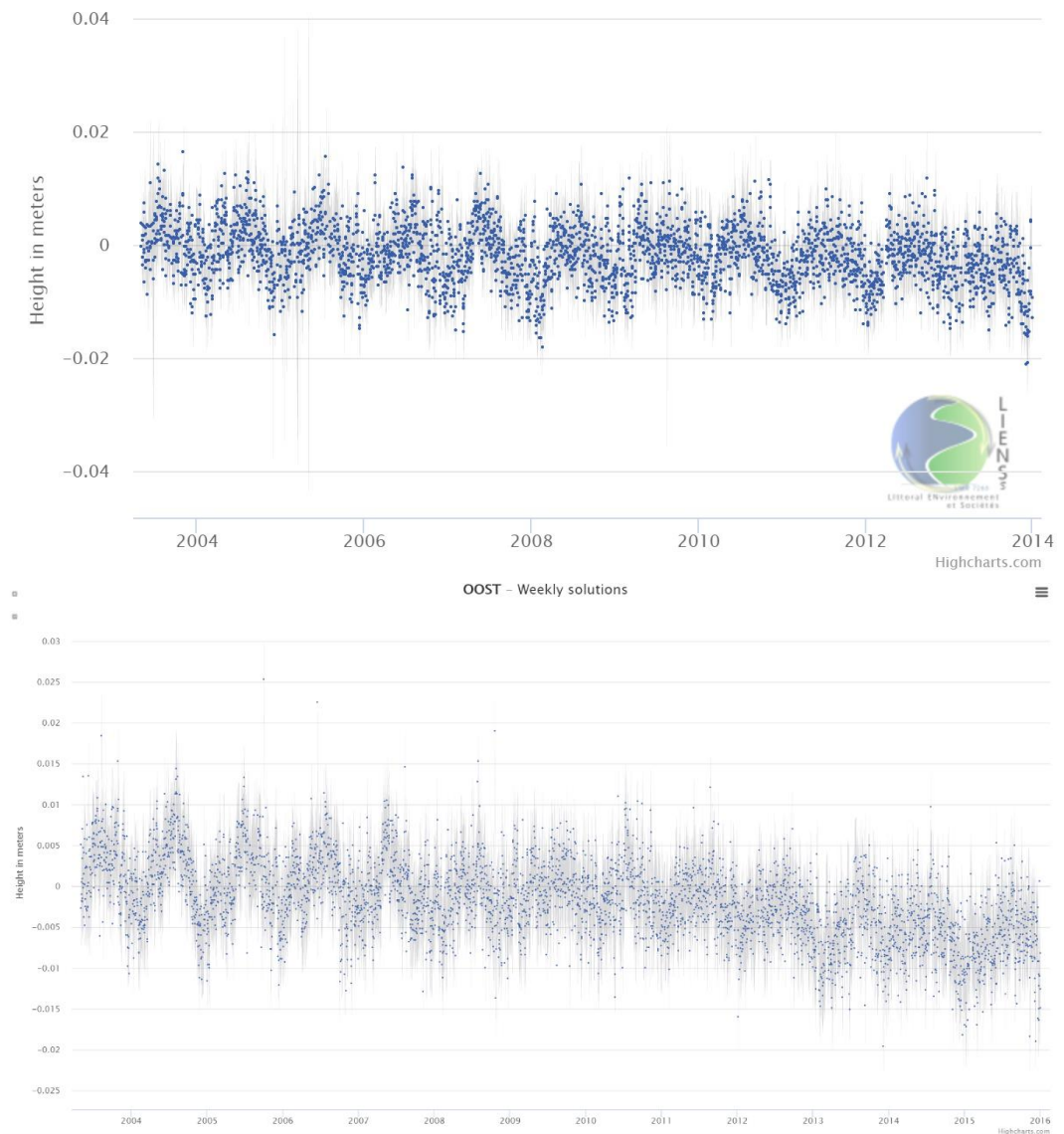
| Locatie    | Bodemdaling [mm/jaar]                |                                      |                                      |
|------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
|            | ULR(6b) <sup>5</sup>                 | GFZ(GT2) <sup>6</sup>                | NGL(14) <sup>7</sup>                 |
| Oostende   | -0.44 +/- 0.29<br>(2003-05 tot 2014) | -0.70 +/- 0.30<br>(2003-05 tot 2016) | -                                    |
| Vlissingen | +0.19 +/- 0.52<br>(2006-11 tot 2014) | -                                    | -0.26 +/- 0.57<br>(2006-11 tot 2020) |

<sup>5</sup> Santamaría-Gómez *et al.* (2017)

<sup>6</sup> Deng *et al.* (2015)

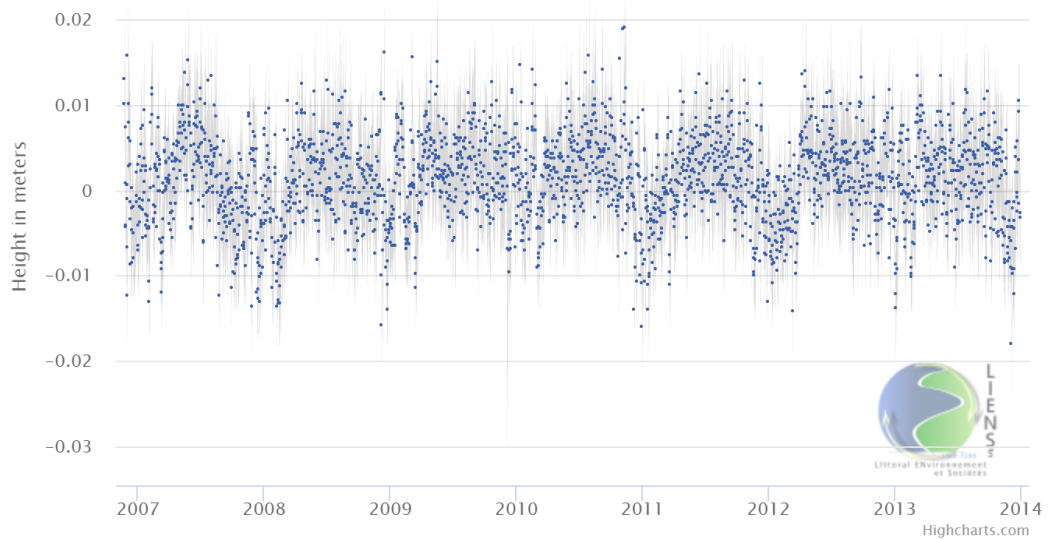
<sup>7</sup> Blewitt *et al.* (2018)

## OOST – Daily solutions

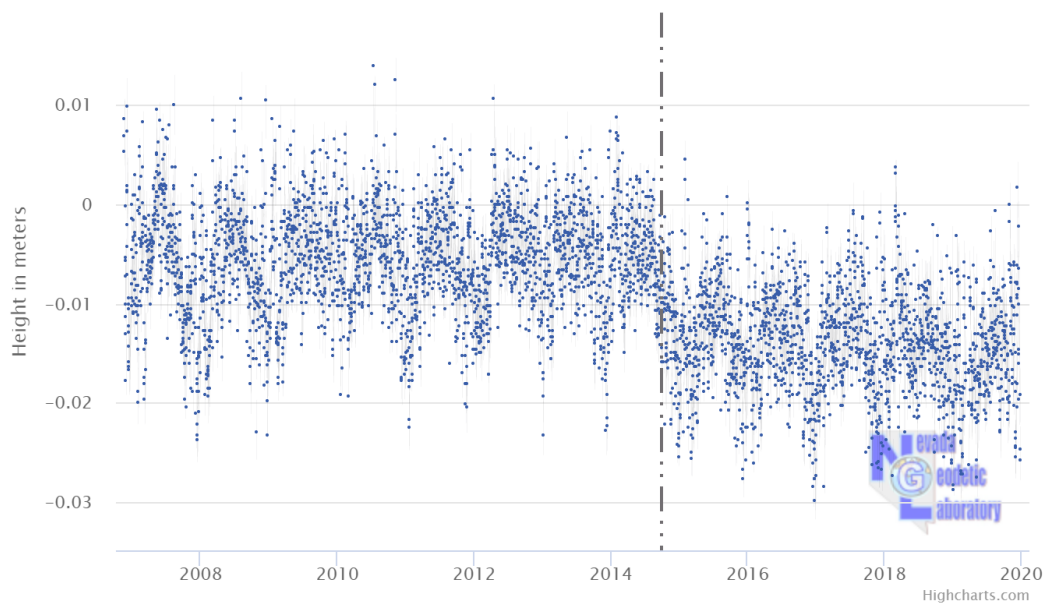


Figuur 5: Hoge resolutie bodembeweging nabij de getijpost van Oostende van ULR6b (BOVEN) en GFZGT2 (ONDER). (Bron: [GPS \(sonel.org\)](http://GPS(sonel.org)), geraadpleegd op 11/12/2020)

## VLIS – Daily solutions



## VLIS – Daily solutions



*Figuur 6: Hoge resolutie bodembeweging nabij de getijpost van Vlissingen van ULR6b (BOVEN) en NGL14 (ONDER) met aanduiding van een trendbreuk in oktober 2014 t.g.v. een gewijzigde sensor of storing. (Bron: [GPS\(sonel.org\)](http://GPS(sonel.org)), geraadpleegd op 11/12/2020)*

### 2.3.2 Zeescheldebekken

De analyse op de meetposten in de Zeeschelde focust op een impactstudie van menselijke ingrepen en niet op de eustatische zeespiegelstijging. Een lange-termijn trend in de bodemdaling zal geen interferentie hebben met onze trendbreuk-analyse, enkel plotse verzakkingen kunnen onze analyse inhiberen. Bovendien zijn er ook quasi geen meetgegevens beschikbaar. Daarom wordt bodemdaling hier enkel behandeld voor de Kust nabije meetlocaties met het oog op de analyse in §3.

Merk op dat dit niet betekent dat hier er geen verzakkingen optraden/optreden. Zo merkte Vekemans (1946) al op dat de Algemene Waterpassing van de Waterwegen tussen 1940-1944 door het Topografisch Bureau wijst op een algemene bodemdaling. Dit gezien men een aanzienlijke afwijking vond, terwijl de peilschalen al eerder gecorrigeerd werden in 1888 “*volgens de uitkomsten van de Waterpassing Meynaert (1878) die in volledige overeenstemming kwam met het Nivellement Général (1857-1878)*”. Vekemans (1946) merkte op:

1. *Ten tijde van talrijke plaatselijke nivelleringswerken van de peilschalen, moesten deze aan een kunstwerk bevestigde schalen merendeels verhoogd worden om ze in overeenstemming te brengen met de hoofdmerktekens van de streek, hetgeen bevestigt dat de in de bedding van een rivier gebouwde kunstwerken, in of met dit bed steeds zakken. Het op peil brengen van de schalen volgens lokale nivelleeringen, heeft deze peilschalen dan ook steeds verplaatst overeenkomstig de gebeurlijke gewestelijke bodembewegingen. Daardoor tonen de schalen van eenzelfde streek nagenoeg dezelfde afwijking bij de nieuwe Nauwkeurigheidswaterpassing.*
2. *Volgens deze laatste afwijking gebeurt alles alsof de peilschalen met de omgelegen streek hoe langer hoe meer gezakt zijn, naarmate het Zeescheldebekken stroomafwaarts doorlopen wordt van Gentbrugge, Wachtebeke en Lier af tot in Antwerpen en Lilloo. Dit zou een eerste aanwijzing zijn van een bodemdaling van de Beneden-scheldestreek. Wij zien hier af van het Nederlandsch gedeelte dat wij niet uitvoerig konden onderzoeken. Evenwel heeft zich in Nederland sinds 1933 zoals in ons land, om reden van de vermoedelijke bodembewegingen, de noodzakelijkheid veropenbaard van de uitvoering van een Algemene Nauwkeurigheidswaterpassing. Overigens schrijft Ir. D. Blaupot ten Cate<sup>8</sup> dat volgens de peilschaalwaarnemingen aan de Nederlandsche kust een seculaire bodemdaling groot 32 cm. vastgesteld wordt en in Zeeland een groter verschil in beweging waargenomen wordt. Hetgeen zou overeenstemmen met onze hierboven bedoelde bevindingen nopens een in stroomafwaartsche richting toenemende bodemdaling.*
3. *Bij gebrek aan juiste inlichtingen is het vrij moeilijk te bepalen hoe de peilschalen veranderd zijn tussen de jaren 1888 (aanvankelijk adjusteren) en 1940-1944 (Nieuwe Nauwkeurigheidswaterpassing). Bij benadering kan – behalve voor Hingene, Duffel, Lier en Emblem – aangenomen worden dat de schalen geleidelijk met den bodem veranderd zijn. De schaalcorrectie wordt dan toegepast naar de evenredigheid van den tijd verlopen sinds Januari 1888, met een hoofste correctie vermeld in bovenstaande tabel en die betrekking heeft op de laatste jaren.*

We gaan er bij deze studie van uit dat deze verzakkingen deels gecorrigeerd zijn in de historische 10-jarige getijboeken en/of bij het overschakelen van referentiepeilen. Verder onderzoek in bodemdaling in het Zeescheldebekken lijkt ons nuttig voor andere doeleinden, maar valt buiten de scope van deze opdracht. De historische nivelleringswerken van de peillatten kunnen hiervoor het beginpunt vormen.

## 2.4 Windklimaat

In Vlaanderen wordt de windsnelheid en -richting nauwelijks gemeten in de directe nabijheid van de Zeeschelde. Dit heeft echter geen impact op de studie, gezien de windopzet voornamelijk wordt bepaald door het windklimaat boven de Noordzee en – beperkt – boven de Westerschelde. De wind wordt er op verschillende locaties gemeten door het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). Zo meet men in Vlissingen al sinds 1768 de windsnelheid en –richting. Omwille

---

<sup>8</sup> Daling van den Bodem (Tijdschrift *De Ingenieur* van 28 Juli 1933).

van de lengte van deze meetreeks en gezien het de meest zeewaarts gelegen meetlocatie is, werd Vlissingen gekozen voor verdere analyses. De beschikbare temporele resolutie is:

- 01/01/1768 - 31/12/1773: driemaal daags, maar louter windrichting geen -snelheid
- 01/12/1854 - 31/12/1905: viermaal tot zesmaal daags
- 01/04/1908 – 31/12/1950: louter daggemiddelden ('Etmaalgemiddelde') beschikbaar
- 01/01/1951 - 02/02/2020: uurlijkse waarden beschikbaar

Wijzigingen in de meetlocatie en/of de meetapparatuur van een meetpost kunnen een invloed hebben op de gemeten windsnelheden en -richtingen. Ook een wijziging in de "oppervlakteruwheid" van de meetlocatie, zoals wijzigingen in landgebruik of toenemende verstedelijking, hebben een effect op de windsnelheid (Vautard *et al.*, 2010). Het is dan ook belangrijk om voldoende metadata te verzamelen van de te analyseren meetreeksen:

- Historisch gezien schatte men eerst de windrichting en snelheid in streken. Sinds 1863 voerde men daadwerkelijk windmetingen uit met behulp van een zelfregistrerende windmeter: het zgn. "Molentje van Robinson". Deze constructie werd geoptimaliseerd en/of verplaatst in 1885, 1887, 1908, 1910, 1929, 1945, 1947 en 1958. Vanaf november 1959 schakelde men over op een Cup anemometer met een frequentiemeter en elektrische windvaan. Ook deze opstelling werd aangepast/verplaatst in 1967, 1968, 1972 en 1982. Sinds mei 1993 registreert men digitaal via een automatisch weerstation (AWS), die nog éénmaal verplaatst werd in 1997.
- Aangezien de meethoogte regelmatig wijzigde (vb.: kortstondige meetcampagnes op een andere locatie) moest er een herleiding naar 10 m boven de grondoppervlakte gebeuren via correctiefactoren en herleidingsformules, conform de internationale afspraken. Vanaf mei 2011 is de herleiding naar 10 m boven het maaiveld echter stopgezet. Hierdoor kunnen recente meetreeksen inhomogeen zijn, alhoewel we geen informatie ontvingen dat de meetmethode of -locatie nadien nog aanzienlijk gewijzigd werd.

## 2.5 Bovenafvoer

Het Hydrologisch Informatiecentrum (HIC) van het WL beschikt over meerjarige tijdreeksen met gemeten (of berekende) debieten aan de randen van het estuarium. Deze bovenafvoeren (gevalideerd) worden jaarlijks gerapporteerd in de MONEOS-jaarrapporten (Vandenbruwaene *et al.*, 2018). Tabel 6 presenteert de meest afwaarts gelegen meetlocaties voor iedere bovenstroom, die ook vervat zijn in de MONEOS-rapportage van het WL. Merk op dat men de bovenafvoeren berekent via zogenaamde Q/H en Q/Q – relaties waarbij de (rivier)doorsnede gemiddelde debieten respectievelijk berekend worden in functie van een terreindebiet (gemeten met debietmeters) en een gemeten waterstand (Cornet *et al.*, 2016). De toegepaste Q/Q- en Q/H- verbanden worden continu geoptimaliseerd m.b.v. bijkomende kalibratiecampagnes (Persoonlijke communicatie W. Vandenbruwaene – 11/03/2020).

Om de bovenafvoer aan de monding van een zijrivier te bepalen, rekent het WL deze meetreeksen door via een opschaling die verband houdt met de toename in oppervlakte van het hydrografisch bekken. De benodigde conversiefactoren staan gepresenteerd in onderstaande Tabel 7. De theoretische aanvoer van zoetwater te Schelle wordt berekend door de aanvoer vanuit iedere waterloop op te tellen en al-dan-niet een tijdsvertraging toe te passen (Vanlierde *et al.*, 2014). Merk op dat de methode wijzigde in 2018 (Michielsen *et al.*, 2019).

Tabel 6 : Weergave van de berekeningswijze van de bovenafvoeren in de Schelde (Vandenbruwaene et al., 2018)<sup>9</sup>.

| Meetlocatie         | Waterloop              | Gemeten parameter | Meetmethode | Berekeningswijze                               |
|---------------------|------------------------|-------------------|-------------|--|
| Aarschot*           | Demer                  | Waterstand        | /           | Instantaan debiet bepaald a.d.h.v. Q/H-verband |
| Witsele*            | Dijle                  | Waterstand        | /           | Instantaan debiet bepaald a.d.h.v. Q/H-verband |
| Dendermonde         | Dender                 | Debiet            | ADM         | Toepassing Q/Q relatie                         |
| Epegem              | Zenne                  | Waterstand        | /           | Instantaan debiet bepaald a.d.h.v. Q/H-verband |
| Grobbendonk Troon** | Kleine Nete            | Waterstand        | /           | Instantaan debiet bepaald a.d.h.v. Q/H-verband |
| Hulshout**          | Grote Nete             | Waterstand        | /           | Instantaan debiet bepaald a.d.h.v. Q/H-verband |
| Melle               | Bovenzeeschelde - Leie | Debiet            | ADM         | Toepassing Q/Q relatie                         |

Tabel 7: Conversiefactoren voor het herscalen van bovenafvoeren naar monding van een zijrivier. Vanaf 2018 hanteert men ofwel het Digitaal Hoogte Model (DHM) ofwel de Vlaams Hydrografische Atlas (VHA) (Michielsen et al., 2019).

| Rivier – meetlocatie tot monding                                 | Schaalfactor |            |      |
|--|--------------|------------|------|
|  | Vóór 2018    | Sinds 2018 |      |
|  |              | DHM        | VHA  |
| Zeeschelde - Melle   | 1            | -          | 1    |
| Dender - Dendermonde   | 1            | -          | 1    |
| Zenne – Epegem tot de monding in de Dijle in Heffen              | 1,08         | -          | 1,06 |
| Dijle – Witsele (Dijle) + Aarschot (Demer) tot Haacht            | 1,0809       | -          | 1,06 |
| Dijle – Haacht tot de samenvloeiing met de Beneden-Nete in Walem | 1,08         | -          | 1,11 |
| Grote Nete – Hulshout tot de samenvloeiing in Lier               | -            | 1,67       | 1,46 |
| Grote Nete – Itegem tot de samenvloeiing in Lier                 | 1,35         | -          | -    |
| Kleine Nete - Grobbendonk Troon tot de samenvloeiing in Lier     | -            | 1,35       | 1,41 |

<sup>9</sup> \* Aarschot en Witsele worden slechts gebruikt vanaf 2012, hiervoor werd een daggemiddeld debiet bepaald te Haacht a.d.h.v. waterstanden omgerekend naar debieten via een Q/H verband te Witsele en Aarschot (Vanlierde et al., 2014).

\*\* Grobbendonk Troon en Hulshout zouden vervangen kunnen worden door de meetlocatie Duffel-Sluis, hier worden debieten rechtstreeks gemeten met een ADM toestel en vervolgens een QQ-relatie toegepast. Er bestaan echter ook relaties waarbij het debiet te Duffel bepaald wordt o.b.v. Grobbendonk Troon en Hulshout (Vanlierde et al., 2014).

*Kleine Nete – Grobbendonk 3<sup>e</sup> Sas tot de samenvloeiing  
in Lier*

|      |   |   |
|------|---|---|
| 1,46 | - | - |
|------|---|---|

## 2.6 Ingrepen

De inventarisatie van de menselijke ingrepen in de Westerschelde, Beneden- en Boven-Zeeschelde is verre van eenduidig. Recente ingrepen zijn vaak goed gedocumenteerd en kunnen bijgevolg eenvoudig opgenomen worden in de inventarisatie. Vaak geldt hoe ouder, hoe onduidelijker de situatie: uitvoeringsperioden zijn niet gekend of twijfelachtig, cijfermateriaal verschilt naargelang de geraadpleegde bron of de gebiedsdefiniëring is onduidelijk. De inventarisatie in dit rapport heeft tot doel deze onduidelijkheden zoveel mogelijk uit te klaren en een eenduidig en zo compleet mogelijk overzicht te geven van de ingrepen die de mens de voorbije decennia in het Schelde-estuarium uitvoerde.

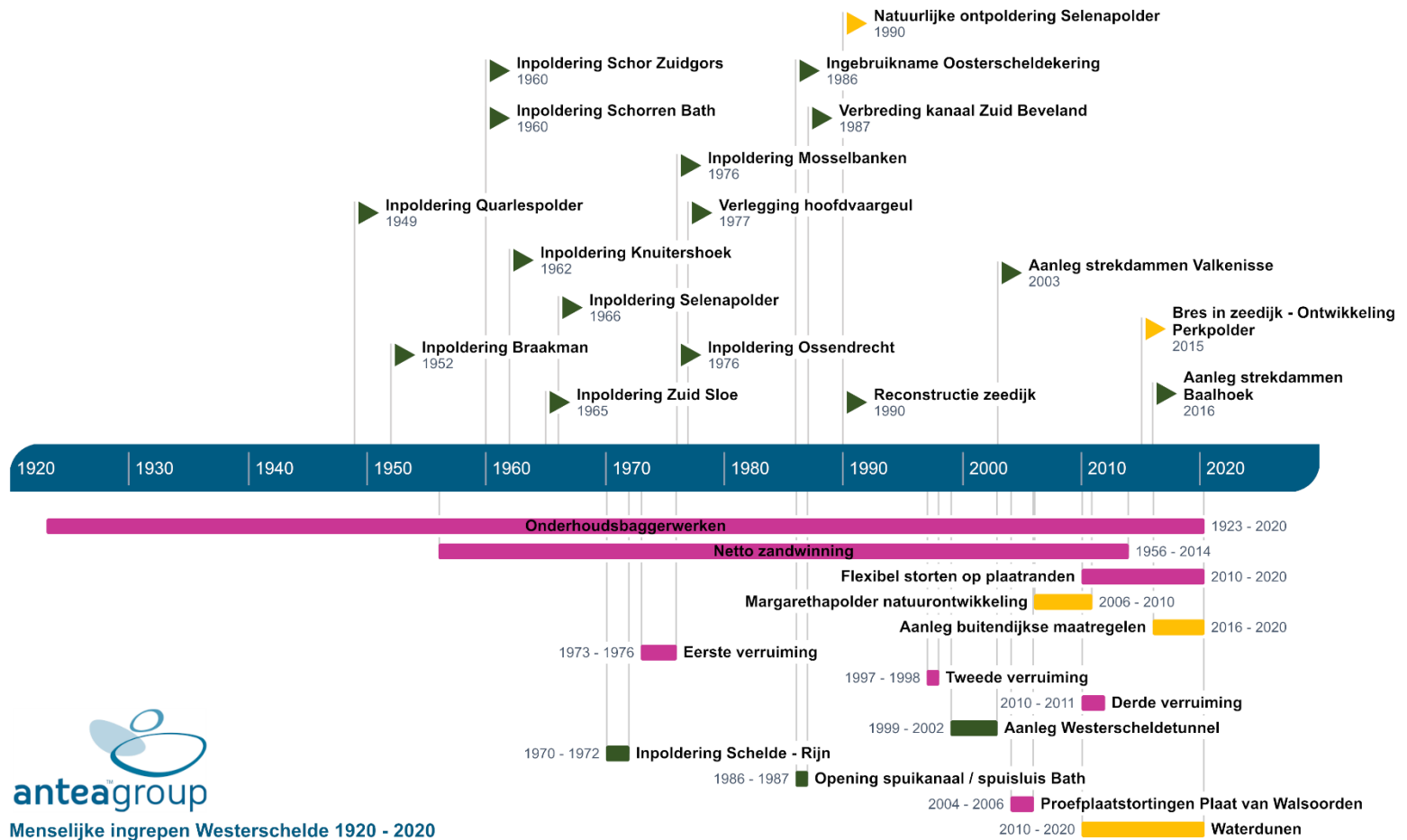
De uitgevoerde inventarisatie van menselijke ingrepen in de Westerschelde en Zeeschelde is gebaseerd op diverse rapporten en artikels van onderzoeksinstituten en studie bureaus zoals het Instituut voor Natuur en Bosonderzoek (INBO) en het Waterbouwkundig Laboratorium (WL). Als vertrekpunt werd uitgegaan van de belangrijkste publicaties zoals de T2009, T2015 rapportages en de publicaties van IMDC *et al.* (2013) en Taal *et al.* (2019). De ingrepen die geen impact kunnen hebben op het waterpeil in het estuarium – denk aan lozingen of het verdiepen van dokken achter de sluisen – zijn hierbij achterwege gelaten.

De inventarisatieperiode omvat de periode 1920 – 2020. De verschillende ingrepen voor de Westerschelde, Beneden-Zeeschelde en Boven-Zeeschelde worden weergegeven door respectievelijk Figuur 7, Figuur 8 en Figuur 9 .

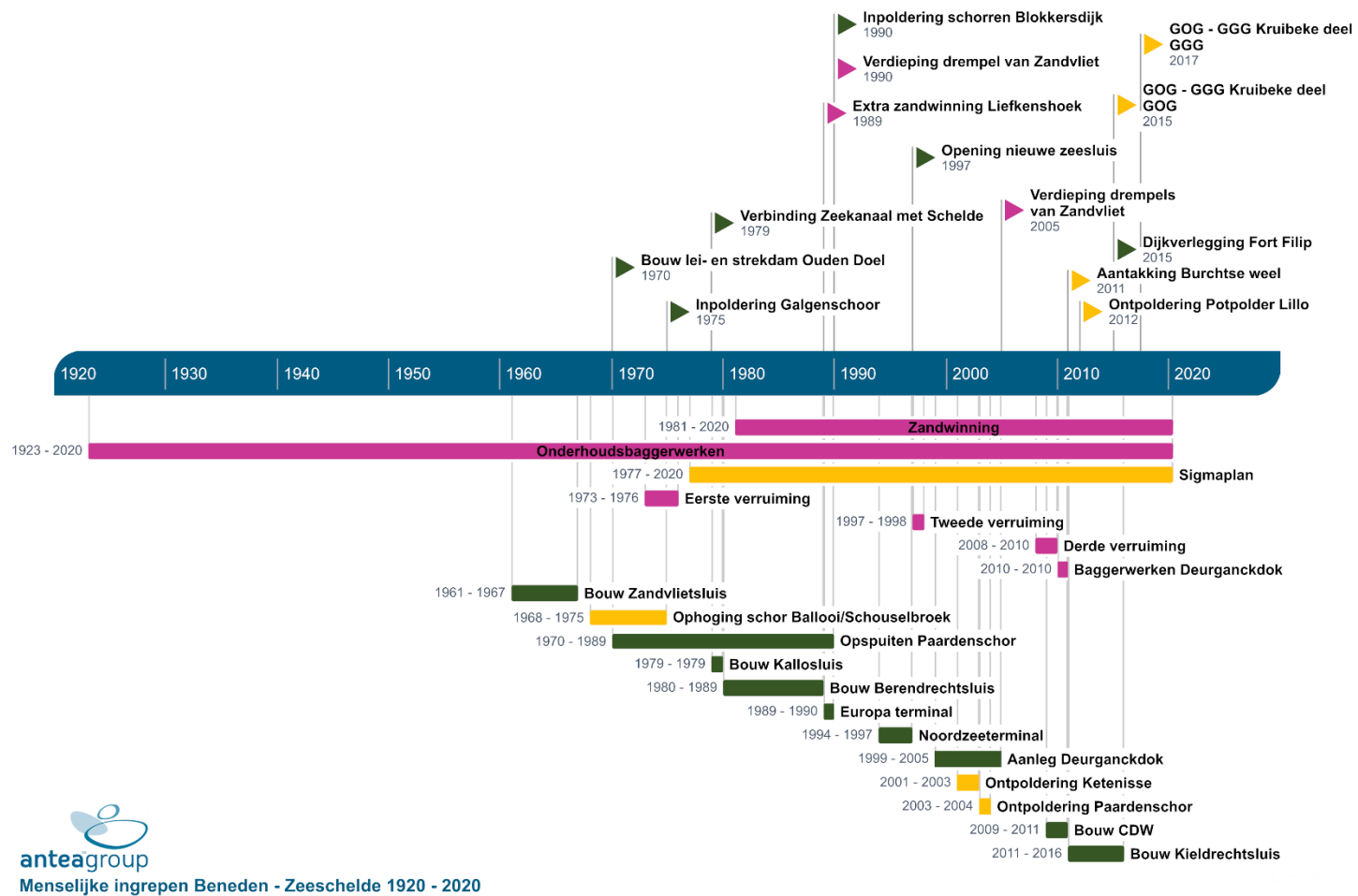
Ingrepen vóór 1920 zijn vaak te onduidelijk beschreven en/of gedefinieerd in de tijd. Deze worden bijgevolg niet verder opgenomen in de inventarisatie. Enkele uitzonderingen hierop zijn algemene rechtekkingen en inpolderingen langsheen het Schelde – traject.

Een volledig overzicht van alle ingrepen, inclusief een korte beschrijving ervan, wordt gegeven in Bijlage 1.



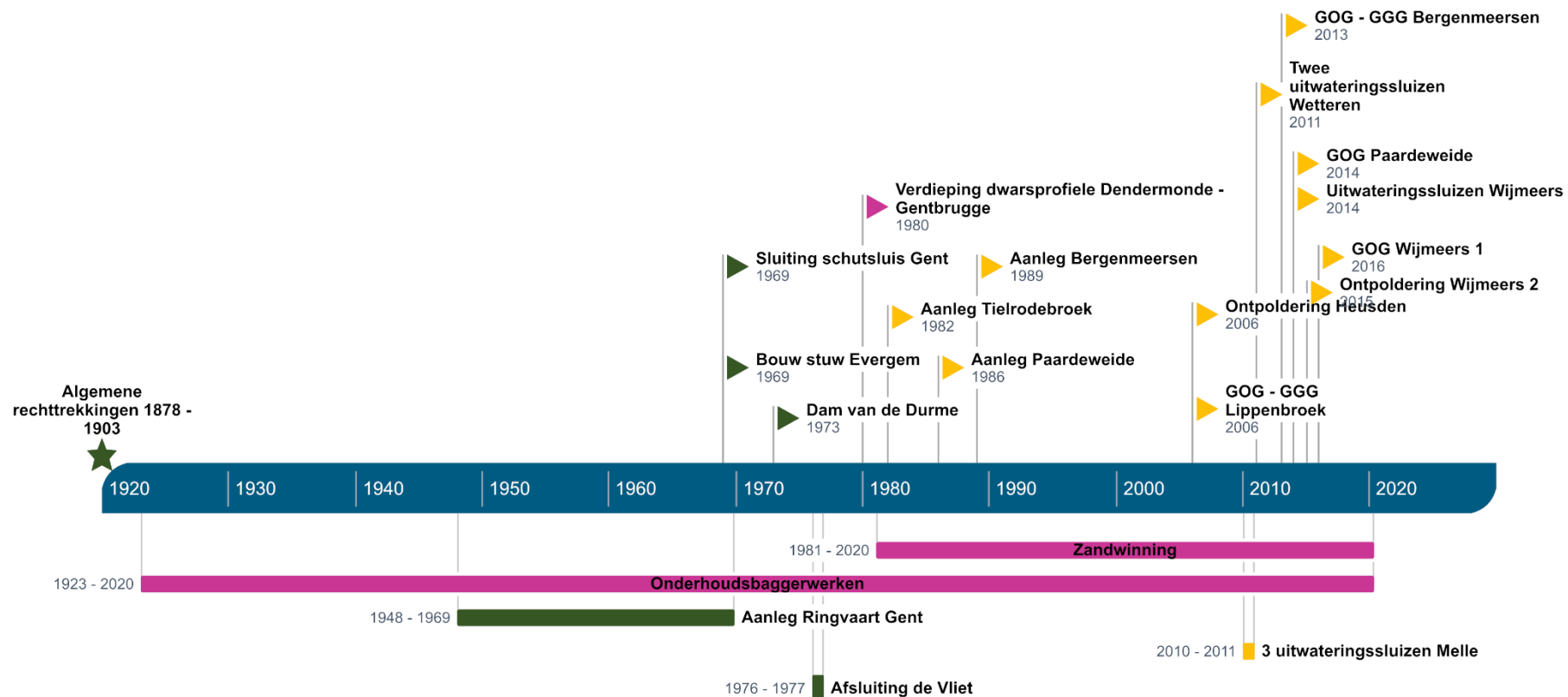


Figuur 7 : Tijdlijn van de menselijke ingrepen op de Westerschelde 1920 – 2020 met opdeling naargelang te verwachten impact: Instantaan – impact op de volledige getijcyclus (GROEN), Instantaan – impact op gedeeltelijke getijcyclus (GEEL) en Geleidelijk – impact op de volledige getijcyclus (ROZE).



  
**anteagroup**  
 Menselijke ingrepen Beneden - Zeeschelde 1920 - 2020

Figuur 8 : Tijdlijn van de menselijke ingrepen op de Beneden - Zeeschelde 1920 – 2020 met opdeling naargelang te verwachten impact: Instantaan – impact op de volledige getijcyclus (GROEN), Instantaan – impact op gedeeltelijke getijcyclus (GEEL) en Geleidelijk – impact op de volledige getijcyclus (ROZE).



**Menselijke ingrepen Boven - Zeeschelde 1920 - 2020**

*Figuur 9: Tijdlijn van de menselijke ingrepen op de Boven - Zeeschelde 1920 – 2020 met opdeling naargelang te verwachten impact: Instantaan – impact op de volledige getijcyclus (GROEN), Instantaan – impact op gedeeltelijke getijcyclus (GEEL) en Geleidelijk – impact op de volledige getijcyclus (ROZE).*

## 3 Zeespiegelstijging voor de Kust

### 3.1 Inleiding

In deze deelstudie gaan we dieper in op de eerste onderzoeksvraag: *Zien we een versnelling in de zeespiegelstijging voor de (Belgische) Kust?* Hierbij wordt ook onderzocht of het een meerwaarde is om louter windluwe periodes in acht te nemen.

We starten met een literatuurstudie op de meest relevante publicaties of rapporten (§3.2). Daarna wordt de dataverwerking voor deze deelstudie beschreven in §3.3. Hoofdstuk §3.4 behandelt de statistische modellering van de zeespiegelstijging op zowel hoge, als lage resolutie – elk met hun eigen besluit. Het antwoord op de onderzoeksvraag is terug te vinden in §3.5.

### 3.2 Literatuurstudie

De zeespiegelstijging voor de Kust van de Zuidelijke Noordzee vormde vanzelfsprekend al voer voor meerdere voorgaande studies. Volgend hoofdstuk vat de meest relevante studies samen. Dit geeft ons (1) een eerste kwaliteitscontrole op de bekomen trendanalyses en (2) de mogelijkheid om na te gaan wat de meerwaarde is van nieuwe statistische analysemethodes.

#### 3.2.1 Van Cauwenberghe (1999)

Van Cauwenberghe (1999) analyseerde het jaargemiddeld HW en LW en de jaargemiddelde zeespiegel, rekening houdend met de impact van de nodale getijcyclus op HW en LW. Hiervoor werkte hij op de meetgegevens van de Vlaamse Hydrografie. Van Cauwenberghe (1999) vond voor de periode 1925-1998 een stijging van respectievelijk 2mm/jaar voor HW, 1,5mm/jaar voor MSL en 1mm/jaar voor LW. Hij vond geen aanwijzing van een versnelling in de jaargemiddelde waterpeilen.

In Tabel 8 wordt een overzicht gegeven van de door Van Cauwenberghe (1999) beschouwde periodes en locaties. Bepaalde periodes heeft hij niet verder onderzocht vanwege de hiaten en onduidelijkheden in de data.

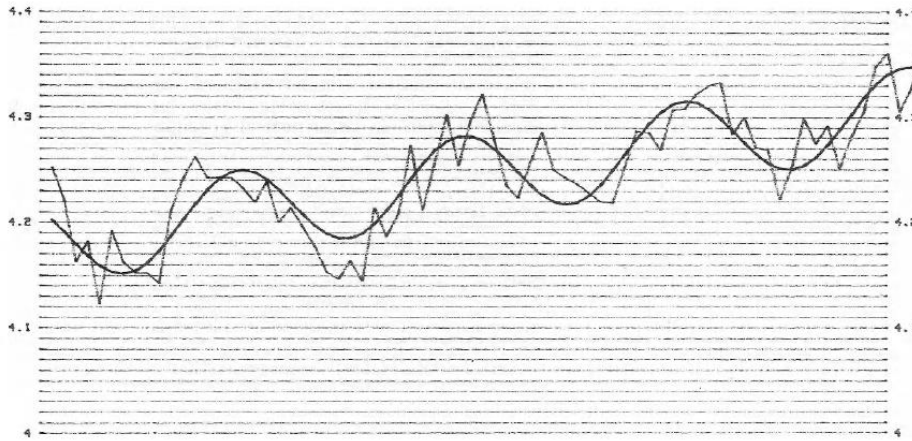
Oostende HW van 1925 tot 1998

$$H = A * Yr + B * \sin((YR - ORIG) * 2 * \pi / \text{period}) + C$$

PERIOD 18.612 ORIG 1974.1 A = .001758 m B = .0407 m C = 4.266 m

mu = 8.162E-16 m sigma = .08187 m

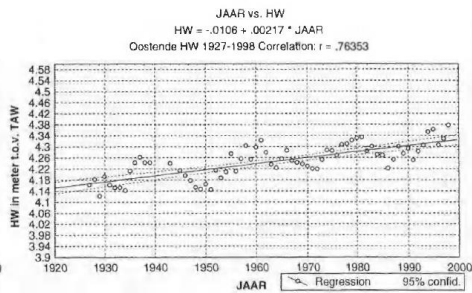
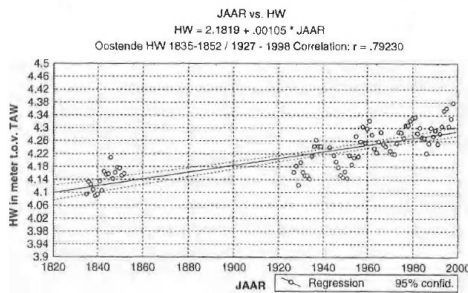
1925.5 1930.5 1935.5 1940.5 1945.5 1950.5 1955.5 1960.5 1965.5 1970.5 1975.5 1980.5 1985.5 1990.5 1995.5



1925.5 1930.5 1935.5 1940.5 1945.5 1950.5 1955.5 1960.5 1965.5 1970.5 1975.5 1980.5 1985.5 1990.5 1995.5

Period: 1835-1852  
1927-1998  
(-1940, 1941, 1942, 1944)

Period: 1927-1998  
(-1940, 1941, 1942, 1944)



Figuur 10: trendanalyse op HW te Oostende met cyclisch (BOVEN) en lineair model (ONDER). (Bron: Van Cauwenberghe, 1999)

Tabel 8 : Overzicht van de beschouwde data door Van Cauwenberghe (1999).

| Locatie         | Periode     | Volledigheid data en verwerking   |
|-----------------|-------------|---|
| Oostende        | 1820 – 1834 | Data zijn verloren.   |
|                 | 1835 – 1853 | Enkel maandelijks gemiddelden.  |
|                 | 1866 – 1871 | Data zijn verloren.   |
|                 | 1878 – 1914 | Data werd niet gebruikt (hiaten in data/onduidelijke referentieniveaus).  |
|                 | 1925 – 1970 | Grote hiaten in de data voor bepaalde jaren, 1925 – 1926, 1940 – 1942 en 1944: data werd niet gebruikt vanwege de te grote discontinuïteit van de data. |
|                 | 1971 – 1998 | Continue data.  |
| Zeebrugge       | 1932 – 1943 | Grote hiaten in de data voor bepaalde jaren.  |
|                 | 1959 – 1970 | Grote hiaten in de data voor bepaalde jaren.  |
|                 | 1971 – 1998 | Continue data.  |
| Nieuwpoort      | 1933 – 1938 | Grote hiaten in de data voor bepaalde jaren.  |
|                 | 1941 – 1943 | Grote hiaten in de data voor bepaalde jaren.  |
|                 | 1959 – 1970 | Grote hiaten in de data voor bepaalde jaren.  |
|                 | 1971 – 1998 | Continue data.  |
| Vlissingen (NL) | 1890 – 1998 | Continue data.  |

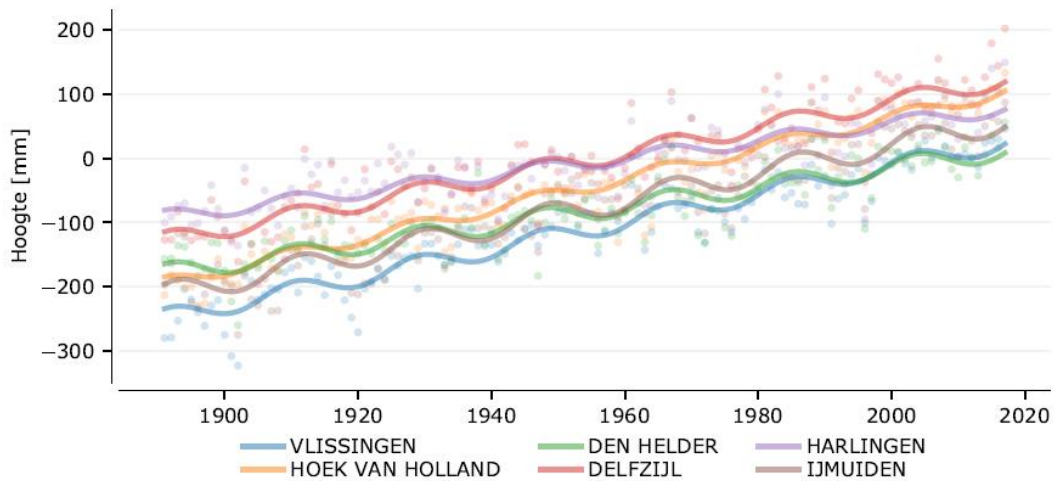
### 3.2.2 Zeespiegelmonitor (Baart *et al.*, 2018)

De Zeespiegelmonitor opgesteld door Baart *et al.* (2018) focust op de relatieve en eustatische zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Men wendde hiervoor de gemiddelde zeespiegel van de Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) aan, waarbij de data geaggregeerd werden tot jaargemiddeldes om zo zeespiegeltrends te kunnen onderscheiden. Het ging hier om data van de 6 hoofdstations (Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl), continue data sinds 1890. In deze studie zijn zowel de nodale getijcyclus, het windklimaat als een autoregressieve term opgenomen als verklarende variabelen. Zowel een lineaire als kwadratische zeespiegelstijging werd beschouwd, maar men vond geen aanwijzing dat de zeespiegel versnelde voor de Nederlandse kust. Voor Vlissingen leidde men een lineaire relatieve zeespiegelstijging van 2,1 mm/jaar en absolute zeespiegelstijging van 1,9 mm/jaar af. Voor Hoek van Holland vond men voor de jaargemiddelde zeespiegel een lineaire relatieve stijging van 2,3 mm/ jaar en absolute van 1,8 mm/jaar.

Men besloot dat de stijging afwijkt van de globale zeespiegelstijging omdat Nederland gunstig ligt ten opzichte van het smeltend ijs en omdat het volume van de dalende oceaانبodem bij de zeespiegelstijging wordt opgeteld.

Tabel 9: Uitsplitsing bodemdaling en zeespiegelstijging per station (bodemdaling uit Hijma & Kooi, 2018). Tektoniek + isostasie, Woningen en Bodemdaling zijn berekend over de periode 1917-2017. Bodemdaling is voor Delfzijl exclusief winning voor IJmuiden inclusief. Relatieve zeespiegelstijging is gemeten over de periode 1890-2017. (Bron: Baart et al. 2018).

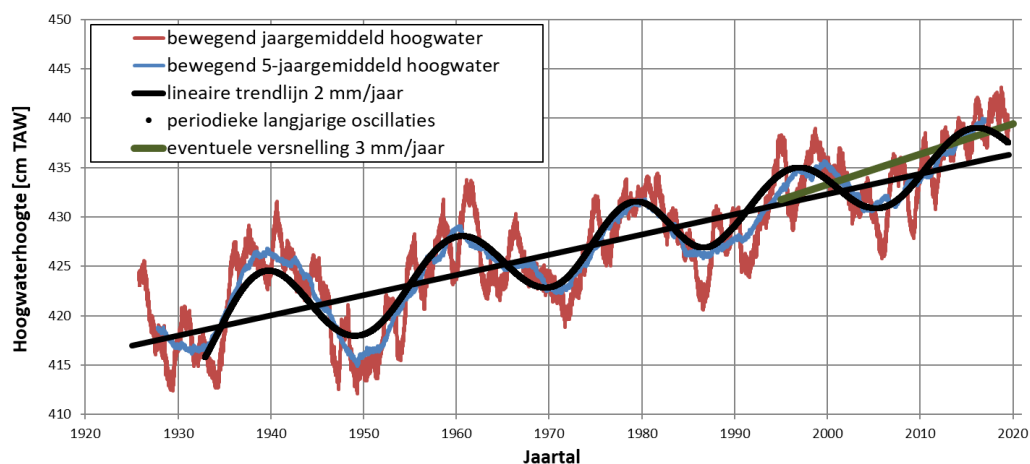
| Station          | Tectoniek + Isostasie<br>[cm] | Woningen<br>[cm] | Bodem<br>[mm/jaar] | Relatief<br>[mm/jaar] | Absoluut<br>[mm/jaar] |
|------------------|-------------------------------|------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| Vlissingen       | -2.4                          | 0.0              | -0.24              | 2.1                   | 1.9                   |
| Hoek van Holland | -3.7                          | -1               | -0.47              | 2.3                   | 1.8                   |
| IJmuiden         | 5.0                           | 0.0              | -0.5               | 2.1                   | 1.6                   |
| Den Helder       | -5.4                          | 0                | -0.54              | 1.4                   | 0.9                   |
| Harlingen        | -6.0                          | 0                | -0.60              | 1.3                   | 0.7                   |
| Delfzijl         | -4.8                          | -24              | -0.48              | 1.9                   | 1.4                   |



Figuur 11: Huidige zeespiegelstijging volgens het lineaire model zonder wind. De trend is voor de 6 getijdstations afzonderlijk weergegeven. De zeespiegel is uitgedrukt ten opzichte van post-2005 NAP (Bron: Baart et al. 2018).

### 3.2.3 Willems et al. (2019)

Willems et al. (2019) analyseerde de zeespiegelstijging a.d.h.v. een gecombineerde dataset waarbij de oudste meetgegevens – sinds 1925 – afkomstig van *Technum et al.* (2002), aangevuld werden met meetgegevens van MVB: gemeten hoogwaters voor de periode 2000-2014 en gemeten 5-minuten waterhoogten voor de periode juli 2014 - juni 2019. Voor de trendanalyse werden de hoogwaters uitgemiddeld met lopend venster van 1 en 5 jaar en is er rekening gehouden met de nodale cyclus. Voor de periode 1925-2019 vond men een lineaire zeespiegelstijging van 2 mm/jaar. Recente jaren (2015-2019) lagen systematisch hoger dan de trendlijn, wat men mogelijk als een versnelling van de zeespiegelstijging zou kunnen aanzien. Doch, Willems et al. (2019) stelt duidelijk dat er zich in het verleden ook perioden hebben voorgedaan waarbij de jaargemiddelde hoogwaterhoogten tijdelijk (soms veel) hogere piekwaarden vertonen dan wat de langjarige schommelingen voorspellen. Men besluit dat men meer meetgegevens nodig heeft om dit verder te onderzoeken, maar dat de waarnemingen te Oostende de versnelling die men in internationaal onderzoek (Nerem et al., 2018) waarneemt – een versnelling midden jaren '90 naar 3mm/jaar – niet tegen spreken.



Figuur 12: Analyse van trend en langjarige schommelingen voor de totale hoogwaterhoogten te Oostende voor 1925-2019, na uitmiddeling op basis van een bewegend venster over perioden van 1 jaar en 5 jaar, met aanduiding van de eventuele versnelling van de trend van 2 tot 3 mm/jaar vanaf midden jaren 1990. (Bron: Willems et al., 2019).

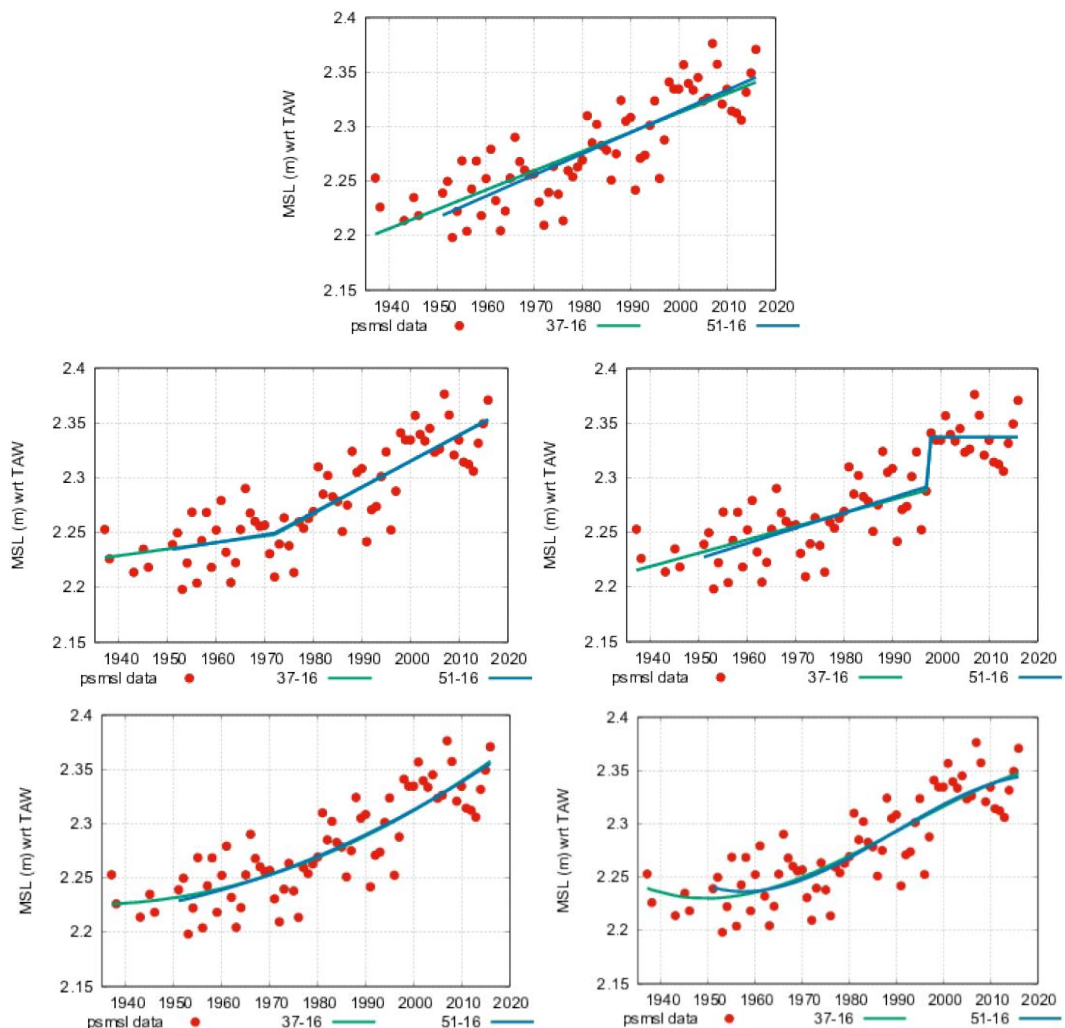
### 3.2.4 CREST (2020)

Binnen het CREST project (CREST, 2020) actualiseerde Ozer *et al.* (2019) de trendanalyse op de zeespiegelstijging. Men voerde een trendanalyse uit op de jaargemiddelde zeespiegelstand, zoals aangeleverd door de Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) bij het Proudman Oceanographic Laboratory, Bidston Observatory, Birkenhead (UK). Deze dataset bevat maandgemiddelde zeespiegelstanden van 1937 tot 2016. Voor de berekeningen in Ozer *et al.* (2019) is data geaggregeerd naar jaargemiddelden.

De studie fit 5 verschillende modellen: waaronder een lineaire trend, een gebroken trend zonder sprong, gebroken trend met sprong, een kwadratische stijging en een 3<sup>de</sup> orde polynoom. Deze staan allen weergegeven in Figuur 13. De trends werden direct gefit op te waterstanden. Noch de nodale getijcyclus, noch het windklimaat werd mee in rekening gebracht. Ozer *et al.* (2019) vond:

- Dat de gemiddelde zeespiegel gedurende de volledige periode 1936-2016 steeg met gemiddeld 1,7 mm/jaar (lineaire trend).
- De trend een versnelling uitwees waarbij de zeespiegel gedurende 1972-2016 steeg met 2,39 mm/jaar, wat hoger is dan het gemiddelde gedurende de volledige periode 1936-2016.
- Men merkte wel op dat deze resultaten met enige voorzichtigheid benaderd moeten worden, gezien de nodale getijcyclus niet in rekening werd gebracht.





Figuur 13: Resultaten CREST met lineair (BOVEN), gebroken zonder sprong (LINKSMIDDEN), gebroken met sprong (RECHTSMIDDEN), kwadratisch (LINKSONDER) en 3<sup>de</sup> orde polynomiaal model (RECHTSONDER) gefit op de gemiddelde zeespiegel van PSMSL. (Bron Ozer et al., 2019)

### 3.3 Dataverwerking

Volgende dataverwerking werden toegepast alvorens de trendanalyses uit te voeren:

- Meetlocaties waarbij de metingen aangeleverd zijn in meerdere bestanden zijn aan elkaar gevoegd. Indien er overlap optreedt, werd de databron met de nieuwste data weerhouden. Gezien dit een indicatie kan zijn voor een verandering in meetmethode, werd er – via een analyse op de significantie van dummyvariabelen – onderzocht of dit een significante sprong in de meetreeks met zich meebracht.
- Enkel tijdsvensters met voldoende, betrouwbare meetgegevens zijn in rekening gebracht (Oostende: 1925-2019; Vlissingen: 1890 tem 2019).
- Alle waarden zijn omgevormd zodat ze allemaal in de zelfde eenheid (bv cm of m) staan en relateren tot eenzelfde referentiepeil (zie ook §2.2.1).
- Indien er in de aangeleverde, ruwe data een specifieke vermelding staat dat bepaalde waarden onbetrouwbaar zijn, hebben we deze datapunten weggelaten.

- Uitschieters zijn verwijderd a.d.h.v. zeer extreme waarden (Oostende HW >100m, Vlissingen Windrichtingen >360°).
- Voor de rest zijn de specifieke encodings van de instanties geïnterpreteerd en omgezet naar een algemene interpretatie. Zo kunnen ontbrekende metingen verschillende vormen aannemen (bv -777, NaN).
- Er is geïtereerd over de logica en data om alle data te kunnen inlezen. Algemene coderingen van de data zijn verwerkt via logica in R. Indien er een schrijffout of een zeer specifiek artefact voorkwam, werd deze manueel gecorrigeerd.

## 3.4 Statistische Modelling

Na de nodige datacorrecties en mogelijke aggregaties, is een statistisch model opgebouwd dat de waargenomen zeespiegelstand verklaart. Door meer verklarende variabelen (zgn. covariaten) op te nemen in de vergelijking, hoe beter men de waargenomen variabiliteit kan verklaren en de onderliggende trend kan determineren. De variatie in de zeespiegelstand wordt hier gemodelleerd door de gewogen som te nemen van desbetreffende variabelen. Aan de hand van regressieanalyses worden de respectievelijke gewichten (coëfficiënten) ingeschat en getoetst op significantie om na te gaan of we ze weerhouden in het finale statistische model.

Om een vergelijking te maken met eerdere studies en om de complexiteit minimaal te houden, is eerst een modellering uitgevoerd op jaarlijks geaggregeerde metingen: de lage resolutie (§ 3.4.1). In een tweede luik is er nagegaan of er verdere conclusies kunnen getrokken worden op hoge resolutie (§ 3.4.2). Hier wordt ieder HW of LW meegenomen als afzonderlijk datapunt zonder eerst een aggregatieslag toe te passen.

### 3.4.1 Lage Resolutie

#### 3.4.1.1 Modelopbouw

De beschouwde formule in de lage resolutie regressieanalyse is:

$$\begin{aligned}
 H(t) &= a + b_{trend}(t) + (b_{versnelling}(t^2)?) + b_{meetmeth}(m) + b_u \cos\left(\frac{2\pi t}{18,61}\right) \\
 &+ b_v \sin\left(\frac{2\pi t}{18,61}\right) + b_{wu}wind_u + b_{wv}wind_v + (b_{corr}geenwind) + \varepsilon(t)(+\varphi\varepsilon(t-1))
 \end{aligned}$$

Waar  $H(t)$  de gemiddelde zeespiegelstand is op tijdstip  $t$  (jaartal),  $a$  het intercept (gemiddelde zeespiegelstand op tijdstip 0) en  $b$ 's de coëfficiënten (gewichten) zijn die aan iedere variabele wordt toegekend. De coëfficiënten die bekomen worden door de regressieanalyse zijn steeds conditioneel op de andere variabelen. De coëfficiënten kunnen als volgt geïnterpreteerd worden:

- $b_{trend}(t)$ : is de gemiddelde zeespiegelstijging per jaar. ( $t$ ) is op lage resolutie dus gewoon het jaartal.
- $b_{versnelling}(t^2)$ : is de term voor de kwadratische trend (zeespiegelstijging versnelling). Deze wordt enkel toegevoegd wanneer volgens de modeldiagnostiek dit een significant effect heeft.
- $b_{meetmethode}(m)$ : Met deze term worden er eventuele meetmethode veranderingen opgenomen in de modellering. Meetmethode veranderingen of data correcties kunnen een artefact met zich meebrengen. Sprongen die hier aan gerelateerd zijn worden op deze manier mee in beschouwing genomen. Deze worden enkel weerhouden wanneer dit een significante verbetering geeft van het model.

- $b_u \cos\left(\frac{2\pi t}{18.61}\right) + b_v \sin\left(\frac{2\pi t}{18.61}\right)$ : Deze termen modelleren de nodale cyclus. Door een cos en sin term tegelijk te beschouwen en te optimaliseren in deze lineaire regressie worden zowel de amplitude als fase gemodelleerd.
- $b_{wu}wind_u + b_{wv}wind_v$ : De windsnelheid en -richting worden beschouwd aan de hand van een vectordecompositie naar O-W en N-Z component.
- $b_{corr}geenwind$ : Een eventuele correctie wordt toegepast indien significant voor de zeespiegelstanden waar er geen winddata voorhanden is.

Bij een standaard lineair regressiemodel wordt er geen rekening gehouden met autocorrelatie van het random residu. Bij tijdreeksen treedt er echter vaak wel correlatie op met residuen op vorige tijdstippen: waterhoogtes veranderen niet instantaan, maar gradueel. Hierdoor zullen onder andere random deviaties van de ingeschatte waterstand zich verder zetten in de tijd. Daarom is het ook belangrijk om naast een gewoon normaal verdeeld residu,  $\varepsilon(t)$ , ook de autocorrelatie van het residu te beschouwen  $\varphi\varepsilon(t-1)$ , (AR<sub>1</sub> term). (opgenomen a.d.h.v. een GLS modellering<sup>10</sup>).

Het uiteindelijke doel is het zo precies mogelijk achterhalen van de trend en eventuele versnelling  $b_{trend}(t) + b_{versnelling}(t^2)$  en het resultaat te vergelijken met eerdere studies. Om te bepalen welke optionele variabelen ( $m$ ,  $b_{corr}geenwind$  of  $t^2$ ) uiteindelijk weerhouden worden in het finale model, werd een voorwaartse selectie uitgevoerd en telkens gecontroleerd of de coëfficiënt significant verschillend is van 0 (t-test). Daarnaast werd er ook nagegaan of de toevoeging een verbetering in het Akaike Information Criterion (AIC) van het totale model met zich meebrengt. AIC is een metriek voor de modelkwaliteit: Het omvat een afweging tussen het aantal gebruikte variabelen vs. hoe goed het model de data beschrijft.

Conform de gangbare modeldiagnostiek zijn er verdere analyses op de modelassumpties uitgevoerd, zoals het nagaan van multicollineariteit en een residuanalyse. Multicollineariteit is de onderlinge correlatie tussen meerdere verklarende variabelen. Dit kan leiden tot een lagere betrouwbaarheid van de respectievelijke coëfficiënten. De multicollineariteit werd nagegaan met de *Variance Inflation Factor* (VIF: Miles & Shevlin, 2001), of de *Generalised Variance Inflation Factor* (GVIF: Fox & Monette, 1992) indien er categorische variabelen aanwezig zijn. Om de multicollineariteit tussen  $t$  en  $t^2$  te minimaliseren, werd het nulpunt van  $t^2$  bij alle analyses ongeveer centraal in de tijdreeks (1970) geplaatst. Voor de residuanalyse werd er nagegaan of de residuen normaal verdeeld zijn, visueel wordt gekeken voor bepaalde patronen en verder werden ze getest voor (partiële) autocorrelatie.

Om een vergelijking te kunnen maken met voorgaande studies, zijn er modelleringen uitgevoerd op jaargemiddeld hoogwater en laagwater uit de data aangeleverd door MVB en de jaargemiddelde zeespiegelstand in de PSMSL data. Deze datasets zijn beschouwd voor de posten van Oostende, Vlissingen en Hoek van Holland.

Om meer inzicht te krijgen in de robuustheid van deze bevindingen, werd een mogelijke versnelling ook met andere methoden onderzocht:

1. Er is een **gevoeligheidsanalyse** uitgevoerd op de MVB data van Oostende om te kijken wat de conclusie zou zijn over de zeespiegelstijging indien er kortere tijdreeksen gebruikt worden. Zo wordt de tijdreeks voorwaarts ingekort vanaf de start (1925-2019) tot slechts 1 jaar (2018-2019) om telkens de regressie met alle meegenomen variabelen uit te voeren. Op deze manier kan voor elk beschouwd interval waargenomen worden of er een significante zeespiegelstijging of versnelling is. Ook de achterwaartse gevoeligheidsanalyse wordt uitgevoerd waar de reeks wordt ingekort van 1925-2019 tot 1925-1926.

<sup>10</sup> GLS modellering: Generalised least squares. De R package nlme v3.1-152, R versie 3.6.1. corARMA definitie  $p=1, q=0$

2. Daarnaast werd er ook een **stuksgewijs lineaire regressie** uitgevoerd op het HW te Oostende door verschillende breekpunten in beschouwing te nemen. Een significant positief verschil tussen de zeespiegelstijging voor en na een breekpunt kan dan een indicatie zijn van versnelling. Er zijn meerdere regressies uitgevoerd met alle variabelen en telkens met een nieuw breekpunt. De breekpunten worden zo gelegd dat ze op een zelfde punt binnen de nodale cyclus uitkomen. Dit is om de impact van artefacten in de fit van de nodale cyclus te reduceren.

Tot slot voerden we ook een modellering van de jaargemiddelde hoogwaterstand te Oostende uit op basis van louter meetgegevens tijdens windluwe periodes.

Hiervoor modelleren we eerst het effect van de windcomponenten op de waterstand (modellering van de windopzet), doormiddel van een lineaire regressie. Hierbij nemen we 3 verklarende variabelen en hun interactietermen (d.m.v. voorwaartse selectie) in beschouwing: Een vectordecompositie van de windsnelheid en -richting in N-Z en O-W componenten en een bijkomende indicator variabele (0 of 1) indien de wind uit het noorden komt. Deze modellering gebeurde op een (hoge) HW resolutie. Per hoogwater werd de wind geaggregeerd naar het vectorgemiddelde sinds het vorige hoogwater.

Windluwe periodes worden gedefinieerd als periodes waarbij de gemodelleerde windopzet a.d.h.v. de gegeven wind lager is dan 5 cm. De hoogwaterstanden die tijdens dergelijke periodes gemeten zijn, worden dan geaggregeerd naar jaarresolutie waarna we eenzelfde modellering als eerder besproken, uitvoeren – weliswaar zonder de termen die verband houden met het windklimaat ( $b_{wu}wind_u + b_{wv}wind_v$  en  $b_{corr}geenwind$ ).

### 3.4.1.2 Resultaten Lage Resolutie

#### 3.4.1.2.1 Oostende (HW van MVB – e.g. Willems *et al.*, 2019)

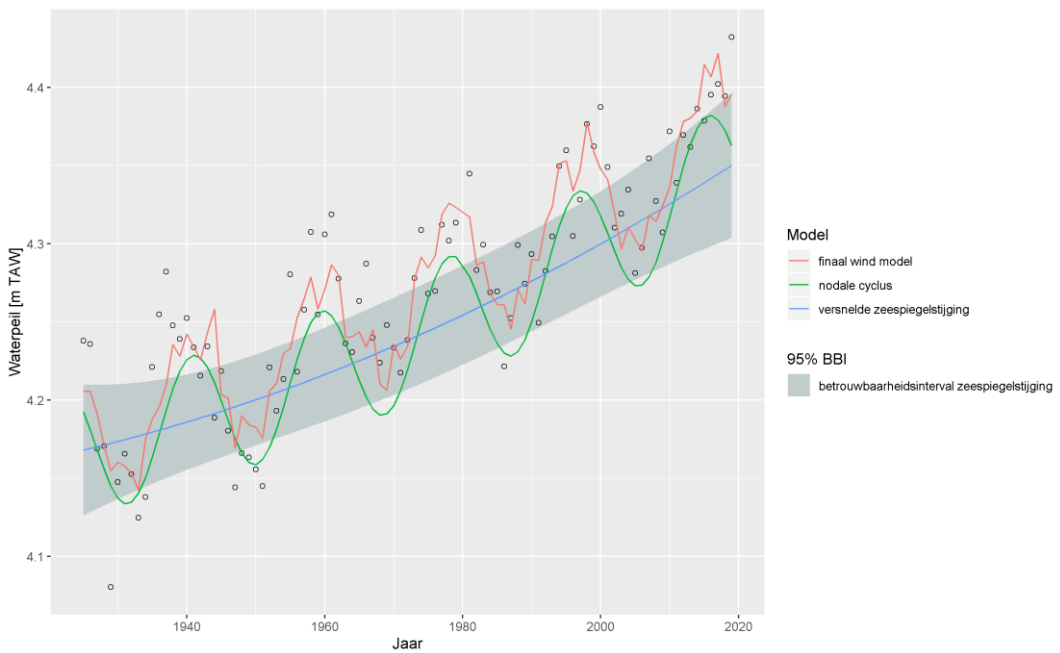
##### **Algemene trend**

Voor de jaargemiddelde hoogwaterstand te Oostende wordt voor de periode 1925-2019 een zeespiegelstijging van **1,9 mm** per jaar waargenomen met een 95% betrouwbaarheidsinterval van **1,7-2,1 mm/j**. Dit stemt overeen met de conclusies van Willems *et al.* (2019), die voor dezelfde periode een lineaire zeespiegelstijging van 2 mm/j uitkwam, wat binnen het betrouwbaarheidsinterval van onze studie ligt.

Indien we een kwadratische term opnemen in het model en een p-waarde van 0.05 aannemen als statistisch significant zien we geen versnelling. Echter de versnellingscomponent heeft een p-waarde van 0.07, wat zeker een vermelding waard is, en daardoor kunnen we spreken van een vermoeden tot versnelling in dit model: **0.009 mm/j<sup>2</sup> (-7,22\*10<sup>-4</sup> tot 1,96\*10<sup>-2</sup> mm/j<sup>2</sup>)**. De verbetering van de AIC in dit model tegenover het model met lineaire trend is beperkt: -406 t.o.v. -407.



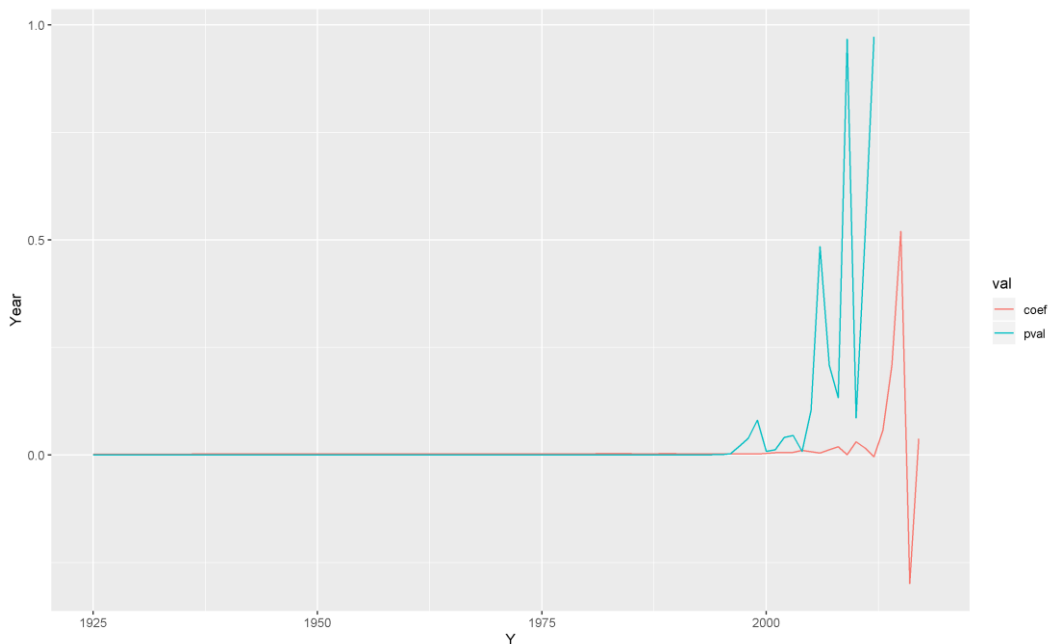
Figuur 14: Model voor gemiddeld HW per jaar in Oostende. Visualisatie van de invloeden van verschillende modelcomponenten. Geen winddata voorhanden tussen 1948-1950. Finaal wind model = trend zeespiegelstijging + nodale cyclus + wind + residu. Nodale cyclus = trend zeespiegelstijging + sinusöide nodale cyclus



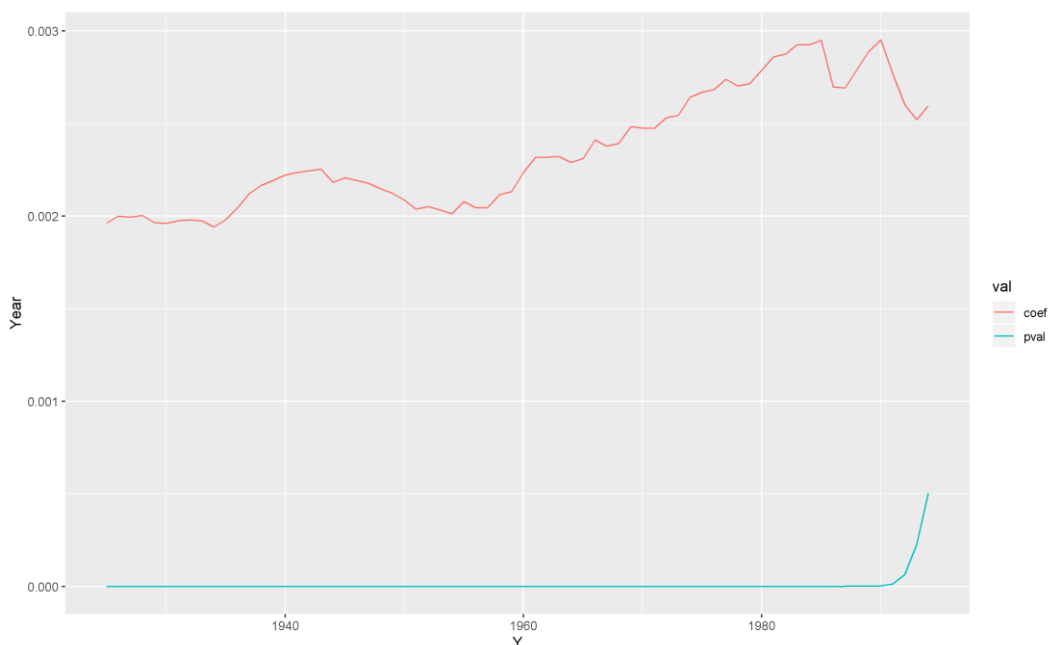
Figuur 15: Model voor gemiddeld HW per jaar in Oostende met versnellingsterm. Visualisatie van de invloeden van verschillende modelcomponenten. Geen winddata voorhanden tussen 1948-1950. Finaal wind model = trend zeespiegelstijging + nodale cyclus + wind + residu. Nodale cyclus = trend zeespiegelstijging + sinusöide nodale cyclus

### Gevoeligheidsanalyse beschouwde periode

In de voorwaartse gevoeligheidsanalyse van de lineaire term uit het regressiemodel met lineaire trend zien we dat er geen conclusies over de lineaire trend kunnen gemaakt worden indien we een kortere reeks beschouwen dan ca. 1995-2019. Vanaf hier stijgt de p-waarde van de trend aanzienlijk en wordt deze onstabiel (Figuur 16). Als we inzoomen op de periode vóór 1995, kan men waarnemen dat de waarde van de zeespiegelstijging stijgt (Figuur 17). Dit kan duiden op een versnelling.

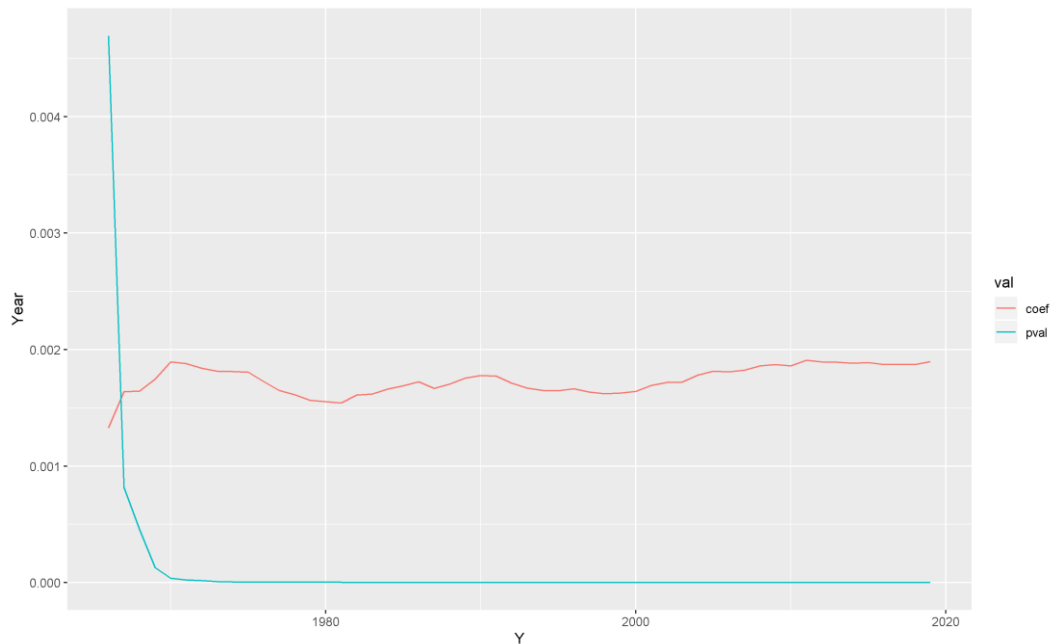


Figuur 16: Gevoeligheidsanalyse lineaire coëfficiënt, zeespiegelrend Oostende, gemiddeld HW per jaar. p-waarde stijgt vanaf midden jaren 1990.



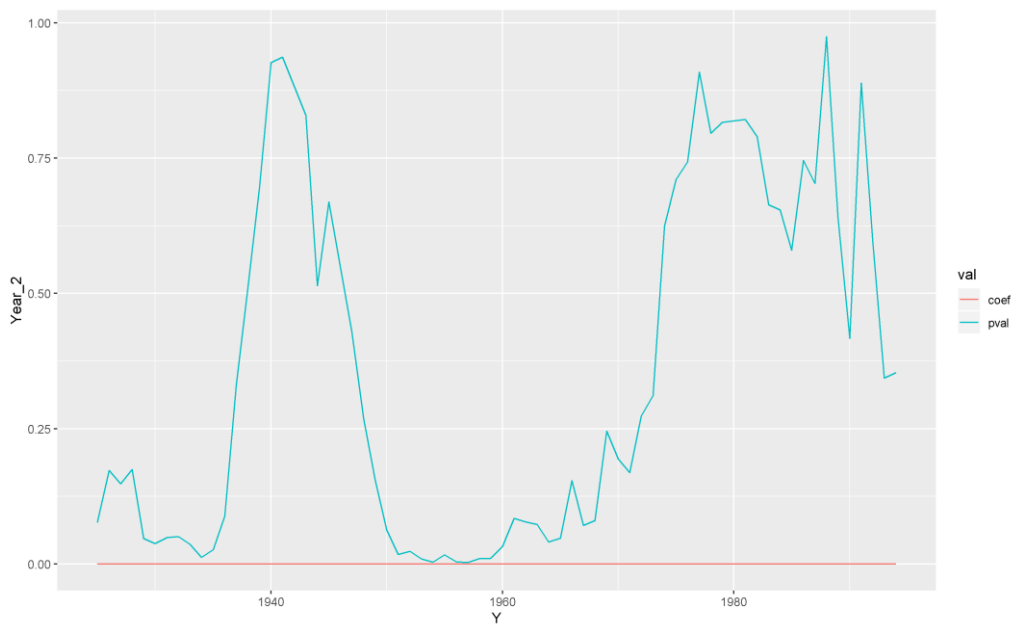
Figuur 17: Gevoeligheidsanalyse lineaire coëfficiënt tot 1995 zeespiegelrend Oostende, gemiddeld HW per jaar.

Bij de achterwaartse gevoeligheidsanalyse, is de trend pas significant wanneer een langere reeks dan 1925-1960 wordt beschouwd. De zeespiegelstijging blijft steeds positief.



*Figuur 18: Achterwaartse gevoeligheidsanalyse lineaire coëfficiënt zeespiegel trend Oostende 1965-2019, gemiddeld HW per jaar.*

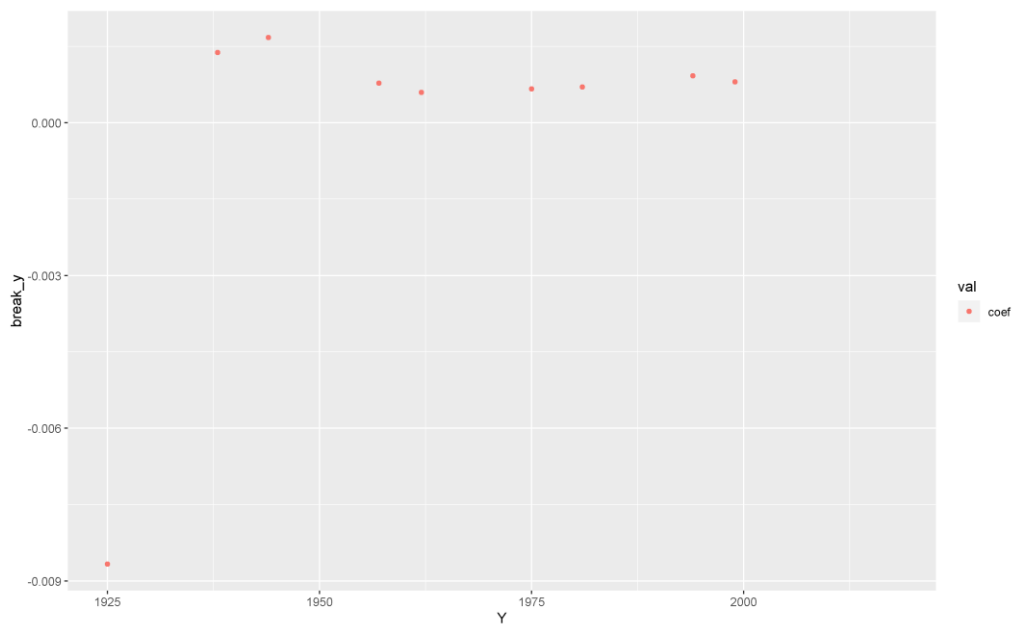
Als er gekeken wordt naar de significantie van de versnellingsterm in het versnellingsmodel met een gevoeligheidsanalyse, zien we dat deze afhankelijk is van het beschouwde interval. Als men bijvoorbeeld data vanaf eind jaren 1930 beschouwt, dan zouden we geen versnelling concluderen. Met de huidige data en variabelen in beschouwing, is dus omzichtigheid aangewezen om een versnelling te concluderen.



*Figuur 19: Voorwaartse gevoeligheidsanalyse zeespiegelversnelling coëfficiënt Oostende, gemiddeld HW per jaar.*

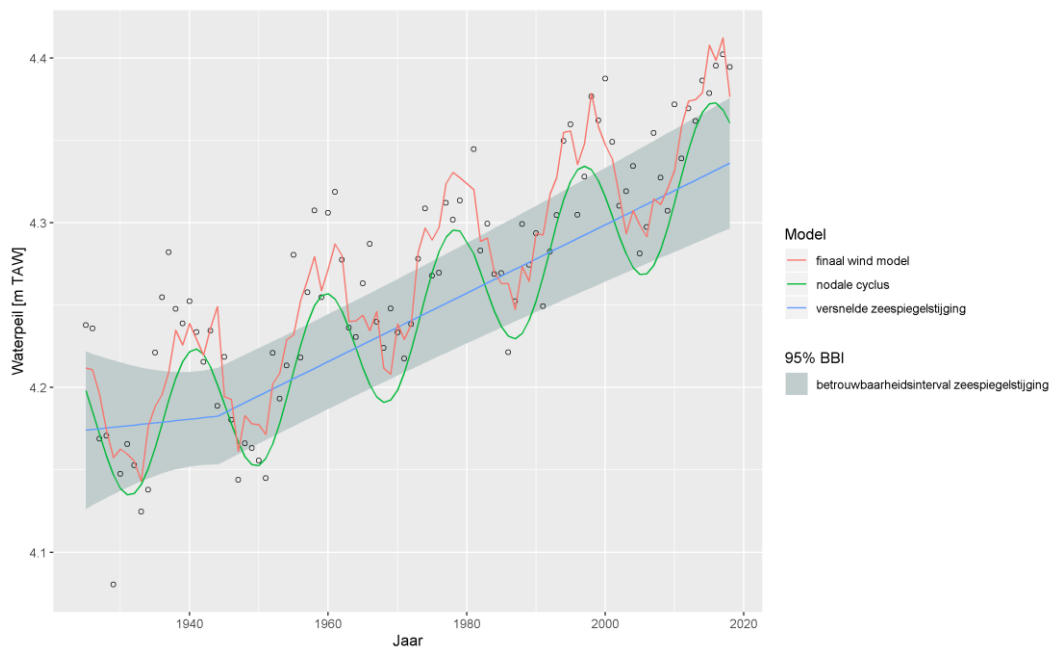
### Stuksgewijs lineaire regressie

Bij het plaatsen van een breekpunt op specifieke, vaste punten in de nodale cyclus, vertoont de meest recente periode quasi steeds (afgezien van 1925, net bij de start) een snellere zeespiegelstijging dan voorheen. Echter, enkel bij de trendbreuk in 1944 is het verschil tussen de oude en recente periode significant. Figuur 21 toont het resulterende model met een breekpunt in 1944. Dit kan op versnelling in de zeespiegelstijging wijzen, maar 1944 bevindt zich dicht bij een correctie voor wijzigend referentiepeil (zie Tabel 3). Het zou namelijk kunnen dat dit een optimalisatie is van het model, indien deze oude correctie niet 100% correct was.



*Figuur 20: Trendbreuk analyse Oostende jaarlijkse HW. De waarden geven de coëfficiënt van de trendbreuk. Dit is het verschil van de trend na de breuk met de trend voor de breuk. 1944 geeft de grootste trendbreuk en is als enige significant.*

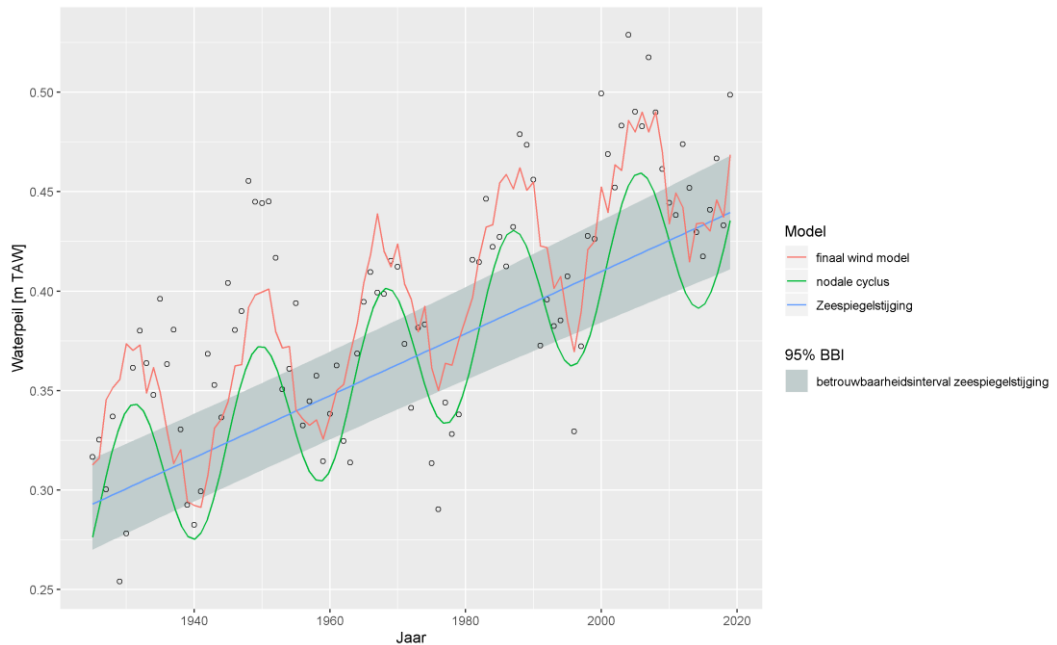




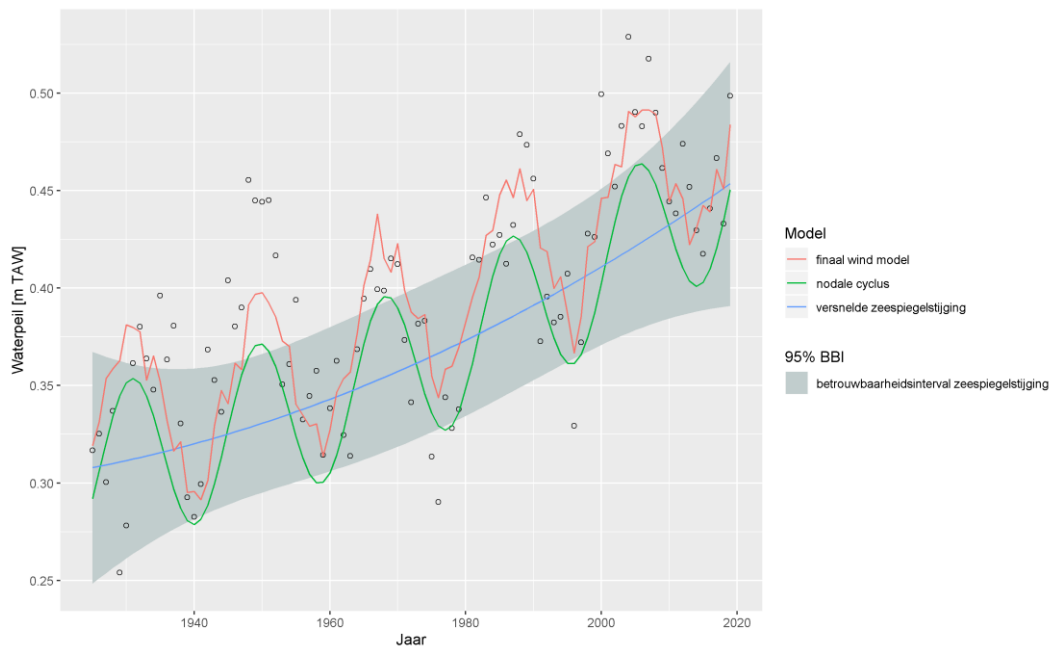
Figuur 21: Model Oostende jaarlijkse HW met trendbreuk in 1944.

### 3.4.1.2.2 Oostende (LW van MVB)

We voerden eenzelfde modellering uit op het jaargemiddelde laagwater in Oostende. Indien een lineaire trend beschouwd wordt, is de stijging **1,6 mm/j (95% BBI 1,1 tot 2,0 mm/j)**. De kwadratische term is hier – met de huidige data – niet significant (95% BBI  $-7,2 \cdot 10^{-3}$  tot  $2,6 \cdot 10^{-2}$  mm/j<sup>2</sup>).



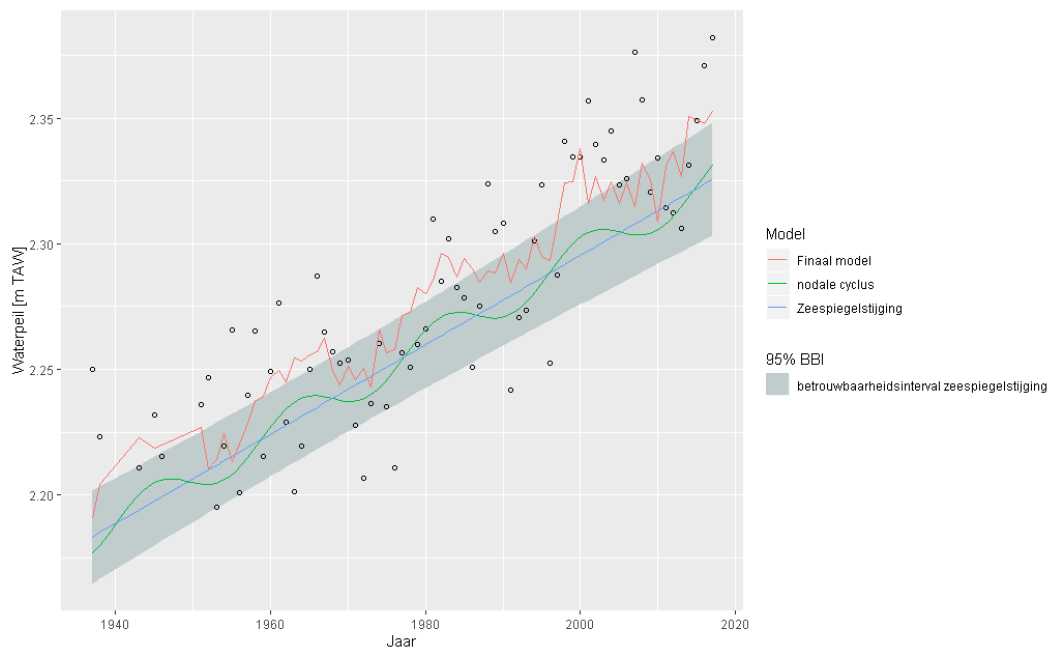
*Figuur 22: Oostende jaarlijks gemiddelde LW visualisatie regressiemodel met lineaire trend. Merk op dat de wind in het algemeen voor een opwaaiing zorgt (predicties en waarden liggen grotendeels boven de trendlijn).*



*Figuur 23: Oostende jaarlijks gemiddelde LW visualisatie regressiemodel met kwadratische trendlijn voor zeespiegelstijging. Merk op dat deze kwadratische coëfficiënt niet significant is en dit model niet weerhouden wordt.*

### 3.4.1.2.3 Oostende (Jaargemiddelde zeespiegel van PSMSL – e.g. CREST, 2020)

Bij de analyse op de jaargemiddelde zeespiegel van de PSMSL dataset bekomen we een gelijkaardige conclusie als bij de HW van MVB: een stijging van de jaargemiddelde zeespiegel van **1,8 mm/j** met een 95% betrouwbaarheidsinterval van **1,5 – 2,1 mm/j**. De zeespiegelstijging van 1,7 mm/j die men vond in CREST (2020), leunt hier dicht tegenaan en valt binnen de betrouwbaarheidsintervallen. Voor de kwadratische versnelling bekomen we een zeer hoge waarde, die significant verschilt van eerdere versnellingen en trends die al waargenomen zijn op deze locatie. De verwachte zeespiegelstijging tussen 1937 en 1950 wordt dan nagenoeg 0 mm/j. De geloofwaardigheid van dit model wordt dan ook in vraag gesteld en het model wordt niet weerhouden. Het lijkt erop dat dit een artefact is van een suboptimale fit van de nodale cyclus.



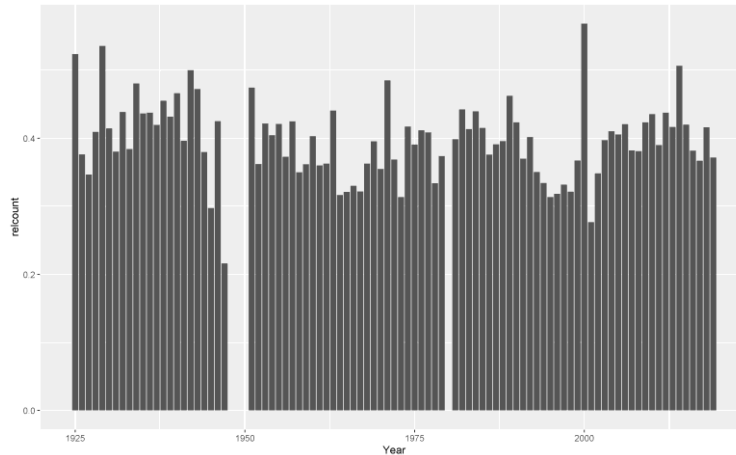
Figuur 24: Oostende PSMSL regressiemodel met lineaire trend.



Figuur 25: Oostende PSMSL regressiemodel met kwadratische trendlijn voor zeespiegelstijging.

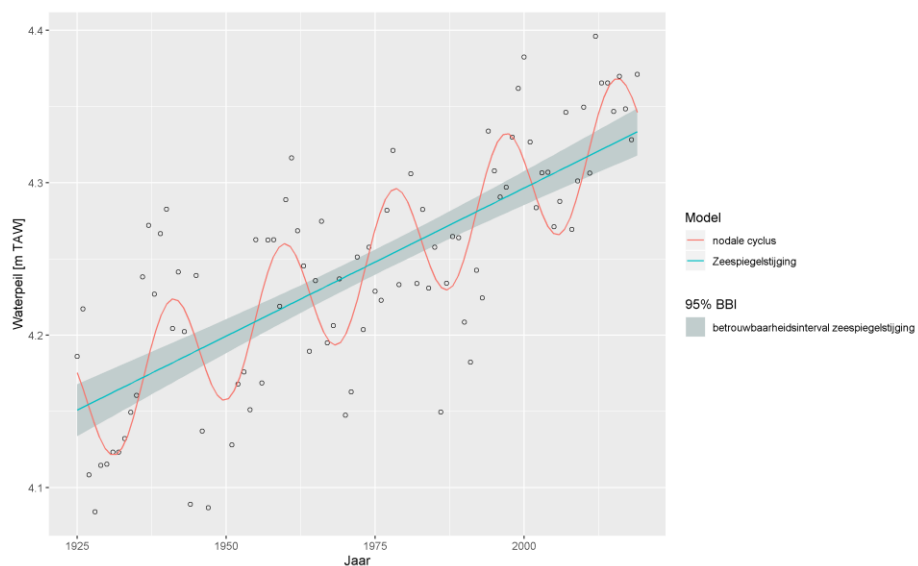
### 3.4.1.2.4 Oostende (Windluw, HW van MVB)

De resultaten van de lineaire regressiemodellering van de windopzet bevindt zich in Bijlage 2. Na het uitfilteren van de windluwe periodes, blijven nog 38% van de meetgegevens behouden. Figuur 26 presenteert het aandeel meetgegevens dat er per jaar beschikbaar is.



*Figuur 26: Staafplot van welke fractie van data weerhouden blijft per jaar indien enkel windluw in acht genomen wordt. Geen winddata beschikbaar 1948-1950. In 1980 waren er geen meetgegevens beschikbaar van het waterpeil te Oostende.*

Het resulterende model omvat een groter residu (RMSE 0.033 vs. 0.025 van de modellering op de volledige set). Deze extra ruis kan afkomstig zijn van de ongelijke verdeling van datapunten van jaar tot jaar of dat er door minder datapunten in rekening te brengen minder stabiele jaarlijkse gemiddeldes bekomen worden. Het 95% betrouwbaarheidsinterval van de stijging is **1,6 tot 2,2 mm/jaar**. We bekomen een gelijkaardige lineaire zeespiegelstijging als voorheen van **1,9 mm/jaar**. Hier wordt **geen significante versnelling** waargenomen. Door de extra ruis zal hier dan ook moeilijker een versnelling kunnen worden onderscheiden. Het valt op dat de residuen van dit model geen autocorrelatie meer vertonen. Er wordt dan ook geen autoregressieve (AR<sub>1</sub>) term meer opgenomen in het finale model. Dit doet vermoeden dat de autocorrelatie tussen waterstanden, gegeven de beschouwde variabelen, binnen een bepaalde periode verband houdt met door de wind opgestuwde watermassa's, die zich gedurende een langere periode manifesteren.



*Figuur 27 Model voor HW op Oostende van enkel windluwe periodes. Visualisatie van de invloeden van verschillende modelcomponenten.*

#### 3.4.1.2.5 Vlissingen (e.g. Baart *et al.*, 2018)

Voor de PSMSL data van Vlissingen bekomen we een **stijging in de jaargemiddelde zeespiegel van 2,1 mm/j** met een 95% betrouwbaarheidsinterval van **1,8 – 2,5 mm/j**. Dit is in overeenstemming met de conclusies van Baart *et al.* (2018).

Voor de **hoogwaters** aangeleverd door RWS, vinden we een grotere stijging van **2,4 mm/j** met een betrouwbaarheidsinterval van **2,2-2,7 mm/j**. Voor beide datasets en parameters vinden we **geen significante versnelling**.

#### 3.4.1.2.6 Hoek van Holland (e.g. Baart *et al.*, 2018)

Voor de PSMSL data van Vlissingen bekomen we een **stijging in de jaargemiddelde zeespiegel van 2,4 mm/j** met een 95% betrouwbaarheidsinterval van **2,1 – 2,6 mm/j**. Baart *et al.* (2018) vond een relatieve zeespiegelstijging van 2,3 mm/j wat dicht tegen onze inschatting aanleunt. Ook voor deze dataset kan geen versnelling waargenomen worden.

#### 3.4.1.3 Besluit Lage Resolutie

Volgende Tabel 10 vat onze resultaten m.b.t. de relatieve zeespiegelstijging op lage resolutie samen en plaatst deze in het licht van eerdere studies. Men kan volgende conclusies trekken:

1. De resultaten van onze methodiek ligt **in lijn met eerdere studies** (Van Cauwenberghe, 1999; Baart *et al.* 2018; Willems *et al.*, 2019; CREST, 2020), onafhankelijk van de toegepaste methodiek. Onze modellen wijzen op een relatieve lineaire stijging te Oostende van 1,8 mm/jaar (95% BBI: 1,5 – 2,1) van de jaargemiddelde zeespiegel en 1,9 mm/jaar (95% BBI: 1,7 – 2,1) van het jaargemiddelde HW. Men zou hieruit kunnen afleiden dat het dan ook niet nodig is om de wind mee in rekening te brengen. Echter, dit zou tot bredere onzekerheidsbanden leiden, dewelke niet gegeven worden in de studies zonder windcomponent (allen excl. Baart *et al.*, 2018). Door deze bijkomende onzekerheid zal men ook moeilijker een mogelijke versnelling kunnen waarnemen: men zal meer datapunten nodig hebben om dergelijke kleine veranderingen op te merken.
2. Door enkel de **windluwe periodes** te beschouwen, behouden we 38% van alle meetgegevens en vinden we een lineaire stijging van 1,9 mm/jaar van het jaargemiddelde HW. Een versnelling is niet significant. Het resulterende model omvat echter een groter residu (lees '**meer ruis**'), waardoor een eventuele versnelling nog lastiger te onderscheiden is. Bij het uitfilteren van de periodes waarbij de wind een – met statistisch model berekende – windopzet van 5 cm of meer veroorzaakte, zien we **geen autocorrelatie meer** in de residuen, waardoor het niet meer nodig is om een autoregressieve term op te nemen in het model. Hetgeen Baart *et al.* (2018) ook al vaststelden. Dit doet vermoeden dat de autocorrelatie tussen waterstanden binnen een bepaalde periode verband houdt met door de wind opgestuwde watermassa's, die zich langer dan één getijcyclus manifesteren.
3. Het is **noodzakelijk om de nodale getijcyclus mee in rekening te brengen**, wanneer men een uitspraak wenst te doen over een versnelling van de zeespiegelstijging. Alle studies die dit toepassen vinden geen significante versnelling in de zeespiegelstijging, zij het jaargemiddeld HW of jaargemiddelde zeespiegel. Doch, we wensen hier een lans te breken om **de windcomponent voor de volledige beschouwde periode mee in rekening te brengen**. Initieel werd namelijk louter de uurlijkse wind sinds 1951 in rekening gebracht<sup>11</sup> en voor de vroegere periode werd een correctiefactor toegekend. Dit leidde echter tot een verschillende fit van de andere termen (o.m. de lineaire en kwadratische), waardoor een

---

<sup>11</sup> Merk op dat dit overeenkomt met de aanpak in de Zeespiegelmonitor (Baart *et al.*, 2018) waarbij men windreeksen sinds 1949 opneemt in hun gefitte model.

mogelijke versnelling gemaskeerd werd. Hieruit besloten we dat er inderdaad geen significante versnelling zichtbaar was in de jaargemiddelde HW. Na toevoeging van de daggemiddelde waarden<sup>12</sup> om een langere windreeks te bekomen, steeg dan ook het significantieniveau van de kwadratische term. Deze benaderde de kritische grens van 0,05%. Met andere woorden, **op dit moment is er nog geen significante versnelling in de relatieve, jaargemiddelde HW zichtbaar**, maar mogelijk wordt deze wel zichtbaar in de nabije toekomst wanneer er meer metingen beschikbaar komen.

4. **In het jaargemiddelde LW is er geen versnelling zichtbaar.** Met zijn 1,6 mm/j (1,1 – 2,0) **LW stijgt bovendien trager dan het HW.**
5. Merk op dat bovenstaande bespreking focust op de relatieve zeespiegelstijging. §2.3 wees al uit dat de bodem minder stabiel is dan eerder aangenomen. De trend in **bodembeweging** is inderdaad kleiner dan 1mm/jaar, maar zelfs een bodemdaling van 0,24 (Vlissingen cfr. Baart *et al.*, 2018), 0,47 (Hoek van Holland cfr. Baart *et al.*, 2018) of 0,44±0,29 tot 0,70±0,30 mm/j (Oostende, SONEL) resulteert al in een aanzienlijk verschil tussen de relatieve en **absolute zeespiegelstijging**. Bovendien neemt men aan dat de bodem lineair beweegt. Door een vertragende bodemdaling zal men echter ook een vertraging in waargenomen, relatieve zeespiegelstijging observeren. De beschikbare meetgegevens zijn echter onvoldoende om een goede uitspraak te kunnen doen over de lange termijn trend in onze lokale bodembewegingen. **We adviseren meer in te zetten op onderzoek naar lokale bodembeweging.** Het is alvast overduidelijk dat men niet zomaar de lokale trend met de globale trend mag vergelijken.

---

<sup>12</sup> Een analyse op de overlappende periode weest uit dat er nauwelijks verschil zat tussen beide reeksen indien we deze aggregaerden naar de gewenste resolutie. De reeksen konden dan ook zonder enige correctie aan elkaar gekoppeld worden, wat resulteerde in een windreeks sinds de start van de metingen te Oostende.

Tabel 10: Samenvatting relatieve zeespiegelstijging op lage resolutie en vergelijking met eerdere studies

| Locatie          | Parameter                       | Data  | Studie                       | Stijging [mm/j] (95% BBI) | Versnelling [mm/j <sup>2</sup> ]  |
|------------------|---------------------------------|-------|------------------------------|---------------------------|---|
| Oostende         | Jaargemiddelde ZSP              | PSMSL | Voorliggende                 | 1,8<br>(1,5 – 2,1)        | Niet weerhouden <sup>13</sup>   |
| Oostende         | Jaargemiddelde ZSP              | PSMSL | CREST (2020)                 | 1,7                       | Vermoedelijk <sup>14</sup>  |
| Oostende         | Jaargemiddeld HW                | MVB   | Voorliggende                 | 1,9<br>(1,7 – 2,1)        | (nog) niet significant  |
| Oostende         | Jaargemiddeld HW <u>Windluw</u> | MVB   | Voorliggende                 | 1,9<br>(1,6 – 2,2)        | Nee   |
| Oostende         | HW lopend gemiddelde            | MVB   | Willems <i>et al.</i> (2019) | 2,0                       | (Nog) geen versnelling <sup>15</sup>  |
| Oostende         | Jaargemiddeld HW                | MVB   | Van Cauwenberghe (1999)      | 2,0                       | Nee   |
| Oostende         | Jaargemiddeld LW                | MVB   | Voorliggende                 | 1,6<br>(1,1-2,0)          | Nee   |
| Vlissingen       | Jaargemiddelde ZSP              | PSMSL | Voorliggende                 | 2,1<br>(1,9 – 2,2)        | Nee, eerder vertraging<br>-4,71*10 <sup>-3</sup><br>(-8,49*10 <sup>-3</sup> - 9,26*10 <sup>-4</sup> ) |
| Vlissingen       | Jaargemiddelde ZSP              | PSMSL | Baart <i>et al.</i> (2018)   | 2,1                       | Nee   |
| Vlissingen       | Jaargemiddeld HW                | RWS   | Voorliggende                 | 2,8<br>(2,5 – 3,0)        | Nee   |
| Vlissingen       | Jaargemiddeld LW                | RWS   | Voorliggende                 | 1,9<br>(1,6 – 2,1)        | Nee   |
| Hoek van Holland | Jaargemiddelde ZSP              | PSMSL | Voorliggende                 | 2,4<br>(2,1 – 2,6)        | Nee   |
| Hoek van Holland | Jaargemiddelde ZSP              | PSMSL | Baart <i>et al.</i> (2018)   | 2,3                       | Nee   |

<sup>13</sup> Deze sterke versnelling valt niet waar te nemen in de overige datasets van Oostende. Aangezien we hier minder inzicht hebben in de voorverwerking van de PSMSL data beschouwen we deze versnelling als minder betrouwbaar.

<sup>14</sup> De vermoedens zijn gebaseerd op visuele interpretatie.

<sup>15</sup> De waarnemingen van de laatste jaren (2015-2019) liggen duidelijk boven de trendlijn. Het valt af te wachten of dit patroon zich verder zet.

## 3.4.2 Hoge Resolutie

### 3.4.2.1 Inleiding

Om een betere uitspraak te kunnen doen omtrent een al-dan-niet versnellende zeespiegelstijging, werd er een bijkomende studie uitgevoerd op de zeer hoge resolutie van de door MVB aangeleverde HW meetgegevens: m.n. ieder HW wordt meegenomen zonder aggregatieslag. We verwachten namelijk dat het verschil tussen een lineaire stijging en (kwadratische) versnelling te klein is om a.d.h.v. een statistische modellering op te merken op lage resolutie. Op lage resolutie zal een mogelijke versnelling pas zichtbaar zijn indien deze al meer uitgesproken is en/of bij nog langere tijdsreeksen.

Dergelijke modellering op hoge resolutie heeft als nadeel dat men meer (kleinschalige) effecten correct moet opnemen in het statistisch model. Pijnpunten kunnen hier de juiste modellering zijn van de getijden, een preciezer inschatting van de windeffecten en een traagheidseffect van water. Op hogere resolutie wordt er namelijk met kortere tijdsintervallen gemodelleerd. Hierop zullen vertraagde effecten dan ook een grotere rol spelen. We kunnen bijvoorbeeld aannemen dat random deviaties van de verklaarde waterstand zich zullen verder zetten in de tijd aangezien watermassa's zich niet instantaan verplaatsen. We verwachten dus dat er grotere autocorrelaties zullen optreden in de residuen.

### 3.4.2.2 Modelopbouw

De basis is dezelfde als bij de lage resolutie, maar er worden verklarende variabelen toegevoegd om de getijwerking, de windeffecten en traagheid van het water beter in rekening te brengen. Ons onderzoek wees uit dat de ARMA residu modellering, het best deze traagheidseffecten kan weergeven. De hoogwaterstand wordt dan gemodelleerd aan de hand van een intercept, een lineaire trend, een eventuele kwadratische component, getij-modellering, nodale cyclus, windeffecten en een ARMA residu:

$$HW(t) = a + b_{trend}(t) + b_{versnelling}(t^2) + b_{getij}(\text{hoge resolutie getijcomponenten}) + b_{nodale}(\text{nodalecyclus}) + b_{wind}(\text{wind}) + ARMA$$

De modellering van de hoge resolutie getijcomponenten is doorgevoerd aan de hand van de Rpackage *Tideharmonics* dewelke meer dan 400 bekende getijcyclussen fit aan de data. De kwaliteit van deze getijmodellering is onderzocht door eerst een fit uit te voeren op data van vóór 2010 en te evalueren hoe goed deze het getij voorspeld na 2010 via een *test train split*. Een hoge correlatie tussen de voorspelde en gegeven waterstanden en een RMSE die consistent bleef tussen train en test set, deed ons besluiten dat dit een geschikte methode was.

We opteerden er echter voor om de 18,6-jarige nodale cyclus zelf te fitten. Dit omdat de *Tideharmonics* package, het astronomisch getij elk jaar corrigeert ten opzichte van de waargenomen data en bijgevolg ook de zeespiegel-trend vervat – wat nefast is voor onze studie. Daarom werd de nodale cyclus apart gefit, net als in §3.4.

Een ARMA model wordt gemodelleerd met behulp van de Arima package in R. Hierbij worden zowel de coëfficiënten van de verklarende variabelen als een ARMA residu ingeschat in de regressie doormiddel van 'maximum likelihood estimation'.

Het nulpunt van de versnelling wordt genomen op 1-1-1970 00:00:00 om multicollineariteit te vermijden. Dit heeft geen impact op de analyse of een versnelling (positieve curve) significant is, maar men dient hier wel rekening mee te houden bij een eventuele extrapolatie (§3.4.2.3).



Volgende analyses zijn uitgevoerd op het HW te Oostende om beter zicht te krijgen op de robuustheid van de conclusies:

- Een gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd om na te gaan of het beschouwde tijdsvenster een effect kan hebben op de conclusies. Hiervoor wordt er telkens een nieuw model gefit voor een kortere tijdreeks.
- Een **stuksgewijs lineaire regressie** is uitgevoerd door verschillende breekpunten in beschouwing te nemen. Een significant positief verschil tussen de zeespiegelstijging voor en na een breekpunt kan dan een indicatie zijn van versnelling. Er zijn meerdere regressies uitgevoerd met alle variabelen en telkens met een nieuw breekpunt. Een set aan jaartallen is beschouwd als breekpunten die ongeveer op dezelfde hoogte in de nodale cyclus zitten en niet te dicht tegen de uiteinden van de tijdreeks zitten.

### 3.4.2.3 Methode informatieve extrapolatie naar toekomstig jaar

Om een predictie uit te voeren naar 2100, wordt enkel de algemene trend in rekening gebracht: lineair en/of kwadratisch. De predictie betreft dus enkel de onderliggende zeespiegelstijging en houdt geen rekening met wind, de nodale of andere getijcycli. Verder maken we in deze studie ook de assumptie dat de onderliggende fysica en condities gelijkaardig of stationair blijven.

Indien men voor een bepaald tijdstip de onderliggende gemiddelde zeespiegelstand wil inschatten kan men gebruik maken van onderstaande formule:

$$H(t) = \alpha + b_{\text{trend}}(t - t_{\text{nulpunt}}) + b_{\text{versnelling}}(t - t_{\text{nulpunt}})^2$$

Waar  $\alpha$ ,  $b_{\text{trend}}$  en eventueel  $b_{\text{versnelling}}$  coëfficiënten uit het model zijn gerelateerd aan respectievelijk het intercept, lineaire trend en de versnelling.

Indien men het verschil tussen 2 tijdstippen wil achterhalen, neemt men het verschil van deze 2 ingeschatte waterhoogten. De term  $\alpha$  valt dan weg in de formule.

### 3.4.2.4 Resultaten Hoge Resolutie

#### 3.4.2.4.1 Oostende (HW)

##### Algemene Trend

We analyseerden zowel een lineair als kwadratisch model (Figuur 28). Het lineaire model geeft een zeespiegelstijging van 2 mm/j (95% BBI 1,9 – 2,1 mm/j). Op hoge resolutie is de versnellingscomponent significant en resulteert dit ook in een betere AIC. Dit impliceert dat de toegepaste methode op de beschouwde meetgegevens een versnelling in de zeespiegelstijging vertoont. Deze versnelling wordt geschat op 0,012 mm/j<sup>2</sup> (95% BBI 0,009 tot 0,023 mm/j<sup>2</sup>).

Hieronder worden de formules om waterstanden in te schatten op jaartal  $t$  weergegeven. Dit wordt – louter informatief – aangewend om te berekenen wat het verschil tussen 2020 en 2100 met zich mee zou brengen indien eenzelfde trend zich voortzet. Zie ook §0 voor meer uitleg m.b.t. de berekeningswijze. Merk op: men moet dergelijke inschattingen met voldoende voorzichtigheid behandelen, gezien het onwaarschijnlijk is dat er in de toekomst zich bv. eenzelfde (ijskap)dynamiek zal manifesteren. Ook geven we hier de betrouwbaarheidsintervallen op de berekende trend. Indien men waterstanden wil extrapoleren dient men de predictie intervallen te hanteren, maar door de opzet van het model, hebben we hiervoor een continue meetreeks nodig met zowel de toekomstige getijwerking als de toekomstige wind.

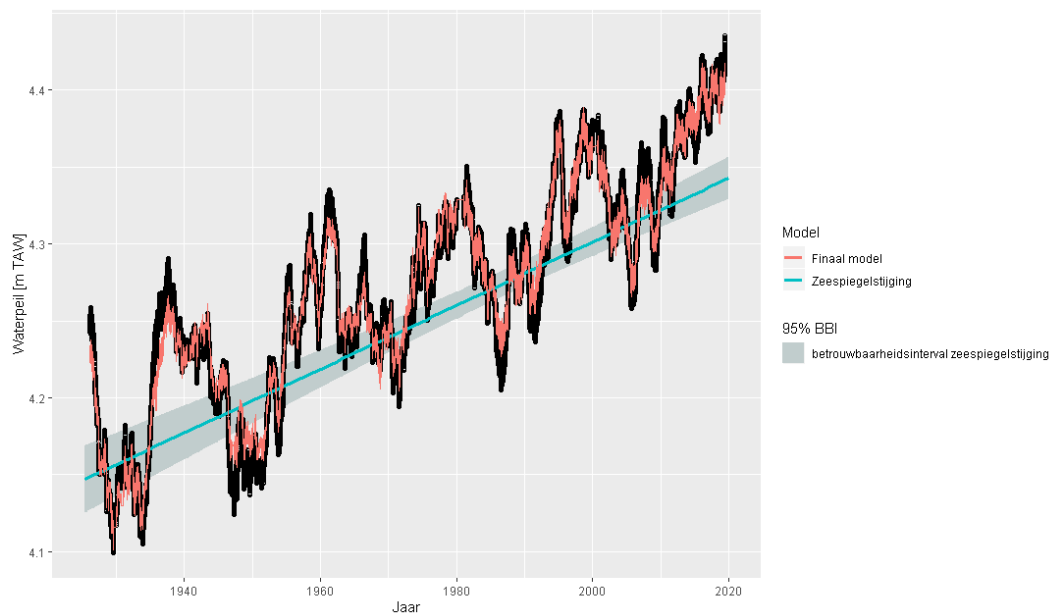
1. **Lineair model [m]:**

- $H(t) = 4,239257 + 0,002065*t$
- Verschil tussen 2020 en 2100:  $0,002065m/j*80j = 0,165m$ . Het 95% betrouwbaarheidsinterval<sup>16</sup> beslaat 0,14m t.e.m. 0,19m en het 99% beslaat 0,12m t.e.m. 0,21m.

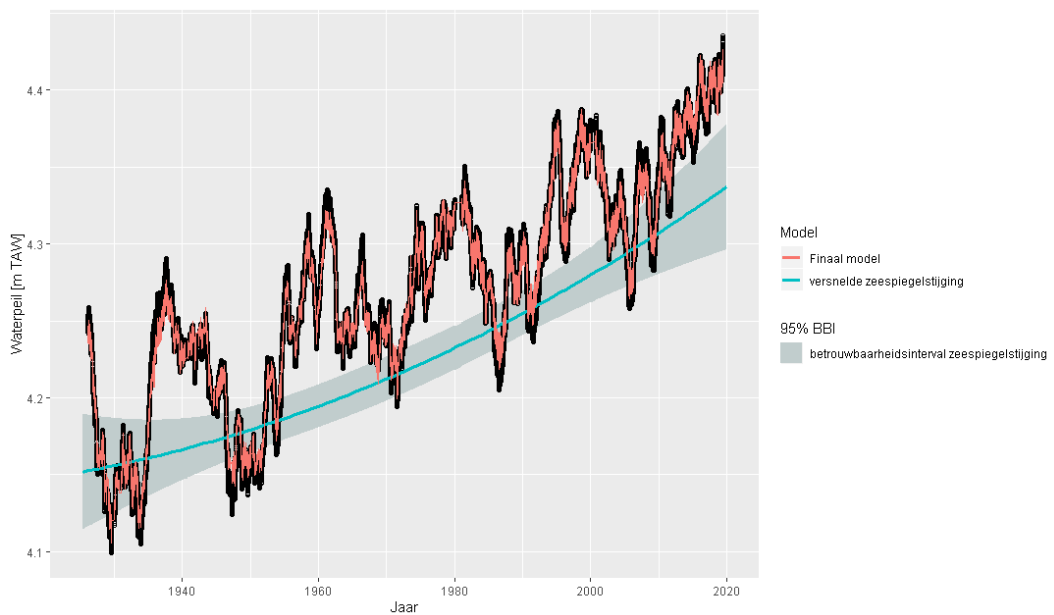
2. **Kwadratisch model [m]:**

- $H(t) = 4,212197 + 0,00189*t + 0,000012*t^2$
- Met nulpunt 1970
- Verschil 2020 en 2100:  $0,00189m/j*80j + 0,000012*((2100-1970)^2-(2020-1970)^2) = 0,32m$ . Het 95% betrouwbaarheidsinterval beslaat 0,08m t.e.m. 0,57m en het 99% beslaat -0,03m t.e.m. 0,68m.

De macht die gebruikt is in de bovenstaande vergelijking – een tweede macht voor de kwadratische term – wordt traditioneel gebruikt vanwege haar gemakkelijke interpretatie m.b.t. de toegenomen stijging per jaar (versnelling). Echter, dit is geenszins de enige juist macht en andere modellen kunnen beter zijn. Om deze reden is er geëxperimenteerd met andere machten, met name: 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, en 2.25. Deze gevoeligheidsanalyse leverde echter – gegeven de data en gehanteerde model – **geen bewijs om de ene macht over de andere te verkiezen**. Hoewel alle machten (behalve 2.25) duidelijk significant zijn en er goed bewijs is voor een superlineaire relatie, kunnen we de juiste macht niet onderscheiden op basis van deze data. We merken op dat dit **aanzienlijke gevolgen** kan hebben **voor onzekerheden en bijgevolg de extrapolatie**, welke in het geval van een machtsvergelijking met de uiterste zorg geïnterpreteerd dient te worden



<sup>16</sup> De betrouwbaarheidsintervallen worden ingeschat aan de hand van de coëfficiënten en variantie-covariantie matrix van de trend variabelen (intercept, lineaire en eventueel kwadratische term) binnen het model. De f-distributie wordt gebruikt voor de probabiliteitspercentielen te berekenen.

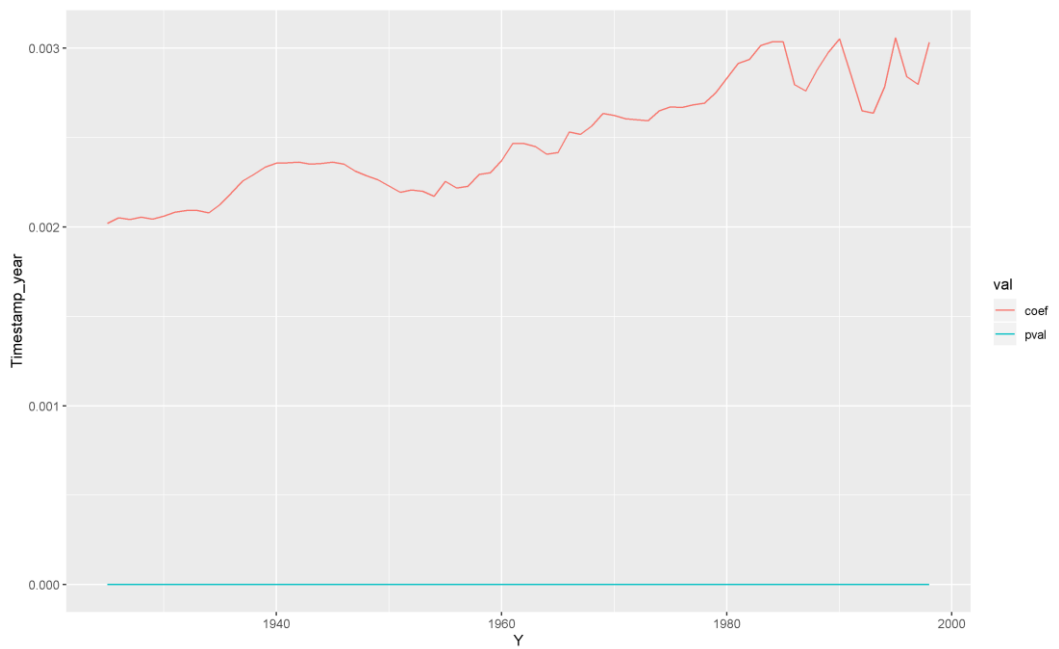


*Figuur 28: Visualisatie van het lineair (BOVEN) en kwadratisch (ONDER) model te Oostende. Onderliggende trend en finale inschatting van de hoogwaterstand worden weergegeven. Merk op voor visualisatiedoeleinden werd hier een lopend gemiddelde met periode van 1 jaar toegepast op zowel waarnemingen als model. Merk op voor visualisatiedoeleinden werd hier een lopend gemiddelde met periode van 1 jaar toegepast op zowel waarnemingen als model.*

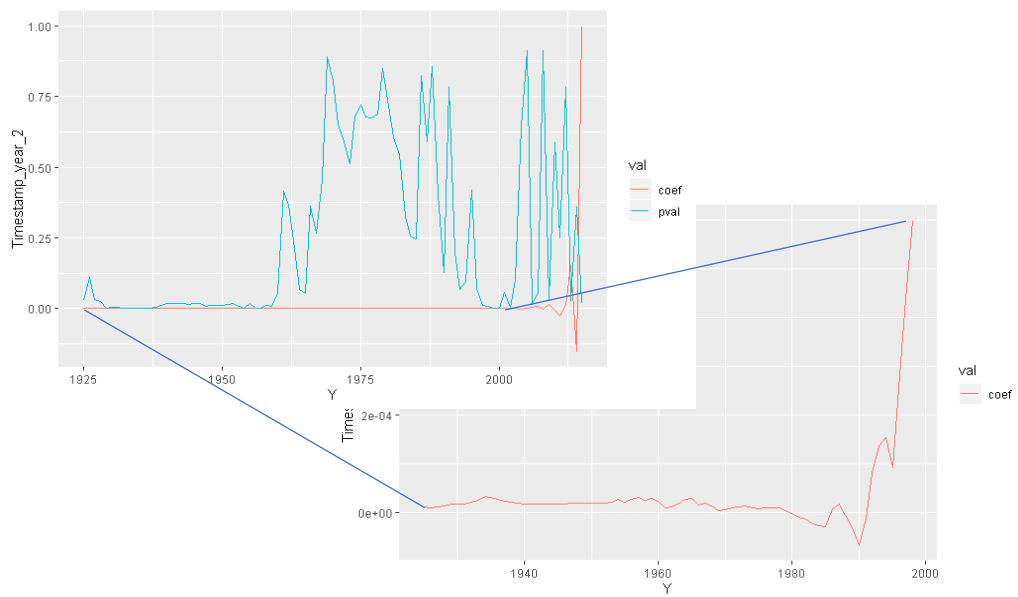
### Gevoeligheidsanalyse beschouwde periode

Als we op beide modellen een voorwaartse gevoeligheidsanalyse uitvoeren op de gehanteerde tijdsperiode, blijken de conclusies robuust. Er werd zowel een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op de lineaire coëfficiënt als op de kwadratische coëfficiënt op HW resolutie. De lineaire coëfficiënt blijft steeds positief (Figuur 29). We zien dat de waarde van de zeespiegelstijging verhoogt, naarmate de beschouwde tijdsreeks korter – en recenter – wordt. Dit kan duiden op een versnelling van de zeespiegelstijging.

Voor de gevoeligheidsanalyse op de kwadratische stijging (Figuur 30) bekomen we een ander resultaat dan op jaarresolutie. Hier is er een langere stabiele positieve versnelling waarneembaar met steeds kortere tijdseries in beschouwing: dit tot een minimale tijdreeks van 1960-2019. Er is dus nog steeds een voldoende lange tijdreeks nodig om dergelijke versnellingsterm te detecteren (minstens vanaf 1960).



Figuur 29: gevoeligheid lineaire coëfficiënt Oostende HW HD. Selectie tot 1999 voor significantie.

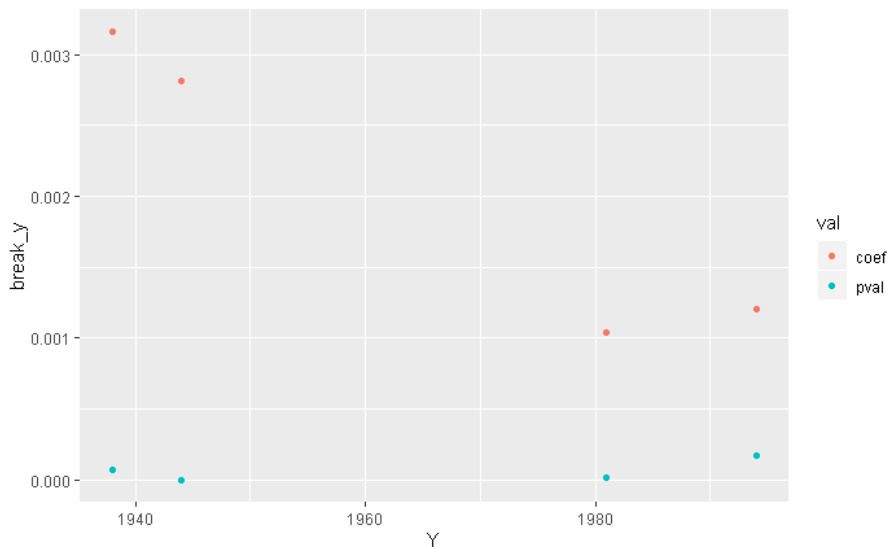


Figuur 30: Gevoeligheidsanalyse Oostende HW HD versnellingscoëfficiënt

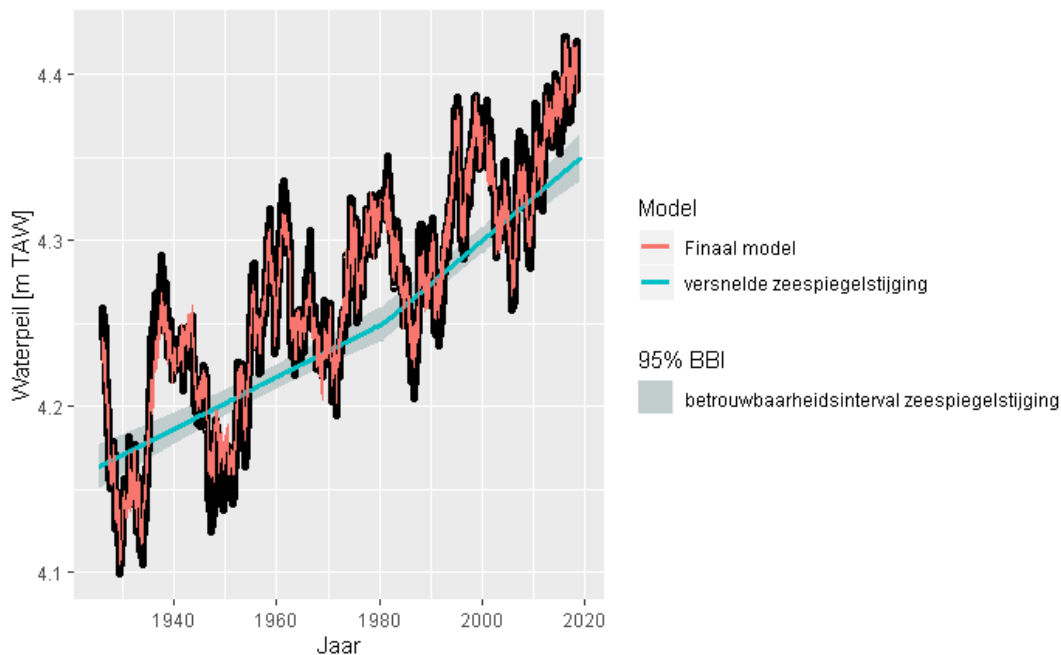
### Stuksgewijs lineaire regressie

Bij het plaatsen van een breekpunt op specifieke, vaste punten doorheen de nodale cyclus, vertoont de meest recente periode steeds een snellere zeespiegelstijging dan voorheen (Figuur 31). Alle geïdentificeerde trendbreuken zijn significant. Figuur 32 visualiseert de stuksgewijze lineaire regressie wanneer men het breekpunt in 1981 plaatst.

Dit alles wijst op versnelling in de zeespiegelstijging en bevestigt het besluit omtrent het opnemen van een kwadratische term (zie Algemene Trend).



Figuur 31: Coëfficiënten en bijhorende p-val van enkele breekpunten in een stuksgewijs lineair model met ARMA residu. Data Oostende hoge resolutie HW.

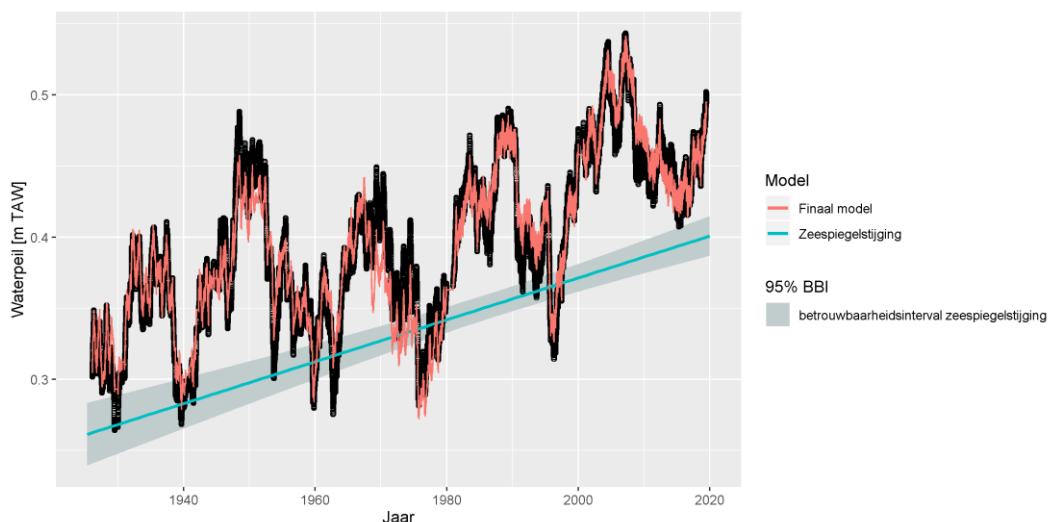


Figuur 32: Stuksgewijs lineair regressiemodel voor het HW te Oostende bij hoge resolutie met breekpunt in 1981.

### 3.4.2.4.2 Oostende (LW)

De analyse op de hoge resolutie LW te Oostende wijst op een lineaire zeespiegelstijging van **1.5 mm/j** bekomen (95% BBI 1.3-1.7 mm/j). De kwadratische term is niet significant. Het LW vertoont bijgevolg geen versnelling. Het finale model is dan:

- $H(t) = 0,32718 + 0.001473 \cdot t$
- Verschil tussen 2020 en 2100:  $0.001473 \text{ m/j} \cdot 80 \text{ j} = 0,118 \text{ m}$ . Het 95% betrouwbaarheidsinterval beslaat 0,09m t.e.m. 0,14m en het 99% beslaat 0,08m t.e.m. 0,16m.



*Figuur 33: Visualisatie Lineair LW model Oostende HD. Merk op voor visualisatiedoeleinden werd hier een lopend gemiddelde met periode van 1 jaar toegepast op zowel waarnemingen als model.*

### 3.4.2.4.3 Vlissingen (HW)

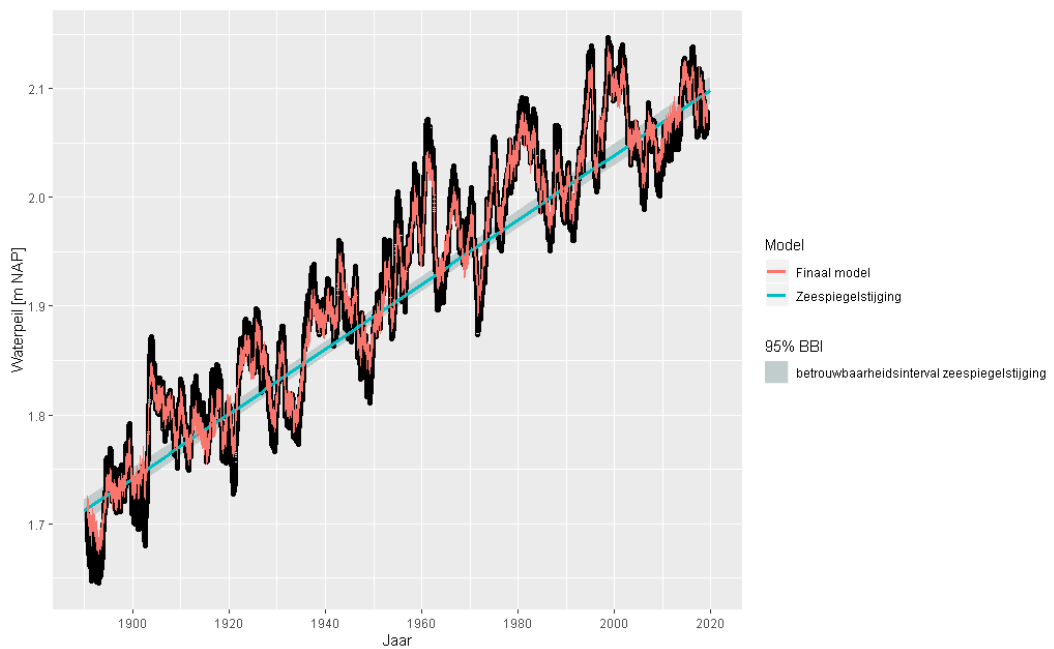
De ruw aangeleverde HW- metingen van Vlissingen omvatten een aantal artificiële sprongen:

- De herinmeting van de NAP nulpalen in 2005 met een plotse sprong van -2,97 cm.
- Onze data-analyse wijst op een significante sprong in 2015, bij de overgang tussen 2 aangeleverde datasets. Hierover wordt geen melding gemaakt in de aangeleverde metadata, noch in de geraadpleegde literatuur. Mogelijk houdt dit verband met de door SONEL (NGL14) gevonden trendbreuk in bodembeweging (zie Figuur 6).

Voor (de combinatie van) beide sprongen werd een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd en bekomen we eenzelfde besluit: We kunnen **geen significante versnelling** waarnemen in de dataset. Onderstaande Tabel 11 geeft de resulterende lineaire trend voor alle opties.

*Tabel 11: Resultaat zeespiegelstijging hoge resolutie trendanalyse Vlissingen HW.*

|   | Waargenomen sprong in 2015 gecorrigeerd | Waargenomen sprong in 2015 niet gecorrigeerd |
|---|---|--|
| <b>Met sprong herinmeting nulpalen</b>    | 3.0 mm/j<br>(95% BBI 2,9-3,0 mm/j)      | 2,9 mm/j<br>(95% BBI 2,8-3,0 mm/j)           |
| <b>Zonder sprong herinmeting nulpalen</b> | 3.1 mm/j<br>(95% BBI 3.0-3.2 mm/j)      | 3.0 mm/j<br>(95% BBI 3,0-3,1 mm/j)           |



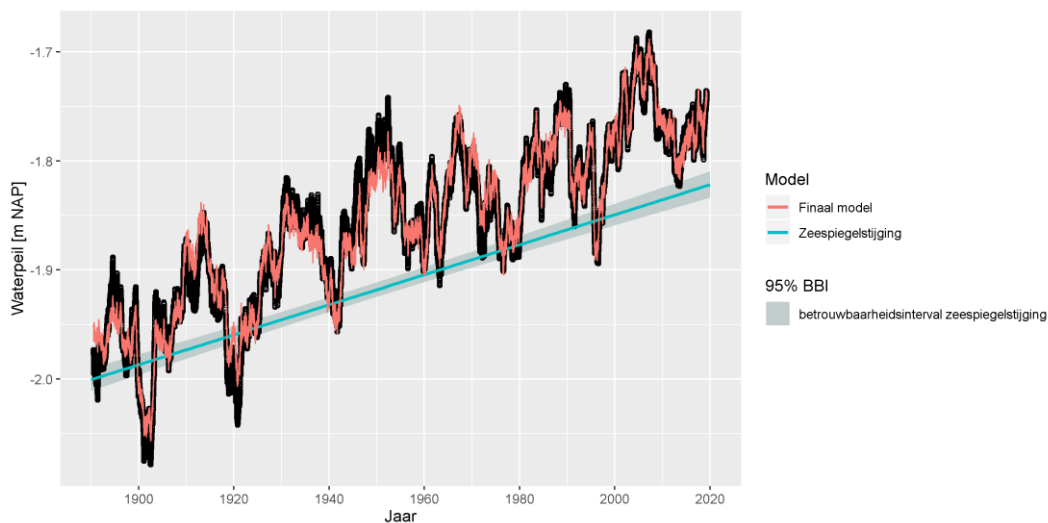
Figuur 34: Visualisatie van het lineair model te Vlissingen. Merk op voor visualisatiedoeleinden werd hier een lopend gemiddelde met periode van 1 jaar toegepast op zowel waarnemingen als model.

#### 3.4.2.4.4 Vlissingen (LW)

Het gefitte model op de hoge resolutie laagwaters te Vlissingen vertoont een tragere stijging als het hoogwater. Ook hier werd geen versnelling waargenomen.

Tabel 12: Resultaat zeespiegelstijging hoge resolutie trendanalyse Vlissingen LW.

|   | Waargenomen sprong in 2015 gecorrigeerd                                 | Waargenomen sprong in 2015 niet gecorrigeerd                            |
|---|---|---|
| <b>Met sprong herinmeting nulpalen</b>    | 1.2 mm/j<br>(95% BBI 1-1.3 mm/j)<br>9 cm (95% BBI 6-12cm) hoger 2100    | 1.2 mm/j<br>(95% BBI 1-1.3 mm/j)<br>9 cm (95% BBI 7-12cm) hoger 2100    |
| <b>Zonder sprong herinmeting nulpalen</b> | 1.4 mm/j<br>(95% BBI 1.3-1.4 mm/j)<br>11 cm (95% BBI 9-13cm) hoger 2100 | 1.4 mm/j<br>(95% BBI 1.3-1.4 mm/j)<br>11 cm (95% BBI 9-13cm) hoger 2100 |



Figuur 35: Vlissingen LW modelvisualisatie HD.

#### 3.4.2.5 Besluit Hoge Resolutie

Op hoge resolutie neemt de gehanteerde methode een significante versnelling van de stijging in de relatieve hoogwaters waar te Oostende in de periode 1925-2019. Deze versnelling is echter niet te zien in Vlissingen. Merk op dat we hier de relatieve zeespiegel analyseren, niet de eustatische. Een mogelijke verklaring voor het waargenomen verschil is een langjarige trend in de bodemdaling, die hier nog niet in rekening werd gebracht. Als hierin bijvoorbeeld ten gevolge van een vertragende compactie, een vertraging van de bodemdaling zou voordoen in Vlissingen, kan dit een eventuele versnelling maskeren.

Ook op hoge resolutie vertonen de relatieve laagwaters geen versnelling in beide locaties. Bovendien vertonen die een lagere lineaire trend dan de hoogwaters.



### 3.5 Besluit Zeespiegelstijging voor de Kust

De **ontwikkelde methode** laat toe om, op een statistisch correcte wijze, alle belangrijke covariaten in rekening te brengen bij de trendanalyse op het waargenomen waterpeil: de relevante getijcyclus, de wind en correcties voor wijzigingen in meetmethode of niet-normaal verdeelde residuen. Dit laatste is belangrijk om statistisch correcte betrouwbaarheidsintervallen te bekomen en zo inzicht te kunnen geven in de onzekerheidsband op de gemodelleerde zeespiegelstijging. Merk op hoe luchtdruk, saliniteit of watertemperatuur ook een invloed kunnen hebben op het gemeten waterpeil, maar we deze hier niet in rekening konden brengen doordat er geen voldoende lange meetreeks beschikbaar is.

Door louter **windluwe periodes** te beschouwen, verandert de bekomen trend nauwelijks maar vergroot de ruis en bijgevolg onzekerheid op de trendanalyse. Gezien dit nefast is voor het onderscheiden van kleine wijzigingen, e.g. een eventuele versnelling in de zeespiegel, wordt deze methode afgeraden voor verdere trendanalyses. Het is beter om de windopzet in rekening te brengen door de wind mee te nemen als covariaat in de vergelijking. Het was wel interessant om te zien dat het uitfilteren van niet-windluwe periodes resulteerde in het verdwijnen van de autocorrelatie in de residuen. Iets wat Baart *et al.* (2018) ook al vaststelden. Dit bevestigt het vermoeden dat de autocorrelatie tussen waterstanden binnen een bepaalde periode verband houdt met door de wind opgestuwde watermassa's. Waarom er dan mogelijke autocorrelatie bestaat tussen de windopzet van opeenvolgende jaren, is voer voor toekomstig onderzoek. Meteorologische fenomenen zoals de Noord-Atlantische Oscillatie lijken ons een goed startpunt.

Op **jaargemiddelde resolutie** bekomen we steeds – voor alle parameters (gemiddelde zeespiegel, HW of LW) en datasets (RWS, MVB of PSMSL) – een gelijkaardige lineaire trend als voorgaande studies: de eerder gerapporteerde trends vallen steeds binnen het bekomen betrouwbaarheidsinterval. Dit benadrukt dat men enkel trendanalyses kan vergelijken indien men op dezelfde parameter en/of dataset werkt. Onze analyse wijst uit dat het HW sneller stijgt dan het LW, terwijl de relatieve zeespiegel sneller stijgt in Vlissingen dan in Oostende (Tabel 13). **In geen enkel model was de versnelling duidelijk significant.** Doch, we dienen hier de kanttekening bij te maken dat de versnellingsterm in het HW te Oostende net niet significant was eens we de wind voor de volledige tijdsreeks in rekening brachten. Bovendien laat ook de gevoeligheidsanalyse op de beschouwde periode een versnelling uitschijnen. De analyse op een stuksgewijs lineaire regressie geeft echter geen uitsluitsel. Hieruit kunnen we het volgende besluiten:

1. Bij de trendanalyse op jaarresolutie kunnen we (nog?) geen uitsluitsel geven over een eventuele versnelling in het HW te Oostende. Hiervoor dienen we meer meetpunten tot onze beschikking te hebben: toekomstige metingen of overschakelen op een hogere resolutie.
2. Het is cruciaal om een windreeks ter beschikking te hebben die de volledige beschouwde periode overspant. Zo niet, kan dit leiden tot een verkeerde fit van de andere termen zoals de lineaire en/of kwadratische term), waardoor een mogelijke versnelling gemaskeerd wordt. Dit was het geval bij onze initiële methodiek die quasi overeenstemt met de Zeespiegelmonitor Baart *et al.* (2018).

Tabel 13: Resultaat Lage Resolutie: gemodelleerde relatieve zeespiegelstijging [mm/j] en bijhorende 95% betrouwbaarheidsintervallen.

| Parameter (dataset)        | Oostende             | Vlissingen      |
|----------------------------|----------------------|-----------------|
| Jaargemiddeld HW (MVB/RWS) | 1,9 (1,7 – 2,1)      | 2,8 (2,5 – 3,0) |
| Jaargemiddelde ZSP (PSMSL) | 1,8 (1,5 t.e.m. 2,1) | 2,1 (1,9 – 2,2) |
| Jaargemiddeld LW (MVB/RWS) | 1,6 (1,1-2,0)        | 1,9 (1,6 – 2,1) |

Op **hogere resolutie** vertoont het model wel een **significante versnelling** van 0,012 (0,009 – 0,023) mm/j<sup>2</sup> in het **HW te Oostende**. Het LW vertoont geen versnelling. Door de data op hogere resolutie te beschouwen beschikken we namelijk over meer gegevens en kunnen we bijgevolg subtielere effecten onderscheiden. Hiervoor dient men er zicht wel van te vergewissen dat (a) alle andere effecten tot en met de beschouwde (kleine) grootteorde al correct opgenomen zijn in het model en (b) er een fysische basis is voor het aannemen van het effect van de variabele. In deze studie werd hiervoor een robuuste methode ontwikkeld. De formules van de individuele modellen inclusief doorrekening naar 2100, zijn terug te vinden in §3.4.2.4.

Echter dergelijke **versnelling is niet te zien in het HW te Vlissingen**, ook niet op hoge resolutie. De lokale bodembeweging zou – een deel van – dit verschil kunnen verklaren. We analyseren hier namelijk de relatieve waterstand, zoals waargenomen op het land. De trend in **bodembeweging** is, zoals steeds aangenomen, inderdaad kleiner dan 1mm/jaar (§2.3), maar zelfs een bodemdaling van 0,24 mm/j (Vlissingen cf. Baart *et al.*, 2018 of 0,44±0,29 tot 0,70±0,30 mm/j (Oostende, SONEL) resulteert al in een aanzienlijk verschil tussen de relatieve en absolute zeespiegelstijging. De beschikbare meetgegevens zijn echter onvoldoende om een goede uitspraak te kunnen doen over de lange termijn trend in onze lokale bodembewegingen. We adviseren meer in te zetten op onderzoek naar lokale bodembeweging. Een vertragende compactie – met vertraging van de bodemdaling als gevolg – kan bijvoorbeeld een eventuele versnelling maskeren. Het is in alle geval overduidelijk dat men niet zomaar de lokale met de globale trend mag vergelijken.

Baart *et al.* (2012) gaven al aan dat het belangrijk is om de nodale getijcyclus in rekening te brengen indien men zich wenst uit te spreken over regionale of lokale zeespiegel trends. In de Zeespiegelmonitor (Baart *et al.*, 2018) vulden ze dit aan met het effect van de wind en een mogelijk autocorrelatie voor niet-normaal verdeelde residuen. Hier besluiten we dat voor onderzoek op een eventuele versnelling in de waargenomen, relatieve zeespiegelstijging, het bovendien ook belangrijk is om (a) de wind voor de volledige beschouwde periode in acht te kunnen nemen en (b) het aangeraden is op hoge resolutie te werken i.p.v. te aggregeren naar jaargemiddelden. Indien men dan ook de lokale waarnemingen wenst te vergelijken met deze op andere locaties of met de globale trend, dient men zeker ook de lokale bodembeweging mee in rekening te brengen om zo de **absolute zeespiegelstijging** te kunnen bepalen.

## 4 Impact van Ingrepen in het Estuarium

### 4.1 Inleiding

In deze deelstudie gaan we dieper in op de tweede onderzoeksvraag: *Kan men de impact van menselijke ingrepen in het estuarium beter onderzoeken door de factor ‘wind’ uit te filteren?*

Het onderzoek op de Zeespiegelstijging voor de Kust, leerde ons al dat:

1. Er zicht te Vlissingen een lineaire relatieve zeespiegelstijging manifesteerde – ook indien we op hoge resolutie naar de data kijken.
2. Door enkel windluwe periodes in acht te nemen, zal het resulterende model een groter residu omvatten. Dit is nefast voor de vooropgestelde impactanalyse, gezien deze ruis het effect van ingrepen kan maskeren. Er is daarom besloten om een gelijkaardige aanpak als in §3 te volgen: het opnemen van de wind – en andere covariaten – in een statistisch model. Dit zal ons toelaten om alle variatie waarin we niet geïnteresseerd zijn, te verklaren en te focussen op de onderliggende trend(wijzigingen) ten gevolge van ingrepen.

We bespreken eerst de belangrijkste eerdere studies (§4.2). Daarna wordt de dataverwerking voor deze deelstudie beschreven in §4.3. In de Verkenning van de data (§4.4) leren we de noodzaak van een statistische, objectieve aanpak om trendwijzigingen aan ingrepen te kunnen toekennen. Hoofdstuk §4.5 behandelt de studie naar een geschikte methode en vat deze samen. De eigenlijke resultaten staan gepresenteerd in §4.6 en worden samengevat in §4.7.

### 4.2 Literatuurstudie

Volgende hoofdstukken behandelen een aantal eerdere studies die de impact van ingrepen op de hydrodynamica van het Schelde-estuarium onderzochten.

#### 4.2.1 Van Braeckel *et al.* (2012)

Het doel van Van Braeckel *et al.* (2012) was vooropgestelde ingreep-effect relaties beter te kwantificeren met behulp van verdere getij-analyses en numerieke modelleringen. Hun doel is om de relatieve bijdrage van rechttrekkingen, debietwijzigingen van de bovenafvoer, inpolderingen, verruiming, zandwinning en de algemene zeespiegelstijging op de getij-indringing in het Schelde-estuarium te bepalen. Het resultaat is dus niet echt een reconstructie van het verleden maar eerder een ‘hindcast’ vanuit het heden.

Volgende hoofdstukken vatten hun besluit per ingreep-effect relaties samen. Hun bevindingen met betrekking tot de historische evolutie wordt overgenomen in §4.2.1.7. Onderstaande tabel vat dit samen. Vergelijkend stelt Van Braeckel *et al.* (2012):

- GHW wordt voornamelijk beïnvloed door rechttrekking, inpoldering, wijzigingen bovenafvoer, zandwinning en zeespiegelstijging
- GLW wordt voornamelijk beïnvloed door rechttrekking, wijzigingen bovenafvoer, zandwinning, verruiming en zeespiegelstijging
- Rechttrekkingen hebben een groter effect op het tijverschil dan het wegvallen van de bovenafvoer.
- Het effect varieert naargelang de aard en relatieve grootte van de ingreep.

Tabel 14: Overzicht theoretische impact ingrepen op hoog- en laagwater, getijverschil obv. simulatieresultaten en gegevens uit literatuur (LINKS) en bijhorende legende (RECHTS). (Bron: Van Braeckel et al., 2012)

| Symbool | Invloedszone                              | Grootte effect (cm) HW/LW/TV | Ingrep   | Getij |      |               |
|---------|---|------------------------------|--|-------|------|---------------|
|         |   |                              |  | HW    | LW   | Getijverschil |
| ↑↓      | Lokaal, ter hoogte van de ingrep (<10 km) | 0-5                          | <b>Rechtstrekking</b><br>-Opwaarts<br>-Ingrep<br>-Afwaarts   | ↗+    | ↘+++ | ↗++++++       |
|         |   | 10                           |  | +     | ↑+   | ↑+            |
| +       |   | 20                           |  | ↗     | ↘++  | ↗+++          |
| ++      |   | 30                           |  | ↘     |      |               |
| +++     |   | 40                           |  |       |      |               |
| ++++    |   | 50                           |  |       |      |               |
| +++++   |   | 60                           |  |       |      |               |
| +++++   |   | 70                           |  |       |      |               |
| +++++   |   | 80                           |  |       |      |               |
| +++++   |   | 90                           |  |       |      |               |
| ↘↗      | Regionaal (<50 km)                        | 0-5                          | <b>Antropogene ingrepen</b><br><b>Inpoldering</b><br>-Braakman<br>-Nieuw-Westland<br>-Tielrodebroek<br>-Groot Schoor<br>-Bergenmeersen<br>-Vliet | ↑     | ↑+   | ↑             |
| ↘↗      |   | 10                           |  |       |      |               |
| ↘↗+     |   | 20                           |  |       |      |               |
| ↘↗++    |   | 30                           |  |       |      |               |
| ↘↗+++   |   | 40                           |  |       |      |               |
| ↘↗++++  |   | 50                           |  |       |      |               |
| ↑↓      | Heel estuarium                            | 0-5                          | <b>Verruiming vaargeul</b><br>-zonder terugstorten<br>-met terugstorten  | -     | ↘    | ↗             |
| ↑↓+     |   | 10                           |  |       |      |               |
| ↑↓++    |   | 20                           |  |       |      |               |
| ↑↓      |   | 60                           |  |       |      |               |
| -       |   | Geen effect                  | <b>Zandwinning<sup>d</sup></b>   | -     | -    | -             |

#### 4.2.1.1 Rechtstrekkingen

Het riviertraject wordt ingekort; niet alleen wordt hierbij habitat vernietigd, het resterende riviertraject verliest ook morfologische diversiteit. Door de rechtstrekking vermindert de ruwheid van de rivier – de getijgolf ondervindt minder obstakels om het estuarium binnen te dringen – waardoor de getijgolf ter hoogte van de rechtstrekking nog gemakkelijker kan doordringen. Opwaarts van de ingrep wordt het grootste effect ondervonden van de verlaagde ruwheid: **Het getijverschil en hydraulisch vermogen stroomopwaarts van de rechtstrekking nemen toe met hoogwaters die sterker stijgen en laagwaters die sterker dalen – resulterend in een groter getijverschil.** Ter hoogte van de rechtstrekking nemen sedimentafzettingen toe. **Zowel opwaarts, als ter hoogte van de rechtstrekking neemt de getijsymmetrie toe.**

**Afwaarts neemt het hydraulisch vermogen af met daling van de hoogwaters en stijging van de laagwaters tot gevolg.** Door de zeer beperkte zijdelingse ruimte met haast continue breuksteenverharding zorgde toename van het getijverschil in de Boven-Zeeschelde niet voor uitbreiding van slik- en schorareaal. De grotere procentuele volumewijzigingen in de Durme en het haast volkomen gebrek aan bovenafvoer verklaren mogelijks waarom de Durme wel en de Boven-Zeeschelde niet of minder te kampen heeft met sedimentatieproblematiek. Onderstaande Tabel 15 geeft het resultaat van een numerieke simulatie.

Tabel 15: Overzicht voorspeld direct effect hoog- en laagwater voor scenario met rechtstrekkingen t.o.v. scenario met bochten (Bron: Van Braeckel et al., 2012, naar Coen et al., 2010)

| Locatie     | Hoogwater               | Laagwater               | Getijverschil          |
|-------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| St-Amands   | Geen effect (<1cm)      | Geringe toename (1-5cm) | Geringe afname         |
| Dendermonde | Geringe afname          | Geringe toename         | Kleine afname (5-10cm) |
| Uitbergen   | Kleine toename (5-10cm) | Grote afname (>25cm)    | Grote toename (>25cm)  |
| Melle       | Grote toename           | Grote afname            | Grote toename          |

#### 4.2.1.2 Bovenafvoerverlaging

Door verlaging van de bovenafvoer kunnen zich twee effecten voordoen. Enerzijds kan de debietsvermindering van opwaarts zorgen voor lagere waterstanden, anderzijds kan een verlaging van de bovenafvoer het getij verder laten doordringen wat zich uit in een stijging van het getijverschil. Onderstaande Tabel 16 geeft het resultaat van een numerieke simulatie. Het opleggen van een lager bovendebiet aan de opwaartse rand van het model in Merelbeke **zorgt voor een daling van zowel de hoog- als laagwaters**. Hierbij is de daling van de laagwaters dubbel zo groot als deze van de hoogwaters, er is dus een **stijging van het getijverschil**. De **getijsymmetrie wordt kleiner**. Aan de opwaartse rand, waar de afname van het bovendebiet opgelegd wordt, treedt een toename op van de duur van stijging (5 à 10 minuten), en een afname van de duur van daling van het water. De toenames en afnames in duur zijn dus eerder gering.

De waarnemingen van Meyvis (1977) wijzen in dezelfde richting.

*Tabel 16: Overzicht voorspeld direct effect hoog- en laagwater voor huidige situatie t.o.v. situatie met hoger bovendebiet (Bron: Van Braeckel et al., 2012, naar Coen et al., 2010)*

| <b>Locatie</b> | <b>Hoogwater</b>          | <b>Laagwater</b>          | <b>Getijverschil</b>       |
|----------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Dendermonde    | Geringe afname (1-5cm)    | Kleine afname (5-10cm)    | Geringe toename (1-5cm)    |
| Uitbergen      | Kleine afname (5-10cm)    | Matige afname (10 – 25cm) | Kleine toename (5-10cm)    |
| Melle          | Matige afname (10 – 25cm) | Matige afname (10 – 25cm) | Matige toename (10 – 25cm) |

#### 4.2.1.3 Inpolderingen en afsluitingen van zijrivieren

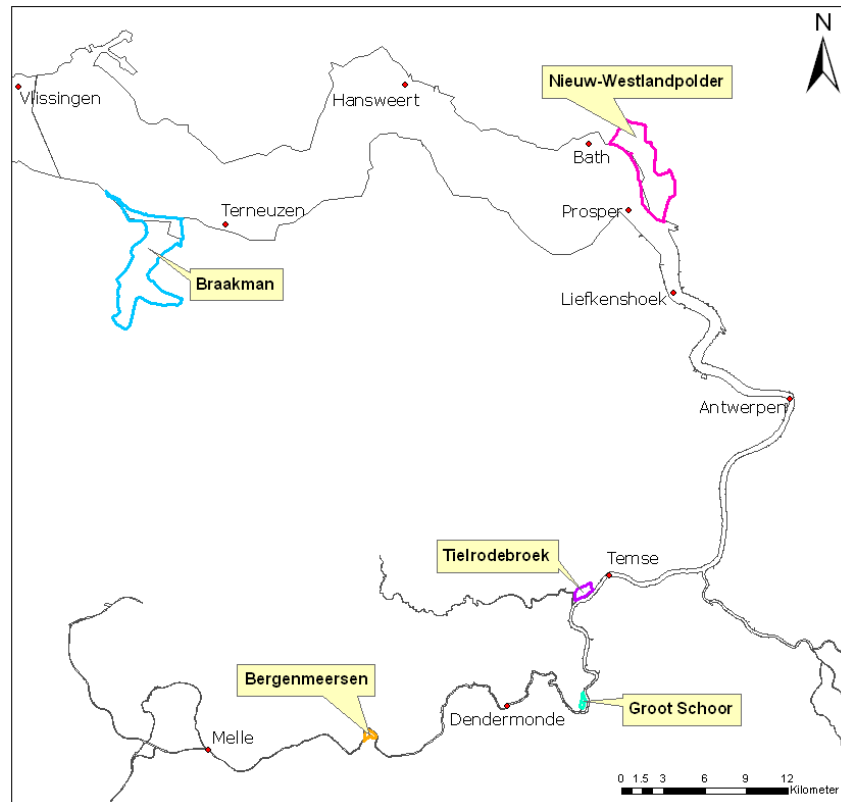
Een inpoldering onttrekt een deel van het estuarium aan getij-invoed, wat een reductie van de ruimtelijke komberging teweeg brengt. Deze ruimte werd voornamelijk door de rivier ingenomen bij hoogwater. **Stroomopwaarts stijgen de hoogwaterstanden over enkele tientallen kilometers, naargelang de grootte en de locatie van de inpoldering**. De **invloed op de laagwaters is eerder verwaarloosbaar**. Het resultaat van numerieke simulaties staat gepresenteerd in Tabel 17. Vloedvolumes stijgen ter hoogte van en stroomopwaarts de inpoldering. In het resterende rivierdeel zal het slikareaal nauwelijks wijzigen; het schorareaal zou kunnen toenemen op plaatsen waar ruimte voorhanden is. Schorren, slikken en ondiepwaterzones boeten er aan kwaliteit in door verhoogde vloodsnelheden; de onthoofde kreekrestanten ter hoogte van de inpoldering passen zich morfologisch aan en worden minder optimaal voor fauna en flora.

Een bijkomende 1D-modellering wees uit dat het afsluiten van de getijwerking op de Vliet zorgt voor een afname van het hydraulisch vermogen van de Rupel afwaarts van de Vliet. Tevens nemen de vloed- en ebvolumes op de Rupel opwaarts van de Vliet in zeer geringe mate toe. Deze af- en toename in eb- en vloedvolumes resulteert in beperkte peilwijzigingen orde +/- 1 cm op Zeeschelde en Rupel. Het effect van de afsluiting van de Vliet op het gemiddelde laagwater is dus verwaarloosbaar.

Merk op dat **ontpolderingen** of het aanleggen van potpolders een **omgekeerd effect** teweeg brengt.

Tabel 17: Invloedgebieden van de verschillende polders o.b.v. 2D-modelresultaten (BOVEN) en situering gesimuleerde inpolderingen(ONDER). (Bron: Van Braeckel et al., 2012, naar Maximova et al., 2010)

| Afstand tot polder (km) |      | Effect van de polder op het waterpeil |                              |                     |                               |                      |                              |                      |                               |
|-------------------------|------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|-------------------------------|
|                         |      | Hoogwater (cm)                        |                              |                     |                               | Laagwater (cm)       |                              |                      |                               |
|                         |      | Braakman polder (WS)                  | Nieuw - Westland polder (MH) | Tielrode-broek (OH) | Groot Schoor (St-Amands) (ZL) | Braakman polder (WS) | Nieuw - Westland polder (MH) | Tielrode -broek (OH) | Groot Schoor (St-Amands) (ZL) |
| Afstand afwaarts polder | -100 |                                       |                              | 0                   | 0                             |                      |                              | 0                    | 0                             |
|                         | -90  |                                       |                              | 0                   | 0                             |                      |                              | 0                    | 0                             |
|                         | -80  |                                       |                              | 0                   | 0                             |                      |                              | 0                    | 0                             |
|                         | -70  |                                       |                              | 0                   | 0                             |                      |                              | 0                    | 0                             |
|                         | -60  |                                       |                              | 0                   | 0                             |                      |                              | 0                    | 0                             |
|                         | -50  |                                       | 0                            | 0                   | 0                             |                      | 0                            | 0                    | -1                            |
|                         | -40  |                                       | 0                            | 0                   | 0                             |                      | 0                            | 0                    | -1                            |
|                         | -30  |                                       | +1                           | 0                   | +1                            |                      | 0                            | 0                    | -1                            |
|                         | -20  |                                       | +2                           | +1                  | +2                            |                      | 0                            | 0                    | -1                            |
|                         | -10  | +3                                    | +5                           | +5                  | +2                            | 0                    | 0                            | -1                   | -1                            |
| Polder                  | 0    | +4                                    | +3                           | +3                  | +2                            | 0                    | 0                            | -1                   | -1                            |
| Afstand opwaarts polder | 10   | +3                                    | +3                           | +3                  | +3                            | 0                    | 0                            | -1                   | -2                            |
|                         | 20   | +2                                    | +3                           | +2                  | +2                            | 0                    | 0                            | -1                   | -1                            |
|                         | 30   | +4                                    | +2                           | +1                  | +2                            | 0                    | -1                           | -1                   | -1                            |
|                         | 40   | +4                                    | +2                           | +1                  | +2                            | 0                    | -1                           | -1                   | -1                            |
|                         | 50   | +4                                    | +2                           | -1                  |                               | 0                    | -1                           | -1                   |                               |
|                         | 60   | +4                                    | +2                           |                     |                               | 0                    | -1                           |                      |                               |
|                         | 70   | +4                                    | +1                           |                     |                               | 0                    | -1                           |                      |                               |
|                         | 80   | +3                                    | +1                           |                     |                               | 0                    | -1                           |                      |                               |
|                         | 90   | +3                                    | 0                            |                     |                               | -1                   | -1                           |                      |                               |
|                         | 100  | +2                                    | -1                           |                     |                               | -1                   | -1                           |                      |                               |
|                         | 110  | +2                                    |                              |                     |                               | -1                   |                              |                      |                               |
|                         | 120  | +1                                    |                              |                     |                               | -2                   |                              |                      |                               |
|                         | 130  | -1                                    |                              |                     |                               | -2                   |                              |                      |                               |



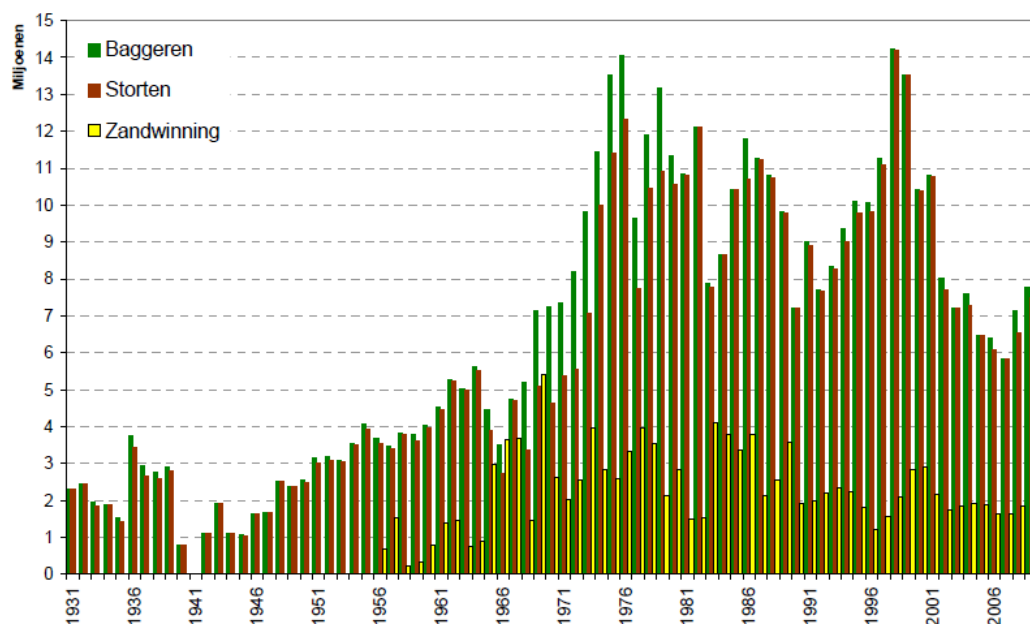
#### 4.2.1.4 Verruiming

Figuur 36 en Figuur 37 tonen de jaarlijks gebaggerde en gestorte volumes in respectievelijk de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde. Men kan een onderscheid maken tussen:

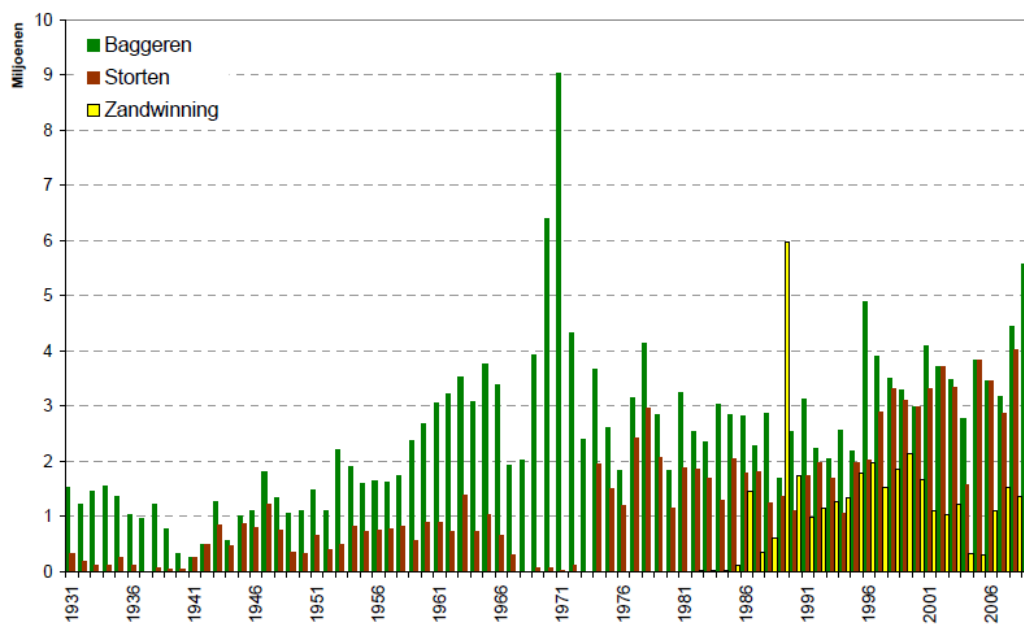
- **Een verruiming zonder terugstorten** (e.g. de 1<sup>ste</sup> verruiming). Hierbij is het effect op de **hoogwaterstanden over het volledig estuarium verwaarloosbaar**, zowel initieel als op de middellange termijn. Het effect op de **laagwaterstanden** is een **aanzienlijke geleidelijke daling in het estuarium opwaarts Bath**. De modellering geeft een **initieel effect van enkele centimeter**, terwijl de waarnemingen op de **middellange termijn een daling geven die maximaal oploopt tot circa 25 cm**. Hierbij dient opgemerkt te worden dat naast de verruiming van de vaargeul, ook de effecten op de waterstanden van andere ingrepen hierin opgenomen zijn. In de beschouwde periode werden ook grote hoeveelheden sediment uit de Beneden-Zeeschelde onttrokken, gerelateerd aan andere infrastructuurwerken dan de verruiming van de vaargeul (o.a. sedimentonttrekking ten behoeve van infrastructuurwerken in de Antwerpse haven).
- **Een verruiming met terugstorten** (e.g. de 2<sup>de</sup> verruiming). De effecten van verruiming met terugstorten van baggerspecie **wijzen in dezelfde richting als een verruiming zonder terugstorten, maar zijn veel kleiner**. Het effect op de hoogwaterstanden over het volledig estuarium verwaarloosbaar, zowel initieel als op de middellange termijn. Het initiële effect op de laagwaterstanden beperkt tot een zeer geringe afname (grootteorde 1 cm). Het effect op de middellange termijn op de laagwaterstanden een daling van grootteorde 5 cm opwaarts van Bath.

Belangrijk is op te merken dat het op de middellange termijn quasi onmogelijk is een onderscheid te maken tussen de natuurlijke morfologische ontwikkelingen (cfr. migratie van geulen via bochterosie), de morfologische ontwikkelingen ten gevolge van de ingreep verruiming en de morfologische ontwikkelingen ten gevolge van andere ingrepen

Tabel 18 presenteert de numerieke simulaties gebaseerd op de data van de 2<sup>de</sup> verruiming.



Figuur 36: Overzicht ingrepen baggeren, storten en zandwinning in de Westerschelde (bron: Van Braeckel et al, 2012). De eenheden op de Y-as zijn in Miljoenen kubieke meters.



Figuur 37: Overzicht ingrepen baggeren, storten en zandwinning in de Beneden-Zeeschelde (bron: Van Braeckel et al, 2012). De eenheden op de Y-as zijn in Miljoenen kubieke meters.



Tabel 18: Overzicht voorspeld direct effect op hoog- en laagwater (BOVEN) en getijverschil (ONDER) voor scenario zonder terugstorten (ZT) en met terugstorten (MT). (Bron: Van Braeckel et al., 2012, naar Maximova et al., 2010)

| Locatie     | Hoogwater  | Laagwater   |
|-------------|--|---|
| Terneuzen   | ZT - geen afwijking<br>MT - geen afwijking           | ZT - geen afwijking<br>MT - geen afwijking          |
| Hansweert   | ZT - geen afwijking<br>MT - geen afwijking           | ZT - geen afwijking<br>MT - geen afwijking          |
| Bath        | ZT - geen afwijking<br>MT - geen afwijking           | ZT - geringe afname (< 2 cm)<br>MT - geen afwijking |
| Antwerpen   | ZT - geringe toename (< 2 cm)<br>MT - geen afwijking | ZT - geringe afname (< 2 cm)<br>MT - geen afwijking |
| Schelle     | ZT - geringe toename (< 2 cm)<br>MT - geen afwijking | ZT - geringe afname (< 2 cm)<br>MT - geen afwijking |
| Dendermonde | ZT - geen afwijking<br>MT - geen afwijking           | ZT - geen afwijking<br>MT - geen afwijking          |
| Schoonaarde | ZT - geen afwijking<br>MT - geen afwijking           | ZT - geen afwijking<br>MT - geen afwijking          |
| Zijrivieren | ZT - geringe toename (< 2 cm)<br>MT - geen afwijking | ZT - geen afwijking<br>MT - geen afwijking          |

| Locatie     | Getijverschil  |
|-------------|--|
| Terneuzen   | ZT - geen afwijking<br>MT - geen afwijking           |
| Hansweert   | ZT - geringe toename (< 2 cm)<br>MT - geen afwijking |
| Bath        | ZT - geringe toename (< 3 cm)<br>MT - geen afwijking |
| Antwerpen   | ZT - geringe toename (< 3 cm)<br>MT - geen afwijking |
| Schelle     | ZT - geringe toename (< 3 cm)<br>MT - geen afwijking |
| Dendermonde | ZT - geringe toename (< 2 cm)<br>MT - geen afwijking |
| Schoonaarde | ZT - geen afwijking<br>MT - geen afwijking           |
| Bijrivieren | ZT - geringe toename (< 3 cm)<br>MT - geen afwijking |

#### 4.2.1.5 Zandwinning

Zandwinning is zeer uitgespreid in de tijd en is onvolledig gedocumenteerd voor de Zeeschelde. Op korte termijn zijn geen duidelijke effecten op getijkarakteristieken waar te nemen. De algemene expert opinie is dat op lange termijn het systeem voortschrijdend **uitruimt** waardoor **de getij-indringing versterkt**. Zandwinningen hebben hierdoor vooral een effect op de lagere ecotopen zoals ondiep subtidaal, slik en pionierschor. Met de toename van getijverschil breidt de verticale reikwijdte van slikken en schorren uit, maar als dit samengaat met uitruiming van het systeem leidt dit eerder tot areaal- en kwaliteitsverlies.

#### 4.2.1.6 Zeespiegelstijging

Zeespiegelstijging wordt in de modelberekeningen gedempt tussen Baalhoek en Schoonaarde terwijl men eerder een versterking over de hele lijn verwacht. Toename van de laagwaterstanden wordt voortschrijdend van Baalhoek tot Gent gedempt en dit sneller dan hoogwater. Het resultaat is **een stroomopwaarts groeiende toename in getijverschil**. Het model berekent echter het effect

van een eenmalige sprong in de waterstand met een statische bathymetrie, terwijl in werkelijkheid slikken en schorren meegroeien met geleidelijk toenemende waterstanden. Anderzijds is **het effect van de zeespiegelstijging in gemeten waterstanden niet te onderscheiden van de ingrepen**.

Toename van getijverschil breidt de verticale reikwijdte van slikken en schorren uit, maar als dit samengaat versteiling van de subtidaal-supratidaal gradiënt doordat het estuarium zijdelings beperkt is, komt er nauwelijks habitat bij en vermindert de kwaliteit. Met de resultaten van de modelsimulaties zijn getij-evolutie en ingrepen in het estuarium per dubbeldecade en per zone naast elkaar gelegd om het aandeel van elke ingreep in de getijevolutie in te schatten en door te vertalen naar habitatareaal en -kwaliteit.

#### 4.2.1.7 Historische evolutie Zeeschelde

De periode voor 1921 is die van de **grote inpolderingen** in de mesohaliene zone, de **rechttrekkingen** in de zoete zone en de 'verbeteringswerken' voor de bevaarbaarheid van de Rupel. De inpolderingen hadden een gering effect op hoogwaterstanden tot Dendermonde, de rechttrekkingen stroomopwaarts Dendermonde hadden een matig tot groot effect op de laag- en hoogwaterstanden en het getijverschil in Melle en Uitbergen. De ingrepen aan de Rupelmonding worden slechts een gering effect op hoogwater in Walem toegekend.

Tussen 1921 en 1940 hebben de **inpolderingen** van Kreekrak en Hellegat in de Westerschelde een gering effect op hoogwater tot in Bath. Onttrekking van de Scheldebreeken aan estuariene invloed heeft een gering effect op hoog en laagwater in Dendermonde. Een kleine rechttrekking aan de Dendermonding heeft enkel lokaal geringe invloed op hoog- en laagwater. De rechttrekking tussen Appels en Schoonaarde laat zich echter op hoog- en laagwater voelen van Dendermonde tot Melle. Op de Durme vergroten de rechttrekkingen het getijverschil in Waasmunster, terwijl de **aanleg van de potpolder** een gering omgekeerd effect heeft. De baggerwerken hebben er een groot effect op laagwater.

Tussen 1941 en 1960 veroorzaakt de inpoldering van de Braakman een geringe toename van hoogwater tot in Schelle. De inpolderingen tussen Bath en Antwerpen en de opspuiting van de Wijtvlieppolder krijgen een vergelijkbaar effect toegekend. De bedijking van de Kalkense meersen veroorzaakt een geringe toename van de hoogwaterstanden stroomopwaarts Schelle tot Uitbergen. De baggerwerken op de Durme vergroten verder lichtjes het getijverschil tussen Tielrode en Waasmunster, de potpolders blijven het omgekeerde effect geven en de afdamming aan Lokeren legt het getijvenster in Waasmunster gevoelig hoger.

Tussen 1961 en 1980 worden vloeisystemen en vallei van de Zeeschelde en Durme verder **onttrokken aan de estuariene invloed**, schorren worden in gebruik genomen als huisvuilstorten. Deze ingrepen veroorzaken vooral ter plekke geringe toename van hoogwater en afname van laagwater. De **1e verruiming** zorgt in grote delen van de Zeeschelde voor een matige daling van het laagwater (maximaal ~ 20cm). De **aanleg van de Ringvaart en schutsluis in Gent** had een gering tot matig verlagend effect op hoog- en laagwater stroomopwaarts Dendermonde. De evoluties in de Durme zetten zich verder.

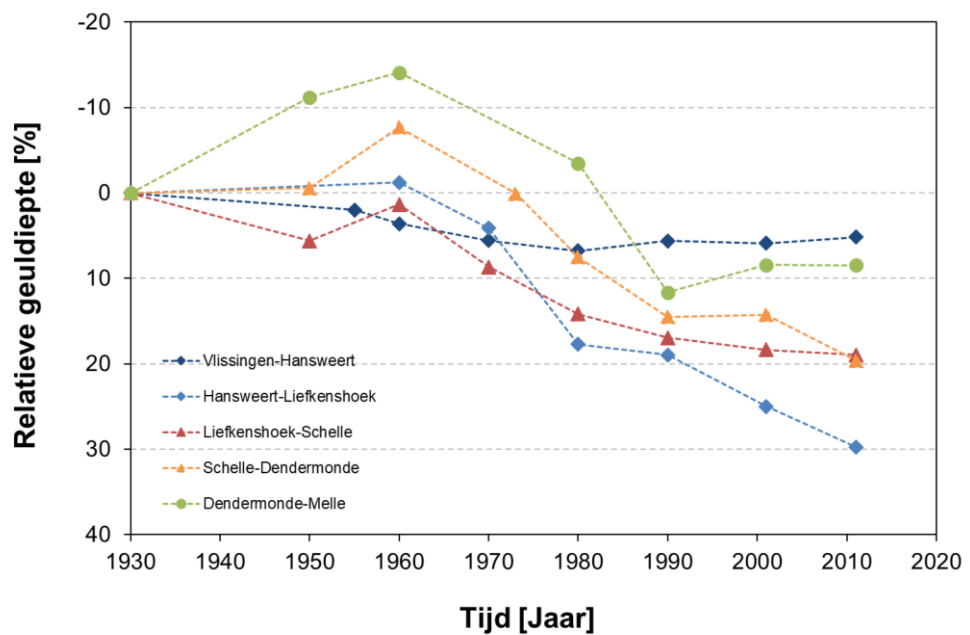
De hypothese dat de plotse val van het gemiddeld laagwater na 1970 ter hoogte van de oorsprong van de Rupel een gevolg is van de afsluiting van de Vliet, wordt hier verworpen. Het afsluiten van de Vliet heeft slechts een beperkte bijdrage geleverd, de eerste verruiming had een groter effect.

Tussen 1981 en 2000 dragen **zandwinning** voor allerhande infrastructuurwerken, dijkverstevingen en de **2e verruiming** bij aan de **verdere toename van het getijverschil** in de mesohaliene zone.

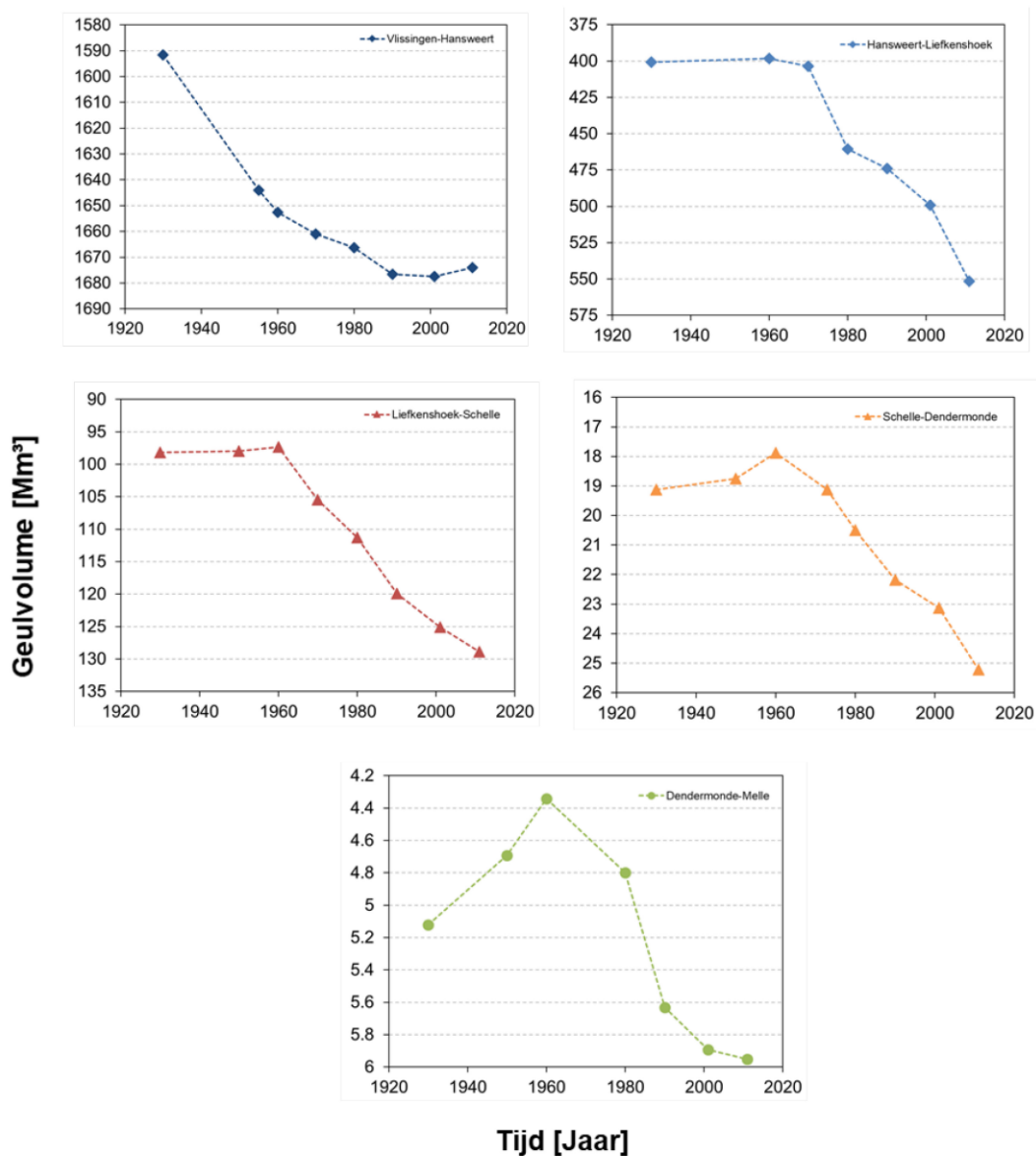
#### 4.2.2 Agenda Van de Toekomst – Schelde estuarium

In kader van Agenda van de Toekomst onderzocht [Vandenbruwaene et al. \(2020a\)](#) via data-analyse de impact van menselijke ingrepen op het getij. Figuur 38 en Figuur 39 tonen de waargenomen morfologische veranderingen.

Ze besloten: De morfologische evolutie van het Schelde estuarium wordt in belangrijke mate bepaald door menselijke ingrepen. In de periode van 1900 tot recent vormen inpoldering (afname in intertidaal areaal) en verruiming (toename in geuldiepte) de belangrijkste menselijke ingrepen. **Verruiming zorgt er voor dat er een daling is van de (extreme) laagwaterstanden indien de geuldieptetoename voldoende groot is.** Dit is het geval voor de zone Hansweert-Dendermonde (vanaf 1960), waarbij zelfs een geuldieptetoename tot 30% wordt waargenomen in het segment Hansweert-Liefkenshoek. **Daarnaast zorgt geuldieptetoename voor een toename van de celeriteit laagwater**, wat op zijn beurt resulteert in een **daling van de getij-asymmetrie**. De invloed van inpoldering is moeilijker na te gaan op basis van data-analyse. Dit omdat de periode van inpoldering (1900-1970) gekenmerkt wordt door simultane veranderingen in geuldiepte. De **data-analyse suggereert dat inpoldering leidt tot een toename van de celeriteit hoogwater, en een toename van de getij-asymmetrie**.



Figuur 38: Relatieve verandering in geuldiepte ten opzichte van 1930 over de periode 1930-2011 voor de verschillende segmenten. (Bron: Vandenbruwaene et al, 2020b)



Figuur 39: Evolutie geulvolume over de periode 1930-2011 voor de verschillende segmenten. (Bron: Vandenbruwaene et al., 2020b)

Vandenbruwaene et al. (2020b) vulde deze studie aan met bijkomende numerieke modellering (zie Figuur 40) en vond dat data-analyse en modelsimulaties aan tonen dat **sedimentonttrekkingen** in combinatie met **vaargeulverruiming en de bijhorende toename in geuldiepte resulteren in een toename van de getijslag**. De grote geuldieptetoename in het segment Hansweert-Liefkenshoek (tot 30%) zorgt hierbij voor de grootste toename in getijslag, niet enkel binnen het segment zelf maar ook tot ver opwaarts het estuarium. Daarnaast **resulteert een grote toename in geuldiepte in een toename van de celeriteit van het laagwater**, en dus een **afname van de vloeddominantie en de getij-asymmetrie**.

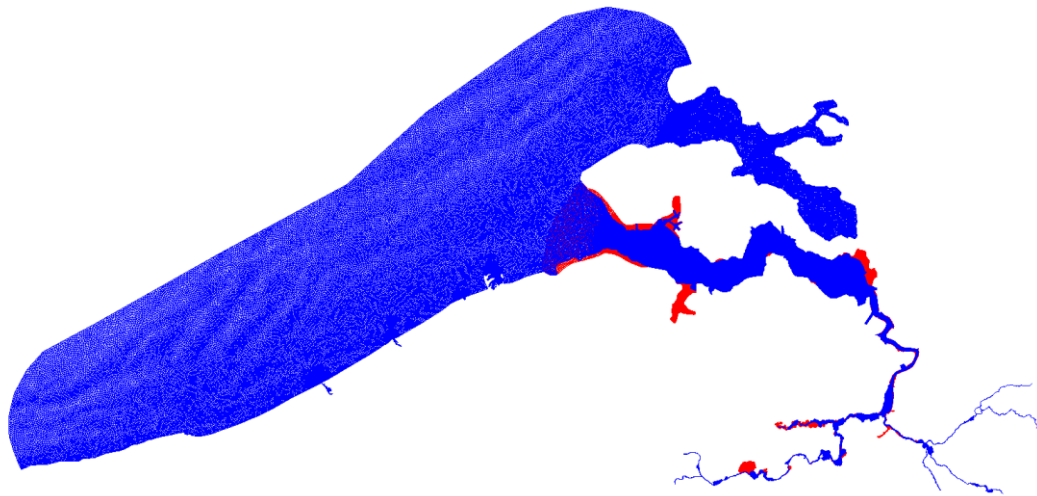
Historische **inpolderingen langsheen het Schelde estuarium leiden tot een toename van de vloeddominantie en de getij-asymmetrie**. Voornamelijk de inpolderingen langsheen het segment Hansweert-Liefkenshoek en Schelle-Dendermonde zijn hierbij belangrijk.

De continue onttrekkingen van sediment in combinatie met de doorgevoerde vaargeulverruiming in het Schelde estuarium (periode 1970-recent) resulteren in een belangrijke

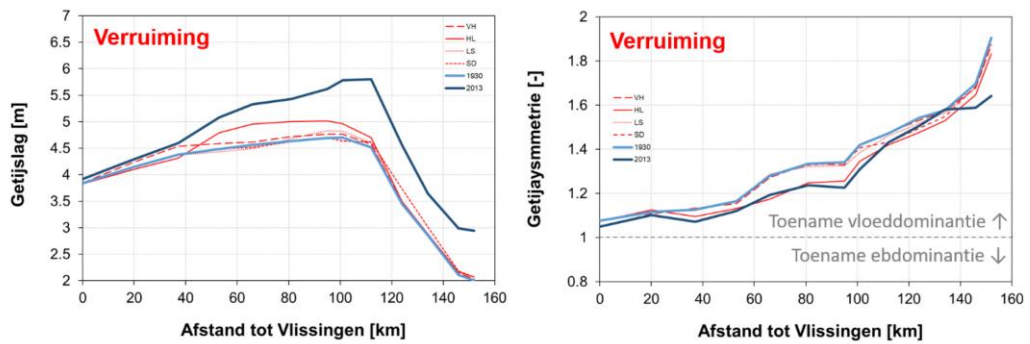
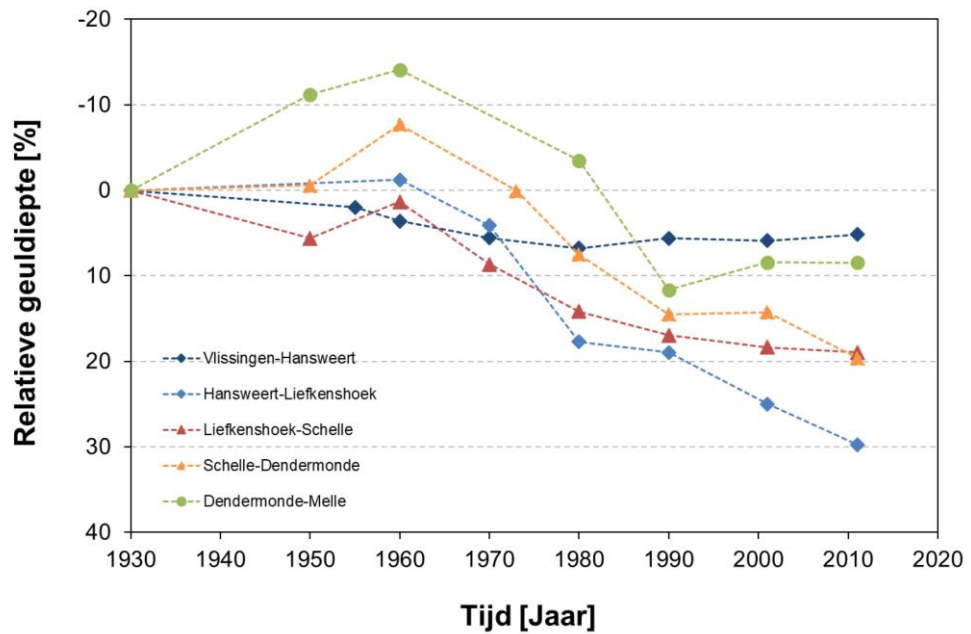
toename van de geuldiepte, en hebben bijgevolg invloed op de evolutie van het getij. De grote geuldieptetoename in het segment Hansweert-Liefkenshoek (tot 30%) zorgt voor de grootste toename in getijslag, niet enkel binnen het segment zelf maar ook tot ver opwaarts het estuarium. De toename in getijslag wordt in belangrijke mate bepaald door de daling van de laagwaterstanden. Een voldoende grote toename in geuldiepte leidt immers tot een verlaging van de laagwaterstanden. Daarnaast resulteert een grote toename in geuldiepte in een sterkere toename van de celeriteit van het laagwater dan van het hoogwater, en dus in een afname van de vloeddominantie en de getij-asymmetrie.

Historische inpolderingen langsheen het Schelde estuarium (1930-1970) leiden tot een toename van de vloeddominantie en de getij-asymmetrie. Voornamelijk de inpolderingen langsheen de segmenten Hansweert-Liefkenshoek (in combinatie met de ophoging van Saeftinghe) en Schelle-Dendermonde zijn hierbij belangrijk. De invloed van inpolderingen op de getijslag is dan weer beperkt. Dit sluit echter niet uit dat morfodynamische ontwikkelingen als gevolg van deze inpolderingen op lange termijn kunnen leiden tot veranderingen in geuldiepte en getijslag, tot een morfologisch evenwicht wordt bereikt.

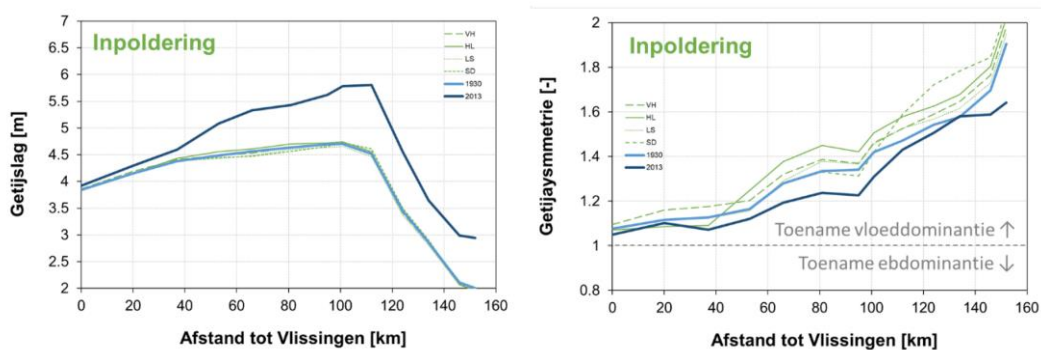
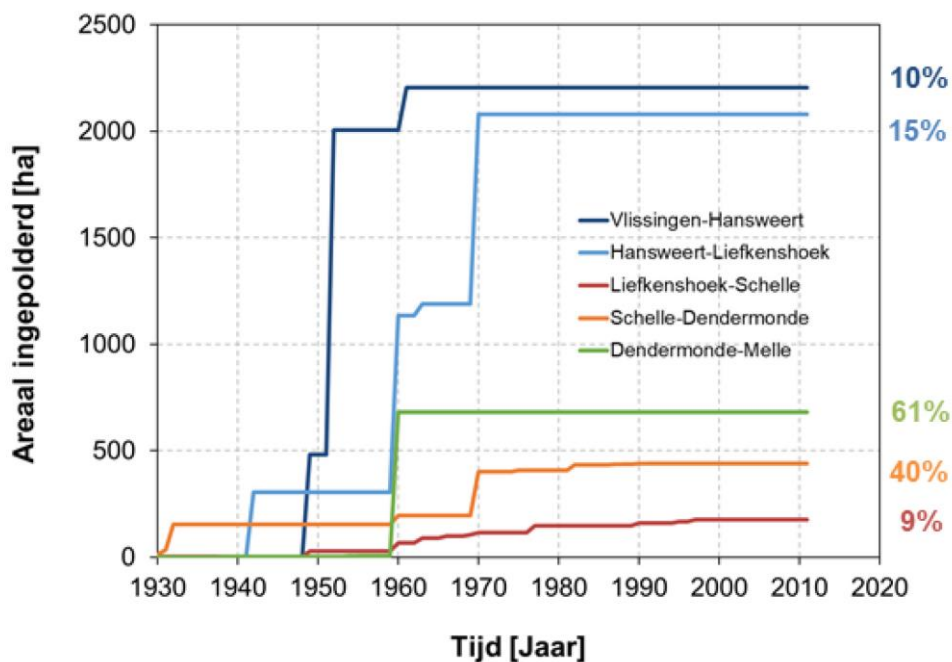
De data-analyse en modelsimulaties tonen op een kwalitatieve manier de invloed van menselijke ingrepen op de evolutie van het getij. Een belangrijke lacune in de kennis blijft de goede inschatting van de morfologische respons van het estuarien systeem op de menselijke ingrepen. Zoals ook reeds in eerdere studies is aangegeven (o.a. Jeuken *et al.*, 2004; Van Braeckel *et al.*, 2012; Stark *et al.*, 2017) blijkt de combinatie van het effect van de individuele ingrepen niet de totale ontwikkelingen te verklaren, wat wijst op het belang van de “menselijke geïnduceerde” respons van het systeem op de (middel)lange termijn.



*Figuur 40: Modeldomein Vandenbruwaene et al. (2020b) met: blauw is het originele Scaldis model, rood is het aangepaste raster volgens de historische situatie over de periode 1930-2013. (Bron: Vandenbruwaene et al., 2020b)*



Figuur 41: (BOVEN:) Relatieve verandering in geuldiepte ten opzichte van 1930 over de periode 1930-2011 voor de verschillende segmenten. (ONDER:) Modelsimulaties waarin voor afzonderlijke segmenten van het Schelde estuarium het subtidaal van 2013 is geïmplementeerd in de 1930 topo-bathymetrie (effect toename geuldiepte). Het effect van de morfologische scenario's op de getijslag is links weergegeven, het effect op de getij-asymmetrie rechts. (Bron: Vandenbruwaene et al., 2020b).



Figuur 42: (BOVEN:) Ingepolderd areaal ten opzichte van de 1930 situatie over de periode 1930-2011 voor de verschillende segmenten. Percentages geven het relatief ingepolderd areaal weer ten opzichte van het totale areaal in 1930 (per segment). Voor de Zeeschelde worden de ingepolderde vloeisystemen mee in rekening gebracht. (ONDER:) Modellsimulaties waarin voor afzonderlijke segmenten het intertidaal van 2013 is geïmplementeerd in de 1930 topo-bathymetrie (effect inpoldering) (VH = Vlissingen-Hansweert; HL=Hansweert-Liefkenshoek; LS=Liefkenshoek-Schelle; SD=Schelle-Dendermonde). Het effect van de morfologische scenario's op de getijslag wordt links weergegeven, het effect op de getij-asymmetrie wordt rechts weergegeven. (Bron: Vandenbruwaene et al., 2020b).

### 4.3 Dataverwerking

De ruwe waterstanden worden **gefilterd** op basis van hun **kwaliteitscode**, zoals door het HIC toegekend. De metingen met een kwaliteitscode die relateert aan onbetrouwbare meetgegevens, i.e. groter dan 60, worden er te allen tijde uitgehaald. In de Westerschelde, waar de data door Rijkswaterstaat geleverd worden, is dit echter niet mogelijk. Deze data heeft uiteraard andere kwaliteitscodes maar de slechtste kwaliteit – ongevalideerd – betreft alle data vóór 1970 en zou dus praktisch gezien de meeste analyses over langere periode onmogelijk maken. Te meer, de data bevat enkel kwaliteitscodes over grote blokken, niet de kwaliteitscontrole per meting zoals toegekend door het Waterbouwkundig Laboratorium.

Om de metingen in de Westerschelde, toch te valideren werd er aan deze metingen een getijnummer toegekend om de interne karakteristieken van de getijgolf te kunnen bepalen. Deze

getijnummers zijn bij de meeste data door het HIC toegekend en volgen een getijgolf door het estuarium heen. De getijnummers zijn geëxtrapoleerd naar de Nederlandse posten door de meest waarschijnlijke observaties te koppelen: i.e. we kijken naar een specifieke getijgolf te Liefkenshoek, en zoeken de – in de tijd – meest nabijgelegen getijgolf van in Hansweert, conditioneel aan het feit dat deze golf eerder bij Hansweert aan moet komen dan bij Liefkenshoek. We veronderstellen dan dat deze getijgolf deel uitmaakt van dezelfde getijcyclus. Daarna filteren we onwaarschijnlijke getijgolven: golven die uiterst snel of langzaam reizen tussen de meetposten. Dit doen we door het gemiddelde en de standaard deviatie te bepalen op de reistijd. Getijgolven wiens reistijd buiten het  $\pm 2IQR$  interval liggen, worden verwijderd. Ook incomplete getijgolven worden verwijderd.

De getijvariabelen worden, in sommige gevallen, **geaggregeerd** naar langere tijdsintervallen, e.g. wekelijks of maandelijks. In dit geval vereisen we dat er van de aggregatie periode ten minste 2/3 van de waarnemingen aanwezig zijn. Als dit niet het geval is, wordt het desbetreffende interval niet opgenomen in verdere analyses.

Gezien bepaalde analysemethodes een continue meetreeks vereisen, **imputeren** wij de ontbrekende gegevens via een State-Space methode – lees *Kalman Smoother* – gebaseerd op een ARIMA model (zie e.g. Moritz *et al.*, 2015).

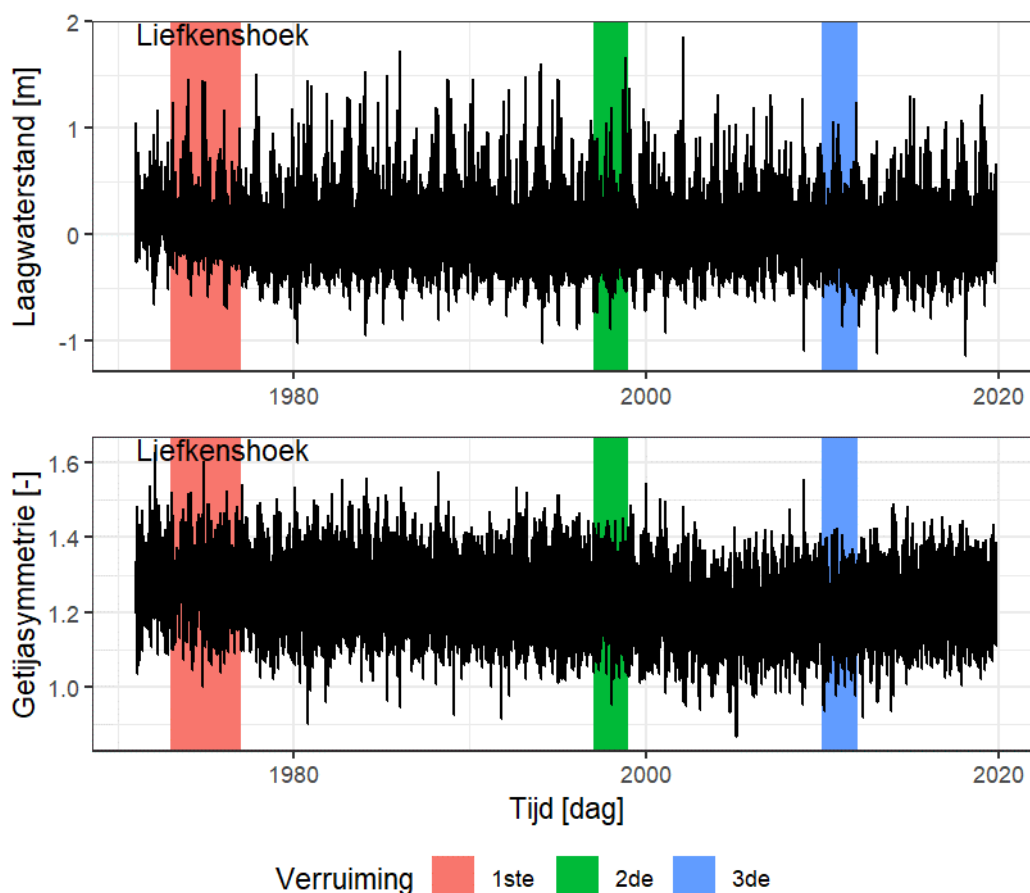
Praktisch gezien is er na deze aanpak geen verdere **spike removal** meer nodig. Hoewel er zeker nog uitschieters in de data zitten, lijken deze eerder een effect van de onderliggende data – e.g. de waarden zijn voor het grootste deel van de maand aberrant. We wensen hierbij op te merken dat we ook geëxperimenteerd hebben met een decompositie op basis van seizoenale data (Valis *et al.*, 2014). Echter, deze techniek bleek zeer gevoelig aan de parametersetting wanneer we de visueel geïdentificeerde pieken eruit wisten te halen nam ze veelal te veel weg, terwijl het op de standaardinstelling te weinig doet om een voordeel op te leveren. We besloten dan ook deze methodiek niet toe te passen.

De aangeleverde waterstanden zijn verwerkt door de betreffende aanleverende instanties en bevatten, onder andere, **peilschaalcorrecties** (zie §2.2.1). Deze correcties werden uitgevoerd om langzaam opbouwende fouten te reduceren en manifesteren zich vaak in de data als een instantane sprong. Praktisch gezien vormt dit een probleem voor de trendbreuk analyse, gezien deze correcties onmiddellijk gedetecteerd worden door het algoritme als een trendsprong. Om deze reden werd de meetreeks dan ook gehomogeniseerd: de peilschaalcorrecties zijn ongedaan gemaakt om eventuele effecten van deze artificiële correcties niet mee te nemen in de resultaten. Tevens zijn de Nederlandse meetreeksen van NAP omgezet naar TAW met de correctiefactor in Tabel 2.



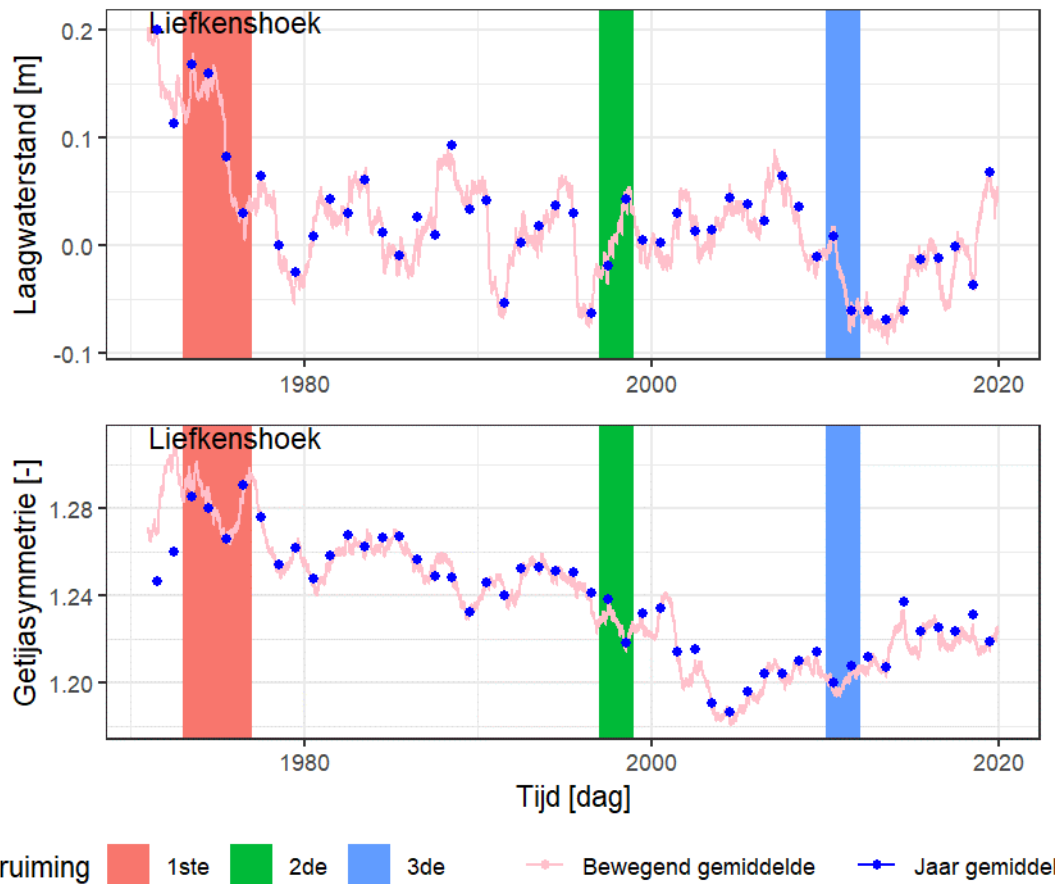
#### 4.4 Verkenning van de data

Binnen deze initiële stap verkennen we de ruwe data. Om repetitiviteit te vermijden wordt hierbij gefocust op de Laagwaterstanden (LW) en Getijasy-mmetrie (GA). Figuur 43 presenteert beide te Liefkenshoek en beschouwt specifiek de eerste, tweede en derde verruiming. Het moge duidelijk zijn dat de effecten van deze – toch wel grote ingrepen – zeer moeilijk visueel te bepalen zijn. De amplitude van de getijcycli is één tot enkele meters (voor LW) en overstemt volledig mogelijke effecten van de ingrepen.



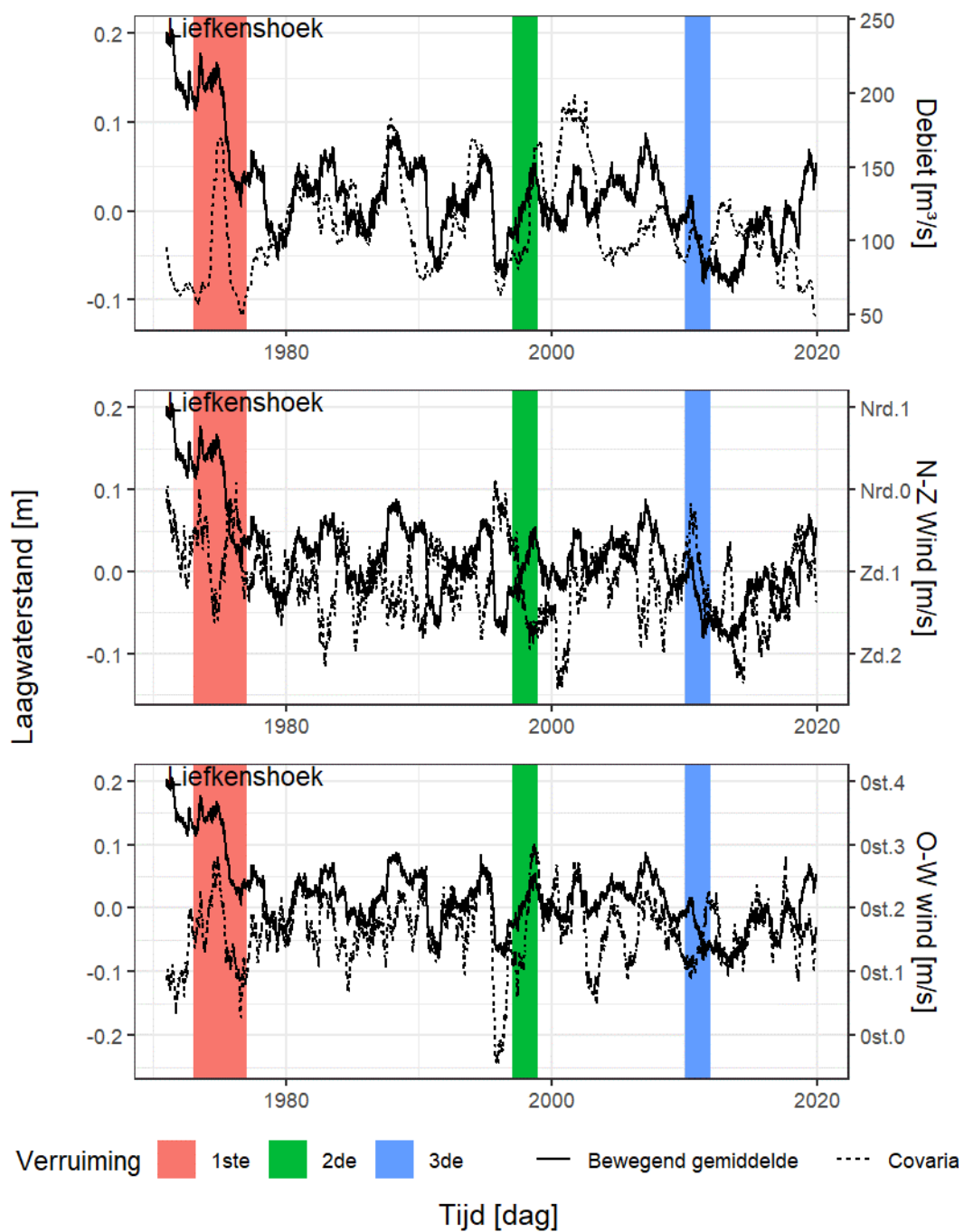
Figuur 43: De visuele weergave van LW en GA te Liefkenshoek op dagresolutie. De vlakken tonen de tijdsspanne van de eerste, tweede en derde verruiming.

Deze cyclische effecten worden uit het signaal gefilterd door uit te middelen over een langere periode, hier een jaar. Figuur 44 presenteert 2 methodes: een lopend gemiddelde en een niet-overlappend gemiddelde. De algemene trend is nu beter zichtbaar, inclusief mogelijke veranderingen. We kunnen ons nu afvragen welke veranderingen gerelateerd zijn aan ingrepen. Hiervoor dienen we echter eerst andere factoren in rekening te brengen zoals zeespiegelstijging, het windklimaat en bovenstroomse afvoer. Een trend in deze factoren, beïnvloedt vanzelfsprekend ook de waargenomen trends van LW en GA.

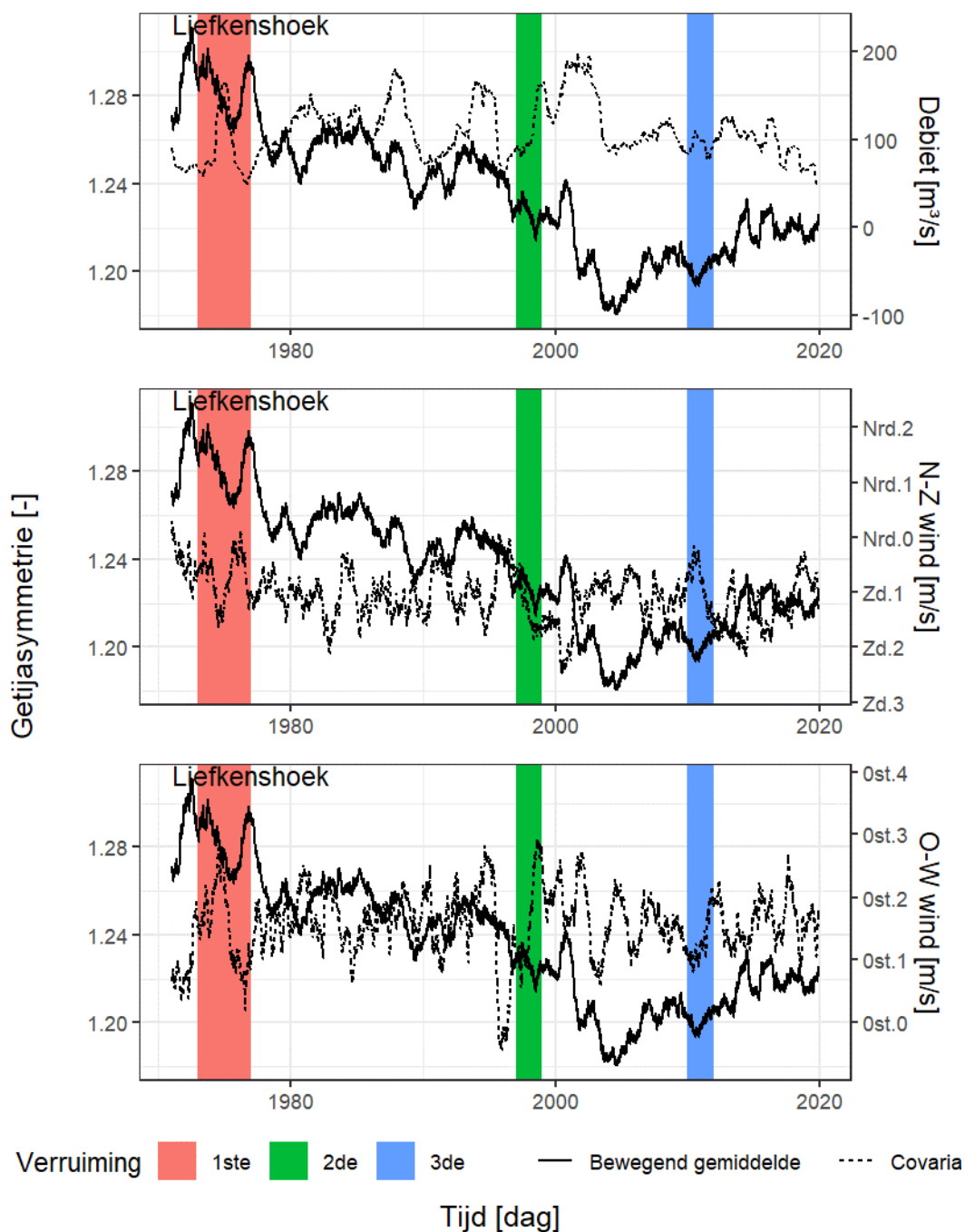


*Figuur 44: Uitmiddeling van getijcycli: een bewegend gemiddelde (rode lijn) of een niet-overlappend jaar gemiddelde (blauwe stippen).*

Figuur 45 en Figuur 46 plotten de trend van deze belangrijke covariaten ten opzichte van de trend in respectievelijk LW en AG. Het is duidelijk dat bepaalde variaties in de trend sterk geassocieerd zijn met variatie in wind en debiet. Bijvoorbeeld, de daling net voor de 2<sup>de</sup> verruiming is gepaard met een daling in debiet en wind. Ook zagen we eerst een stijging tijdens deze verruiming, wat op zich vreemd is, maar nu lijkt dit geassocieerd te zijn met een stijging of herstel van de wind en het debiet. We zien dus onmiddellijk dat het gebruik van covariaten bijzonder belangrijk is voor een correcte interpretatie.



Figuur 45: De Laagwaterstanden vergeleken met de covariaten, beide met een bewegend gemiddelde van een jaar. Merk op dat de wind as opgedeeld is in Oosten wind (Ost.#) en Westenwind (Wst.#), beide in meter per seconde.



*Figuur 46: Getijassymmetrie vergeleken met de covariaten, beide met een bewegend gemiddelde van een jaar. Merk op dat de wind as opgedeeld is in Oosten wind (Ost.#) en Westenwind (Wst.#), beide in meter per seconde.*

We komen dus tot de conclusie dat we niet zomaar een trendwijziging aan een ingreep toe kunnen kennen, we moeten ook rekening houden met trendwijzigingen veroorzaakt door exogene variabelen. Hoewel GA duidelijk minder invloed ondervindt van de verschillende exogene variabelen, is ze er niet compleet vrij van. Als we kijken naar de correlaties voor LW en GA op alle posten, in Tabel 19 dan zien we dat er voor beide een significante correlatie bestaat tussen de getijparameters en de verschillende exogene variabelen. Merk op dat:

1. Deze waarden de Kendall Tau betreffen en niet de meer algemeen gebruikte Spearman Rho omdat Kendall Tau ongevoelig is aan niet-lineaire gedrag in de data.

2. Deze op jaargemiddelden berekend zijn omdat jaargemiddelden de correlatie iets onderdrukt, terwijl direct werken op een bewegend gemiddelde de correlatie sterk overdrijft.

Er komt hier dus een complex beeld naar voren, we dienen rekening te houden met de effecten van getijcycli, maar ook met verscheidene exogene variabelen. Hoewel dit zeker niet onmogelijk is voor een deskundige met voldoende kennis van het Schelde-estuarium, wordt dit al snel een zeer subjectieve oefening. **De noodzaak van een statistische, meer objectieve aanpak wordt aldus duidelijk.**

Tabel 19: De Kendall tau correlaties tussen de getijparameters en de verschillende covariaten.

| Post         | Type | Debiet | O-W wind | N-Z wind |
|--------------|------|--------|----------|----------|
| Vlissingen   | GA   | 0,14   | 0,01     | -0,38    |
| Vlissingen   | LW   | 0,06   | -0,37    | -0,35    |
| Hansweert    | GA   | 0,15   | 0        | -0,32    |
| Hansweert    | LW   | 0,1    | -0,38    | -0,35    |
| Liefkenshoek | GA   | 0,02   | 0,02     | -0,15    |
| Liefkenshoek | LW   | 0,06   | -0,36    | -0,29    |
| Antwerpen    | GA   | 0,08   | 0,04     | -0,12    |
| Antwerpen    | LW   | 0,15   | -0,38    | -0,31    |
| Schelle      | GA   | 0,11   | -0,04    | -0,16    |
| Schelle      | LW   | 0,24   | -0,31    | -0,28    |
| Dendermonde  | GA   | 0,19   | 0,04     | -0,1     |
| Dendermonde  | LW   | 0,47   | -0,18    | -0,19    |
| Melle        | GA   | 0,57   | -0,02    | -0,1     |
| Melle        | LW   | 0,64   | -0,13    | -0,16    |

## 4.5 Methodologie Impactstudie

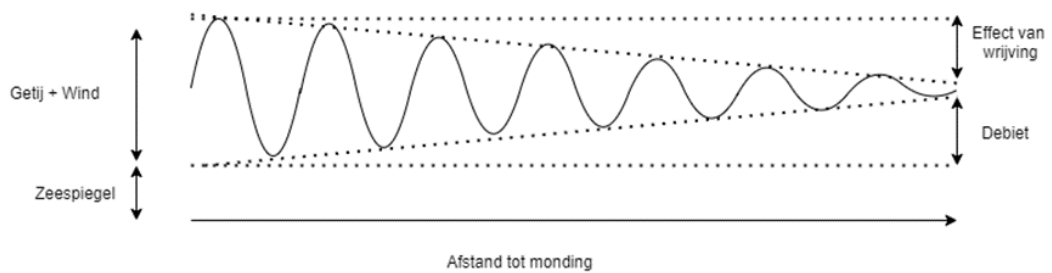
### 4.5.1 Modelopbouw

#### 4.5.1.1 Inleiding

In deze sectie bespreken we de opbouw van een nieuw statistisch model. We bespreken eerst de algemene filosofie van een statistisch model. Daarna wordt dieper ingegaan op de meerwaarde van de verhoogde resolutie en de afzonderlijke covariaten. Achtereenvolgens presenteren we de modelleermethode die wij voorstellen, een Gegeneraliseerd Additief Model (GAM), en geven een korte introductie over de filosofie achter een GAM.

#### 4.5.1.2 Statistische Modelopbouw: Filosofie

Voordat we verder de resultaten en de methode bespreken, is het nuttig om even stil te staan bij het conceptuele idee achter een statistisch model. Achter ieder statistisch model steekt een impliciet, mechanisch/fysisch gebaseerd, conceptueel model zoals hetgeen dat gepresenteerd wordt in Figuur 47. Dit laatstgenoemde model definieert de causaliteit van het model, zoals in Figuur 47 vormt de zeespiegel een basis offset voor de waterstanden, en dempt de wrijving de amplitude van de getijgolf. De wind zorgt voor een grotere amplitude nabij de monding, en het debiet geeft een offset voor de getijgolf nabij de oorsprong.

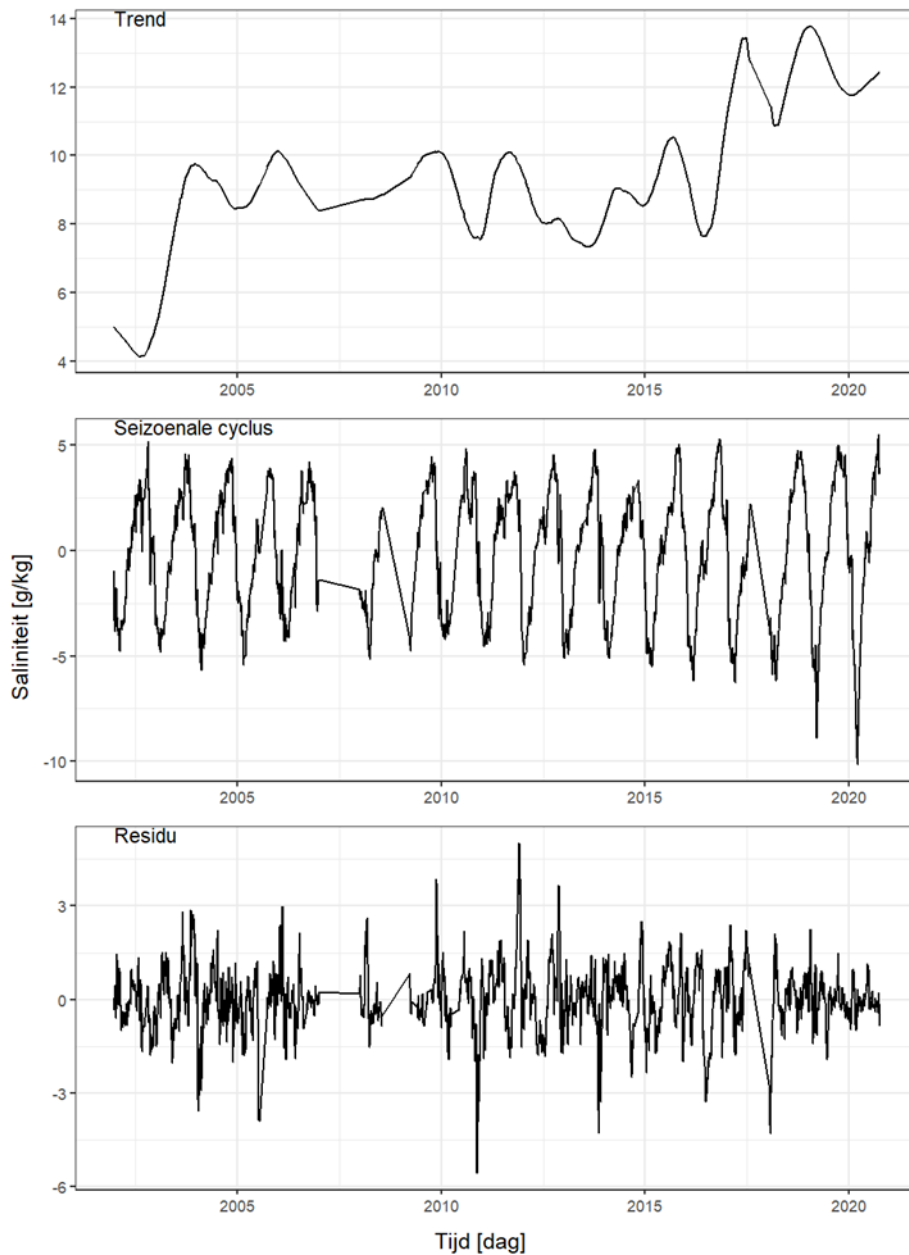


*Figuur 47: Het conceptueel model voor de waterstanden onder invloed van zeespiegel, debiet en wind, alsook de impliciete actie van wrijving in het estuarium*

Het moge duidelijk zijn dat een dergelijk model geen bijzonder rigide oefening is. Het vormt de (vaak impliciete) basis voor het redeneren over een stochastisch systeem: op basis van dit (simplistische) model stellen we een hypothetisch statistisch model/methode op waarbij we vermoeden dat al deze effecten steeds op hun eigen manier bijdragen aan het systeem en dat we, op basis hiervan, bepaalde gedragingen verwachten.

Echter, in praktijk refereren we nauwelijks het conceptueel model maar kijken we puur naar de data: i.e. de associaties en relaties die we terugvinden in de ruwe data. Pas als we hier resultaten van hebben, keren we terug naar het conceptueel model om te controleren of de waargenomen bevindingen ook logisch zijn. We stellen onszelf aldus constant de vraag: Zijn deze uitkomsten logisch?

Er valt hier ook iets te zeggen over de keuze van covariaten of predictoren. Niet alleen de zeespiegelstijging, bovenafvoer en wind hebben een effect, maar ook andere variabelen zoals temperatuur, luchtdruk en saliniteit van het water kunnen een invloed uitoefenen. Toch hebben we ervoor gekozen om deze laatste niet in ons model mee te nemen. Ten eerste is er natuurlijk een behoefte aan data om een degelijk statistisch model af te leiden. Zo is bijvoorbeeld debiet sinds de jaren zeventig beschikbaar, terwijl variabelen zoals saliniteit en watertemperatuur veelal pas sinds 2001 beschikbaar zijn. Dit zou de beschouwde datareeks dusdanig kort maken zodat enkele interessante ingrepen er niet meer in zitten. Verder is het zaak om een zogenaamde post-treatment bias (McElreath, 2020) te vermijden. Deze fout bestaat erin dat sommige variabelen zelf een effect ondervinden van ingrepen. In Figuur 48 zien we een korte analyse van saliniteit te Liefkenshoek. Duidelijk is dat er meerdere trends in deze covariaat aanwezig zijn, wat logisch is, gezien ze een functie is van waterbewegingen in het estuarium. Echter, als gevolg hiervan is het waarschijnlijk dat ze ook invloed ondervindt van verschillende ingrepen. Als we deze variabele dus op zouden nemen in ons model dan is het te verwachten dat een deel van de ingrepen gemaskeerd worden omdat ze in één van de exogene variabelen zitten, i.e. de saliniteit. We stellen hierbij niet dat ze niet interessant is, maar dat ze geen geschikte verklarende variabele is voor dit model.



*Figuur 48: Seizoenale analyse m.b.v. STL (Cleveland, 1996) voor de saliniteit te Liefkenshoek in de jaren 2000 tot 2020.*

#### 4.5.1.3 Resolutie

De eerste keuze die we moeten maken na het opstellen van de onderzoeksvraag en de identificatie van de uitkomstvariabele, is op welke resolutie we modelleren. Tot nu toe is er in de literatuur altijd op jaarlijkse resolutie gekeken, wat ons doet afvragen of een hogere resolutie een meerwaarde kan zijn. Om dit te onderzoeken kijken we simpelweg naar een plot van LW te Liefkenshoek bij de verschillende resoluties (tot op dagniveau). In Figuur 49 zien we deze verschillende resoluties met elkaar vergeleken, merk op dat de tijdspanne van de figuren verandert om visuele duidelijkheid te behouden.

Het is duidelijk dat een hogere resolutie meer detail geeft, en dus hopelijk de ingrepen duidelijker zal maken. Ten slotte, een stijging gevolgd door een daling zal uitmiddelen op jaarniveau, maar niet op dag- of weekniveau. Tevens zijn, zoals we in §4.4 zagen, op hogere resolutie trends makkelijker

te onderscheiden van ruis. Het is dan ook de hoop dat we op een hogere resolutie makkelijker trendbreuken kunnen detecteren.

Het voordeel op week en dag niveau is minder. De natuurlijke fluctuaties nemen het beeld over en de toegevoegde informatie lijkt voornamelijk afkomstig te zijn van de getijcyclus, niet van eventuele trends. Ten slotte: een door ingrepen veroorzaakte fluctuatie die enkele weken te bespeuren is, is voor het beleid minder interessant.

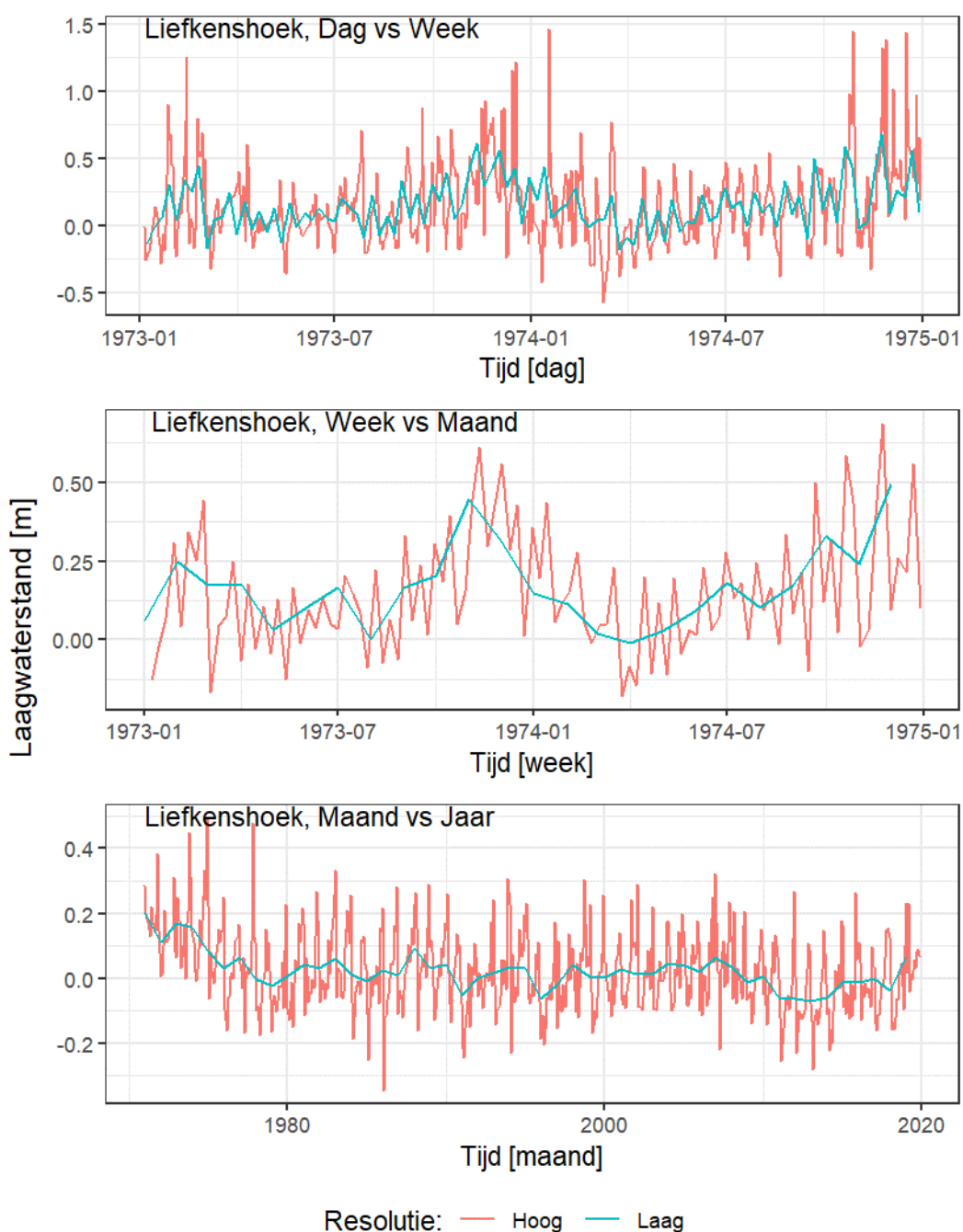
Echter, een hogere resolutie is niet zonder zijn eigen nadelen. Als eerste is er het computationele aspect: op jaarniveau hebben we  $\pm 50$  data punten, op maandniveau  $\pm 600$ , op weekniveau  $\pm 2600$  en op dagelijks niveau  $\pm 18\ 250$ . Hoewel dit misschien niet direct een probleem lijkt, moeten we hier vermelden dat de meeste methoden die we gebruiken niet lineair in hun computationele behoeften zijn, maar zich eerder gedragen als  $n^2$  waar  $n$  het aantal punten is. Dit wil zeggen, bij de dubbele hoeveelheid datapunten rekenen we vier keer zo lang. Dit levert al snel problemen op als we meer datapunten gebruiken.

Een tweede probleem is dat de wind en het debiet, welke belangrijke covariaten zijn, op hogere resolutie geen instantaan effect hebben. Dat wil zeggen dat de windopzet belangrijk wordt, alsook de vertraagde effecten van het debiet. Deze effecten introduceren residuele fouten in het model, wat later problematisch kan zijn bij het detecteren van trendbreuken – ten slotte, als we bijvoorbeeld een consistente schommeling van ca. 5 cm hebben als gevolg van het vertraagd effect van debiet, dan is het moeilijk om er een trendbreuk van 2,5 cm uit te halen.

Bijkomend zien we dat er altijd een bepaalde faseverschuiving in waterpeil gaande is, vooral evident op weekniveau (Figuur 49). In sommige weken zien we dat de piek nagenoeg exact binnen een week valt, en op andere weken zien we dat de piek en het volgende dal tussen twee weken vallen. Dit levert effectief een schommeling op in de errors. Hoewel niet 100% gevrijwaard van problemen, lijkt het maandniveau hier redelijk mee om te gaan. We merken op dat een betere aggregatiemethode, getraind op de intrinsieke perioden van getijden, dit op kan lossen, maar tegen de prijs dat de tijdsintervallen dan oneven zijn, wat praktisch gezien veel statistische methodes uitsluit.

We concluderen dan ook dat een maandresolutie een ideaal gemiddelde is voor onze doeleinden: voldoende resolutie om relatief kleine effecten te kunnen detecteren, maar niet te hoog dat het model te gecompliceerd wordt. Tevens is de computationele kost haalbaar. Verder is hier op te merken dat effecten die uitmiddelen over een maand buiten de scope van deze opdracht vallen.





Figuur 49: De Laagwaterstanden te Liefkenshoek op verschillende resoluties, met elkaar vergeleken.

#### 4.5.1.4 Covariaten

In deze sectie bespreken we de covariaten alsof het model al gefit is. Dit stelt ons in staat om te kijken naar het effect van een covariaat op het uiteindelijke resultaat. Te meer, dit geeft ons toegang tot zogenaamde contrast plots waar we de impact van iedere covariaat afzonderlijk kunnen nagaan.

We spreken hier dan ook vaak over een *ongekende component* of een **onverklaarde component**. Dit is het residu van het model nadat we alle gekende fluctuaties verwijderd hebben: de component van het signaal die, vermoedelijk, door andere variabelen (zoals ingrepen) verklaard kan worden.

#### 4.5.1.4.1 Relatieve Zeespiegel en Getijcycli

De zeespiegel en de getijcycli vormen de belangrijkste componenten binnen het model omdat ze, evident, de meeste variatie veroorzaken, zoals we al zagen in §4.4. Deze degelijke modelleren is dan ook belangrijk en is het onderwerp van deze sectie.

##### Zeespiegel

De zeespiegel te Vlissingen modelleren we zoals bekomen in het onderzoek op de zeespiegelstijging voor de kust (§3). Praktisch gezien is het niet evident om de waarden die aldaar gevonden zijn over te nemen. Niet alleen omdat we hier ook andere getijparameters gebruiken, maar ook omdat:

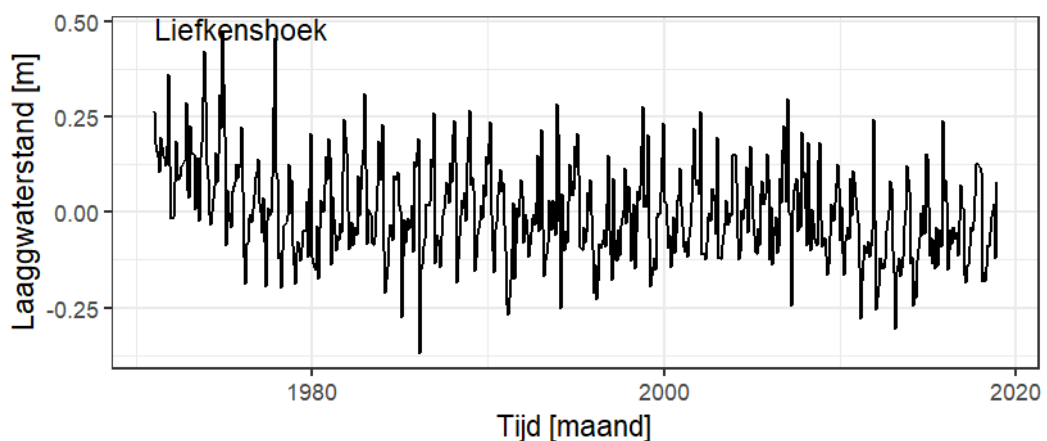
- 1) We op een andere resolutie werken.
- 2) We andere covariaten gebruiken. Deze kunnen hun eigen trends bevatten waar we rekening mee moeten houden bij het bepalen van een globale trend.
- 3) We andere effecten wensen toe te voegen welke hun eigen trends hebben. We hebben dus een effect van meerdere trends tegelijkertijd, iets wat moeilijk is om uit elkaar te halen door een statistisch model.

In de praktijk is het dus moeilijk om een statistisch onderscheid te maken tussen lokale trends, door ingrepen, en regionale trends door zeespiegelstijging. Ook kunnen oudere ingrepen van voor de beschouwde periode nog steeds een impact hebben, wat het beeld verder verwart. Hoewel we dus rekening houden met een lineaire trend is de implementatie niet zo simpel en verwijzen we de lezer naar sectie §4.5.1.5.3 en sectie §3. In de praktijk vervatten we de zeespiegelstijging en de trendbreuken in één proces, en stellen dat de consistente lineaire trend doorheen dit gehele proces de zeespiegelstijging is.

Merk op dat we hier de relatieve zeespiegelstijging modeleren. De achterliggende reden is tweeledig: (a) Er zijn onvoldoende gegevens voorhanden om een specifieke, niet rechte bodemdaling op te nemen in de vergelijking en (b) een statistisch model kan zonder voorafgaandelijke input geen onderscheid maken tussen 2 lineaire trends, maar zal deze gewoon optellen.

##### Getijcycli

De getijcycli veroorzaken de schommelingen met grootste amplitude in het estuarium en dienen dus gedegen gemodelleerd te worden. We kunnen dit zien in Figuur 50, waar we duidelijke patronen zien die zich herhalen (cyclische of seizoenale patronen) als gevolg van getijcycli.

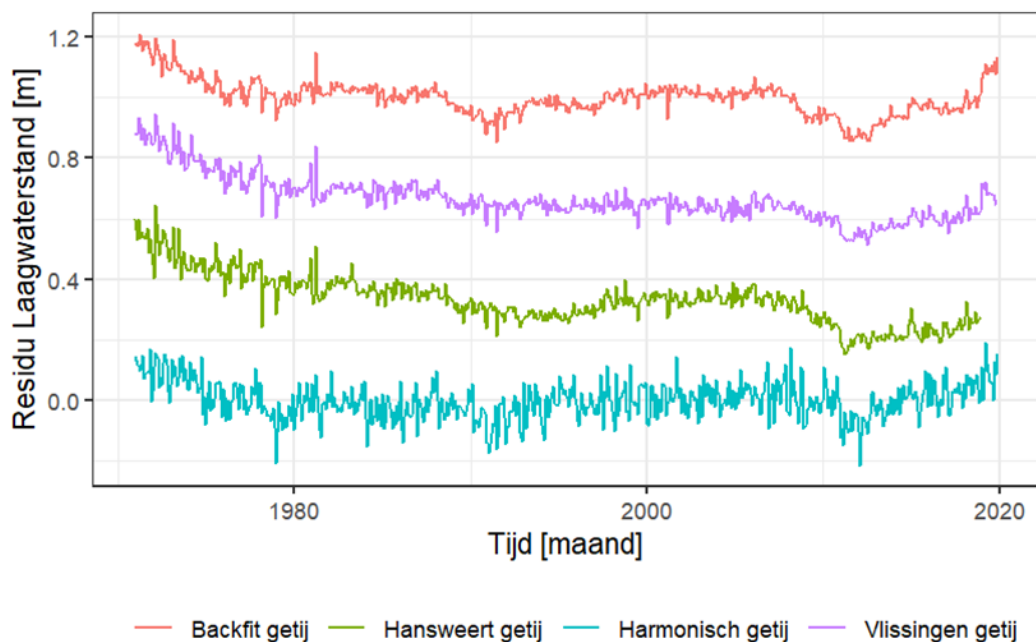


*Figuur 50: De laagwaterstanden te Liefkenshoek op maand resolutie. Merk op dat er een significante herhalende fluctuatie in het signaal zit.*

In hoofdstuk §3 gebruikten we hiervoor het harmonisch getij. Echter, hier is dit niet meer evident omdat we te maken hebben met: meerdere verschillende getijparameters, een maandelijkse resolutie, de effecten van het estuarium en de effecten van covariaten op het getij. Er is dus een flexibelere methode vereist. Om deze te ‘modelleren’ hebben we volgende keuzes verkend, elk met hun eigen voor- en nadelen:

1. Het gebruik van de meting van een stroomafwaarts gelegen post als verklarende variabele.
2. Het gebruik van de meting te Vlissingen (voor alle andere meetlocaties) als verklarende variabele.
3. Het gebruik van een harmonisch getij (gefit op de getijparameter specifiek): te Vlissingen of op de locatie zelf.
4. De extractie van een algemene hoogfrequente component voor alle posten, gegeven het hier ontwikkeld model.

Figuur 51 visualiseert deze opties voor de laagwaterstanden te Liefkenshoek. Merk op dat alle residuen gemiddeld nul zijn, echter, ze hebben hier een offset meegekregen voor een heldere visualisatie. Het is duidelijk dat de vierde optie de minste **ruis** oplevert, maar dat de andere opties ook relatief goed presteren.



*Figuur 51: De op de modellen uit sectie 3.3.1 gefitte residuen, elk bepaald met verschillende getijcycli. Zie sectie 4.5.1.4.1 voor in uitleg. Merk op dat alle residuen gemiddeld nul zijn, echter, ze hebben hier een offset meegekregen voor een heldere visualisatie.*

Naast ruis, dienen we ook de **interpreteerbaarheid van het model** in acht te nemen. De keuze voor optie 1 en 2 (‘Hansweert getij’ en ‘Vlissingen getij’ in Figuur 51) bemoeilijkt namelijk de interpretatie van de resultaten. In het geval van optie 1 moeten we de resultaten relatief aan de benedenstroomse post zien, welke verschilt per post en waardoor het vergelijk tussen de posten lastig wordt. Om dit te verhelpen kunnen we voor optie 2 kiezen door alle posten relatief aan Vlissingen te modelleren. Echter, dit zorgt ervoor dat we de trendwijzigingen nog altijd niet absoluut kunnen zien, maar enkel relatief aan Vlissingen, en de verscheidene onverklaarde effecten die daarin te zien zijn. Bijkomend, de effecten van exogene variabelen zijn voor een deel al gerepresenteerd in de getijdereeks van Vlissingen, wat het fitten van een model soms instabiel kan

maken. We merken als laatste op dat deze aanpak nog één ander probleem met zich meebrengt: Stel dat we een ingreep hebben te Hansweert en dat deze ingreep enkel een effect heeft te Hansweert. We zullen dan allereerst vergelijken met Vlissingen en deze ingreep detecteren te Hansweert, zoals verwacht. Echter, als we vervolgens verder kijken naar de volgende post, Liefkenshoek, dan zullen we ook hier een ingreep detecteren! Deze aanpak maakt de interpretatie niet alleen moeilijker, maar ook de vraag of een trendbreuk reëel is.

Opties 3 en 4 ('Harmonisch getij' en 'Backfit getij' in Figuur 51) kiezen een andere aanpak: ze fitten een component op de geobserveerde signalen via een nader te specificeren mechanisme. Dit idee kan vergeleken worden met het ontbinden van het signaal in deelcomponenten waarbij we enkel de componenten overhouden die voldoen aan bepaalde eigenschappen. Hier zijn deze eigenschappen zo gedefinieerd dat we het over golven hebben die relatief korte periodes hebben van maximaal een aantal jaar. Omdat deze methoden specifieke componenten uit het signaal halen die niet het gevolg zijn van ingrepen, is de interpretatie dus makkelijker. Echter, dit kan tegen de prijs komen van een verhoogde hoeveelheid ruis en dus een minder precieze schatting van de effecten:

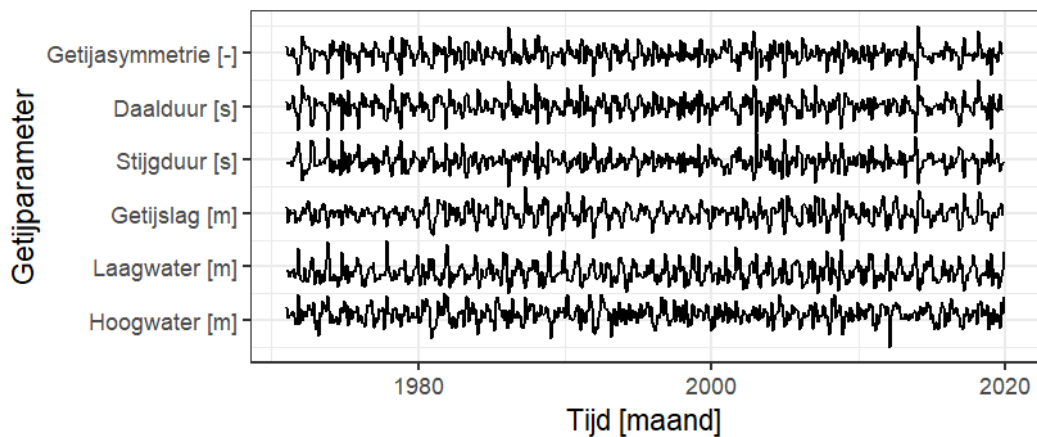
Methode drie fit harmonische getijden zoals in hoofdstuk §3. We gebruiken hier het R-pakket *TideHarmonics* (Stephenson, 2016) voor, maar fitten de verschillende getijparameters direct op maandresolutie. Deze optie is in Figuur 51 weergegeven als 'Harmonisch getij', en vertoont het meeste ruis van de vier opties. De patronen lijken vrijwel gelijk, maar ze zijn moeilijk te onderscheiden.

**De methode die we hier verkiezen is methode vier**, omdat ze de laagste ruis en de makkelijkste interpretatie oplevert zoals in Figuur 51 getoond als 'Backfit getij'. De methode om dit Backfit getij te bepalen is een backfitting procedure, zoals voor GAM's (zie sectie §4.5.1.5.2). De essentie van deze methode is om het model te fitten zonder de trends en de getijcycli. Daarna bepalen we trend en getijcycli door op de residuen van het model te werken. We bepalen dan dus de trend en een gedeelde component tussen alle posten *zonder* lokale trends, en stellen dat dit de getijcycli zijn. Ze is bepaald via het volgende algoritme:

1. Stel een term voor de trend, i.e. zeespiegel en trendbreuken, op als  $T(t) = 0$  en een term voor de getijcycli  $C(t) = 0$ .
2. Definieer de residu term als  $R(t) = H(t) - T(t) - C(t)$ , waar  $H(t)$  de observaties zijn.
3. Fit het model uit sectie §4.5.1.5.3, minus de trendbreuken spline en de getijcycli, op de residuen  $R(t)$ , noem de uitkomst hiervan  $\hat{H}(t)$ .
4. Update het residu als  $R(t) = H(t) - C(t) - \hat{H}(t)$  en fit daarop een trend, per post, met behulp van een LOESS regressie met een spanne van  $s$ . Dit geeft de trend in het signaal. Ken dit resultaat toe aan de trend component  $T(t)$ .
5. Bepaal wederom het residu, nu gedefinieerd als  $R(t) = H(t) - T(t) - \hat{H}(t)$ . En schaal deze residuen per post zodat ze hetzelfde gemiddelde hebben en dezelfde variantie. Deze schaling is nodig om gemakkelijk alle posten samen te kunnen beschouwen.
6. Bepaal de getijcomponent door, over alle posten, de mediaan te bepalen voor ieder tijdstip.
7. Bepaal op de gedeelde getijcomponent wederom een trend met behulp van LOESS zoals in stap 4 en verwijder deze trend. De reden hiervoor is om te verzekeren dat we geen lokale trends in de getijcycli hebben.
8. Schaal, voor iedere post, de seizoenale component zodat ze het beste fit. Ken de resultaten hiervan toe aan  $C(t)$ . Deze stap nemen we om de schaling in step 5 ongedaan te maken.
9. Ga terug naar stap 2 en herhaal totdat  $\hat{H}(t)$ ,  $T(t)$ , en  $C(t)$  niet meer veranderen.

Dit algoritme zorgt er effectief voor dat de getijcomponent, op een factor na, hetzelfde is voor alle posten en beperkt de fluctuaties door de getijcomponent te detrenden met behulp van een LOESS filter. De reden om de getijcomponenten, op een factor na, gelijk te schakelen voor alle posten is zodat de getijcomponent identificeerbaar wordt: als we de getijcomponent laten fluctueren van post naar post, hebben we maar één observatie per unieke getijcomponent en kunnen we deze dus niet onderscheiden van e.g. ingrepen. Merk hierbij ook op dat meer stroomopwaarts in het estuarium, de getijgolven niet exact periodisch zijn. Hoewel we deze niet expliciet meenemen in het model is het wel belangrijk om er tenminste hier rekening mee te houden. We merken ook op dat **we veronderstellen dat de verschillen in getijcycli tussen de posten lineair zijn**. De reden hiervoor is dat ze anders uitermate moeilijk te identificeren zijn.

In praktijk beheersen we de snelheid van de fluctuaties in de trend en de getijcycli dus door middel van de *spanne* van de LOESS methode *s* in te stellen. Deze parameter bepaalt hoe groot het window voor de LOESS is als een fractie van de totale lengte van het signaal. We tonen de gefitte getijcycli in Figuur 52. Merk op dat deze genormaliseerd zijn.



*Figuur 52: De gefitte getijcycli, per getijparameter. Merk op dat de waarden genormaliseerd zijn.*

Nu we de gefitte getijcycli hebben, is het interessant om te kijken naar **de verklarende kracht van deze getijcycli**, dat wil zeggen, hoeveel informatie de getijcycli toevoegen aan het model. We doen dit door effectief twee modellen te fitten: (a) een model met alle factoren, typisch het model in sectie §4.5.1.5.3 en (b) één model zonder de component waar we in geïnteresseerd zijn. Beide modellen hebben een zogenaamde coëfficiënt van determinatie, vaak de “*R squared*” genoemd:

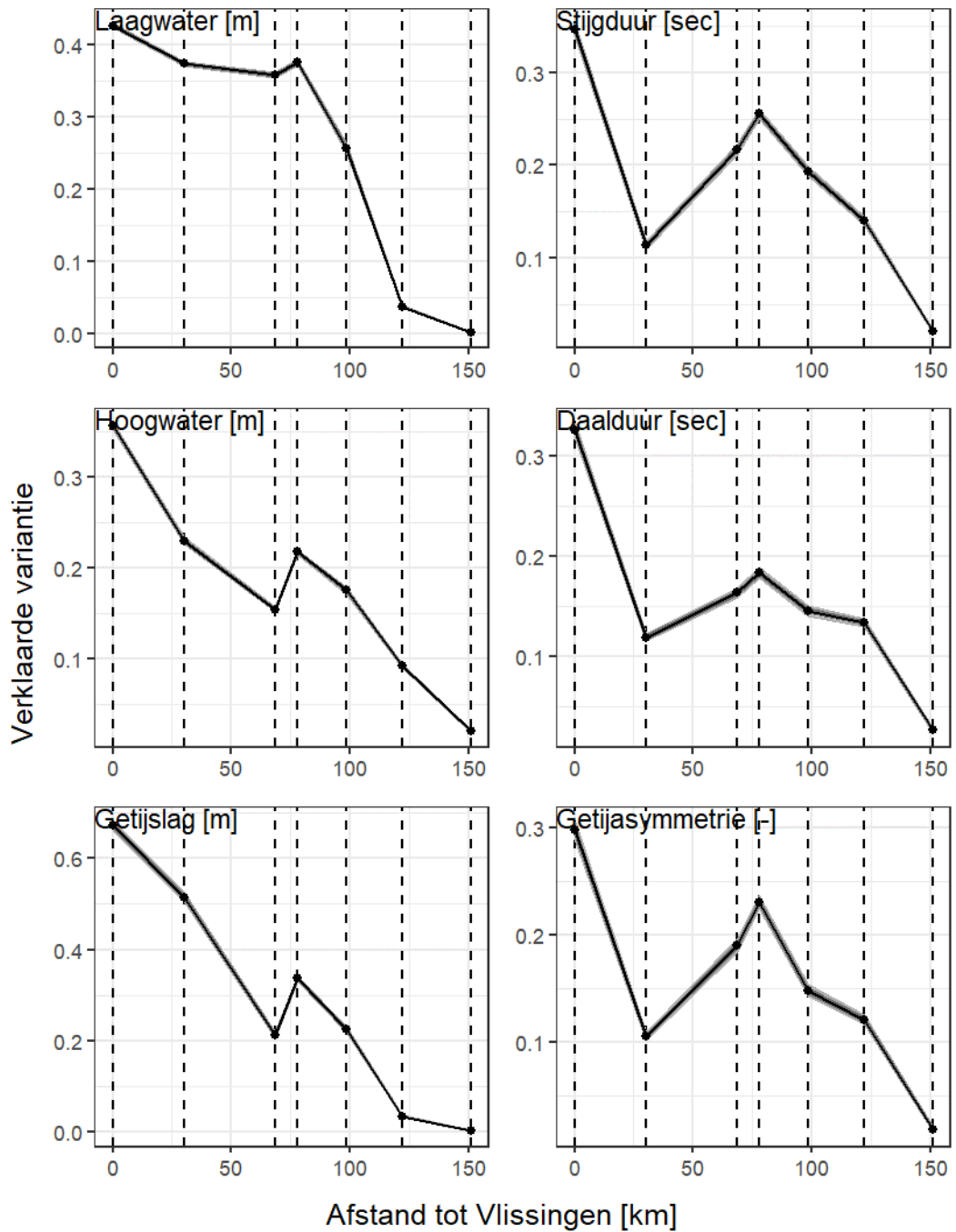
$$r^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - f_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}$$

Waar  $y_i$  een observatie is,  $f_i$  een model voorspelling en  $\bar{y}$  het gemiddelde van alle observaties. We kunnen dit berekenen voor beide modellen, en noemen deze  $r_{vol}^2$  voor het volledig model, en  $r_{red}^2$  voor het gereduceerd model. We berekenen dan een bijdrage aan het model als:

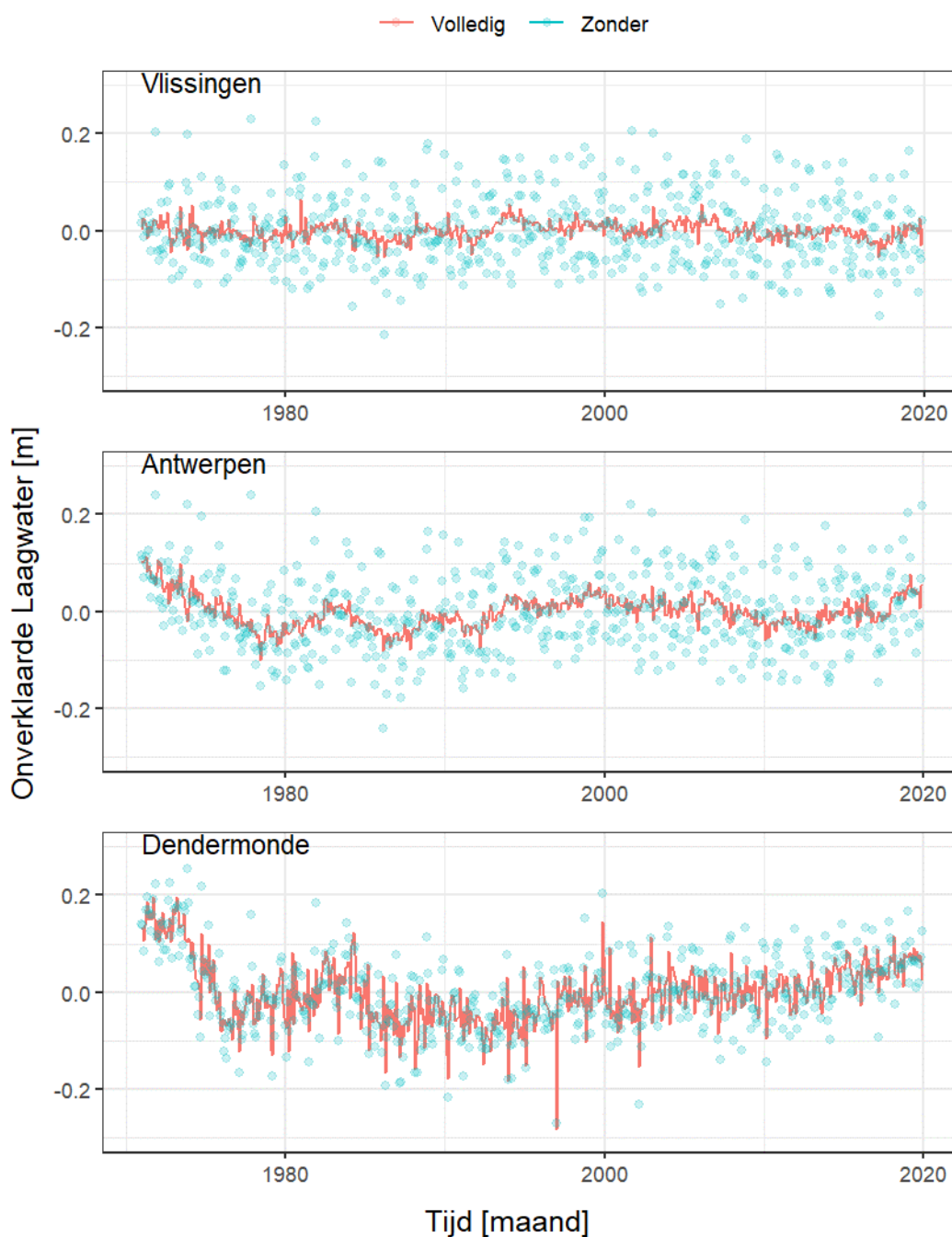
$$r_{add}^2 = r_{vol}^2 - r_{red}^2$$

We merken op dat de modellen hier **niet** afzonderlijk gefit worden, dat wil zeggen, het gereduceerde model stelt effectief de bijdrage van de component van belang op nul. De reden hiervoor is dat we hier werken met bijzonder flexibele modellen en als we één bepaalde component censureren, het mogelijk is dat een andere component dit gedrag overneemt als gevolg van de gelijkaardige cyclische componenten in alle covariaten. We tonen de resultaten hiervan in Figuur 53. We zien hier duidelijk dat de getijcycli, voor alle getijparameters, een afnemend belang hebben bij toenemende afstand van Vlissingen. Dit is zoals we verwachten vanuit een fysische interpretatie.

In Figuur 54 zien we de effecten van de getijcyclus op de ongekende component. Deze plot geeft effectief hetzelfde weer als Figuur 53, maar toont dit als bijdragen op individuele tijdstippen.



*Figuur 53: De toegevoegde waarde van de getijcyclus, per post per getijparameter. De verticale stippellijnen geven de locaties aan van (van links naar rechts): Vlissingen, Hansweert, Liefkenshoek, Antwerpen, Schelle, Dendermonde, en Melle.*



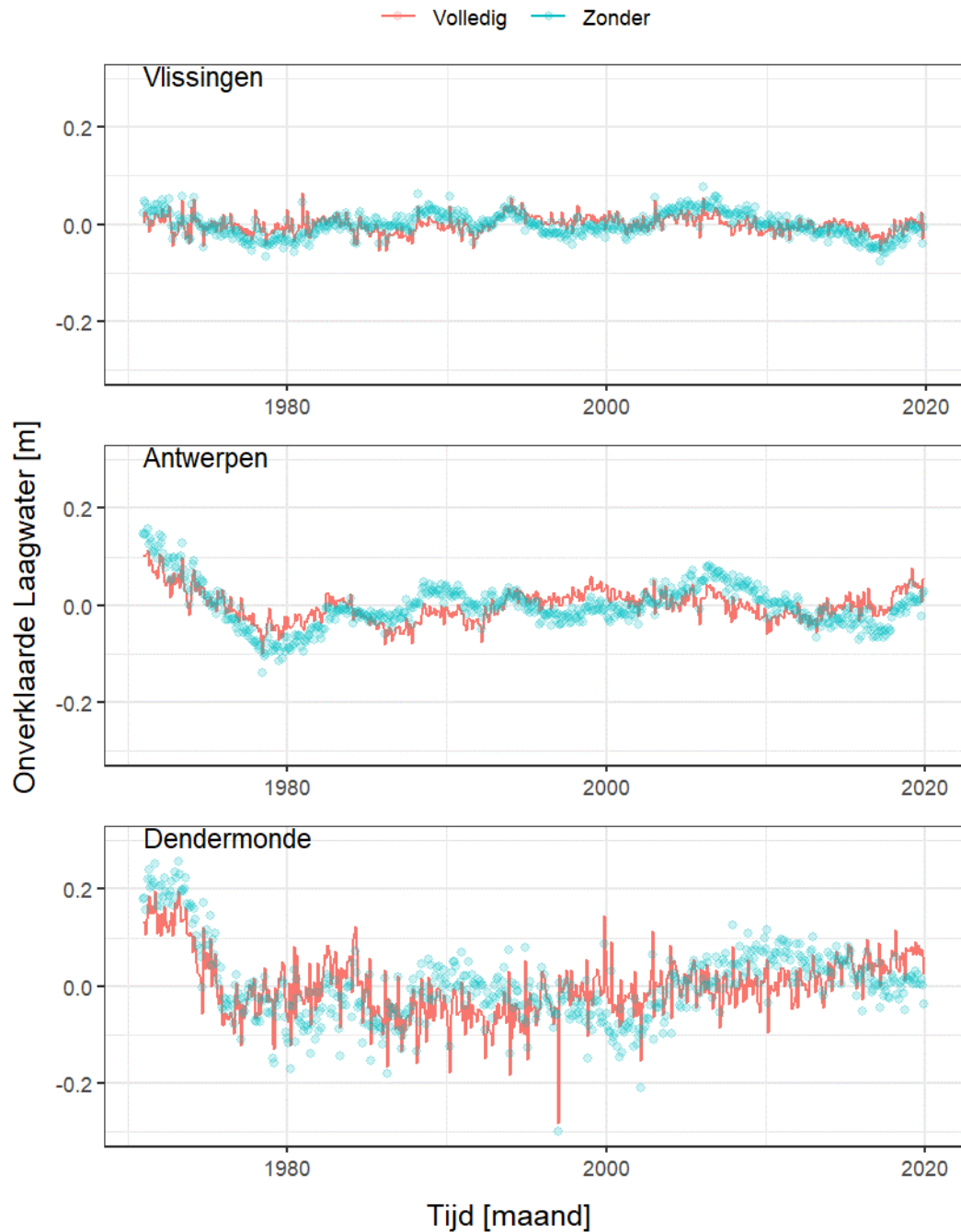
*Figuur 54: De bijdrage van de getijcyclus op het model. De rode lijn is het model met deze component, i.e. de getijcyclus, de blauwe stippen de onverklaarde component als we dit covariaat zouden negeren.*

#### 4.5.1.4.2 Meerjarige cycli

In de getijparameter vinden we ook nog enkele langjarige cycli: de nodale getijcyclus en een zevenjarige cyclus mogelijks geassocieerd met de Noord-Atlantische oscillatie. Figuur 55 toont dit voor de nodale cyclus: de residuen van het model zonder en met een gefitte nodale cyclus. We zien dat de nodale cyclus duidelijk een waarde toevoegt, zoals ook te zien is in de *R-squared* plots in Figuur 56. We merken wel op dat er significante onzekerheid bestaat rond de exacte effecten van de nodale cyclus, ten slotte, ze kan worden geïnterpreteerd door het model als een trend, omdat ze

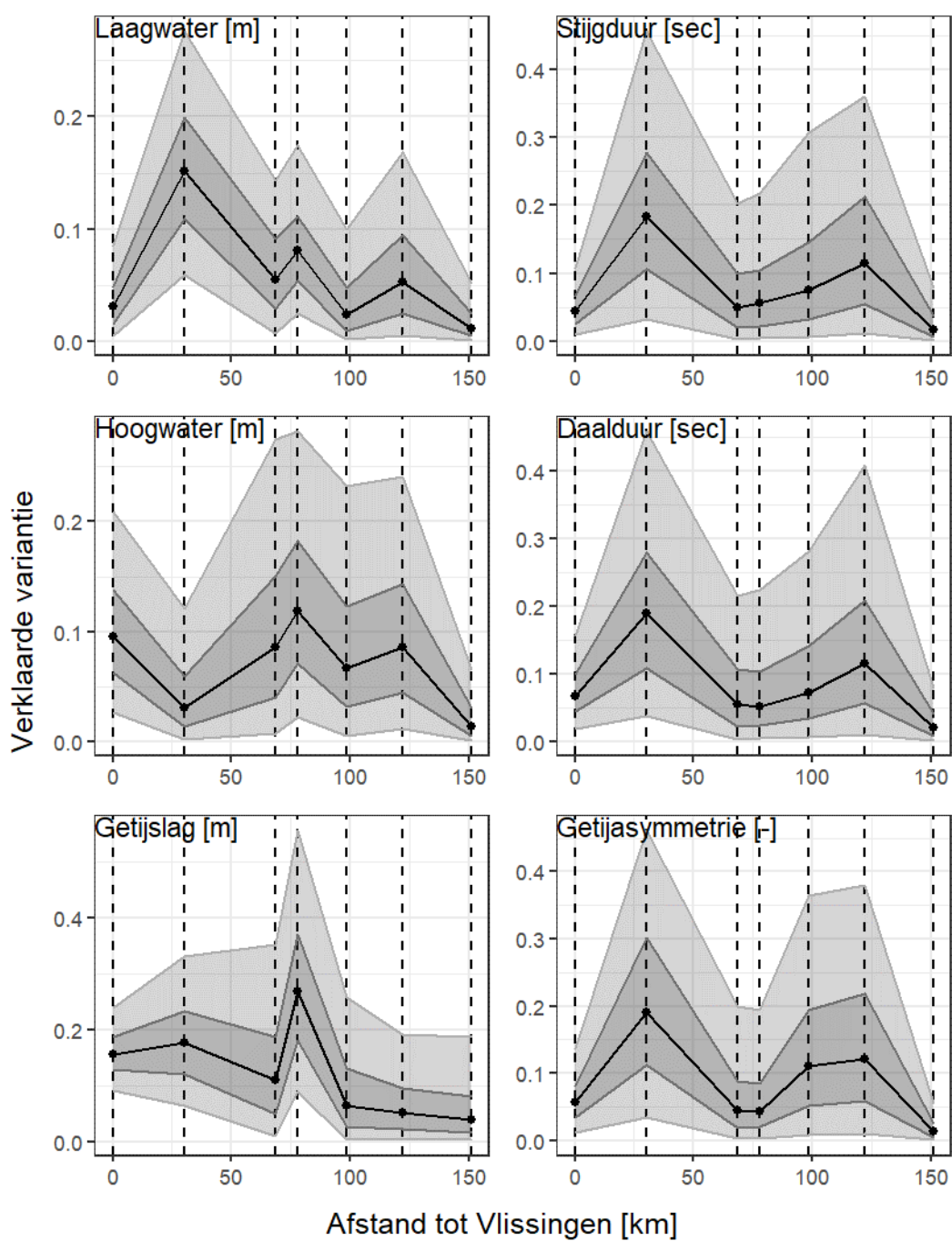
langzaam varieert. Hoewel de onzekerheid significant is, is het wel op te merken dat ze niet normaal verdeeld is en sterk gepiekt is rond de mediane schatting.

We verkennen het belang van de zevenjarige cyclus door de  $r_{add}^2$  methode. In Figuur 57 zien we dat de zevenjarige cyclus van minder belang is dan de nodale cyclus en dat de onzekerheid erop minder is. We merken ook hier op dat soms geen onderscheid kan maken tussen lange termijn trends en de nodale cyclus, alsook de zevenjarige cyclus.

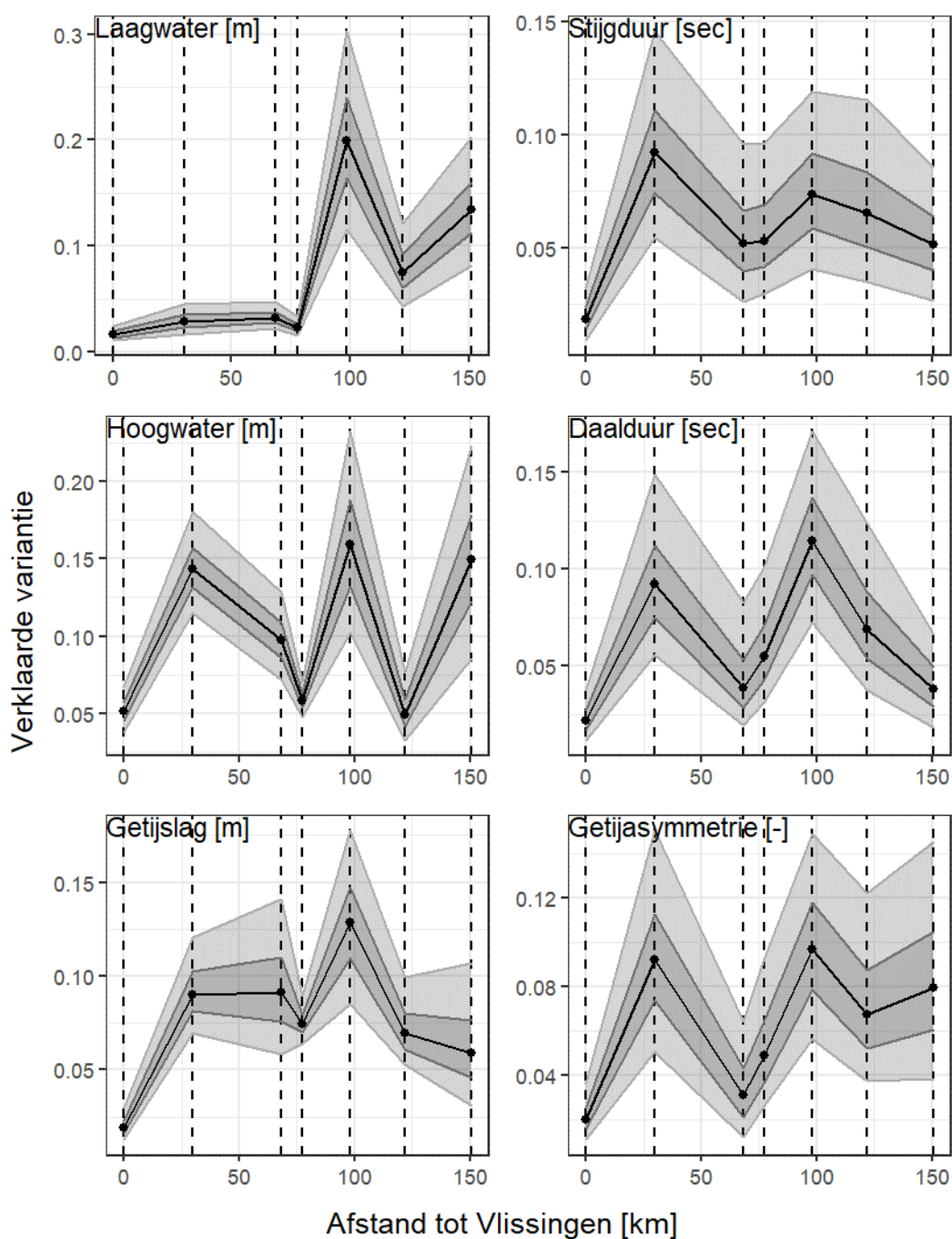


*Figuur 55: De residuen met en zonder de nodale cyclus voor enkele posten op Laagwater.*





Figuur 56: De toegevoegde waarde van de nodale cyclus zoals aangegeven door een verbeterde R-squared. De licht grijze vlakken geven de posterioere onzekerheid weer, licht grijs gaat van 5% kwantiel tot het 95% kwantiel, de donker grijze vlakken van het 25<sup>ste</sup> percentiel tot en 75<sup>ste</sup> percentiel. De verticale stippellijnen geven de locaties aan van (van links naar rechts): Vlissingen, Hansweert, Liefkenshoek, Antwerpen, Schelle, Dendermonde, en Melle.



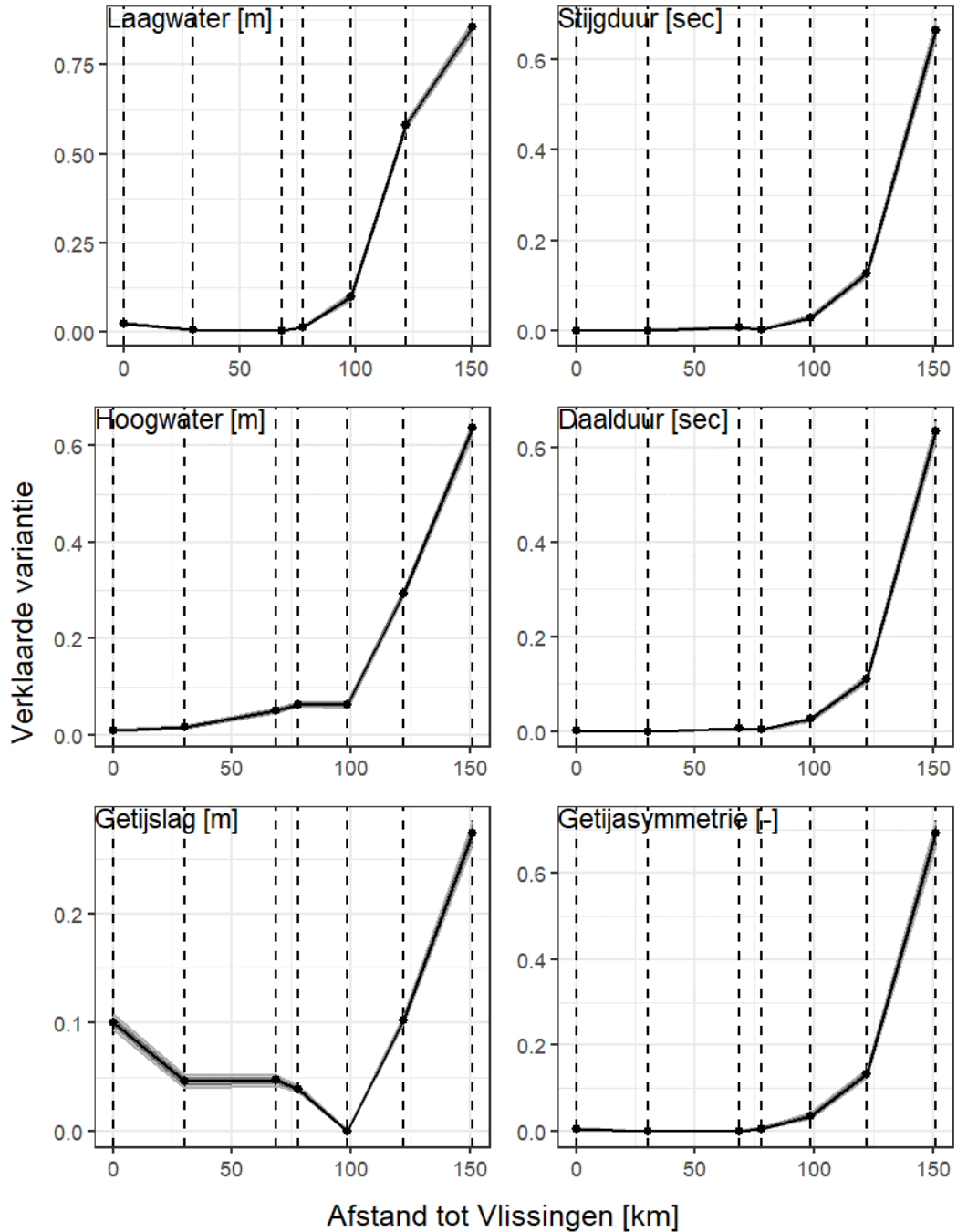
Figuur 57: De toegevoegde R-squared voor de zevenjarige cyclus. Merk op dat de toegevoegde waarde vaak klein is en dat de onzekerheid erop ook navenant klein is. De verticale stippellijnen geven de locaties aan van (van links naar rechts): Vlissingen, Hansweert, Liefkenshoek, Antwerpen, Schelle, Dendermonde, en Melle.

#### 4.5.1.4.3 Bovenafvoer

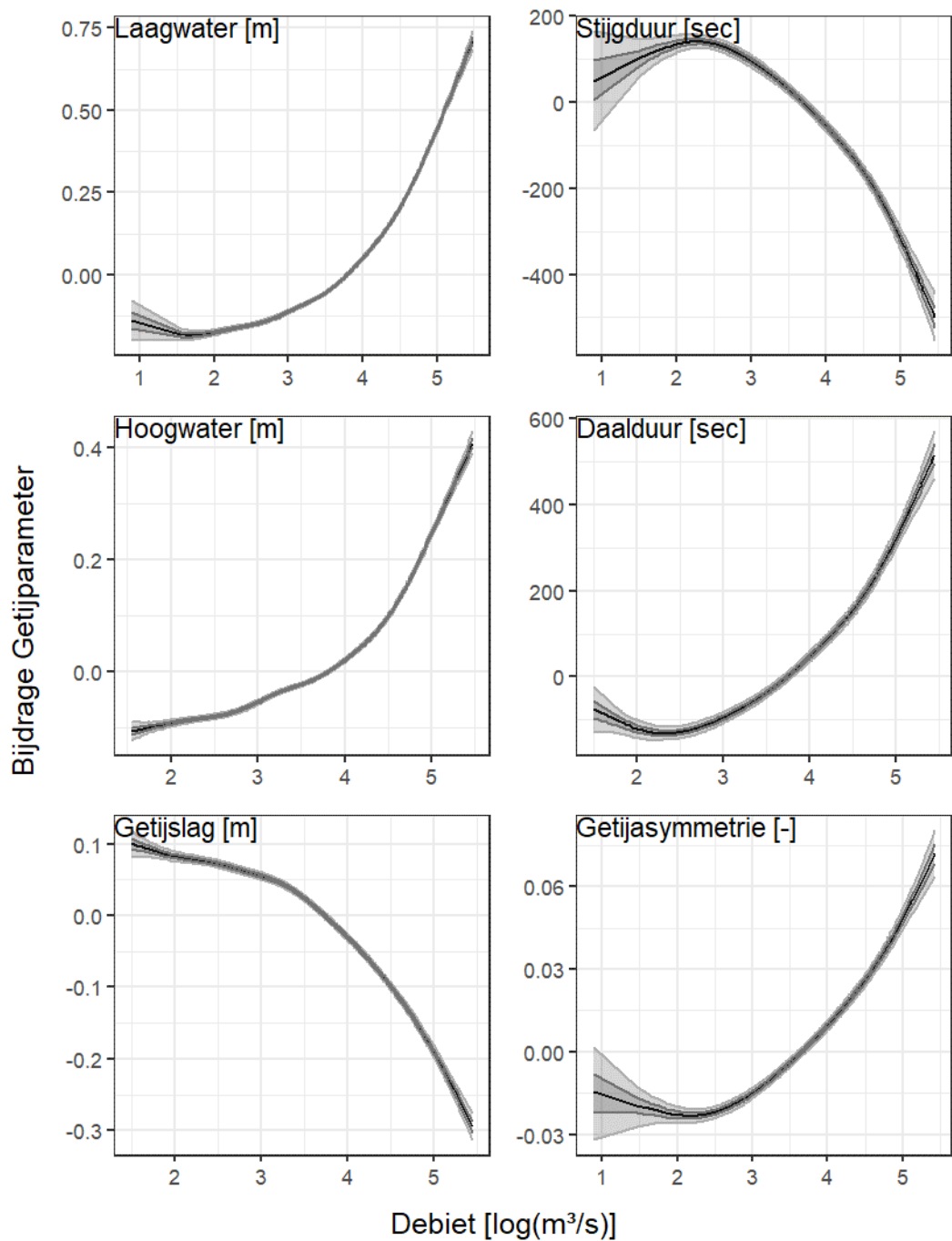
Het zoetwaterdebiet vanuit de bovenstromen is vanuit een fysisch oogpunt een belangrijke component stroomopwaarts in het estuarium en dient dus meegenomen te worden in het statistisch model. Als eerste merken we op dat we het debiet log-transformeren. De reden hiervoor is dat zonder een transformatie de relatie tussen e.g. laagwaterstanden en debiet gedomineerd wordt door enkele hoge waarden, wat vreemde resultaten kan opleveren.

Figuur 58 presenteert de bijdrage van het debiet voor verschillende posten door een  $r_{add}^2$  plot te maken in. We zien duidelijk het verwachte patroon: nabij de monding van het estuarium is het belang van debiet nihil, terwijl dit dieper in het estuarium groter wordt. De uitzondering hierop lijkt getijslag, waar we een significant effect zien bij de Vlissingen. Merk echter op dat dit alsnog een relatief klein effect is. Als we naar de directe bijdrage op enkele posten kijken (Figuur 58), zien we ook dat de bijdrage van debiet nabij de mond van het estuarium verwaarloosbaar is.

Debiet is de eerste variabele dat we met een niet-rechthoekig verband modelleren. We tonen dit in Figuur 59, waar we de waarden van het log-getransformeerde debiet op de X-as tonen, en de bijdrage aan de getijparameter op de Y-as.



Figuur 58: De R-squared plots voor het debiet. De verticale stippellijnen geven de locaties aan van (van links naar rechts): Vlissingen, Hansweert, Liefkenshoek, Antwerpen, Schelle, Dendermonde, en Melle.



Figuur 59: De contrast plots voor het debiet te Dendermonde. De intervallen hier zijn dezelfde als in Figuur 56

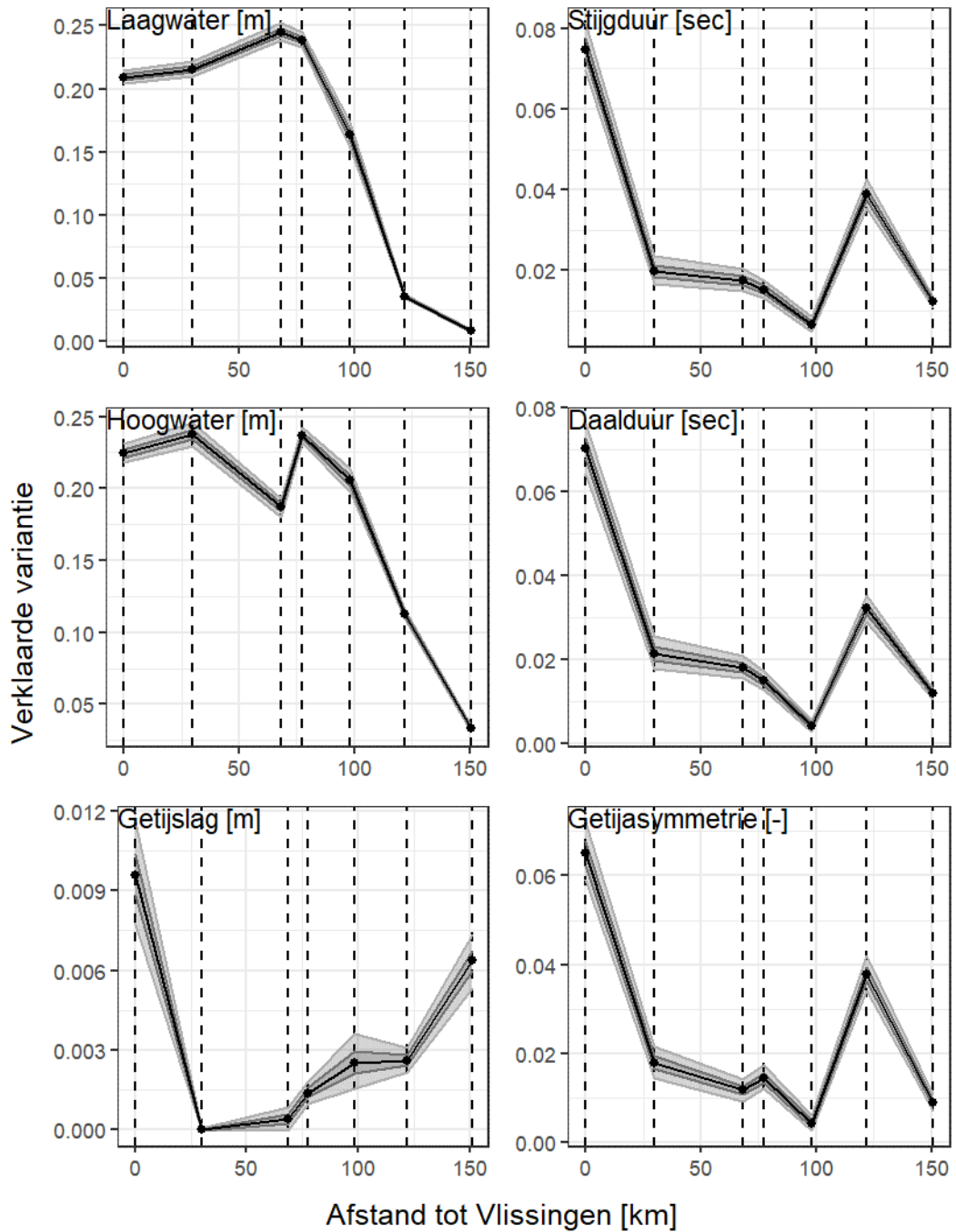
#### 4.5.1.4.4 Windklimaat

Ook het windklimaat – met de Oost-West en Noord-Zuid componenten – lijkt relevant. We bespreken dit in twee componenten (Oost-West vs. Noord-Zuid wind) omdat deze in praktijk een ander effect uitoefenen op de watermassa in (en voor) het estuarium.

##### Oost-West wind

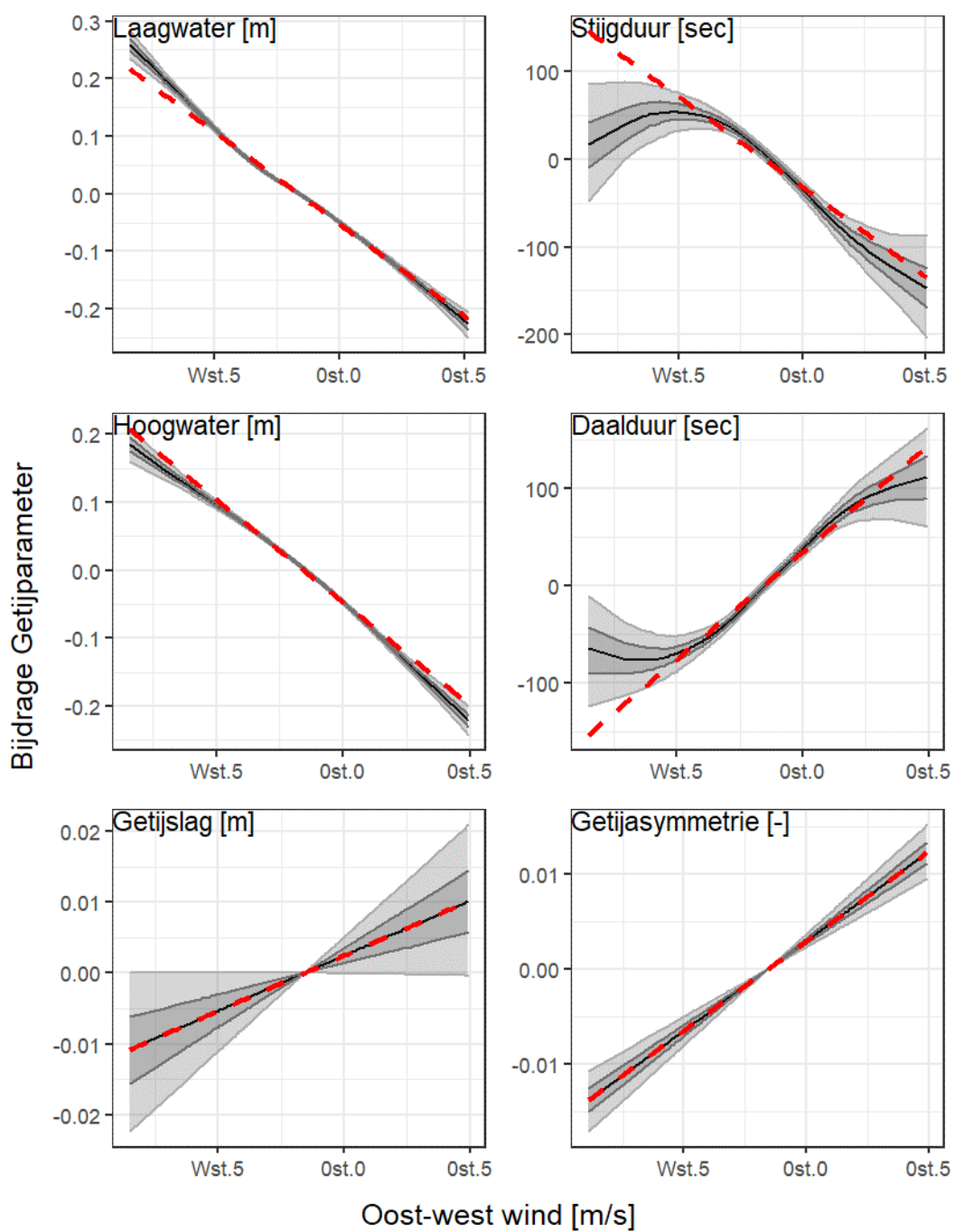
De Oost-West wind heeft een directe invloed op de getijden door opstuwing. Figuur 60 presenteert de relatieve bijdrage van iedere getijcomponent doorheen het estuarium. Wederom zien we dat onze fysische verwachtingen grotendeels voldaan worden: nabij de monding is het effect van de

Oost-West wind significant (vooral op de stand gerelateerde getijparameters<sup>17</sup>) en de invloed zwakt meer stroomopwaarts af. We zien ook dat de niet-rechthoekige component van de Oost-West wind significant is, vooral bij de tijdsgerelateerde getijparameters (Figuur 61).



Figuur 60: De relatieve bijdrage van de Oost-West wind voor de verschillende getijparameters en posten. De verticale stippellijnen geven de locaties aan van (van links naar rechts): Vlissingen, Hansweert, Liefkenshoek, Antwerpen, Schelle, Dendermonde, en Melle.

<sup>17</sup> Lees: Hoogwater, Laagwater en Getijslag. In contrast: Tijd gerelateerde parameters: Stijgduur, Daalduur en getijasymmetrie

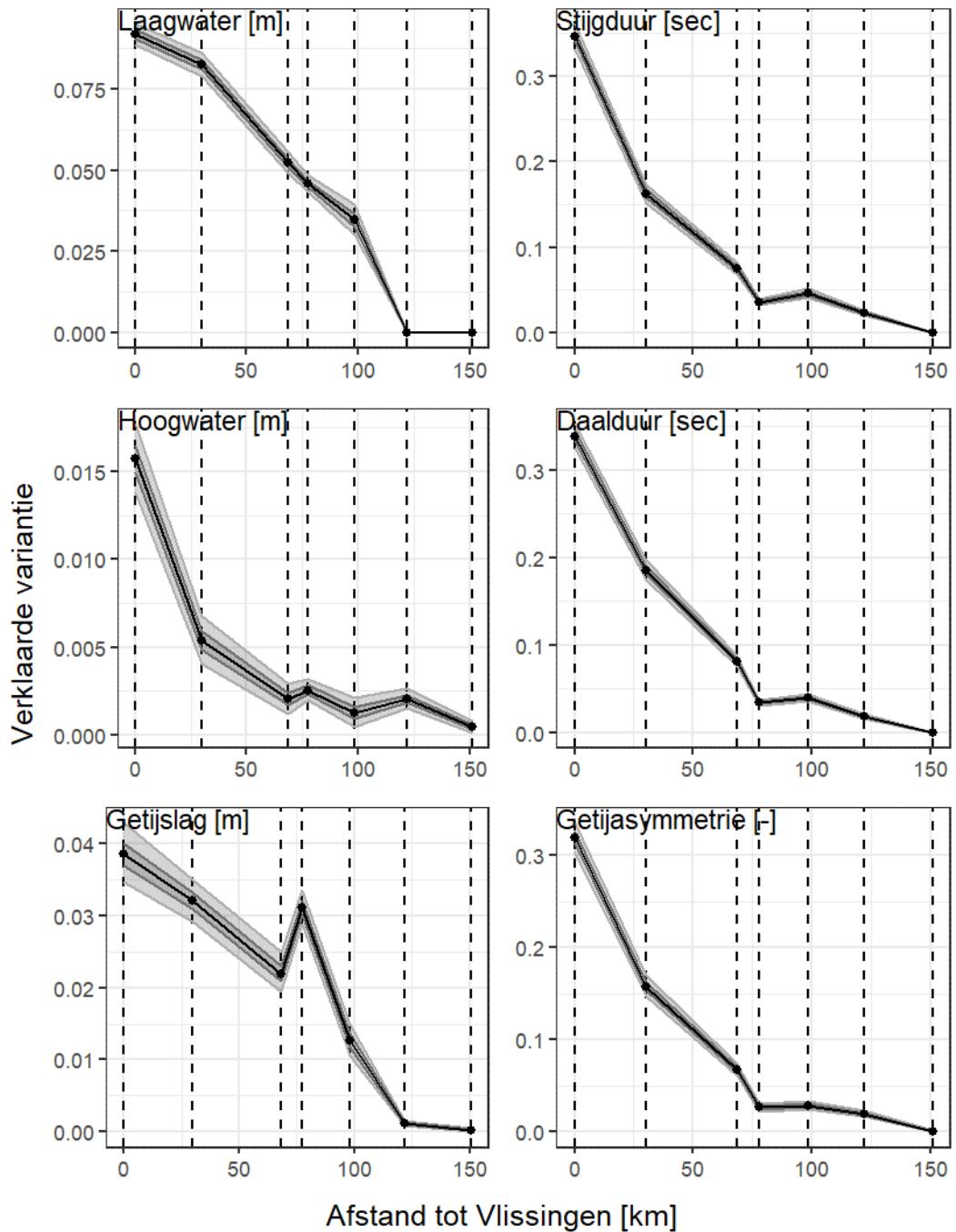


Figuur 61: De contrast plots voor de Oost-West wind te Liefkenshoek. Merk op dat de meeste verbanden rechtlijnig zijn (rode stippellijn), maar enkele sterke afwijkingen vertonen.

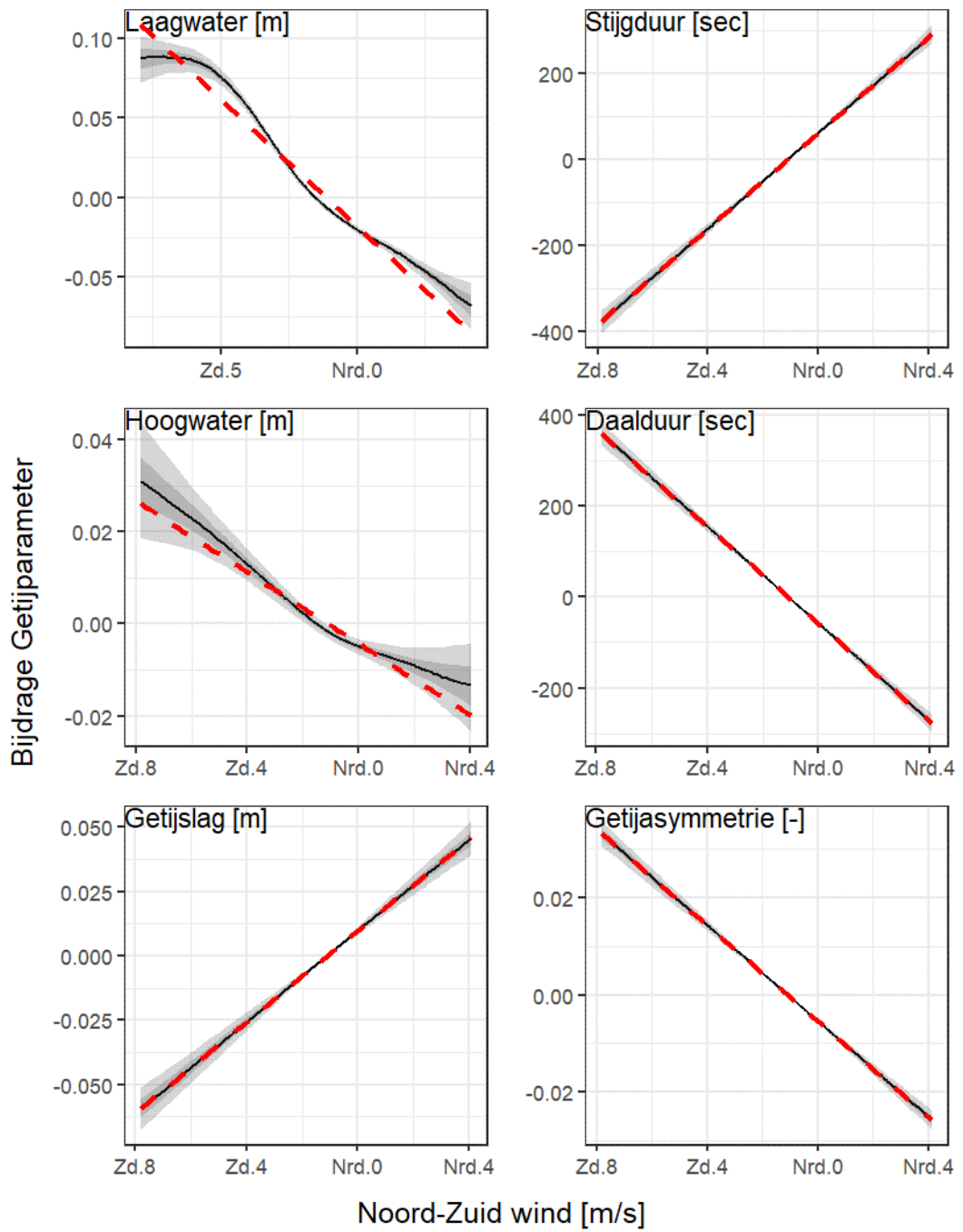
### Noord-Zuid wind

De fysische interpretatie van de Noord-Zuid wind is lastiger, omdat ze niet direct/minder voor opstuwung of afvlakking kan zorgen, gegeven de ligging van het estuarium. Echter, we zien dat ze wel degelijk een invloed heeft, voornamelijk op de tijdsgerelateerde getijparameters. We tonen dit in Figuur 62, waar we ook zien dat aan de fysische verwachting voldaan wordt: het effect van de wind zwakt stroomopwaarts af.

De noord-zuid wind lijkt grotendeels lineair in haar effect (Figuur 63), met uitzonderingen van kleine trendbreuken zoals we ook zagen in hoofdstuk §2.4.



Figuur 62: De bijdrage van de Noord-Zuid wind aan de verschillende getijparameters.



Figuur 63: De contrast plots voor de getijparameters te Vlissingen.



#### 4.5.1.5 Gegeneraliseerde Additieve Modellen

##### 4.5.1.5.1 Inleiding

Gegeneraliseerde Additieve Modellen, *Generalised Additive Models*, of kortweg GAMs zijn een veralgemening van het concept van lineaire regressie. Ze zijn origineel gepresenteerd door Hastie & Tibshirani (1990) met als doel een midden te voorzien tussen lineaire modellen zoals in §3 en de non-parametrische regressie (Breiman & Friedman, 1985).

Een dergelijk model beschouwt de relatie tussen een getijparameter en één covariaat als een non-parametrische regressie, maar dwingt een additieve structuur af op het probleem als geheel. Dit zorgt ervoor dat het model beter te fitten en begrijpen is, zonder dat we vastzitten aan bijzonder restrictieve modelformules. Zoals we in de voorgaande secties zagen is een puur lineair model te restrictief voor het modelleren van de afhankelijkheden tussen de covariaten en de getijparameters. Bijvoorbeeld, de relatie tussen debiet en waterstand is non-lineair, i.e. de partiële regressie gedraagt zich niet als een rechte lijn. Hoewel het mogelijk is om polynomen toe te voegen, is dit in de praktijk vaak lastig vanwege de onstabielheid en collineariteit van de resultaten, verder is dit in complexere situaties, zoals hier, moeilijk te bepalen vanwege de grote hoeveelheid mogelijke transformaties en associaties tussen de parameters. Verder is het ook vaak het geval dat polynomiale termen geen tevredenstellende fit opleveren.

##### 4.5.1.5.2 Een GAM geïllustreerd

Een GAM heeft in het algemeen de volgende structuur

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^p f_j(X_j) + \epsilon_i.$$

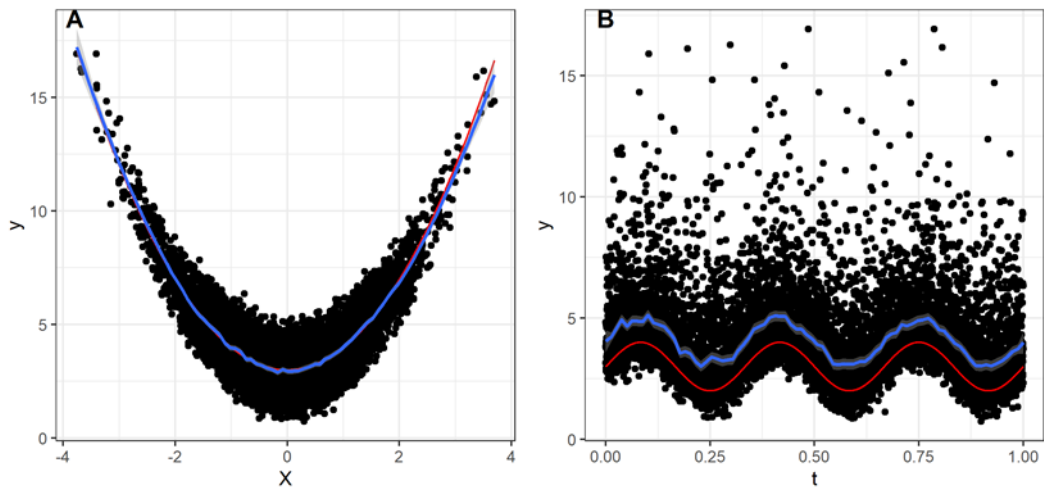
waar  $\beta_0 = \bar{Y}$  en  $\epsilon \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ , een *i.i.d.* fout. De termen  $f_j(X_j)$  zijn onbekende gladde functies van de covariaten  $X_j$ . Dit wil simpel zeggen dat we een functie  $f_j$  fitten tussen  $y_i$  en de covariaat  $X_j$  welke moet voldoen aan een aantal eisen zoals een gemiddelde hebben van nul en "glad" zijn. Dit laatste betekent dat we niet zomaar een functie kunnen gebruiken met compleet willekeurig patroon, maar dat we, in de praktijk, visueel een relatie moeten kunnen identificeren.

Om het idee achter een GAM duidelijk te maken, alsook de beperkingen, is het gemakkelijk om een synthetisch voorbeeld te gebruiken. We introduceren het volgende model

$$y(t) = 3 + X(t)^2 + 2\sin(d\pi t) + \epsilon,$$

Waar  $X \sim \mathcal{N}(0,1)$ ,  $t=0 \dots 1$  en  $\epsilon \sim \mathcal{N}(0,0.5)$ .

Effectief hebben we dus twee covariaten in ons model, een gegeven is als random fluctuaties en de tijd. Beide hebben een sterke non-lineaire relatie met  $y(t)$ , die we in onze modelleeroefening als onbekend aannemen. In Figuur 64(A) zien we de relatie tussen  $y$  en  $X$  en in Figuur 64(B) de relatie tussen de tijd  $t$  en  $y$ . De rode lijn geeft de, vooralsnog onbekende, relatie tussen  $X - y$  en  $y -$  de tijd  $t$  weer en de blauwe een *gesmoothte* (m.b.v. LOESS) fit tussen de twee. Duidelijk is dat we beide functies bijna onmiddellijk kunnen herkennen in de scatter plots, op wat bias na. Deze bias wordt veroorzaakt door de GAM die een constante niet kan herkennen, i.e. als we een waarde optellen bij een van de termen in bovenstaande vergelijking dan is het in de uitkomst  $y(t)$  niet te herkennen van welke term deze constante af komt.



Figuur 64: De variabelen van de vergelijking in sectie 4.5.1.5.2. Blauw zijn de LOESS relaties, rood de feitelijke echte waarden.

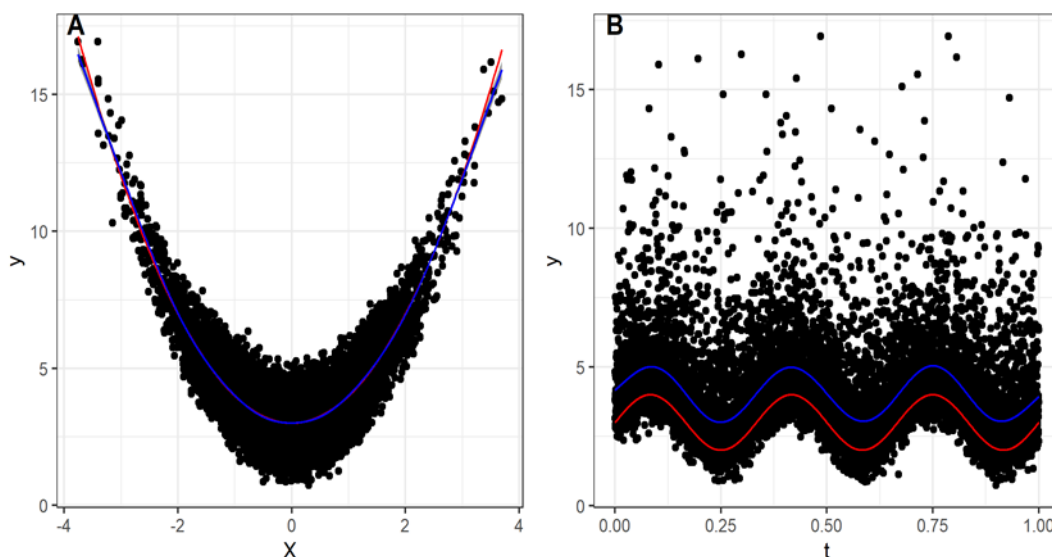
De reden voor de onmiddellijke herkenbaarheid is dat beide functies drastisch verschillend zijn, ze zijn dusdanig verschillend van elkaar dat, onder bepaalde aannames, we de effecten van beide functies van elkaar kunnen scheiden, of kunnen identificeren. Een GAM formaliseert dit idee en vraagt zich af hoe we deze kennis kunnen gebruiken om, op statistisch correcte wijze, de originele functies terug te schatten.

Een GAM beantwoordt deze vraag door Backfitting (Friedman *et al.*, 2001): een simpele procedure waar we eerst (bijvoorbeeld) de relatie tussen  $X$  en  $y$  schatten met behulp van een gladde functie, i.e. een functie die beperkingen stelt aan hoe snel hij kan fluctueren. Dit is belangrijk omdat we anders té flexibele functies overhouden die ook het effect van  $t$  op  $y$  kunnen modelleren, tegelijkertijd met dat van  $X$ . Dit zou ervoor zorgen dat we de functies effectief niet uit elkaar kunnen halen.

Hierna houden we een residu over, in dit residu schatten we dan de relatie tussen  $t$  en  $y$  wederom met een gladde functie voor dezelfde redenen als hierboven. Formeel gesteld in termen van de eerste vergelijking in deze sectie:

1. Initialiseer  $\beta_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ ,  $f_j(t) = 0$ ;  $\forall j, t$
2. Herhaal voor  $j = 1, 2, \dots, p, 1, 2, \dots, p, \dots$  (i.e. itereer herhaaldelijk of  $j = 1, 2, \dots, p$ )
  - a. Fit  $f_j$  op basis van de data  $y_i - \beta_0 - \sum_{k \neq j} f_k(x_{ij})$
  - b. Centreer de functie  $f_j = f_j - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij}$
  - c. Herhaal dit totdat de functies  $f_j$  en de waarde  $\beta_0$  niet meer veranderen.

De crux achter een GAM als statistische methode is het bewijs dat dit convergeert voor alle gladde, regelmatige functies en dat de eigenschappen van deze convergentie bekend zijn (Wood, 2017). We merken wel op dat in de praktijk deze methode (i.e. backfitting) niet gebruikt wordt, maar een efficiëntere methode. De resultaten zijn getoond in Figuur 65, waar we zien dat de originele functies quasi exact teruggevonden worden. We merken op dat de functie van  $t$  een bias vertoont, wat het gevolg is van het feit dat een GAM geen gemiddelde kan schatten voor de afzonderlijke functies en dus alle gemiddelden in één waarde steekt. Voor een meer technische bespreking van deze methoden verwijzen wij de lezer naar (Hastie & Tibshirani, 1990; Wood, 2017).



Figuur 65: De gefitte resultaten van het voorbeeld in Figuur 64.

#### 4.5.1.5.3 Een GAM voor getijparameters

We stellen, voor alle getijparameters en posten, de volgende relatie op met behulp van een GAM:

$$H(t) = \beta_0 + [Getij] + [Cycli] + f_Q(\log(Q(t))) + f_{OW}(OW(t)) + f_{NW}(NW(t)) + f_{TB}(t) + \epsilon$$

Hier is  $H(t)$  een generieke getijparameter, en  $\beta_0 = \bar{H}$ , praktisch gezien. Merk op dat we hier dus forceren dat alle predictoren een gemiddelde van nul hebben. Verder nemen we aan dat alle variabelen gecentreerd zijn. De termen  $[Getij]$  en  $[Cycli]$  zijn twee generieke termen voor de getijcycli en de langjarige cycli, respectievelijk. De andere termen zijn de verschillende covariaten, debiet ( $Q(t)$ ), Oost-West wind ( $OW(t)$ ), de Noord-West wind ( $NW(t)$ ) en een generiek proces voor de trendbreuken ( $f_{TB}(t)$ , zie sectie §4.5.2.5.1). Elke covariaat heeft een non-lineaire functie  $f$  met zich geassocieerd, i.e. de transformatie functie op basis van splines in een GAM.

#### 4.5.1.5.4 Een GAM fitten

Het fitten van een GAM is niet zo simpel als dat is bij lineaire regressie. Logischerwijs hebben de functies  $f_j$  meer parameters dan de simpele rechte lijnen die we gebruiken in OLS. Deze functies kunnen op meerdere manieren gemodelleerd worden, maar de standaard die we hier gebruiken is de spline methode van (Wood, 2017), zoals geïmplementeerd in het R-pakket *mgcv* (2020).

Splines zijn, kort gezegd, flexibele functies waarvan we de gladheid – hoe snel ze kunnen variëren – kunnen regelen. Ze zijn ideaal voor het benaderen van gladde functies (zoals een sinusgolf) waarvan we geen exacte wiskundige functie kunnen of willen geven. Er zijn meerdere types splines, elk met hun eigen voordelen en nadelen. Voor een diepgaande introductie van splines in de context van GAMS refereren wij naar Wood (2017).

De keuze voor verschillende splines is moeilijk te maken op basis van een inspectie van de data. Er is geen direct criterium om het ene spline model over het andere te verkiezen. Hetzelfde geldt voor de keuze van de parameters voor de spline, het aantal breukpunten (*knots*) en de gladheid (*smoothness penalty*). Na experimentatie met de verschillende splines en *settings* komen wij tot de conclusie dat de precieze keuze van splines en hun parameters nauwelijks een gevolg heeft voor de verschillende covariaten, zolang deze redelijk zijn. Praktisch gezien gebruiken we een penalized spline met 10 knots en een gladheid van 2. We gebruiken ook het algoritme van (Marra en Wood,

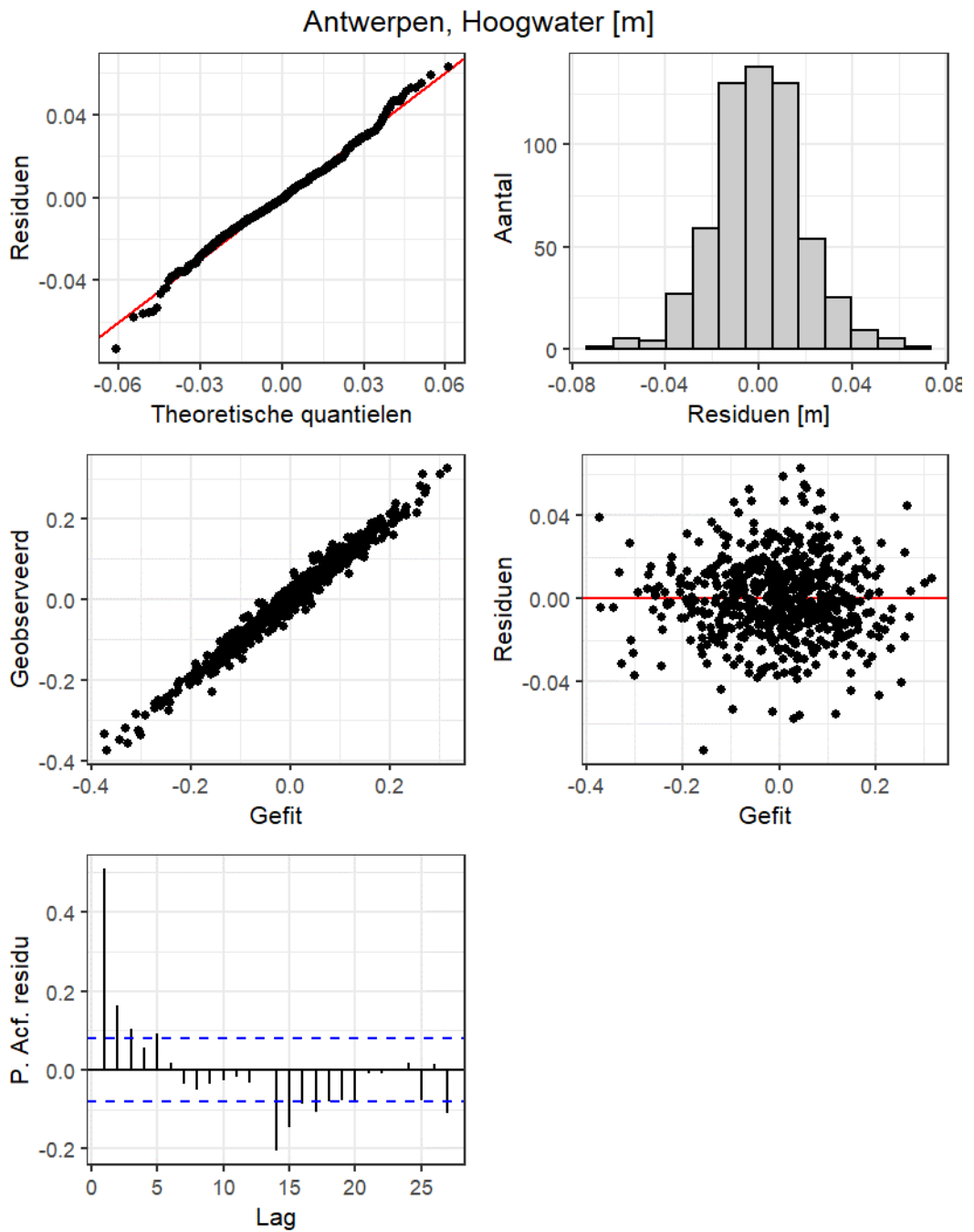
2006) om eventuele overtollige breukpunten terug te brengen tot nul. Dat wil zeggen, als een covariaat niet nuttig is dan kan ze op nul worden gezet.

De uitzondering hierop zijn de trendbreuken  $f_{TB}$ . De rol van deze spline is het aangeven aan het model dat we met trendbreuken te maken hebben. Het is duidelijk dat als ze te flexibel is afgesteld dat ze dan andere processen, zoals bijvoorbeeld de nodale cyclus, kan gaan vertegenwoordigen. Om dit tegen te gaan dienen we deze spline dus met zorg in te stellen. We kiezen hier voor een Basis Spline met 20 knots en een continuïteit van orde 1.

#### 4.5.1.5.5 Analyse van de regressies

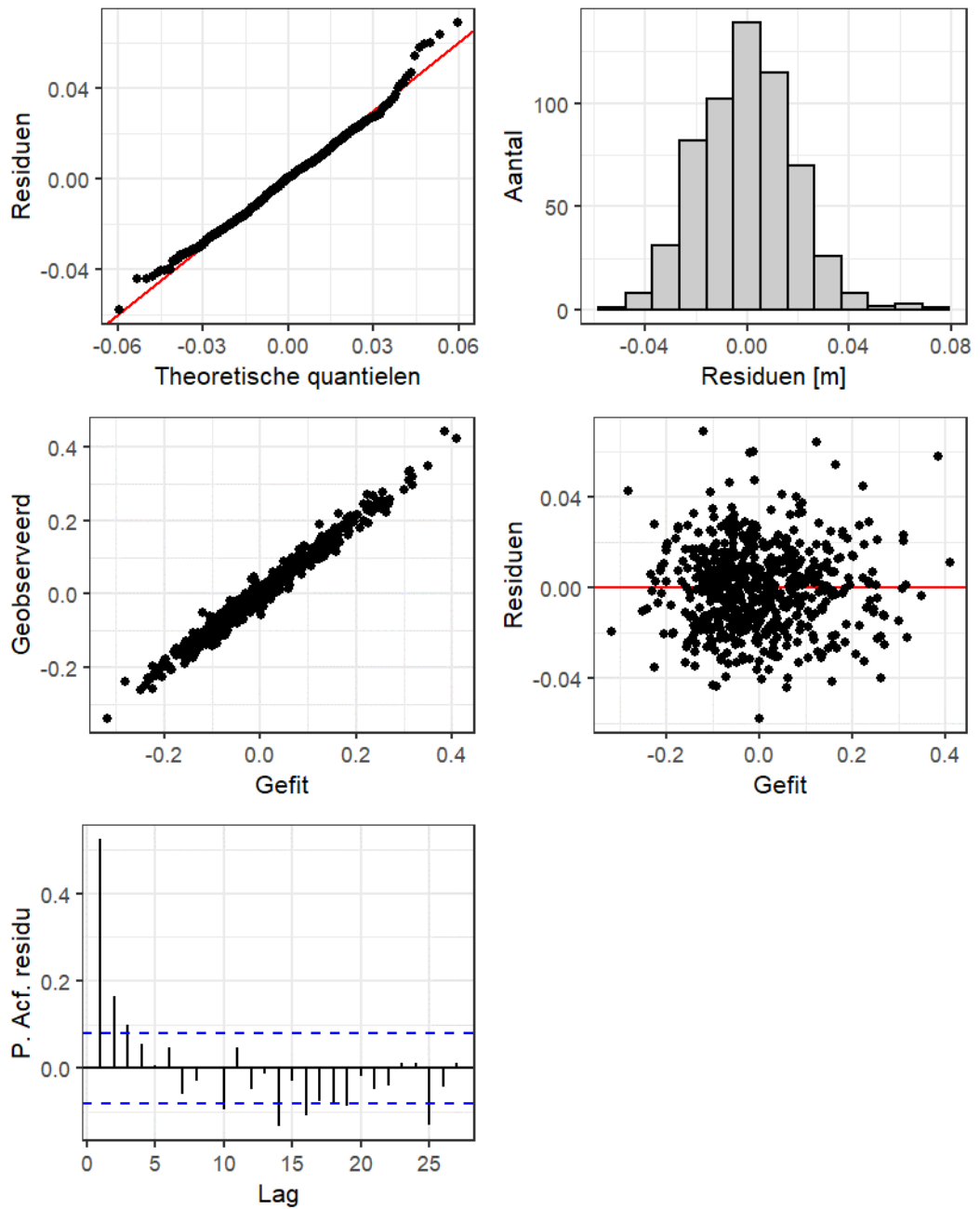
We kijken naar de performantie van enkele van de regressies in Figuur 66, Figuur 67 en Figuur 68. We observeren dat het model het goed doet in algemene termen, we hebben ogenschijnlijk geen residuele trends, de error term is niet enorm en de verdeling lijkt relatief normaal verdeeld. We zien wel dat de autocorrelatie van de residuen significant is. Dit is waarschijnlijk een gevolg van de imperfecte verwerking van de trendbreuken op dit moment. We merken op dat we hier juist voornamelijk geïnteresseerd zijn in deze residuen en dat bijgevolg een ARMA-term hierop fitten (zoals in hoofdstuk §3.4.2.2) geen meerwaarde heeft voor deze analyse. Beter gezegd, hoewel de ARMA residuen de convergentie van het algoritme zouden verbeteren, zouden we effectief alsnog de door de ARMA term benaderde componenten in de trendbreuk analyse mee moeten nemen. We merken hier op dat we beide hebben geprobeerd, i.e. een extra term voor de trendbreuken, een ARMA term en een combinatie van beiden. Het valt hier dan op dat beide termen deels uitwisselbaar zijn, en dus dat een combinatie veelal onstabiele resultaten geeft. Verder heeft het gebruik van een spline het voordeel dat ze simpel te tunen is zodat we enkel zeer langzame fluctuaties ermee opvangen, iets wat voor een ARMA term lastiger is.

Te meer, de schatting van GAM's is, in onze ervaring, relatief robuust tegen autocorrelatie en de parameterschatting ondervindt in de praktijk hier ook geen effect van. Om deze redenen is het hier opportuun om het model relatief simpel en snel te houden en dus geen ARMA term te gebruiken. De individuele effecten van de covariaten zijn al besproken in sectie §4.5.1.4.



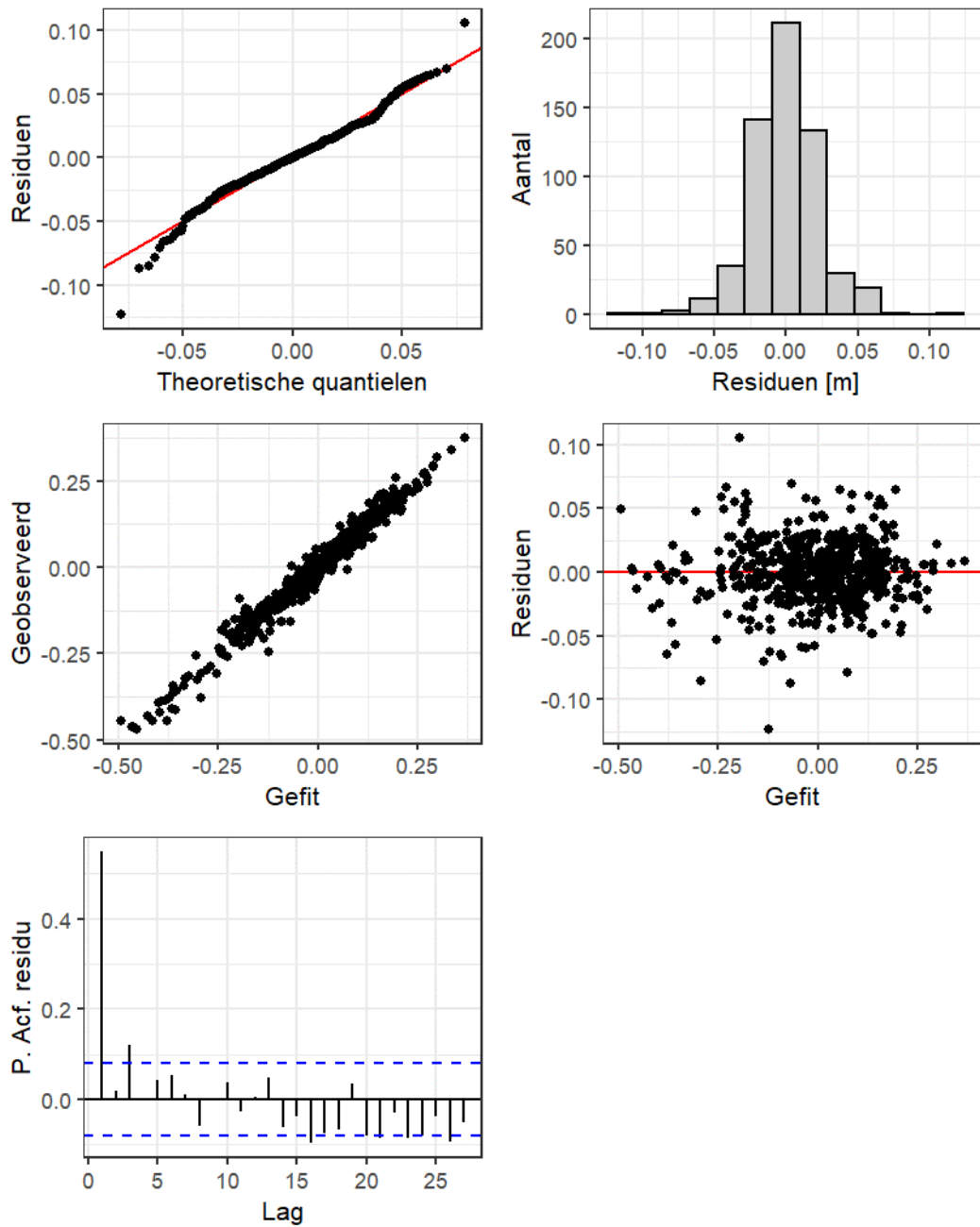
*Figuur 66: De regressiediagnostiek voor HW te Antwerpen.*

### Antwerpen, Laagwater [m]



Figuur 67: De regressiediagnostiek voor LW te Antwerpen.

### Antwerpen, Getijslag [m]



Figuur 68: De regressiediagnostiek voor Getijslag te Antwerpen.

## 4.5.2 Trendbreukanalyse

### 4.5.2.1 Opzet

In sectie §4.4 zagen we dat we bij het bepalen van de effecten van ingrepen een aantal grote uitdagingen hadden. De eerste was dat covariaten zoals debiet, wind en getijcycli de effecten van ingrepen kunnen maskeren. Dit hebben we in het vorige hoofdstuk opgelost door een model op te stellen en op basis daarvan een “onverklaarde component” te bepalen. In dit hoofdstuk lossen we het tweede probleem op: de **interpretatie van het onverklaarde proces**.

In Figuur 69 tonen we enkele onverklaarde componenten te Liefkenshoek. Dit is de component van een getijparameter  $H(t)$  welke niet verklaard wordt door het model (zie ook §4.5.2.3). Hoewel het duidelijk is dat we meerdere afwijkingen kunnen zien, blijft de vraag welke significant zijn en welke door ruis veroorzaakt kunnen zijn. Om dit te kwantificeren is het nuttig om deze ingrepen te schatten met gebruik van een statistische methode: i.e. een trendbreukdetectie. Een dergelijke aanpak geeft ons een objectieve maat voor de locaties van trendbreuken.

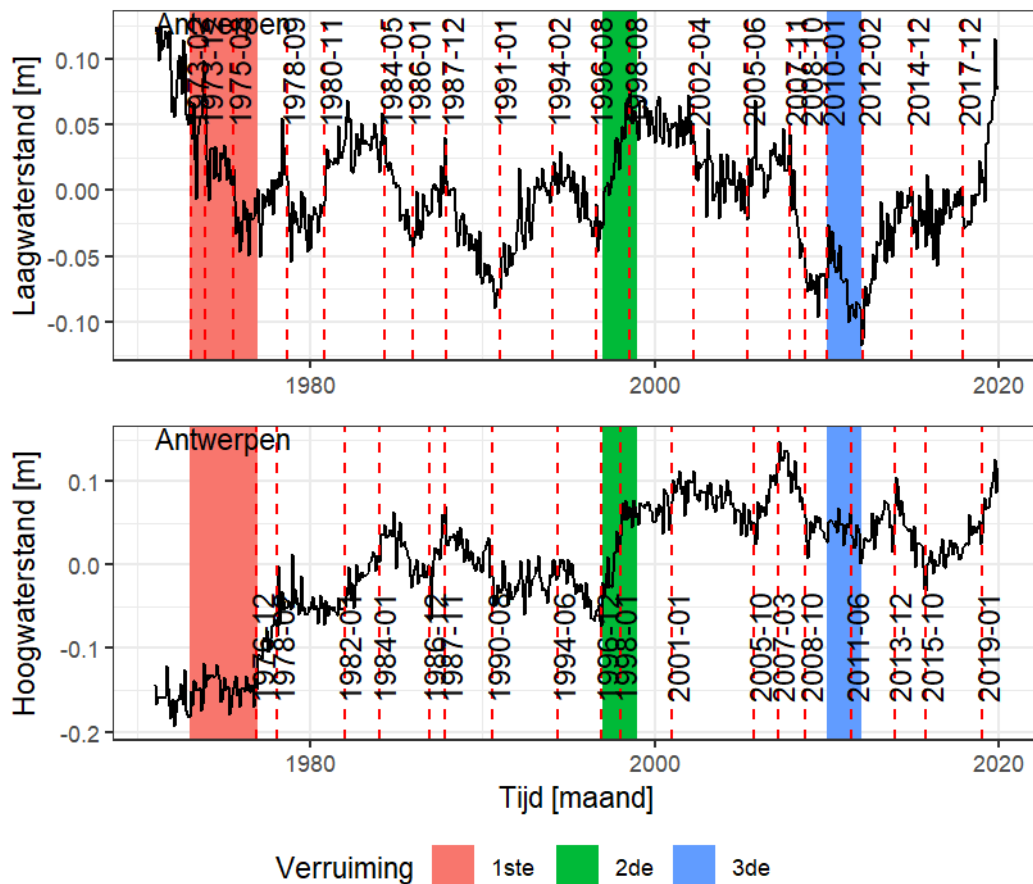
Om een trendbreuk analyse uit te kunnen voeren, is het noodzakelijk een model voor een trendbreuk proces op te stellen. We definiëren dit proces als:

$$U(t) = \beta_0 + \sum_{i=1}^N J_{t \geq \tau(i)} (a_i + b_i t) + \epsilon$$

waar  $U(t) = f_{TB}(t) + \epsilon_{GAM}$  de onverklaarde component is, zoals door het GAM geproduceerd en verder besproken in sectie §4.5.2.3.  $a_i + b_i t$  is een vergelijking die een individuele trendbreuk modelleert als een lineair segment. De functie  $J_{t > \tau(i)}$  is de identiteitsfunctie welke de effecten van de functie  $a_i + b_i t$  enkel anders dan nul laat zijn als  $t \geq \tau(i)$ , waar  $\tau(i)$  het moment is van de  $i^{de}$  trendbreuk.

Dit model is niet de enige mogelijkheid, e.g. we zouden ook  $a_i$  of  $b_i t$  kunnen gebruiken: respectievelijk een sprong in het gemiddelde of een verandering in de helling. Dit levert niet alleen een ander model per trendbreuk op, maar heeft ook een effect op de trendbreuken  $\tau(i), i = 1 \dots N$  zelf. Praktisch gezien zien we in de data (e.g. Figuur 69) dat er **zowel sprongen als hellingsverschillen** zijn en dus gebruiken we het model in de bovenstaande vergelijking. De technieken die we hier gebruiken zijn niet flexibel genoeg om een opzet met variërende trendbreukmodellen aan te kunnen: i.e. enkel een trendwijziging op de ene trendbreuk, en enkel een trendsprong op een andere. Hierdoor zijn we gedwongen om het meest algemene model te nemen, i.e. een trendwijziging en een trendsprong op alle trendbreuken.





Figuur 69: De onverklaarde component voor LW en HW te Antwerpen. De verticale rode lijnen geven de gevonden trendbreuken weer, zoals bepaald in sectie 4.5.2.2.

#### 4.5.2.2 Bepaling van trendbreuken

De trendbreuken zelf bepalen, aldus bovenstaand procesmodel, kan op een aantal verschillende methoden, elk met zijn eigen aannames en beperkingen. Hier gebruiken we de methode van Bai & Perron (1998) (BP98), zoals geïmplementeerd in het R-pakket *strucchange* (2017).

Gegeven een serie  $U(t)$ ,  $t = 1 \dots T$  is de vraag hoeveel trendbreuken  $\tau(i)$  er gefit moeten worden en waar deze te plaatsten. De methode van BP98 bepaalt voor iedere mogelijke combinatie aan trendbreuken en segmenten een score: het zogenaamde **Bayesiaanse Informatie Criterium (BIC)**. Het BIC is gedefinieerd als:

$$BIC = k \ln(T) - 2 \ln(\hat{p}(U | \hat{\theta}, N))$$

waar  $k$  het aantal parameters is, e.g.  $k = 2 + 2N$  voor het model in sectie §4.5.2.1.  $T$  is het aantal datapunten in  $U(t)$  en  $p(U | \hat{\theta}, N)$  is de kans op de data gegeven  $N$  trendbreuken met de parameters  $\hat{\theta}$ , welke gekozen zijn om deze kans te maximaliseren. In praktijk is BIC een kans op de data gegeven een model (likelihood), gecorrigeerd voor het aantal parameters dat we gebruiken. Dit voorkomt overfitting, ten slotte, als we stellen  $N = T$  kunnen we de data perfect fitten, maar hebben we geen informatie gewonnen.

De keuze voor het aantal trendbreuken is gebaseerd op de laagste (lees: beste) BIC score. Andere regels zijn ook onderzocht, maar in praktijk bleken deze niet afdoende te werken. Bijvoorbeeld een voorwaartse selectie, i.e. trendbreuken toevoegen, wordt vaak toegepast om rekentijd te besparen maar heeft sterk de neiging om vast te zitten in "lokale minima". Bovendien is de computationele

tijd hier niet echt een issue, voornamelijk omdat de methode BP98 geoptimaliseerd kan worden (Verbesselt *et al.*, 2020).

#### 4.5.2.3 Onverklaarde component

De modellen leveren een onverklaarde component op. Er zijn echter meerdere opties om de onverklaarde component bepalen. We kunnen direct het model fitten en naar de residuen kijken. Echter, in de praktijk is het vaak niet verstandig om een gedeeltelijk model te fitten: i.e. een model zonder kennis van de trendbreuken. In sectie §4.5.1.5.3 hebben we daarom een tijdsgevoelige spline toegevoegd welke de trendbreuken modelleert. Deze keuze is niet zonder gevolgen, ten slotte, deze spline kan nooit exact de juiste trendbreuken fitten en dient enkel als een intermediaire stap. We onderzoeken dan ook kort wat de effecten van deze keuze zijn. Een vergelijkbaar algoritme is een speciale backfitting methode welke afwisselt tussen het fitten van een GAM en het fitten van de trendbreuken (Verbesselt *et al.*, 2010), het algoritme is als volgt:

1. Initialiseer een trend proces  $T(t) = 0$
2. Fit een GAM, zonder het proces  $f_{TB}(t)$ , op de residuen  $R(t) = H(t) - T(t)$ , en noem de voorspellingen hiervan  $\hat{H}(t)$ .
3. Gebruik de methode BP98 op de residuen  $R(t) = H(t) - \hat{H}(t)$ . En vind de lineaire regressie op deze trendbreuken. Ken deze waarden toe aan  $T(t)$ .
4. Ga terug naar stap 2 en herhaal totdat de GAM fit  $\hat{H}(t)$  en de trend  $T(t)$  niet meer veranderen.

Vergelijk deze procedure ook met degene gegeven in sectie §4.5.1.5.2. Deze procedure is echter computationeel zeer duur en kan soms onstabiel zijn. Om deze reden is de methode met een tijdsgevoelige spline  $f_{TB}(t)$  in sectie §4.5.1.5.3 dan ook zeer aantrekkelijk. Het moge duidelijk zijn dat we hopen dat een dergelijke ingreep ons voorlopig gebrek aan kennis over de trendbreuken opvangt en hopelijk eventuele bias in het model voorkomt (Engl *et al.*, 1986).

Om de resultaten van beide aanpakken te verkennen vergelijken we ze als volgt

$$U_{back}(t) = T(t) + \epsilon_t \Leftrightarrow U_{spline}(t) = f_{TB}(t) + \epsilon_t$$

Tevens voeren we de methode van Bai & Perron (1998) uit op  $U_{spline}(t)$  en tonen ook de gevonden trendbreuken. We bestuderen dit verder in sectie 4.5.2.5.1.

#### 4.5.2.4 Onzekerheid (hulpmiddel interpretatie)

Hierboven hebben we een methode gepresenteerd welke trendbreuken bepaalt in een onverklaard proces op basis van een model. Echter, het moge duidelijk zijn dat iedere stap onzekerheid met zich meebrengt. Deze onzekerheid vloeit voort uit: (a) de onzekerheid op het model, (b) de onzekerheid op de data, en (c) de onzekerheid op de bepaling van de trendbreuken zelf. Ook zijn de aannames van zulke modellen in de praktijk onmogelijk om te voldoen, en dit kan ook onzekerheid met zich meebrengen.

De gesommeerde onzekerheid maakt een directe interpretatie lastig. In Figuur 69 zien we bijvoorbeeld enkele trendbreuken welke in de buurt liggen van een uitschieter in de data (e.g. Laagwaterstand, 1993-02). De vraag rijst hier dan ook of de locatie van deze trendbreuk een gevolg is van de nabijgelegen uitschieter, de ruis in het algemeen, of feitelijk een “zeker” proces in de data.

Omdat we meerdere methoden opeenvolgend gebruiken zijn de onzekerheidsinschattingen in de methode van Bai & Perron (1998) te optimistisch. Ze kijkt ten slotte enkel naar de onzekerheid in de residuen. Bovendien zagen we al eerder dat sommige gevonden trendbreuken dusdanig klein zijn, dat we niet zeker weten of ze correct zijn. We wensen dus een schatting te maken van hoe zeker de methode, als geheel, is dat er op de gegeven locatie een trendbreuk ligt.

Om een schatting te verkrijgen van de onzekerheid maken we gebruik van de zogenaamde bootstrap methode (Friedman *et al.*, 2001). Deze methode bepaalt onzekerheid op een schatting

door haar vele malen te herhalen met net verschillende inputdata, de individuele parameterschattingen kunnen dan gezien worden als samples uit een onderliggende kansverdeling. Hier zijn we geïnteresseerd in de kans dat er een trendbreuk op een bepaald tijdstip aanwezig is,  $p(T = t | D)$ . Een dergelijke kansverdeling geeft een inzicht in de betrouwbaarheid van de resultaten omdat we niet alleen zien of er op tijdstip  $t$  een trendbreuk geplaatsd wordt, maar ook hoe waarschijnlijk die plaatsing is.

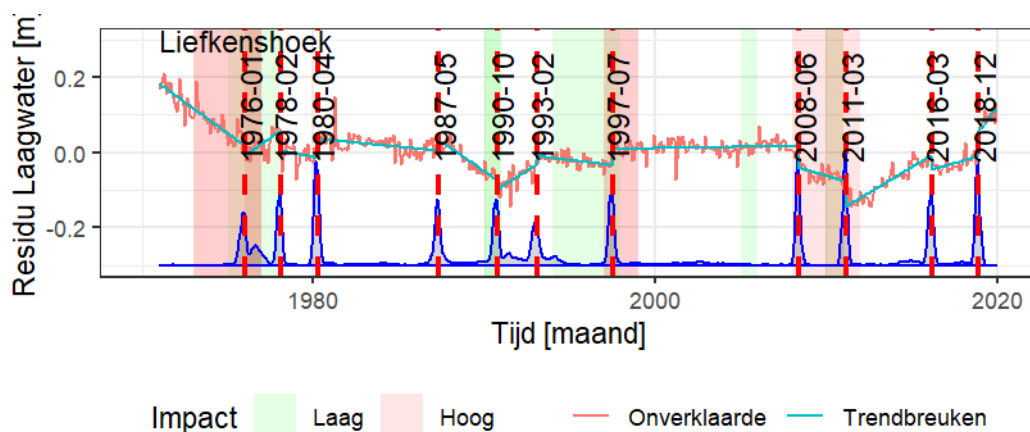
Er zijn meerdere manieren om de data “te verstoren”, en dus ook meerdere manieren om een bootstrap methode op te stellen. Hier kiezen we voor een zogenaamde residual bootstrap, een dergelijke methode is gegeven als volgt:

1. Fit een model, zoals in sectie 4.5.1.5.3, en de trendbreuken met de gekozen methode. Noem de covariaten  $X(t)$ , het gefitte model  $\hat{H}(t)$  en de trendbreuken  $T(t)$ , definieer de residuen van dit model als  $R(t) = H(t) - \hat{H}(t) - T(t)$
2. Bepaal een nieuw signaal als  $\tilde{H}(t) = \hat{H}(t) + T(t) + R(\tilde{t})$ , waar  $\tilde{t}$  een willekeurig genomen tijdstip is.
3. Fit op  $\tilde{H}(t)$  en de covariaten  $X(t)$  opnieuw een model en trendbreuken zoals in stap 1.
4. Sla de relevante parameters op en ga terug naar stap 2 voor  $M$  iteraties.

De relevante parameters die we hier opslaan zijn dus de trendbreuken. We verkrijgen op deze manier een grote set trendbreuken op verschillende locaties welke samen een kansverdeling vormen.

Bij deze methode maken we een aantal aannames. Deze kunnen samengevat worden als de aanname dat de fout volledig onafhankelijk is: identiek en onafhankelijk gedistribueerd (i.i.d.). Dat wil zeggen dat de fout geen correlatie in de tijd vertoont, noch een correlatie met de geobserveerde waarden. We zagen in sectie §4.5.1.5.5 dat de modellen nog enige correlatie vertonen. Dit is natuurlijk te verwachten, gezien de scherpe bochten van de trendbreuken nog in de residuen zitten op dat moment. Hier dienen we te kijken naar de residuen *na* het fitten van de trendbreuken. We merken op dat dit in de praktijk vaak niet geheel vervuld wordt, en dat als gevolg daarvan de variatie in de kansverdelingen soms licht onderschat wordt (lees: te scherp gepiekt).

We tonen de resultaten voor een dergelijke procedure op LW te Liefkenshoek in Figuur 70. We zien dat de trendbreuken op relatief logische locaties geplaatsd worden. Ook zijn ze allemaal sterk geassocieerd met een piek in de kansverdeling. We stellen dan ook dat deze trendbreuken een sterk bewijs hebben. We merken op dat de kansen hier rationeel zijn aan de kans dat er op deze locatie een trendbreuk ligt.



Figuur 70: De trendbreuken en het onverklaarde proces voor LW te Liefkenshoek. De blauwe vlakken zijn rationeel aan de kansdichtheid.

Naast de **schatting van de onzekerheid**, heeft het gebruik van een bootstrap ook nog een ander voordeel: Als trendbreuken een gevolg zijn van een foute aannames in ons model, iets wat praktisch gezien niet te vermijden is, dan zien we hier al snel dat ze op een zeer inconsistente locatie terecht komen. We kunnen een **diffuse kansverdeling** voor een trendbreuk dan ook zien als een indicatie dat we deze trendbreuk **niet zomaar mogen vertrouwen**.

We merken hier op dat deze methode effectief een Bayesiaanse methode is, soms ook wel een *Poor Man's Bayes* genoemd (Friedman *et al.*, 2001). De reden hiervoor is dat we essentieel niet meer kijken naar de effectieve waarden van het model, maar de kans op een bepaalde uitkomst gegeven de data. Het voordeel hiervan is dat we niet meer vast zitten aan een specifieke gegeven locatie, maar ook direct een nabij gelegen meting in kunnen schatten. De benaming "*Poor Man's Bayes*" vindt zijn oorsprong in de versimpelde aanpak.

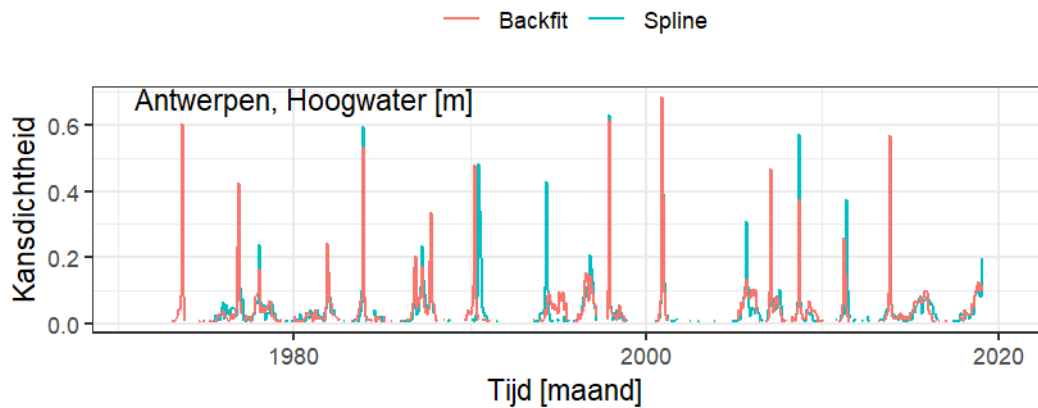
#### 4.5.2.5 Gevoeligheidsanalyse

Nu we de methode hebben besproken, alsook de interpretatie op probabilistische wijze, kunnen we kijken naar de effecten van verschillende keuzes binnen het model. We bekijken hier drie zaken afzonderlijk: (a) het effect van de keuze van onverklaarde component, (b) het effect van de minimale afstand tussen de trendbreuken en (c) het effect van de BIC regel.

##### 4.5.2.5.1 Onverklaarde Component

We focussen op de onderliggende kansverdeling zoals gevonden via de bootstrap in voorgaande sectie, wanneer we de onverklaarde component bepalen op basis van (a) de Backfitting procedure en (b) op basis van de spline procedure. Figuur 71 toont de resultaten voor HW te Antwerpen.

We zien dat beide methoden nagenoeg dezelfde trendbreuken vinden, echter, de Spline methodiek lijkt de trendbreuken sterker te lokaliseren. Dit is, gedeeltelijk, het gevolg van de extra onzekerheid die bij de backfitting methode tevoorschijn komt. Ten slotte, een dergelijke methode kan vast komen te zitten in lokale minima. We zien wel een enkele trendbreuklocaties (in het begin van de jaren 70) die wel gevonden wordt door de backfitting procedure en niet door de spline procedure. Echter, als we dit vergelijken met Figuur 69 zien we dat er op deze locatie inderdaad geen trendbreuk ligt. Dit illustreert (a) het belang van kiezen van de juiste methode en (b) dat trendbreuken niet alleen een resultaat zijn van de data, maar ook van de methode.



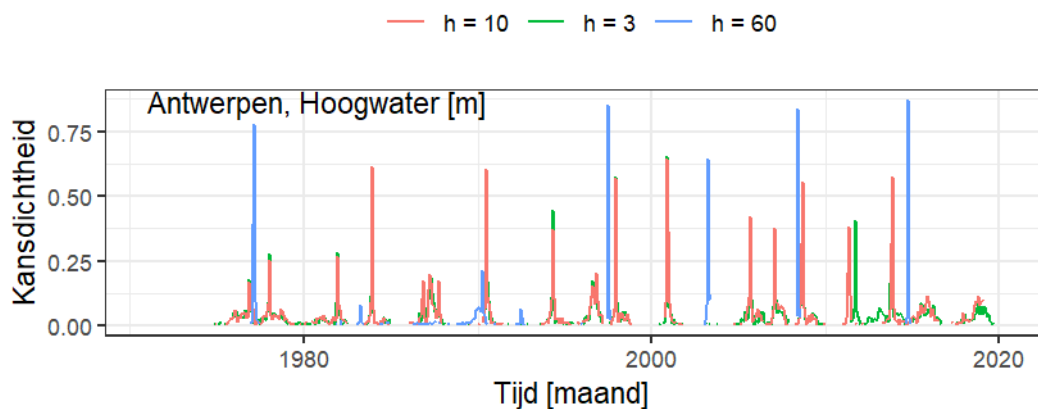
Figuur 71: De kansverdeling voor trendbreuken op basis van de Spline methodiek en de Backfit methodiek, in Antwerpen voor Hoogwaterstand.

#### 4.5.2.5.2 Minimale afstand tussen trendbreuken

De minimale afstand tussen trendbreuken is een *setting* voor de BP98 methode. Ze beperkt de hoeveelheid trendbreuken die er aan een signaal toegekend kunnen worden. We zien in Figuur 72 dat we enkel bij een zeer grote afstand van minimaal 5 jaar andere resultaten bekomen, voor drie maanden en tien maanden zijn de resultaten nagenoeg hetzelfde.

Het kan aanlokkelijk zijn om een grotere afstand tussen trendbreuken te forceren, onder de aanname dat we zo enkel de grootste trendbreuken verkrijgen. Echter, dit is niet correct: bij een te lange lengte zal de methode punten op suboptimale plekken leggen, waar we zien dat ze duidelijk zo dicht als toegestaan bij de feitelijke breukpunten komen te liggen.

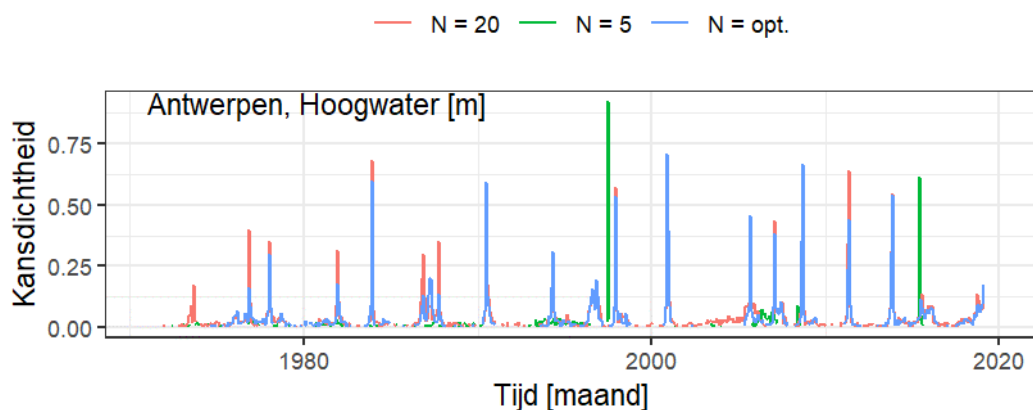
Daarom kiezen we voor  $h = 10$  maanden bij alle experimenten.



Figuur 72: De verschillende minimale afstanden tussen de trendbreuken, voor het hoogwater te Antwerpen;  $h$  is de minimale tijdsperiode in maanden tussen trendbreuken.

#### 4.5.2.5.3 Selectie aantal trendbreuken

De selectie van het aantal trendbreuken kan op meerdere wijzen gebeuren en de keuze voor een correct criterium kan dan ook een verschil opleveren in de uitkomsten. In Figuur 73 zien we de kans op de verschillende trendbreuklocaties voor een keuze van 5 trendbreuken, 20 trendbreuken of een aantal gekozen door het laagste BIC. Het is duidelijk dat 5 trendbreuken vreemde resultaten oplevert omdat de methode niet voldoende flexibel is. Echter, het verschil tussen 20 trendbreuken en het, per post en getijparameter verschillende, optimale aantal is zeer klein. De reden hiervoor is dat bij meer trendbreuken dan nodig, de overvloedige trendbreuken op een willekeurige locatie worden geplaatst en dus niet bijdragen aan de pieken.



Figuur 73: De kans op verschillende trendbreuken voor verschillende keuzes van het aantal trendbreuken, 5 of 20 trendbreuken, of het optimale aantal (opt.)

#### 4.5.2.6 Impact Score (hulpmiddel interpretatie)

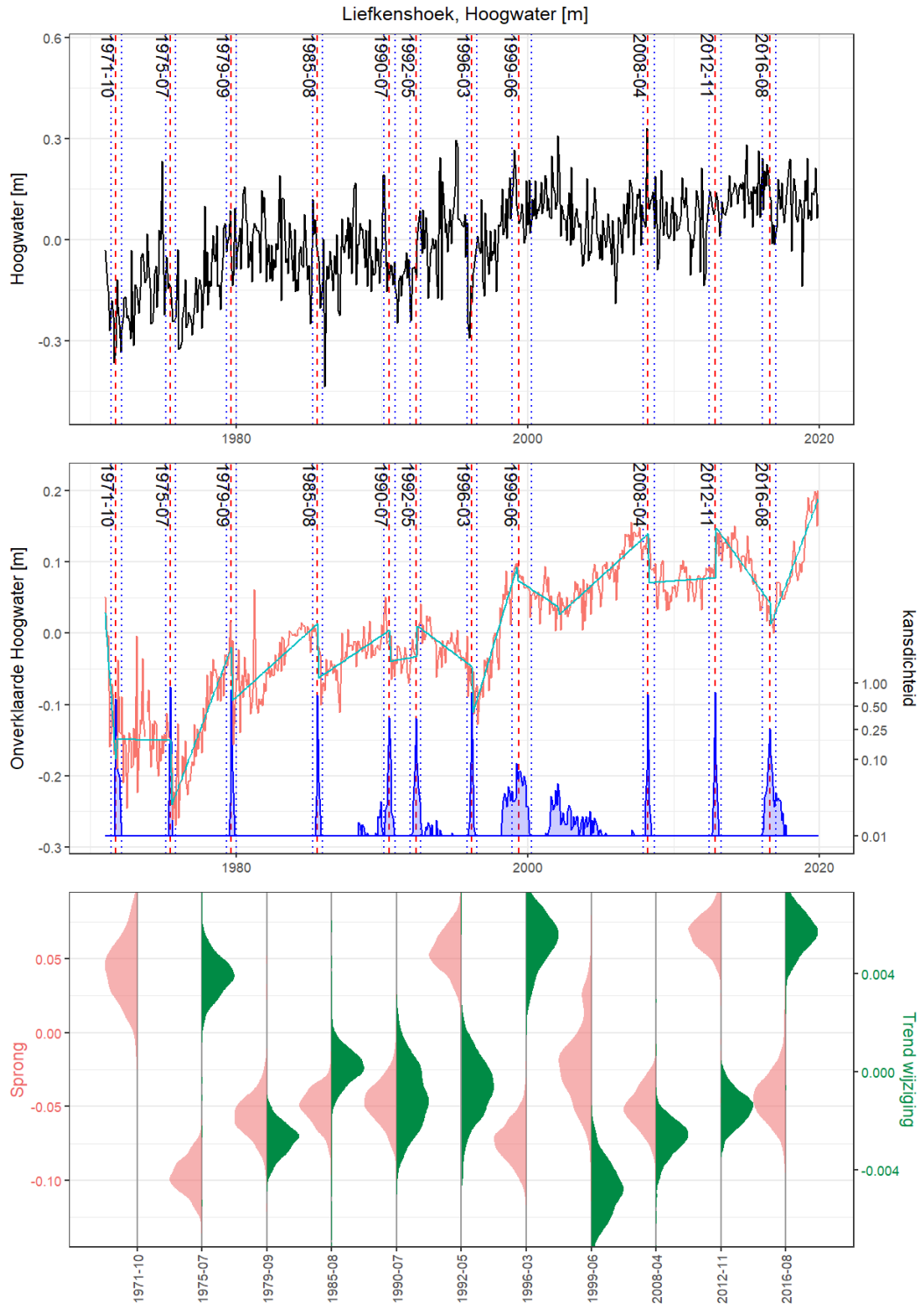
De impact van een trendbreuk zit natuurlijk al deels vervat in de BIC score. Echter, de BIC is niet direct te interpreteren. We zouden dan ook graag kijken naar een directere maat. Hier kiezen we simpel voor de verandering in trend en de sprong op een trendbreuk zoals in het model voor de ingrepen gegeven in sectie §4.5.2.1 .

Echter, zoals we in de voorgaande paragraaf zagen is de interpretatie van trendbreuken niet zo simpel, we hebben te maken met een significante onzekerheid en vaak enkele spurieuze trendbreuken. We kunnen dit opvangen door te kijken naar de kansverdeling van de instantane sprong en de trendwijziging, samen de **impact scores** genoemd. We bepalen deze op exact dezelfde manier als in sectie §4.5.2.4, maar slaan tijdens de bootstrap de impact scores op. Dit geeft een schatting van de verdeling van de impacts voor de trendbreuken, gegeven de locatie van de trendbreuken.

Figuur 74 plot dit tezamen met de ruwe maandelijkse data en de onverklaarde component. De bovenste plot geeft de ruwe data, i.e. de maandelijkse gemiddelden zoals ze geobserveerd zijn. De tweede plot geeft de meest waarschijnlijke onverklaarde component van dit signaal, tezamen met een fit hierop. De blauwe lijn in de tweede figuur geeft de kans op een trendbreuk in de log-schaal. De pieken zijn hierin gedetecteerd en de meest waarschijnlijke geselecteerd (zie sectie §4.5.3), dit is weergegeven als een rode, onderbroken, lijn. De blauwe stippellijnen aan weerszijden geven de tijdstippen die tot deze piek behoren aan. De derde en laatste plot geeft voor iedere geselecteerde trendbreuk weer wat de effecten ervan zijn, i.e. de impact score, als een kansverdeling. De linker kansverdelingen geven de instantane sprong weer, en de rechter de trendwijziging.

We gaan hier in sectie §4.6 dieper op in, maar we kunnen hier al enkele voordelen zien. Zo plaatst het meest waarschijnlijke proces te veel trendbreuken welke simpelweg niet terug gevonden

worden als we de onzekerheid meenemen, e.g. de trendbreuk vlak na 2000. Verder zien we ook dat sommige trendbreuken, e.g. die in 1999, in het meest waarschijnlijke proces een kleine sprong vertonen. Echter, een visuele inspectie doet ons twifelen aan de validiteit van deze sprong: ze lijkt eerder een artefact. De kansverdeling staat een dergelijke opinie bij: een waarde van nul is zeer waarschijnlijk.



Figuur 74: Een totaal figuur voor Hoogwaterstanden te Liefkenshoek.

### 4.5.3 Combinatie met gekende ingrepen

We zouden graag een schatting verkrijgen van de waarschijnlijkheid dat een trendbreuk met een ingreep geassocieerd is. We zouden dit kunnen doen door de regressie zoals in sectie §4.5.2.1 uit te voeren met breukdata gebaseerd op de kennis van de ingrepen. Echter, in de praktijk leverde dit zijn eigen problemen op: bijvoorbeeld, de exacte datum wanneer de impact van een ingreep gemeten wordt, is niet zo simpel te bepalen. We zouden dus alle mogelijke tijdstippen hiervoor, gebaseerd op de ingrepen, uit moeten testen.

Echter, we merken op dat we in sectie §4.5.2.4 al een kansverdeling hebben berekend voor de locatie van een trendbreuk gegeven de data. De brondata hiervan kunnen we omrekenen naar een kans dat we op een bepaalde locatie een trendbreuk toekennen. We doen dit door voor iedere bootstrap herhaling te kijken of er in dit experiment een trendbreuk in de tijdspanne van de ingreep werd toegekend. Dus:

$$p(T \text{ in Ingreep}) = \frac{\sum_i I(S_i \in \text{Ingreep})}{M}$$

Hier is  $S_i$  de trendbreuken van het  $i^{\text{de}}$  bootstrap sample, en *Ingreep* stelt de tijdsspanne voor van de ingreep die we onderzoeken en  $M$  is het aantal bootstrap experimenten. Effectief is dit dus de fractie van de bootstrap experimenten welke op zijn minst één trendbreuk plaatsen in de tijdspanne geassocieerd met de trendbreuken.

In de praktijk zien we echter dat deze kansen onredelijk hoog uitvallen omdat ook willekeurige geplaatste trendbreuken – degene die geen consistent patroon opleveren – worden namelijk meegeteld. Om dit te verhelpen identificeren we de pieken in de kansverdeling, en bepalen we welke tijdstippen bij een piek horen. We vinden dit met behulp van het R-pakket *pracma* (Borchers, 2019), specifiek de functie *findpeaks*. We tellen dan enkel de trendbreuken mee die deel uitmaken van deze pieken. Tevens selecteren we deze pieken zodat op zijn minst in 20% van de experimenten een trendbreuk toegekend zijn. We bekomen zo Tabel 20, welke de kans geeft dat een trendbreuk gelijktijdig met de eerste verruiming wordt geplaatst. Merk op dat deze aanpak twee voordelen heeft:

1. Eventuele multimodaliteit, meerdere pieken tijdens één ingreep, wordt automatisch meegenomen.
2. Een piek die deels in de ingreep valt, wordt niet afgesneden op de start- of einddatum van die ingreep, maar in zijn geheel meegenomen.

Dit geeft een realistischer beeld van de kans op een trendbreuk tijdens een ingreep dan simpel het aantal trendbreuken in een interval tellen. De kansen die we dan bekomen geven een indicatie van de kans op een trendbreuk in een tijdspanne toegekend aan een ingreep. Deze distinctie is belangrijk omdat overlappende trendbreuken en ingrepen nog altijd niet te onderscheiden zijn.

Tabel 20: De kans dat een trendbreuk gelijktijdig met de derde verruiming geplaatst wordt, voor alle posten en variabelen. De kleur is van rood (lage kans), naar groen (hoge kans).

| Post         | Hoogwater [m] | Laagwater [m] | Getijslag [m] | Stijgduur [s] | Daalduur [s] | Getijasymmetrie [-] |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------------|
| Vlissingen   | 98.2%         | 39.4%         | 0.0%          | 0.0%          | 0.0%         | 0.0%                |
| Hansweert    | 96.8%         | 83.1%         | 80.7%         | 62.0%         | 39.2%        | 54.9%               |
| Liefkenshoek | 88.0%         | 97.1%         | 0.0%          | 77.6%         | 61.8%        | 72.8%               |
| Antwerpen    | 84.1%         | 100.0%        | 76.6%         | 0.0%          | 0.0%         | 0.0%                |
| Schelle      | 47.5%         | 98.1%         | 94.2%         | 0.0%          | 0.0%         | 0.0%                |
| Dendermonde  | 73.1%         | 0.0%          | 42.9%         | 0.0%          | 0.0%         | 0.0%                |
| Melle        | 0.0%          | 0.0%          | 0.0%          | 0.0%          | 0.0%         | 0.0%                |



#### 4.5.4 Andere uitgeteste technieken

Voor de volledigheid merken we hier kort op dat er **ook andere methoden getest zijn**, maar deze tekort schoten, enkele voorbeelden zijn:

- Iteratieve aanpak op basis van ARIMA (Tsay, 1998)
- Lineaire breuk via iteratieve aanpak (Muggeo, 2008)
- Volledige breuk via iteratieve aanpak (Muggeo, 2008)
- Continu Variërende Parameter modellen (Wood, 2006)

We merken hierbij op dat deze andere methodes telkens lineaire verbanden tussen de covariaten aannemen. We hebben aangetoond dat dit geen adequate aanname is. Deze foute aanname zorgt er dan ook voor dat bepaalde effecten in het model gaan compenseren, wat tot onrealistische en/of onstabiele resultaten leidt. Essentieel is hier het probleem dat de aannames voor het model en haar gedragingen vast in de methode zitten, wat vaak noodzakelijk is om het effectief uit te kunnen rekenen. We komen dus flexibiliteit te kort – iets wat we hier voor de BP98 methode hebben opgelost door een Bayesiaanse aanpak toe te passen.

We hebben in dit proces ook opgemerkt dat het in acht nemen van onzekerheid bijzonder belangrijk is. Hoewel bovenstaande methoden allemaal binnen het voorgestelde framework (i.e. de bootstrap) gebruikt kunnen worden, maken we ook hier dezelfde observatie die we al in sectie §4.5.2.5.1 hebben gemaakt, deze methoden zijn dusdanig computationeel zwaar dat een iteratieve methode geen haalbare optie is. We hebben er hier dan ook voor gekozen om de Bayesiaanse aanpak, door middel van een bootstrap en een efficiënte methode te gebruiken in plaats van een geavanceerdere, maar complexe methode welke geen onzekerheid in acht neemt.

#### 4.5.5 Verbetermogelijkheden

Er zijn een aantal kanttekeningen te maken bij het onderzoek. Hoewel er veel informatie beschikbaar is over het waterpeil, weten we minder over de exacte timing van ingrepen en hun effecten – zeker historische. Tevens zijn er geen grote hoeveelheden (soortgelijke) ingrepen welke we onderling kunnen vergelijken, iets wat een puur data-gedreven aanpak bemoeilijkt. Ten slotte, als ingrepen met elkaar overlappen is het niet te zeggen wat door welke ingreep teweeg gebracht is. Ook is het op te merken dat we hier enkel naar posten en getijparameters in isolatie hebben gekeken. Uiteraard is dit een versimpeling van de realiteit.

We merken hier op dat we een zogenaamde **Poor Man's Bayes** hebben gebruikt: de Bootstrap en vergelijkbare methoden. We hebben daarin vaak methoden gewikkeld, zoals die van BP98, om snel tot goede schattingen te komen. Echter, dit is ten nadele van de interpretatie van een dergelijk model. Hoewel de kansen juist zijn, moeten deze in functie van de methode worden gezien: als we het hebben over een set trendbreuken zoals in sectie §4.5.2.2, dan bedoelen we impliciet de kans op de trendbreuken *gegeven dat we de methode van BP98 gebruiken*. Omdat verschillende methoden verschillende trendbreuken opleveren is de interpretatie hier dan ook niet altijd even eenvoudig.

De methodiek steunt bijgevolg nog steeds sterk op een manuele interpretatie, waardoor ze gevoelig blijft aan *expert judgement* en/of subjectiviteit (afhankelijk hoe je het bekijkt). De onderliggende oorzaak is: We linken ingrepen met wijzigingen in hydrodynamica zonder de tussenliggende schakel morfologie en het fysisch systeem in rekening te brengen. We dienen dus een verband te zoeken qua timing, wat bemoeilijkt wordt door (a) onzekerheid in timing van de belangrijkste ingrepen en (b) de gevoeligheid van de trendbreukanalyse aan de *parameter settings* als ook de abstractie van de gegevens. Verder dient het in gedachten gehouden te worden dat we hier berusten op **meetpunten** en dat we als gevolg dus zeer lokale effecten detecteren. Dit model kan verder verbeterd worden door **morfologische parameters** mee op te nemen in de vergelijking, alsook het

fysisch systeem. Dit heeft tot gevolg dat de metingen moeten passen in een breder kader van het gehele systeem en dus minder gevoelig zijn aan lokale effecten. Hiervoor dient, met behulp van een verwerking van de jaarlijkse bathymetrische grids, onderzocht te worden welke morfologische parameters de beste fit geven. Het model kan ook verder uitgebreid worden met simplistische fysische modellen – zogenaamde conceptuele modellen – om een hybride model te bekomen dat informatie capteert van het data-gedreven en het numeriek model. Een dergelijk model poogt de voordelen van een data-gedreven model (snel, relatief simpel) te verenigen met die van een numeriek model (causaal, minder last van ruis). Dit terwijl ze de nadelen van numerieke modellen (traag, moeilijk te optimaliseren, deterministisch) en data-gedreven modellen (geen causaal verband, moeilijke interpretatie) tracht te reduceren.

De methode hier gepresenteerd is natuurlijk niet perfect, en er zijn nog vele optimalisatie denkbaar. Echter, we hebben twee zaken opgemerkt:

1. De onzekerheid speelt een veel belangrijkere rol dan initieel gedacht.
2. Het gebrek aan een fysische interpretatie inherent aan het model vormt een uitdaging, nu brengen we deze er in door *expert judgement*.

Dit zijn twee structurele problemen, en we stellen dan ook voor om eerst deze op te lossen alvorens eender welke methode volledig te optimaliseren. De lessen die we hier geleerd hebben, leiden ons tot een aantal vitale inzichten die mogelijk bruikbaar zijn bij toekomstig onderzoek:

1. De benodigde resolutie voor impact studies lijkt zich in de orde van maanden te bevinden, niet enerzijds dagen of uren, noch anderzijds jaren.
2. Het meenemen van covariaten is noodzakelijk.
3. Een data-gedreven aanpak is snel, maar heeft een aantal tekortkomingen
4. Non-lineaire effecten spelen een belangrijke rol
5. De relatie kan effectief benaderd worden met een lineaire relatie, hoewel de realiteit vele malen complexer lijkt te zijn. Seizoenaliteit en parameters veranderen voortdurend in het systeem.

We stellen dan ook voor om in toekomstige studies na te denken over simpele fysisch gebaseerde modellen te versterken met data gedreven methoden via Bayesiaanse methoden zoals data-assimilatie en state-space modellen. Een dergelijke methode heeft als voordeel dat ze tot op zekere hoogte fysisch gebaseerd is en dus een makkelijke interpretatie heeft, terwijl ze de voordelen van een data-gedreven model behoudt: ze is nog altijd relatief simpel om op te stellen en “snel” om uit te rekenen.

#### 4.5.6 Besluit Methodologie

We kunnen besluiten dat we binnen deze studie een model ontwikkelden dat helpt om de impact van ingrepen die plaatsvonden tijdens de beschouwde periode beter te onderzoeken. Het uitfilteren van wind helpt – voornamelijk nabij de monding – maar men dient ook andere factoren in rekening te brengen.

De methodologie leerde ons dat een Gegeneraliseerd Additief Model (**GAM**) zonder ARMA-modellering, de beste methode was om de waargenomen getijparameters te simuleren zonder het eventuele effect van menselijke ingrepen te maskeren. Dit laatste zit dan vervat in het residu: de zogenaamde **onverklaarde component**.

Uit de eerste deelstudie op de zeespiegelstijging bleek al dat het beter was de wind op te nemen in het statistische model, dan louter te focussen op de windluwe periodes. Gezien de grootteorde van de impact van menselijke ingrepen, is het daarnaast ook belangrijk om andere covariaten mee in rekening te brengen: de getijdencycli en bovenafvoer. **Pas eens men al deze covariaten in acht nemen, kan men de impact van menselijke ingrepen beter onderzoeken.** Bovendien is het belangrijk om ook een niet-rechthoekig verband toe te laten: voornamelijk voor de bovenafvoer. De optimale **resolutie** voor onze doeleinden zijn maandelijks gemiddelden: voldoende om relatief kleine effecten te kunnen detecteren, maar niet te hoog zodat het model te gecompliceerd wordt. Tevens is de computationele kost haalbaar. Verder is hier op te merken dat effecten die uitmiddelen over een maand buiten de scope van deze opdracht vallen.

Dergelijke opzet leert ons het volgende over de **verklarende kracht** van de individuele **covariaten**:

- Op maandresolutie verklaren de getijdencycli aan de monding meer dan 60% van de variantie in de getijslag en ca. 30% van de variantie in getijasymmetrie tot quasi niets aan de bovengrens van het estuarium (Figuur 53).
- Er zijn 2 meerjarige cycli geïdentificeerd:
  - De nodale getijdencyclus verklaart aan de monding tot 20% van de variantie in getijslag en 5% in getijasymmetrie, tot quasi niets van beide aan de opwaartse grens (Figuur 56).
  - Een 7-jarige cyclus – mogelijk te wijten aan de Noord-Atlantische Oscillatie – verklaart aan de monding nauwelijks variantie, maar tot 5 à 10% in getijslag en getijasymmetrie aan de bovengrens (Figuur 57). Het effect op LW en HW is groter, analoog aan de bovenafvoer, wat een mogelijke link met de NAO kan staven.
- De bovenafvoer (Figuur 59) verklaart aan de monding nauwelijks variantie, maar aan de bovengrens tot meer dan 60% van de variantie in getijasymmetrie en HW tot zelfs 80% van de variantie in LW.
- De Oost-West component van de wind (Figuur 60) heeft voornamelijk impact op HW en LW: tot aan Schelle meer dan respectievelijk 20% en 15% van de variantie, maar daarna daalt het tot quasi 0% voor beide in Melle.
- De Noord-Zuid component van de wind (Figuur 62) heeft maar een beperkt effect op HW, LW of getijslag. Doch, in ons model lijkt het een aanzienlijk deel (ca. 30%) van de variantie in getijasymmetrie te verklaren.

Binnen onze methodologie wordt aangenomen dat ingrepen die plaatsvonden tijdens de beschouwde periode, een trendbreuk of –wijziging te weeg brengen in de onverklaarde component. Als hulpmiddel voor een objectieve interpretatie ontwikkelden we **een Bayesiaanse methode voor het plaatsen van trendbreuken** die zo niet enkel een inschatting geeft van de onzekerheid op een gefitte trendbreuk, maar ook een probabilistische benadering van de impact van iedere trendbreuk. Echter, de trendbreuken dienen hier ook gezien te worden als

ondersteuning voor de interpretatie van het onverklaarde proces, niet als een *sine qua non* methode: **men dient het resultaat nog steeds te interpreteren**. Op basis van de feedback gewonnen tijdens verscheidene kennisdelingssessies, hebben we dan ook de interpretatie op basis van onzekerheid als ook de interpretatie op basis van impactmaten geïntroduceerd.

Tot slot dienden we nog de **link te leggen met ingrepen**. Een vooringenomen methode waarbij de ingrepen als dummy opgenomen worden in het model, leverde geen goede uitkomst. We hebben gepoogd dit probleem op te lossen door ingrepen aan trendbreuken te koppelen op een **probabilistische wijze**: We kijken niet naar een specifieke trendbreuk, maar naar de kans dat er in een gegeven tijdskaders, geassocieerd met een ingreep, een trendbreuk voorkomt. Hoewel dit nog steeds **geen oorzakelijke koppeling** geeft tussen een ingreep en een effect, is deze interpretatie minder gevoelig aan fouten in de data en de methode. Merk op dat de impact van quasi gelijktijdige ingrepen nog altijd niet te onderscheiden zijn.

Het ontwikkelde model vormt een **handig hulpmiddel** voor het objectief bepalen van trendbreuken en deze trachten te linken met menselijke ingrepen en vormt ook een **stevige basis voor vervolgonderzoek**. Zo identificeerden we een aantal verbetermogelijkheden. De belangrijkste zijn:

1. Het ontwikkelde model beschikt niet over een **predictieve kracht**: men kan het niet inzetten om het effect van een specifieke ingreep te voorspellen. Dit kan men bewerkstelligen door morfologische parameters op te nemen als covariaten in het model. Hiervoor dient men met behulp van een tijdreeks aan bathymetrische rasters te onderzoeken welke morfologische parameters de beste fit geven.
2. Het heeft echter nog steeds een aantal beperkingen die typisch zijn aan een puur data-gedreven model: e.g. de morfologische respons van het estuarien systeem op middellange termijn of het implementeren van fysische wetmatigheden. Het kan interessant zijn om dit model te koppelen aan vereenvoudigde fysische modellen – zogenaamde conceptuele modellen – en zo op te nemen in een **hybride model**. Een dergelijk model poogt de voordelen van een data-gedreven model (snel, relatief simpel) te verenigen met die van een numeriek model (causaal, minder last van ruis). Dit terwijl ze de nadelen van numerieke modellen (traag, moeilijk te optimaliseren, deterministisch) en data-gedreven modellen (geen causaal verband, moeilijke interpretatie) tracht te reduceren. Een dergelijke opzet kan ook voor predictieve doeleinden ingezet worden.

## 4.6 Resultaten

We bespreken eerst de algemene trend in de onverklaarde component (§4.6.1), alvorens in te zoomen op de individuele trendbreuken die samenvielen met de belangrijkste ingrepen (§4.6.2). In Bijlage 3 staan de finale grafieken met hierop: de ruwe meeting (maandelijke aggregatie), de onverklaarde respectievelijke component en probabilistische trendbreukanalyse. In dit hoofdstuk focussen we ons op deze onverklaarde component. Voor de leesbaarheid wordt dit echter niet telkens meer vermeld.

### 4.6.1 Algemene trend onverklaarde component

Onderstaande Tabel 21 geeft een samenvatting van de algemene, onderliggende trend in het onverklaarde residu (gevisualiseerd in Bijlage 3): de trend die niet verklaart kan worden door de gefitte covariaten als (lineaire) zeespiegelstijging, getijcycli, bovenafvoer of het windklimaat. Deze algemene, onverklaarde trend komt bijgevolg grotendeels overeen met de reactie van de hydrodynamica op de lange termijn, morfologische<sup>18</sup> verandering van het estuarium. Dit laatste is dan weer de resultante van zowel alle ingrepen tijdens, als voor de beschouwde periode en de morfologische feedback op de zeespiegelstijging.

We zien hier volgende trends die we niet kunnen verklaren door de gefitte covariaten:

- Bij de beschouwde posten in de Westerschelde zien we een beperkte, onverklaarde stijging in zowel HW als LW. In het oostelijke deel stijgt de getijslag ook beperkt. De getijasymmetrie vertoont hier geen duidelijk uitgesproken trend.
- In de **Zeeschelde** is het een ander verhaal met duidelijk stijgende getijslag ten gevolge van sterk stijgende HW en dalende LW. Ook de getijasymmetrie daalde. De trend wordt meer uitgesproken in stroomopwaartse zin. Nabij Liefkenshoek en Antwerpen lijkt de algemene trend zelfs gestaagd tot teruggedraaid na ca. 2005 à 2010. Deze evolutie duidt op een duidelijke **toename van de getij-indringing** stroomopwaarts in het Schelde-estuarium. Dit is in overeenstemming met de bevindingen van Van Braeckel *et al.* (2012) en Vandenbruwaene *et al.* (2020a; 2020b) die vonden dat (a) een verruiming van de geulen leiden tot een toename van de getijslag en getij-indringing en (b) dat een geuldieptetoename een stijging van de celeriteit LW en bijgevolg afname van de getijasymmetrie teweegbracht. De beschouwde periode wordt inderdaad gekenmerkt door ingrepen die een verruiming en geuldieptetoename bewerkstelligden: aanleg- en onderhoudsbaggerwerk en zandwinning.

*Tabel 21: Samenvatting belangrijkste trends en plotse veranderingen in het onverklaarde residu van de gefitte modellen voor Vlissingen (Vli), Hansweert (HW), Lillo-Liefkenshoek (Lie), Antwerpen (Ant), Schelle-Hingene (Sch), Dendermonde (De) en Melle (Mel). Legende: ↗stijgende trend, ↘dalende trend, ~ fluctuatie rond cte*

| Algemene Trend  | Vli | Hw | Lie | Ant | Sch | De | Mel |
|-----------------|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|
| HW              | ↗   | ↗  | ↗↗  | ↗   | ↗↗  | ↗↗ | ↗↗  |
| LW              | ↗   | ↗  | ↘   | ↘   | ↘   | ↘↘ | ↘↘  |
| Getijslag       | ~   | ↗  | ↗↗  | ↗   | ↗↗  | ↗↗ | ↗↗  |
| Getijasymmetrie | ~   | ~  | ↘   | ↘   | ↘   | ↘  | ↘↘  |

<sup>18</sup> In brede zin: zowel bathymetrische als geometrische wijzigingen.

## 4.6.2 Probabilistische impactstudie

### 4.6.2.1 Algemeen

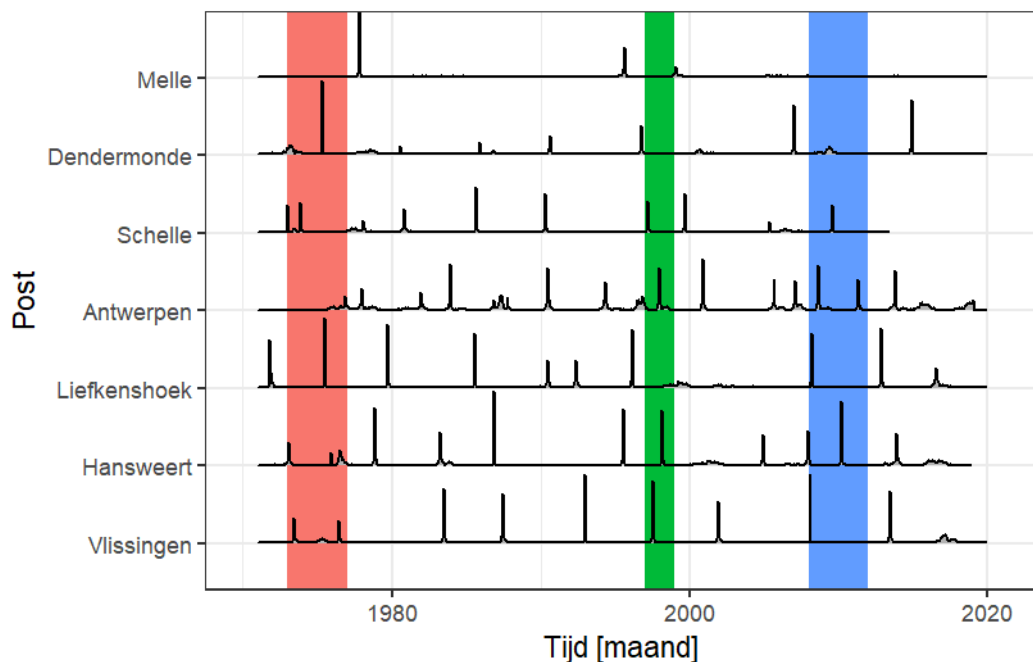
Figuur 75, Figuur 76 en Figuur 77 geven een globaal overzicht van de resultaten voor respectievelijk HW, LW en Getijasymmetrie. Ze tonen de kans dat er op een gegeven tijdstip een trendbreuk voorkomt<sup>19</sup> en relateren dit aan de belangrijkste ingrepen: de Eerste, Tweede en Derde Verruiming.

Men kan het volgende waarnemen:

1. HW vertoont de meeste trendbreuken, gevolgd door LW, terwijl getijasymmetrie relatief weinig trendbreuken vertoont.
2. De Eerste verruiming valt samen met meerdere trendbreuken (doorheen het estuarium) voor alle getijparameters. Enkel tijdens de eerste verruiming merken we meerdere trendwijzigingen in getijasymmetrie.
3. De Tweede verruiming valt samen met minder trendbreuken. Ze valt hoofdzakelijk samen met trendwijzigingen in HW.
4. Ook tijdens de Derde verruiming plaatsten meerdere experimenten trendwijzigingen in HW en LW. Deze zijn grotendeels gelegen tussen Hansweert en Schelle.

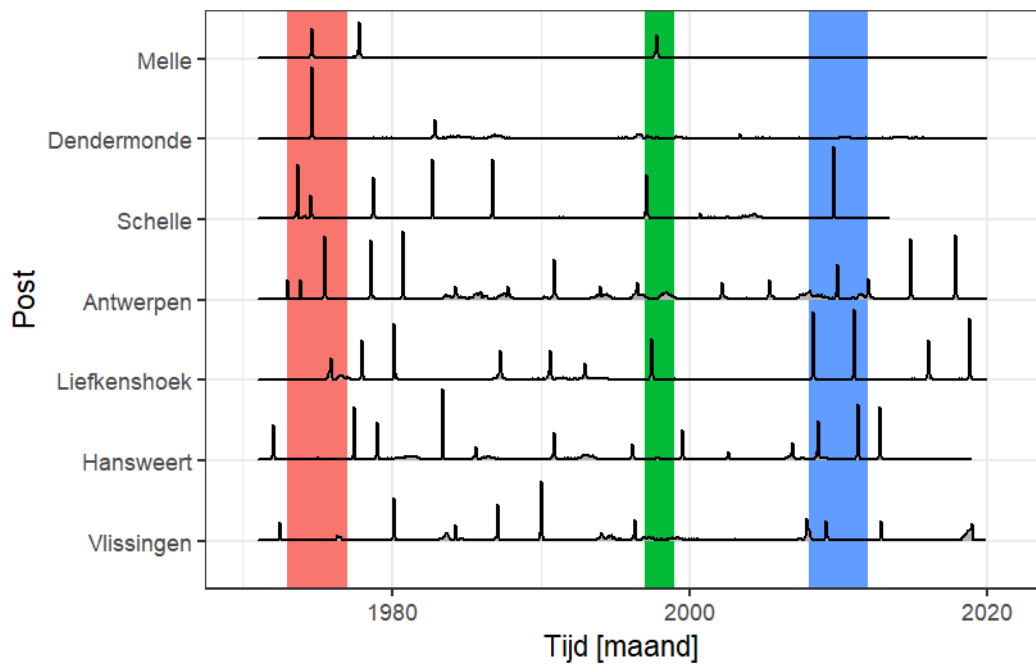
Deze figuren presenteren louter een globaal overzicht, maar heruit kunnen we noch het effect, noch de significantie afleiden. Bovendien is het noodzakelijk om ook de individuele plots in Bijlage 3 te bekijken om zo te achterhalen of er een overfit, dan-wel onderfit optrad.

In volgende hoofdstukken zoomen we daarom verder in op de specifieke verruiming.

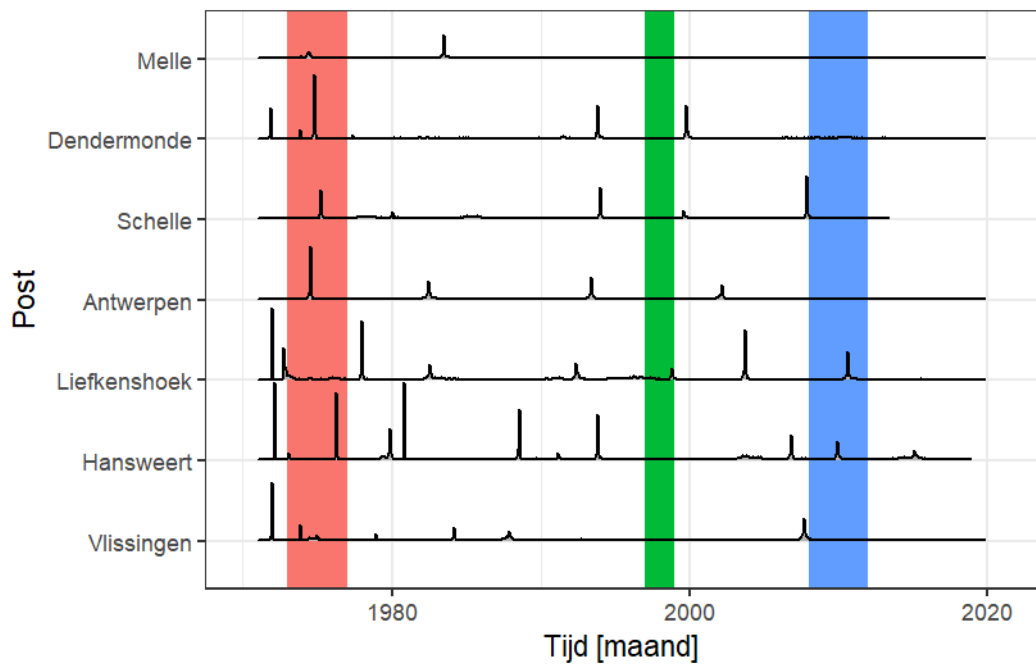


*Figuur 75: De kans op trendbreuken voor een specifieke tijd in Hoogwaterstanden. Merk op dat de kansen geschaald zijn per post en dus geen exacte kwantiteit hebben.*

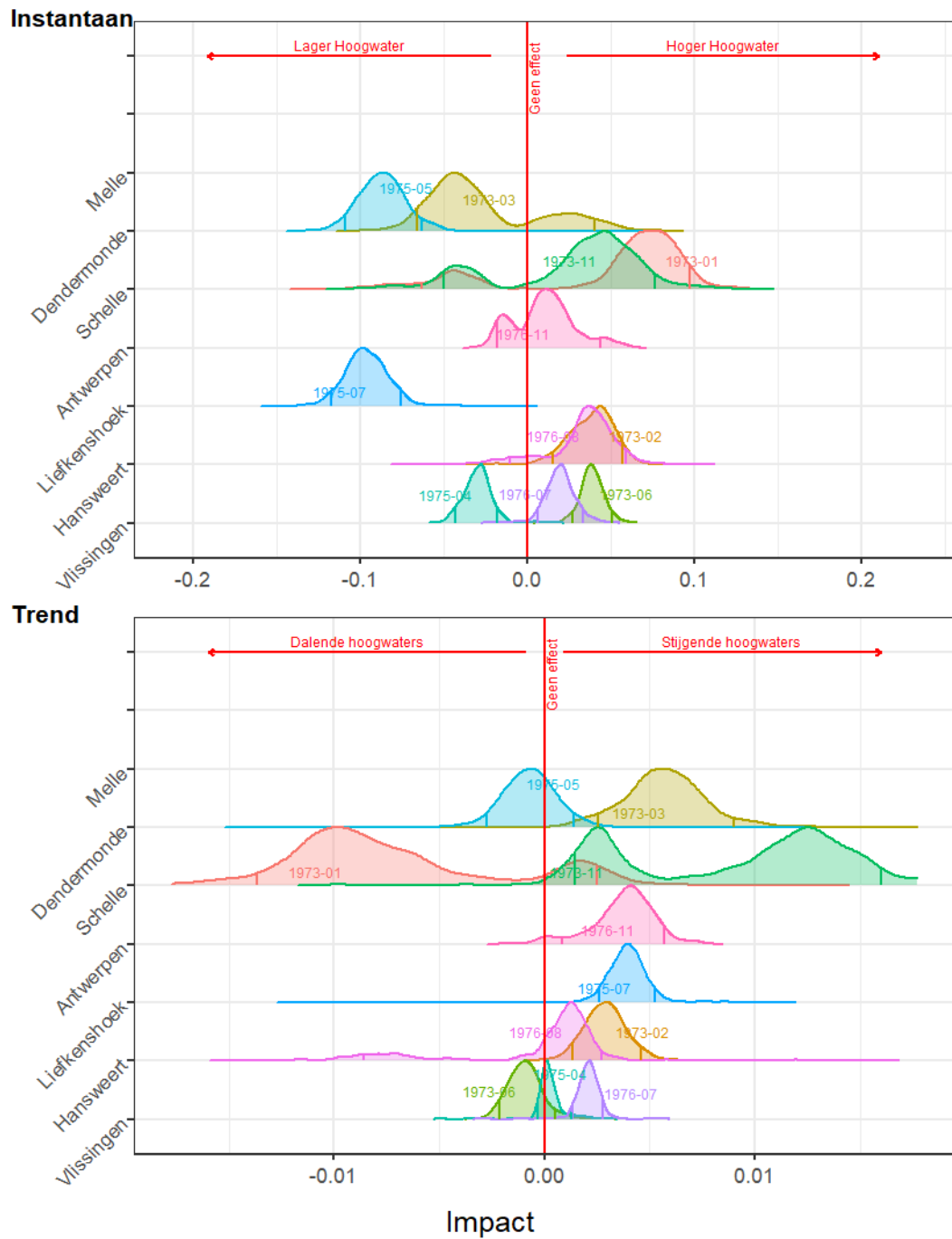
<sup>19</sup> Het percentage van de 1000 herhaalde experimenten dat een trendbreuk heeft geplaatst op tijdstip t



Figuur 76: De kans op een trendbreuk voor een gegeven tijd voor de Laagwaterstanden.



Figuur 77: De kans op een trendbreuk voor een gegeven tijdstip voor de Getijasymmetrie.



Figuur 78: De instantane (sprong) en trendeffecten (wijzigende trend) op de Hoogwaterstanden tijdens de eerste verruiming. Verschillende trendbreuken hebben elk hun eigen piek, en zijn met hun respectievelijke piekdatum gelabeld. Tussen de verticale lijnen bevindt zich 89% van de massa van de kansverdeling.



#### 4.6.2.2 Eerste verruiming (1973-1976)

##### 4.6.2.2.1 Uitleg figuren en tabellen

In Figuur 78 tonen we **de kansverdeling van de effecten** die de eerste verruiming zou kunnen hebben op de HW. Merk op dat we hier niet meer spreken over de kans op een trendbreuk (cf. §4.6.2), maar nu focussen op een bepaalde impact als er een trendbreuk aanwezig is.

Tijdens de tijdspanne van één ingreep kunnen er meerdere trendwijzigingen plaatsvinden. Iedere van deze trendbreuken kan natuurlijk zijn eigen set parameters hebben, waardoor we deze afzonderlijk analyseren. **Het tijdstip van de maximale dichtheid** (i.e. de piek in Figuur 75) is toegevoegd als een tekst. Merk op dat we enkel trendbreuken in acht nemen, wiens onzekerheidsband (blauwe stippellijn op figuren in Bijlage 3) binnen de termijn van de uitgevoerde ingreep valt. Bovendien houden we enkel pieken over die een totale massa hebben van minstens 25% en een piekhoogte van minstens 5%.

Voor zowel de trendwijziging als de instantane impact (sprong) betekent een waarde van nul geen effect. Een positieve waarde voor een instantane sprong betekent een hogere waarde voor de onverklaarde component en *vice versa*. Voor de trendwijziging betekent een positieve waarde dat een daling minder daalt of in een stijging verandert en *vice versa* voor een negatieve waarde

De kansverdeling geeft tevens de significantie weer in de vorm van een geloofwaardigheidsinterval<sup>20</sup> (*McElreath, 2020*). Als de waarde nul in dit geloofwaardig interval ligt dan stellen we dat de impact niet significant verschillend is van nul. Dit interval is essentieel arbitrair, net zoals een significantie interval, en is hier gesteld op 89%<sup>21</sup>, symmetrisch.

Tot slot zetten we hier (arbitraire) cut-off waarden voor wat wel of niet significant is. Voor Tabel 22 hanteren we een waarde van 10% als de minimale waarde wanneer we stellen dat er significant een trendbreuk aanwezig is. Verder, we stellen ons geloofwaardig interval vast als 89% van de kansverdeling, i.e. tussen 5.5% en 94.5% van de kansverdeling (*McElreath, 2020*).

Tabel 22: Het percentage van bootstrap experimenten wat tenminste één trendbreuk of -wijziging hebben geplaatst ten tijde van de eerste verruiming.

| Post         | Hoogwater [m] | Laagwater [m] | Getijslag [m] | Stijgduur [s] | Daalduur [s] | Getijsymmetrie [-] |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------------|
| Vlissingen   | 95.7%         | 0.0%          | 0.0%          | 84.2%         | 88.6%        | 24.1%              |
| Hansweert    | 88.3%         | 0.0%          | 67.5%         | 98.7%         | 99.4%        | 96.8%              |
| Liefkenshoek | 99.3%         | 97.4%         | 76.3%         | 0.0%          | 98.7%        | 0.0%               |
| Antwerpen    | 63.5%         | 94.4%         | 98.0%         | 97.7%         | 73.2%        | 89.4%              |
| Schelle      | 65.8%         | 94.6%         | 25.4%         | 49.0%         | 67.4%        | 62.5%              |
| Dendermonde  | 99.9%         | 98.8%         | 100.0%        | 96.9%         | 97.1%        | 95.9%              |
| Melle        | 0.0%          | 56.6%         | 96.2%         | 79.9%         | 99.0%        | 32.1%              |

##### 4.6.2.2.2 Waarneming

We bekijken nu de volledige set figuren, voor de verschillende getijparameters, in Figuur 78 tot Figuur 80 en in Tabel 22. We zien dat de eerste verruiming op vrijwel alle getijparameters een effect heeft gehad, i.e. de methode detecteert trendbreuken:

1. Een gelokaliseerde instantane daling van **HW** te Liefkenshoek en nabij Dendermonde, terwijl ze omhoog springen bij Hansweert, Antwerpen en Schelle. Waar significant, lijken

<sup>20</sup> Een geloofwaardigheidsinterval is het interval waar we 89% procent zeker zijn dat de correcte parameter in ligt, gegeven de data en het model.

<sup>21</sup> Deze waarde wordt standaard gebruikt in de Bayesiaanse statistiek, veelal voor historische redenen (*McElreath, 2020*). Ze is anders dan de frequentistische 95% betrouwbaarheidsintervallen om het verschil te benadrukken en het arbitraire aspect van dergelijke intervallen duidelijk te maken.

de trendwijzigingen bij de meeste locaties voornamelijk positief te zijn: stijgende HW. Merk op: Schelle vertoont eerst dalende, maar erna stijgende HW. Een controle op de individuele figuren (Bijlage 3) leert ons dat:

- a. Te Vlissingen en Hansweert lijken de trendbreuken eerder een overfit te zijn. De stijgende trend in HW zet zich voort.
  - b. Te Liefkenshoek zien we een relatief zeer sterke stijging van de onverklaarde component in het HW (+25 cm) in de periode '75 – '79.
  - c. Te Antwerpen steeg het HW met ca. +10 cm tussen '76 – '78, ervoor steeg het trager.
  - d. In Schelle steeg het HW sterk (ca. +25 cm) tussen '72 en '78.
  - e. Te Dendermonde zien we de sterkste stijging (>25 cm) in het HW tussen ca. '75 en '81, erna steeg het nog verder tot in '85 (+ 5cm).
  - f. Te Melle wordt een goede interpretatie (en het plaatsen van trendbreuken) tegengewerkt door een aantal ontbrekende waarden. We zien een stijging van het HW (+20 cm) tot in ca '88, maar geen duidelijke trendbreuk tijdens de eerste verruiming.
2. De **LW** vertonen op alle posten een instantaan lagere waarde. De trendwijzigingen op LW zijn diffuus: ze vertonen geen sterk patroon door het estuarium heen en zijn vaak niet significant. Echter, waar ze dat wel zijn, lijken ze positief te zijn: i.e. ze neigen naar stijgende LW. We zien in Liefkenshoek een dubbele piek. Het lijkt erop dat de instantane wijziging een netto nul-effect heeft, terwijl de trendwijziging dat niet heeft. We verkennen dit verder door te kijken naar een totaal plot (zie §4.5.3) in Bijlage 3. Hoewel de trendbreuk gevonden wordt in de onzekerheid lijkt ze een gevolg van onstabieliteit, zoals uitgewezen door de bredere piek van de trendbreuk rond augustus 1976. We zien ook dat de trendwijziging niet significant is, wat ook wijst op deze onstabieliteit. Een controle op de individuele figuren (Bijlage 3) leert ons dat:
- a. Te Vlissingen zien we een beperkte daling in het LW (-5 cm) tot in '76. Erna stijgt het LW.
  - b. Te Hansweert stijgt het LW tussen '72 en '77 (<10 cm). Erna daalt het HW beperkt tot in '79 (-5 cm) om erna opnieuw te stijgen.
  - c. Te Liefkenshoek daalt het LW sterk tot in '75 (ca. -20 cm) om erna quasi constant te blijven tot in '87.
  - d. Ook te Antwerpen daalt het LW sterk tot in '75 (ca. -15 cm).
  - e. In Schelle daalt het LW tot in '78 met ca. -25 cm.
  - f. In Dendermonde zien we een zeer snelle en sterke daling (ca. -30cm) van het LW tot in '75, met zwaartepunt in '74 (-20 cm). Na '75 stijgt de onverklaarbare component tot eind '82 om erna opnieuw sterk te dalen.
  - g. In Melle lijkt, gezien de ontbrekende datapunten, het LW sterk te dalen tot in '75 (ca. -15 à 20 cm) om erna even te stijgen (ca. +15 cm) tot eind '77, maar dan opnieuw sterk te dalen (-50 cm) tot eind jaren '90.
3. In de **getijasynergie** zien we voornamelijk instantane effecten, terwijl de trendwijzigingen veelal niet significant zijn. Bij Vlissingen t.e.m. Schelle zien we een instantane sprong naar een hogere getijasynergie, bij Dendermonde en Melle naar een lagere getijasynergie. Een controle op de individuele figuren (Bijlage 3) leert ons dat:

- a. Te Vlissingen wordt er niets opmerkelijks vastgesteld.
  - b. Hansweert: daling met ca. -0,10 tot in '76 (sinds start van de tijdsreeks) om dan te stijgen met ca. +0,15 tot in '93.
  - c. Te Liefkenshoek vindt een stijging plaats tot in '77 (+0,05) om erna plots met 0,05 te dalen in '78 en dan opnieuw te stijgen met 0,04 tot in '82. Merk op dat dit alles gesupponeerd wordt door een algemene dalende trend.
  - d. Te Antwerpen wordt de algemeen dalende trend nauwelijks onderbroken. Er vindt louter een beperkte stijging (+0,03) plaats in '74. Het verschil met Liefkenshoek is frappant.
  - e. Schelle: quasi constant tot in '85. Met goeie wil kan men een beperkte daling waarnemen van -0,03 tussen '75 en '80, gevolgd door een beperkte stijging van +0,03 tot in '85.
  - f. Te Dendermonde nemen we een daling van bijna -0,1 waar tot in ca. '77 om erna quasi constant te blijven tot begin jaren '90. De snelste daling (-0,05) vond plaats in '74.
  - g. In Melle nemen we geen duidelijke trendwijziging plaats nabij de eerste Verruiming. De algemeen dalende trend zet zich voort.
4. Een controle op de individuele figuren (Bijlage 3) leert ons het volgende over de **getijslag**:
- a. Vlissingen: beperkte stijging (+10 cm) tot in '80
  - b. Hansweert: quasi constant, beperkte stijging (+10 cm) '71 tot in '83
  - c. Liefkenshoek: sterke stijging (>25 cm) tot in '79 om dan na een korte daling, constant te blijven tot in '83
  - d. Antwerpen: stijging tot in '78 (+25 cm) om dan kort te dalen (-20 cm) tot in '81 en dan opnieuw te stijgen met (+25 cm) tot in '90.
  - e. Schelle: sterke stijging van +40 cm tot in '79 om dan tot in '82 te dalen met ca. -15 cm.
  - f. Dendermonde: sterke stijging met >60 cm tot in '87. De snelste stijging (+40 cm) vond plaats tussen '74 en '77.
  - g. In Melle nemen we geen duidelijke trendwijziging plaats nabij de eerste Verruiming. De algemeen sterk stijgende trend (tot in 2004) zet zich voort.

#### 4.6.2.2.3 Interpretatie

De Eerste verruiming bevindt zich tegen de start van de beschouwde tijdsreeks, wat er de interpretatie niet gemakkelijker op maakt omdat we niet met een lange voorgaande periode kunnen vergelijken. Vandenbruwaene *et al.* (2020a) leren ons echter dat het HW, LW en bijgevolg LW ook ervoor dezelfde algemene trend voortzetten. De Getijasymmetrie steeg algemeen tot ergens tussen de jaren '60 en '70 om erna een algemene daling in te zetten.

Daarnaast deden er zich ook een aantal andere belangrijke ingrepen voor tijdens nabij de periode van de Eerste verruiming. Tabel 23 presenteert een subset van Bijlage 1, specifiek gefocust op de belangrijkste ingrepen in de jaren '70. Deze gelijktijdigheid bemoeilijkt de interpretatie: Van Braeckel *et al.* (2012) en Vandenbruwaene *et al.* (2020a; 2020b) leren ons dat inpolderingen en verruiming een gelijkaardig signaal kunnen hebben op HW en LW – zij het de ene meer op HW en de andere meer op LW.

De waarnemingen in de **Westerschelde** vertonen **geen duidelijk signaal** die we normaal van de **Eerste Verruiming** zouden verwachten, namelijk: dalende LW, (beperkt) stijgende HW en dalende getijasymmetrie (Van Braeckel *et al.*, 2012 ; Vandenbruwaene *et al.*, 2020a; 2020b).

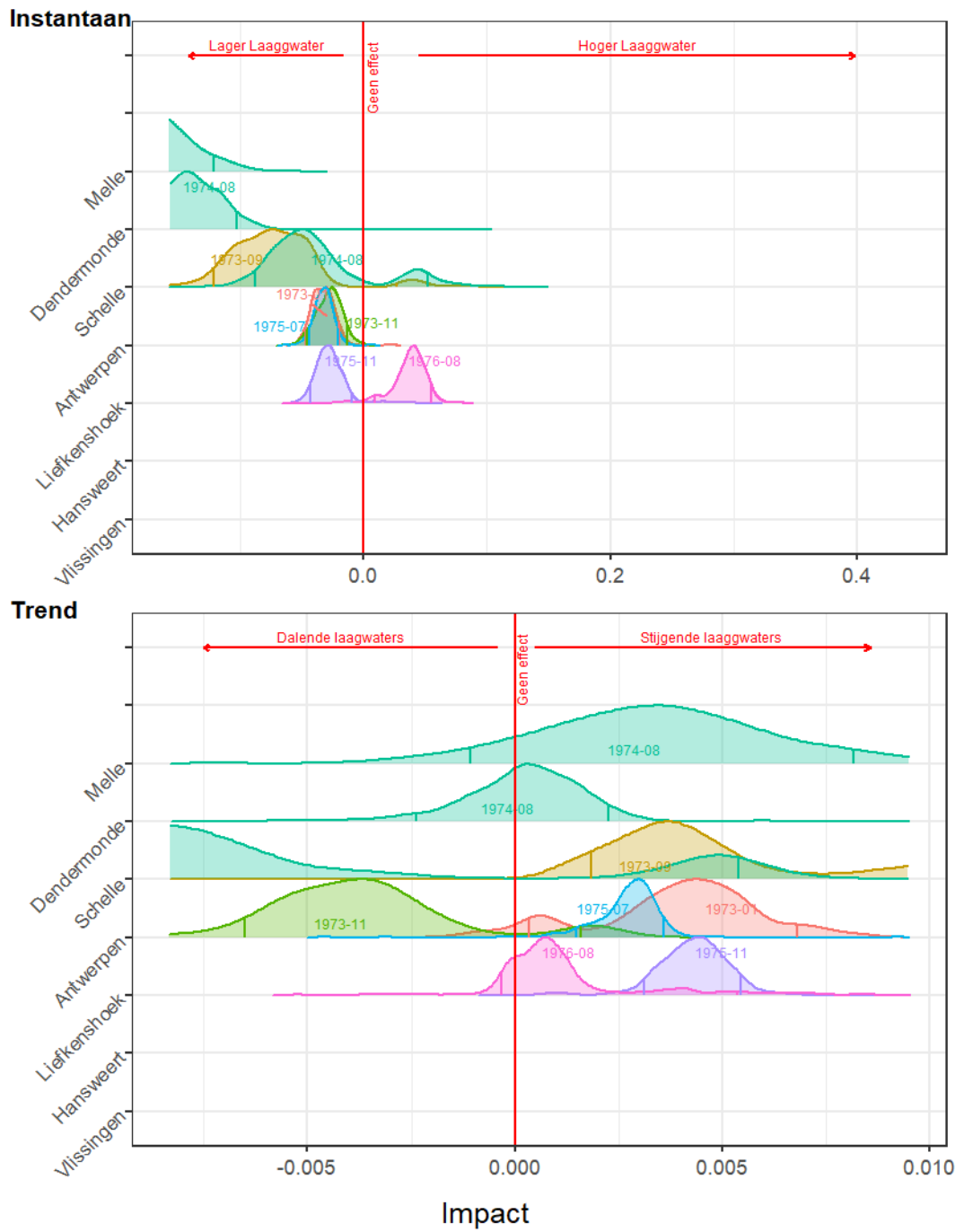
De meetlocaties in de **Zeeschelde** vertonen wel een onverklaarbare daling in het LW tijdens de eerste verruiming: vaak tot in '75, te Schelle ook nog erna. Dit vertoont een sterke gelijktijdigheid met de Eerste Verruiming en bovendien vonden de belangrijkste inpolderingen pas in '75 (Galgenschoor) en '76-'77 (Afsluiting de Vliet) plaats. Hierbij wensen we wel op te merken dat de dam op de Durme weliswaar ook in '73 werd geplaatst en de inpoldering voor de aanleg van het Schelde-Rijn Kanaal er net voor plaatsvond ('70 tot '73). Het HW lijkt in Liefkenshoek en Antwerpen pas net na de Eerste Verruiming te stijgen, wat dan weer een sterke gelijktijdigheid met de inpolderingen vertoont. Enkel in de Boven-Zeeschelde vertoont de (dalende) getijasymmetrie het signaal van een verdieping van de geul. Te Liefkenshoek nemen we een onverklaarbare stijging van de getijasymmetrie waar, wat men eerder aan een inpoldering zou toeschrijven. Antwerpen vertoont gewoon een algemene daling in getijasymmetrie.

Bovenstaande waarnemingen doen ons besluiten dat er een vrij sterke **link** te leggen is **tussen de dalende LW in de Zeeschelde en de Eerste Verruiming**. Deze daling werd **mogelijk nog versterkt door inpolderingen en/of afsluitingen van zijrivieren**. De **Eerste Verruiming** lijkt **geen aanzienlijk effect op het HW** gehad te hebben. **De hierop volgende inpoldering(en) wel te Liefkenshoek en Antwerpen.**

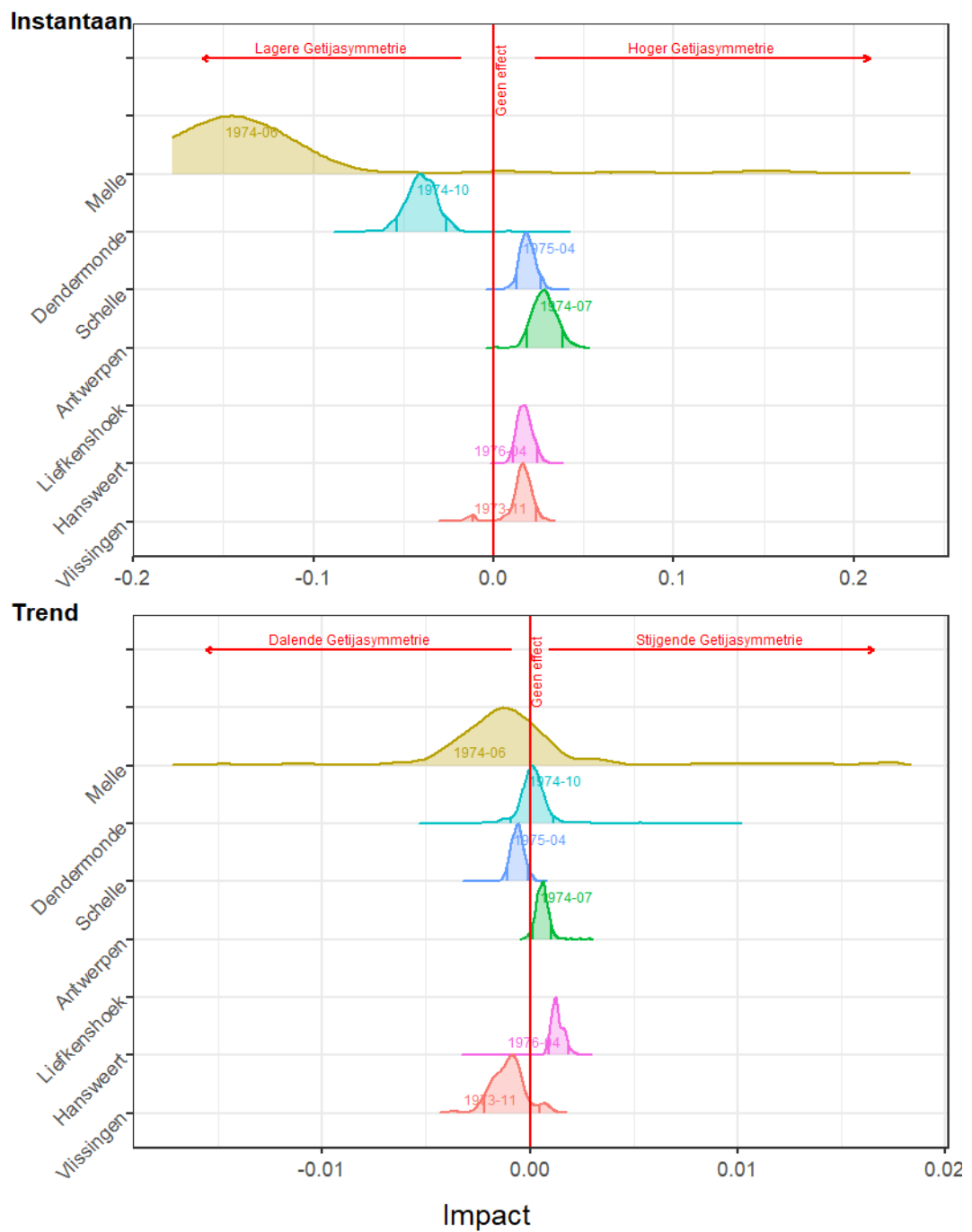
Tabel 23: Samenvatting belangrijke ingrepen in de jaren '70

| Locatie       | Naam                                   | Start     | Eind       | Beschrijving  |
|---------------|--|-----------|------------|---|
| Westerschelde | Inpoldering Schelde Rijn (1970 - 1972) | 1/01/1970 | 31/12/1972 | Inpolderingen ten gevolge van het tot stand brengen van het Schelde – Rijn kanaal.  |
| Westerschelde | Eerste verruiming (1973 - 1976)        | 1/01/1973 | 31/12/1976 | De vaargeul werd verdiept en verbreedt om de doortocht van de scheepvaart te verzekeren. De eerste baggerwerken startten in Bath met het verdiepen van de drempel (van der Weck, 2007). In totaal werd voor de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde een volume van respectievelijk 57,5 Mm <sup>3</sup> en 14Mm <sup>3</sup> gebaggerd. De baggerspecie van de Beneden – Zeeschelde werd volledig geborgen op land, terwijl deze van de Westerschelde ook gedeeltelijk werd teruggestort in het estuarium (Van Braeckel <i>et al.</i> , 2012). |
| Westerschelde | Inpoldering Ossendrecht (1976)         | 1/01/1976 | 31/12/1976 | Ingepolderd gebied van 782 ha. Delen van het gebied overstroomden tijdens stormvloeden. Momenteel is het vooral gekend vanwege het natuurgebied “Noordpolder Ossendrecht”.  |
| Westerschelde | Inpoldering Mosselbanken (1976)        | 1/01/1976 | 31/12/1976 | Inpoldering van 133 ha ten behoeve van de industrie. (Volgens Vroon et al. (1996) gaat het hier om 148 ha.)   |
| Westerschelde | Verlegging Hoofdvaargeul (1977)        | 1/01/1977 | 31/12/1977 | Verlegging van de hoofdvaargeul naar de vloedgeul Gat van Ossensisse – Overloop Hansweert.  |

| Locatie                   | Naam                                 | Start     | Eind       | Beschrijving   |
|---------------------------|--------------------------------------|-----------|------------|--|
| <b>Beneden-Zeeschelde</b> | Eerste verruiming (1973 - 1976)      | 1/01/1973 | 31/12/1976 | Eind de jaren zestig van de vorige eeuw vond de eerste verruiming van de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde plaats. De vaargeul werd verdiept en verbreedt om de doortocht van de scheepvaart te verzekeren. De eerste baggerwerken startten in Bath met het verdiepen van de drempel (van der Weck, 2007). In totaal werd voor de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde een volume van respectievelijk 57,5 Mm <sup>3</sup> en 14Mm <sup>3</sup> gebaggerd. De baggerspecie van de Beneden – Zeeschelde werd volledig geborgen op land, terwijl deze van de Westerschelde ook gedeeltelijk werd teruggestort in het estuarium (Van Braeckel et al., 2012). |
| Beneden-Zeeschelde        | Opspuiten Paardenschor (1970 - 1989) | 1970      | 1989       | opspuiten voor aanleg kerncentrale t.h.v. Schor Ouden Doel   |
| Beneden-Zeeschelde        | Inpoldering Galgenschor (1975)       | 1/01/1975 | 31/12/1975 | Inpoldering van een gebied van 22,5 ha op de rechter schelde-oever, gescheiden van het Groot Buitenschor door de Zandvlietsluis. De gebieden functioneren nu als natuurgebied met getijdenwerking (ontpolderd).  |
| <b>Boven-Zeeschelde</b>   | Dam op de Durme (1973)               | 1/01/1973 | 31/12/1973 | In 1973 werd de dam op de Durme (nabij Lokeren) geplaatst om de getijgolf tegen te houden en zo de stroomopwaarts gelegen zones te vrijwaren van overstromingen.   |
| Boven-Zeeschelde          | Afsluiting de Vliet (1976 - 1977)    | 1/01/1976 | 31/12/1977 | De Vliet is een zijrivier van de Rupel, deze werd volledig afgesloten aan de monding in de Rupel in 1976 na de grote overstromingsramp. De Vliet is bijgevolg tijloos gebied geworden.   |



Figuur 79: De effecten van de trendbreuken tijdens de eerste verzuiming, op Laagwaterstanden.



Figuur 80: De effecten van de trendbreuken tijdens de eerste verruiming op de getijasymmetrie.



#### 4.6.2.3 Tweede verruiming (1997-1998)

##### 4.6.2.3.1 Waarneming

De Tweede verruiming heeft duidelijk minder effect gehad dan de eerste: Tabel 24 vertoont duidelijk vaker niet significante trendbreuken dan Tabel 22. Enkel HW en LW vertonen een aantal trendbreuken gedurende de tweede verruiming die geduid worden in Figuur 81 tot Figuur 83:

1. Waar significant (Schelle, Antwerpen, Hansweert & Vlissingen – merk op niet in Liefkenshoek), vertoont het **HW** een plotse, positieve sprong naar boven. Bij Antwerpen en Hansweert wordt dit gevolgd door een trendwijziging die neigt naar meer dalende HW, te Vlissingen naar sterker stijgende. Een controle op de individuele figuren (Bijlage 3) leert ons dat:
  - a. Te Vlissingen er zich nabij 1997 een kortstondige stijging. De gefitte sprong maskeert de eigenlijke periode die langer duurt: +10 cm onverklaarde component tijdens '97-'98.
  - b. Hansweert: het HW inderdaad steeg (10 cm) in de beschouwde periode om erna terug te dalen (-10cm) tot het in 2001 op hetzelfde niveau kwam als voorheen.
  - c. Te Liefkenshoek steeg het HW relatief zeer sterk tussen '96 en '99. Gezien de trendbreuken zich net buiten de periode van de 2<sup>de</sup> verruiming viel, werd dit niet gezien door het 'impactmodel', waardoor Tabel 24 0% kans op trendwijziging geeft. De quasi gelijktijdigheid en extreem sterke stijging (20 cm), doen ons vermoeden dat er een link is met de 2<sup>de</sup> verruiming.
  - d. Te Antwerpen nemen we ook een sterke stijging (>10 cm) waar, maar nu tussen '96 en '98, waardoor dit wel gecapteerd wordt in Tabel 24.
  - e. Ook te Schelle maskeert de gefitte sprong de eigenlijke duur van de stijging (ca +10 cm): '96-'98
  - f. In Dendermonde merken we een steile stijging (+20 cm) van in '96 tot in 2000. Door de timing, vindt het model deze niet.
  - g. Te Melle was er al een steile stijging aan de gang sinds '95 en deze duurt door tot in ca. 2007. Tijdens deze volledige periode steeg het HW (onverklaarbare component) met ca. +30 cm.
2. Het **LW** vertoont te Melle, Schelle en Liefkenshoek een beperkte instantane stijging. Trendwijzigingen lijken niet significant of onnoemenswaardig klein. Een controle op de individuele figuren (Bijlage 3) leert ons dat:
  - a. Te Vlissingen, het LW lijkt te stijgen (ca. +5cm onverklaarde component tussen '96 en '98), maar de modellen het lastig (grote onzekerheid, brede piek) hebben om trendbreuken te plaatsen in de periode '90-2000.
  - b. Hansweert: een stijging tussen ca. '96 en '99 (net buiten interval van het impactmodel) van ca. +5 cm.
  - c. Liefkenshoek: stijging van ca +5 cm in '97.
  - d. Antwerpen: stijging van > 10 cm tussen '96 en '98.
  - e. Schelle: een stijging van ca. 10 cm in '97
  - f. Dendermonde: ca. 15 cm tussen '96 en '99.
  - g. Melle: stijging van ca. 15 cm tussen '96 en '98
3. De **getijasymmetrie** vertoont nauwelijks een effect. Een controle op de individuele figuren (Bijlage 3) leert ons dat er inderdaad geen belangrijke veranderingen optreden in Vlissingen,

Hansweert, Liefkenshoek, Antwerpen, Schelle of Melle. Te Dendermonde nemen we een daling waar van '93 tot '99 om erna constant te blijven, maar gezien de tijdsduur lijkt dit geen verband te houden met de 2<sup>de</sup> verruiming.

- Ook de **getijslag** vertoont geen duidelijke trendwijziging of –breuk.

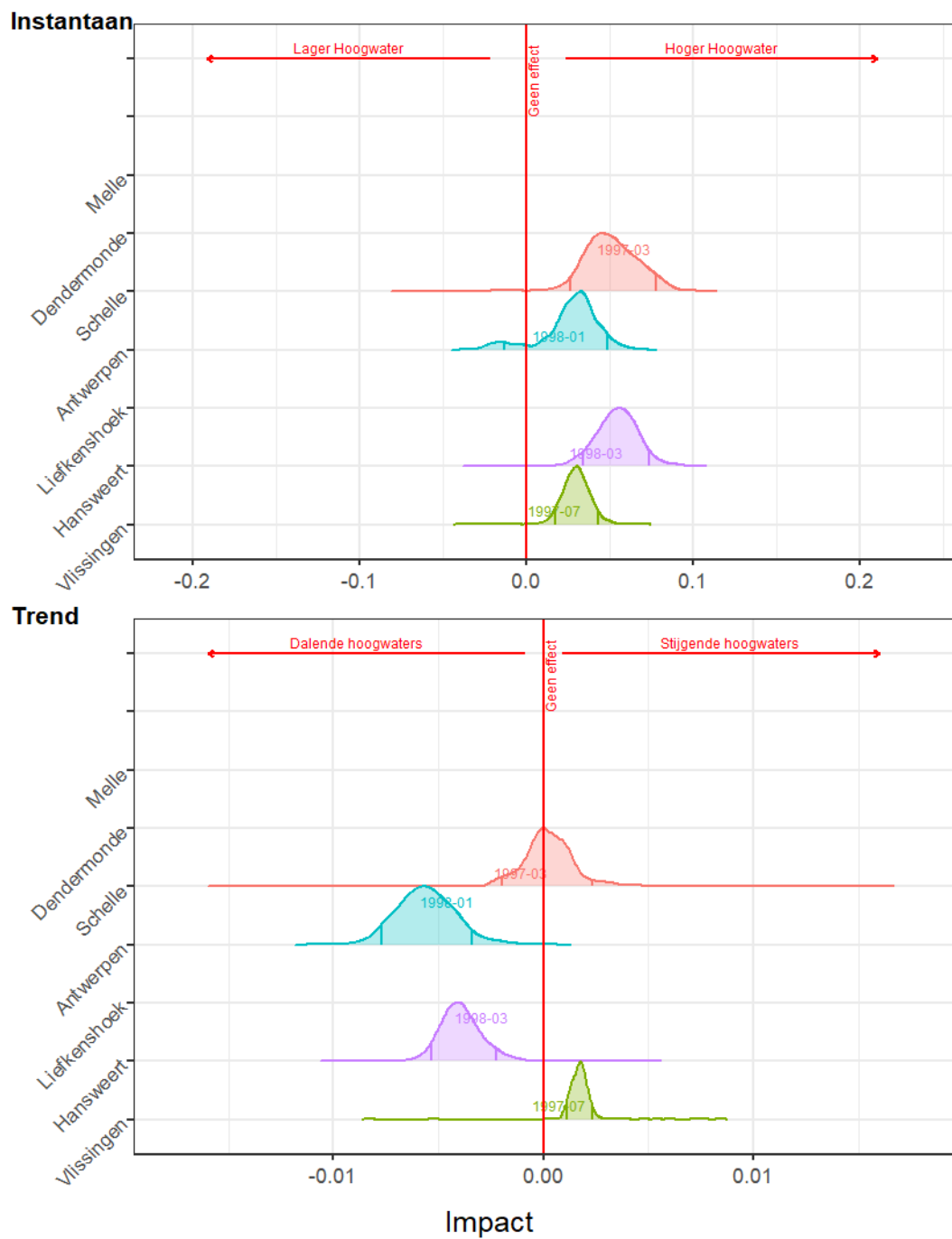
#### 4.6.2.3.2 Interpretatie

De waargenomen veranderingen dragen niet echt het signaal dat men op basis van Van Braeckel *et al.* (2012) en Vandenbruwaene *et al.* (2020a; 2020b) typisch zou verwachten van een verruiming of verdieping van de geul: respectievelijk een stijgende getijslag en daling van de getijasymmetrie. Stijgende HW en LW zou men eerder linken aan een zeespiegelstijging. Bovendien merken we in Vlissingen gelijkaardige effecten als verder stroomopwaarts in het estuarium, wat ook eerder op een exogene oorzaak duidt.

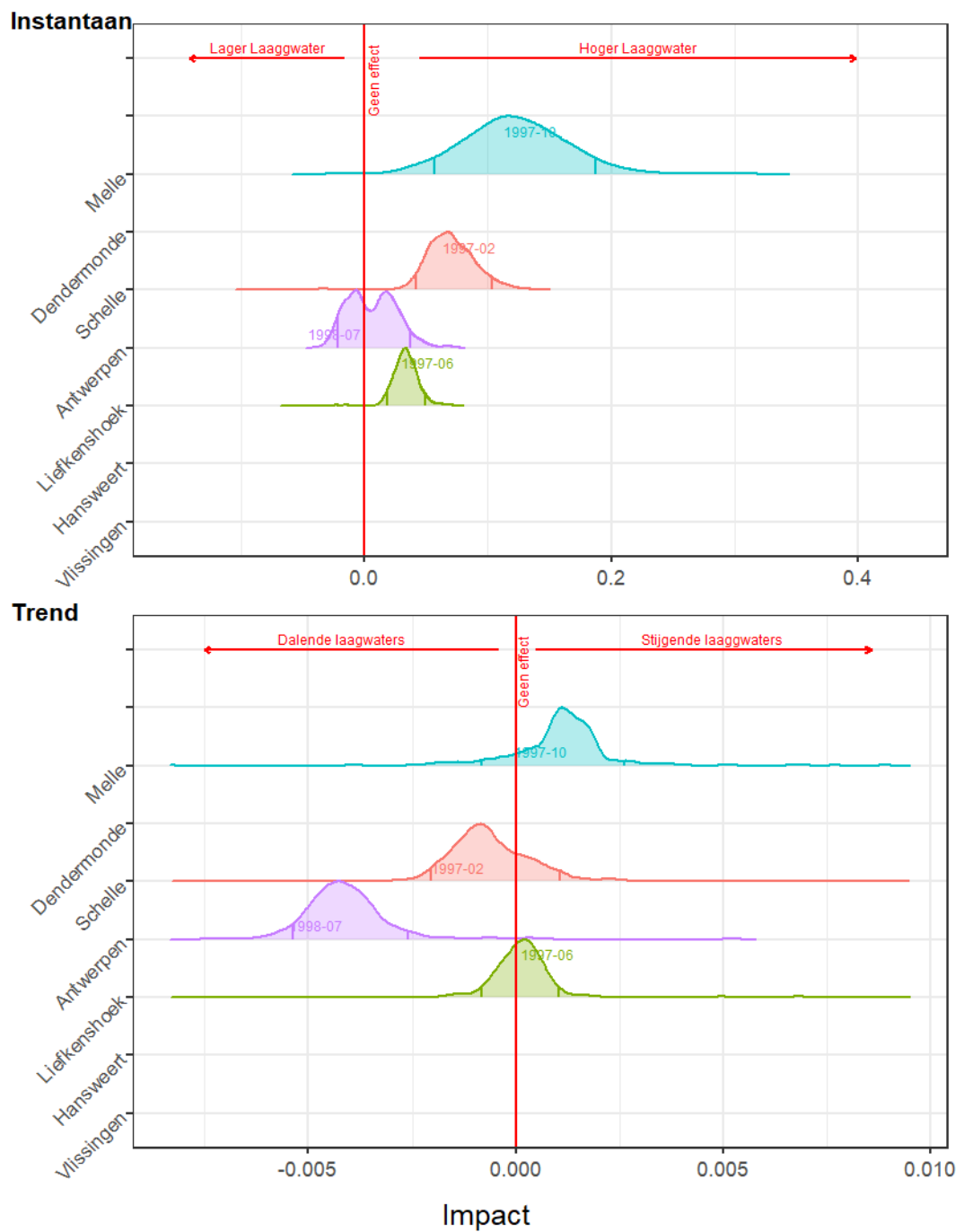
Op basis van ons model en gegeven de data, besluiten we dan ook dat **de Tweede Verruiming geen significante impact** gehad heeft op het waargenomen HW, LW of getijasymmetrie. Gezien er in deze periode geen andere ingrepen plaatsvonden die een impact op het volledige estuarium kunnen hebben, **schrijven we de waargenomen veranderingen toe aan een tijdelijke versnelling in de regionale zeespiegelstijging**. Deze kon dan ook niet gevat worden in de gefitte lineaire trend, getijcycli of andere gefitte meerjarige cycli.

Tabel 24: De kans op een trendbreuk of -wijziging gelijktijdig met de tweede verruiming.

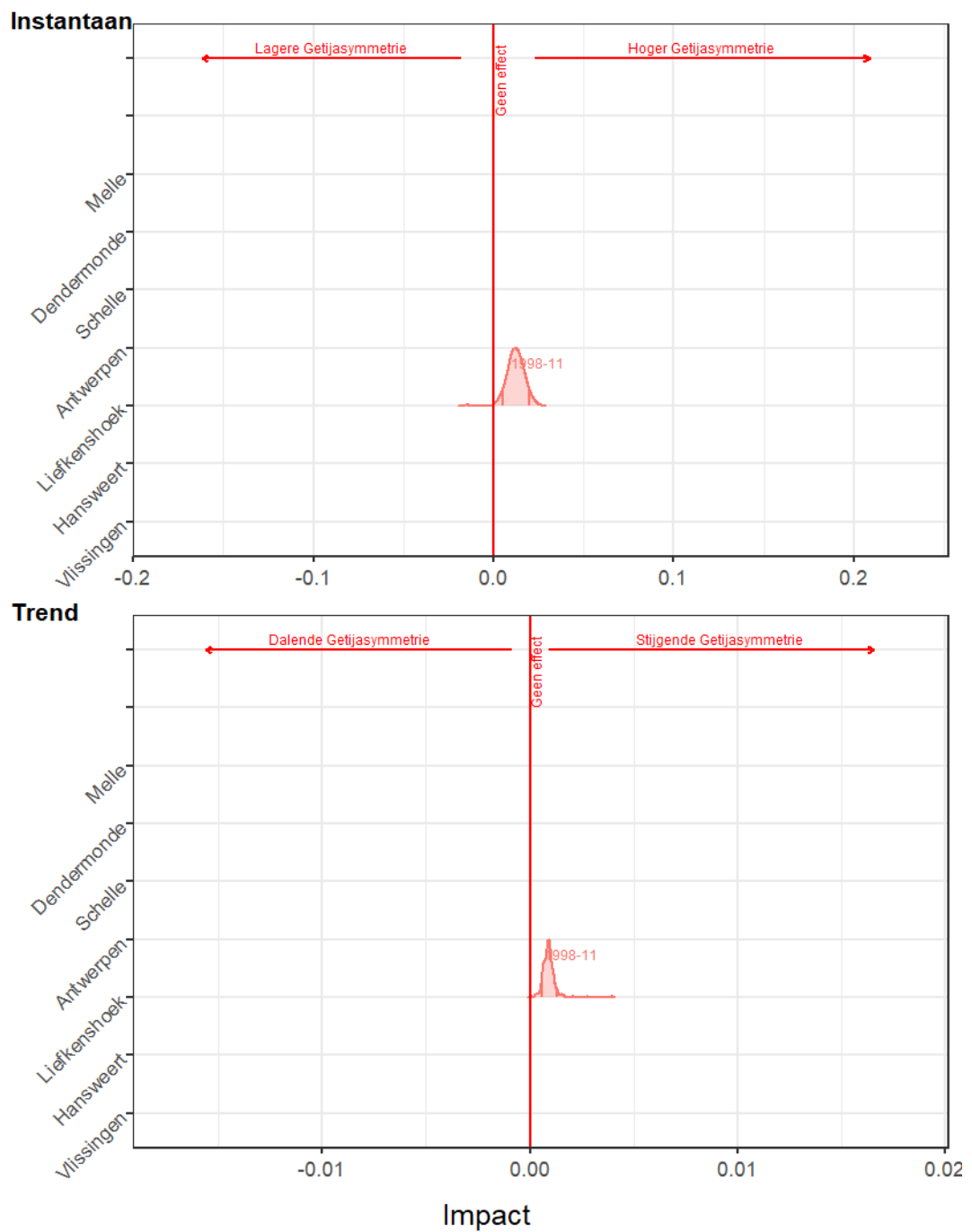
| Post         | Hoogwater [m] | Laagwater [m] | Getijslag [m] | Stijgduur [s] | Daalduur [s] | Getijasymmetrie [-] |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------------|
| Vlissingen   | 96.2%         | 0.0%          | 0.0%          | 0.0%          | 0.0%         | 0.0%                |
| Hansweert    | 93.2%         | 0.0%          | 0.0%          | 0.0%          | 45.1%        | 0.0%                |
| Liefkenshoek | 0.0%          | 70.3%         | 0.0%          | 0.0%          | 0.0%         | 30.6%               |
| Antwerpen    | 84.6%         | 96.3%         | 0.0%          | 0.0%          | 0.0%         | 0.0%                |
| Schelle      | 54.2%         | 83.4%         | 0.0%          | 0.0%          | 0.0%         | 0.0%                |
| Dendermonde  | 0.0%          | 0.0%          | 0.0%          | 0.0%          | 0.0%         | 0.0%                |
| Melle        | 0.0%          | 58.1%         | 56.4%         | 0.0%          | 0.0%         | 0.0%                |



Figuur 81: De effecten van de trendbreuken gelijktijdig met de tweede verruiming, op hoogwaterstanden.



Figuur 82: De effecten van de trendbreuken gelijktijdig met de tweede verruiming, op laagwater.



Figuur 83: De effecten van de trendbreuken gelijktijdig met de tweede verruiming op getijasymmetrie.

#### 4.6.2.4 Derde verruiming (2008-2011. Westerschelde: 2010-2011, Beneden-Zeeschelde: 2008-2010)

##### 4.6.2.4.1 Waarneming

Tabel 25 leert ons dat Derde Verruiming ook minder effecten teweeggebracht dan de Eerste verruiming (Tabel 22). We zien net als bij de Tweede Verruiming, een diffuus effect op de getijparameters, waar we wel trendbreuken zien maar deze geen helder patroon vormen.

1. Zo vertoont het **HW** (Figuur 84) een instantane daling te Antwerpen en Liefkenshoek, maar sprong naar boven elders. De trendwijziging neigt overal naar meer stijgende/minder dalende HW, behalve te Liefkenshoek en Vlissingen. Een controle op de individuele figuren (Bijlage 3) leert ons dat:
  - a. Het HW te Vlissingen vertoont een daling (<10 cm) in 2008 om dan quasi constant te blijven tot 2013.
  - b. Hansweert: na een daling van <10 cm in 2007-2009, vertoont (de onverklaarde component van) het HW een snelle stijging van +20 cm tussen 2010 en eind 2013 om daarna opnieuw te dalen. De snelste stijging (+10 cm) deed zich voor in 2010.
  - c. Ook te Liefkenshoek kende het HW een korte daling (-10 cm) in 2008 om dan na een quasi stabiele periode (eind 2008 - begin 2012) opnieuw te stijgen in 2012 (ca +10cm).
  - d. In Antwerpen daalde het HW (-10 cm) tussen 2007 en eind 2008 om dan stabiel te blijven tot 2013.
  - e. Te Schelle steeg het HW met +10 cm tussen 2009 en 2011.
  - f. Dendermonde: na een plotse daling (<15 cm) tussen 2007 en 2009, startte het HW een stijgende trend die nog steeds voort loopt. Tussen 2009 en 2019 steeg de onverklaarde component met +20 cm.
  - g. In Melle kende het HW een lange stijgende trend tot in ca. 2008 om dan quasi constant te blijven.
2. Het **LW** (Figuur 85) vertoont te Hansweert en Liefkenshoek een instantane daling en te Vlissingen en Schelle een instantane stijging. Te Liefkenshoek volgt hierop een meer negatieve trend. Bij Vlissingen, Hansweert en Schelle een meer positieve trend. Te Antwerpen zijn er meerdere trendbreuken gedetecteerd tijdens de 3<sup>de</sup> verruiming met tegengesteld effect. Dit kan (a) dat het model het lastig heeft om de waarnemingen te verklaren of (b) dat meerdere ingrepen die tijdens die periode plaatsvonden (3<sup>de</sup> verruiming, op diepte baggeren Deurganckdok etc.) een ander effect hadden. Een controle op de individuele figuren (Bijlage 3) leert ons dat:
  - a. Te Vlissingen daalde het LW met -5 cm in 2008-2009 om dan quasi constant te blijven tot eind 2012, waarna een stijgende trend werd ingezet die nog voortliep in 2019.
  - b. In Hansweert daalde het LW met -10 cm in 2007-2008 om dan te stijgen met ca. +15 cm tot in 2011, waarna het na een plotse daling van -5 cm opnieuw steeg met <10 cm tot eind 2012. Erna bleef het LW quasi constant.
  - c. In Liefkenshoek daalde het LW met -20 cm in 2008-2011 om dan te stijgen met +15 cm tot begin 2016.
  - d. In Antwerpen kent het LW een grillig patroon, wat een mogelijke overfit door het model veroorzaakt. Het LW daalde met -15 cm in 2008-2011 om dan met +10 cm te stijgen tot in 2014.
  - e. In Schelle daalde het LW met -20 cm tussen 2004 en 2009 om dan in quasi 1 maand (september 2009) met +15 cm te stijgen alvorens opnieuw een dalende trend in te zetten.

- f. In Dendermonde kende het LW een lange daling van ca. -20 cm tussen 2000 en 2010 om daarna opnieuw een stijgende trend in te zetten.
  - g. Het LW in Melle vertoont eenzelfde patroon.
3. De effecten op **getijasymmetrie** (Figuur 86) zijn wederom nihil. Een controle op de individuele figuren (Bijlage 3) bevestigt dit:
- a. Te Vlissingen vertoont de getijasymmetrie geen belangrijke wijzigingen tijdens de 3<sup>de</sup> Verruiming.
  - b. Hansweert: een stijging van 0,05 tussen 2003 en 2015 om dan te dalen.
  - c. Liefkenshoek: na een lange daling tot in 2003 werd een stijging ingezet die nog steeds voortgaat – mits korte tussenpauze met zeer beperkte daling (-0,02) tussen eind 2008 en eind 2010.
  - d. In Antwerpen kent de getijasymmetrie een daling tot in 2002 om dan quasi constant te blijven.
  - e. De getijasymmetrie in Schelle kent een algemeen dalende trend met quasi geen belangrijke trendwijzigingen.
  - f. In Dendermonde daalde de getijasymmetrie tot eind '99 om dan quasi constant te blijven.
  - g. In Melle kent de getijasymmetrie een algemeen dalend verloop, zonder belangrijke trendwijzigingen tijdens de 3<sup>de</sup> verruiming.
4. Een controle op de individuele figuren (Bijlage 3) leert ons het volgende over de **getijslag**:
- a. Vlissingen geen belangrijke wijzigingen tijdens de 3<sup>de</sup> Verruiming.
  - b. Te Hansweert vertoont het model een overfit. De getijslag kent een algemeen stijgende trend tot eind 2011 om dan met -15 cm te dalen tot begin 2016.
  - c. In Liefkenshoek steeg de getijslag tot eind 2012 om daarna met ca. -20 cm te dalen tot midden 2016.
  - d. Ook in Antwerpen steeg de getijslag tot in 2012 om erna te dalen met <20 cm tot eind 2015.
  - e. In Schelle vertoont het model ook een aanzienlijke overfit qua trendbreuken. De getijslag steeg tot in 2008 om dan tot eind 2009 te dalen met -10 cm. Daarna steeg de getijslag opnieuw.
  - f. In Dendermonde kent de getijslag een ander verloop: een daling tot eind 2008 om dan een stijgende trend in te zetten die nog steeds voortgaat.
  - g. In Melle kent de getijslag een lange stijgende trend tot in 2004 om dan quasi constant te blijven.

#### 4.6.2.4.2 Interpretatie

Tijdens de 3<sup>de</sup> verruiming vonden er nauwelijks belangrijke andere ingrepen plaats die een aanzienlijk regionaal effect kunnen hebben op de hydrodynamica. Na de 3<sup>de</sup> verruiming traden er in de Boven-Zeeschelde wel een aantal GGG's of ontpolderde zones in werking (2013-2015: zie Bijlage 1). De lange duur waarbij er in de Westerschelde tussen 2010-2011 sediment werd gebaggerd, maar in de Beneden-Zeeschelde van 2008 tot 2010, maakt de interpretatie wat lastiger.

Gelukkig lag het zwaartepunt in beide deelsystemen in 2010, toen 95% van het sedimentvolume in de Westerschelde en 65% van het sedimentvolume in de Beneden-Zeeschelde gebaggerd werd.

Nabij 2008 merken we een relatief snelle daling in zowel het HW, als LW van de monding tot in Antwerpen. Dit komt niet overeen met het te verwachten signaal van een verruiming (Van Braeckel *et al.*, 2012 ; Vandenbruwaene *et al.*, 2020a; 2020b). Bovendien merken we in Vlissingen gelijkaardige effecten als verder stroomopwaarts in het estuarium, wat ook eerder op een exogene oorzaak duidt. We schrijven de waarneming in de **Westerschelde en Beneden-Zeeschelde** dan ook toe aan **een tijdelijk tragere regionale zeespiegelstijging (incl. cycli) t.o.v. de gefitte covariaten**.

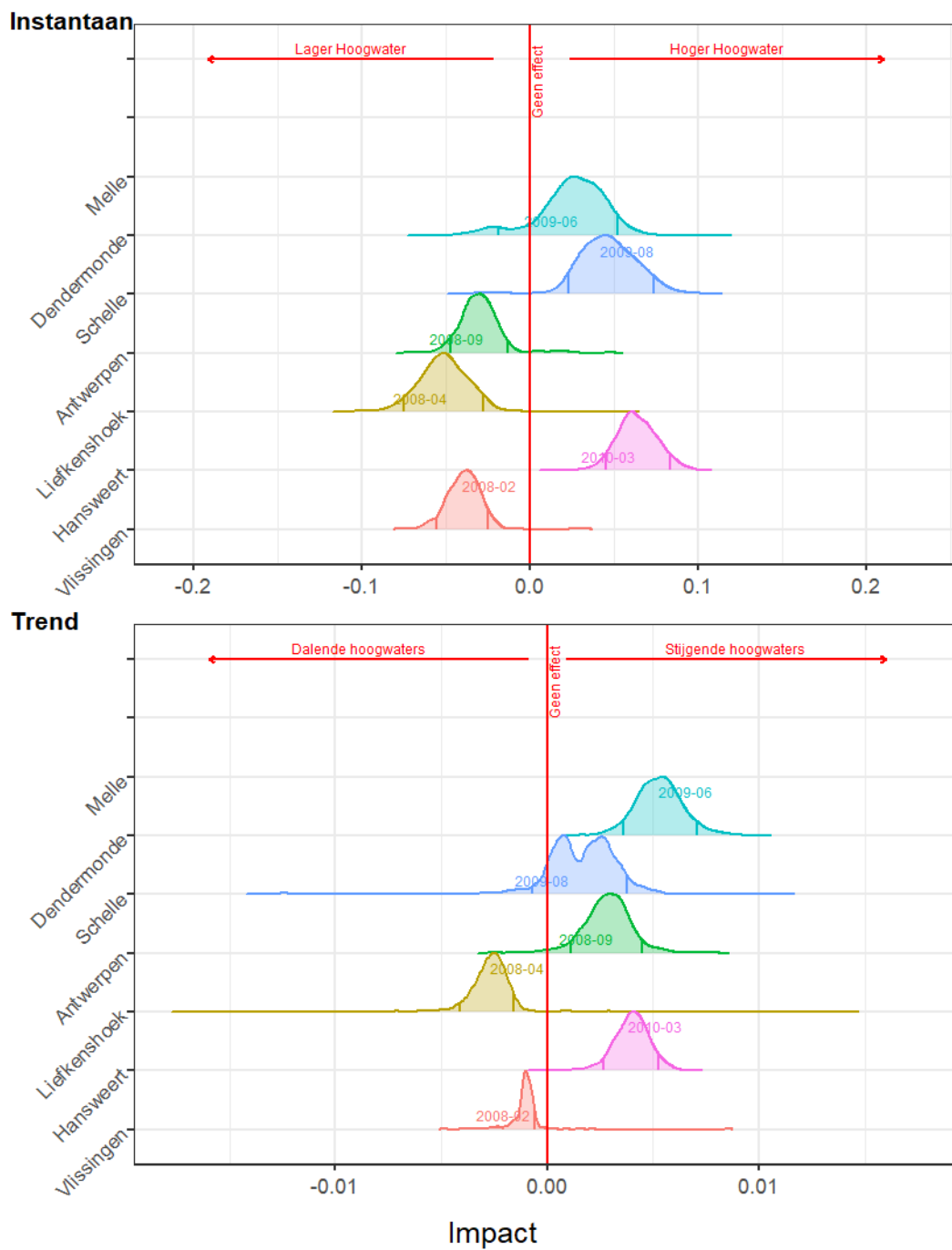
Een uitzondering hierop is de plaatselijk zeer sterke daling in het **LW te Liefkenshoek**, die groter is dan in nabijgelegen posten en zich ook in 2010 manifesteert. Gezien deze meetlocatie zich nabij het centrum van de aanlegbaggerwerken bevond (Drempel van Frederik en Drempel van Lillo), kan dit **mogelijks deels het gevolg zijn van een plaatselijke verdieping**/verruiming van de geul. Bovendien is dit de enige post met een (uiterst) beperkte trendwijziging (daling) in de getijasymmetrie tussen eind 2008 en eind 2010, wat ook op een verdieping van de geul kan wijzen. Merk op deze echter vatbaar is voor discussie.

De meetlocaties in de **Boven-Zeeschelde** vertonen eerder een eigen signaal, onafhankelijk van de 3<sup>de</sup> verruiming. Het waterpeil lijkt hier **sterker beïnvloed door lokale zandwinning en onderhoudsbaggerwerken, dan door de derde verruiming**. Barneveld *et al.* (2018a) leerde ons dat het gebaggerde sediment grotendeels uit het systeem gehaald wordt en zo eerder een zandextractie is, met uitruiming van de geul tot gevolg.

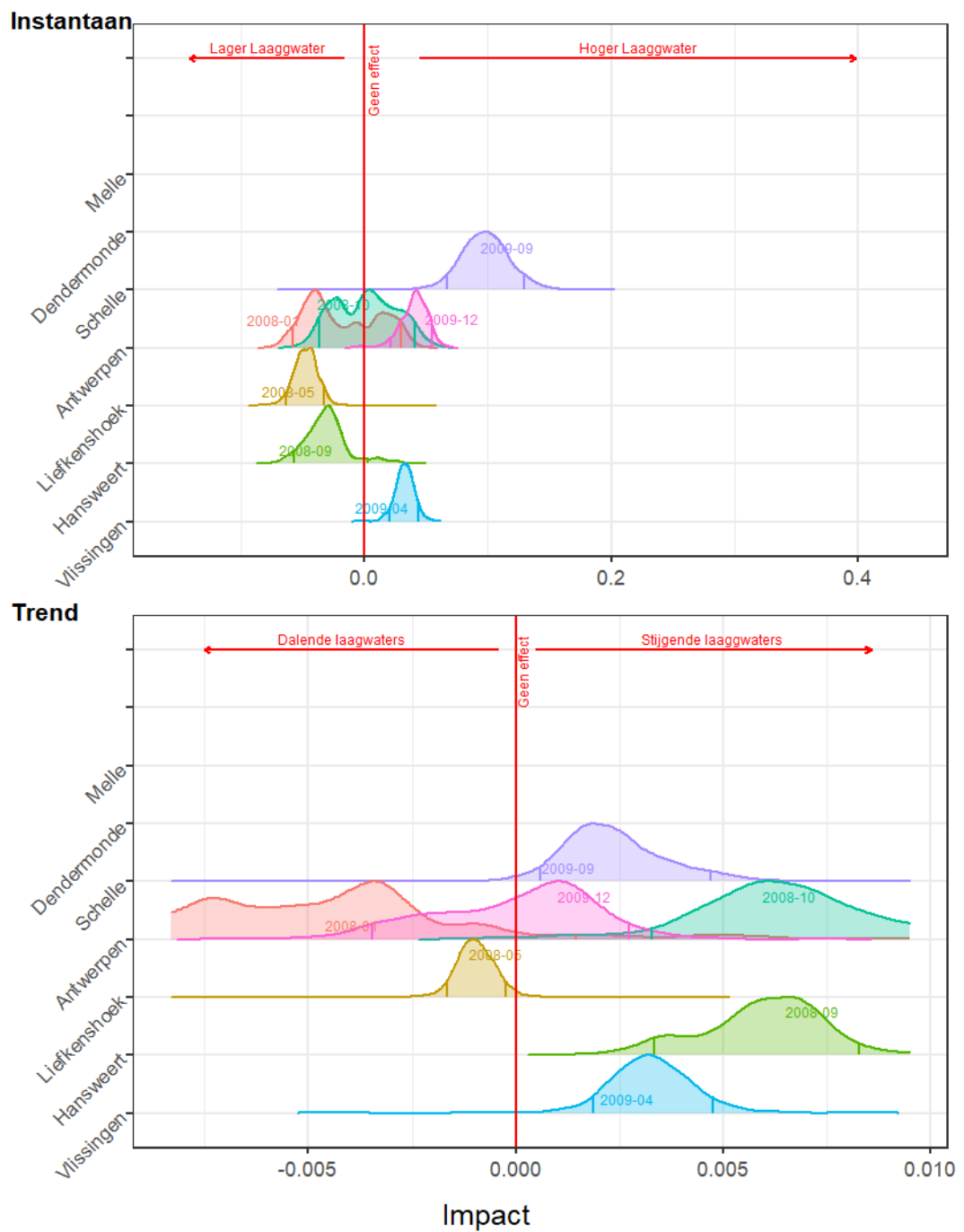
*Tabel 25: De kans op een trendbreuk of -wijziging gelijktijdig met de derde verruiming.*

| Post         | Hoogwater [m] | Laagwater [m] | Getijslag [m] | Stijgduur [s] | Daalduur [s] | Getijasymmetrie [-] |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------------|
| Vlissingen   | 98.2%         | 39.4%         | 0.0%          | 0.0%          | 0.0%         | 0.0%                |
| Hansweert    | 96.8%         | 83.1%         | 80.7%         | 62.0%         | 39.2%        | 54.9%               |
| Liefkenshoek | 88.0%         | 97.1%         | 0.0%          | 77.6%         | 61.8%        | 72.8%               |
| Antwerpen    | 84.1%         | 100.0%        | 76.6%         | 0.0%          | 0.0%         | 0.0%                |
| Schelle      | 47.5%         | 98.1%         | 94.2%         | 0.0%          | 0.0%         | 0.0%                |
| Dendermonde  | 73.1%         | 0.0%          | 42.9%         | 0.0%          | 0.0%         | 0.0%                |
| Melle        | 0.0%          | 0.0%          | 0.0%          | 0.0%          | 0.0%         | 0.0%                |

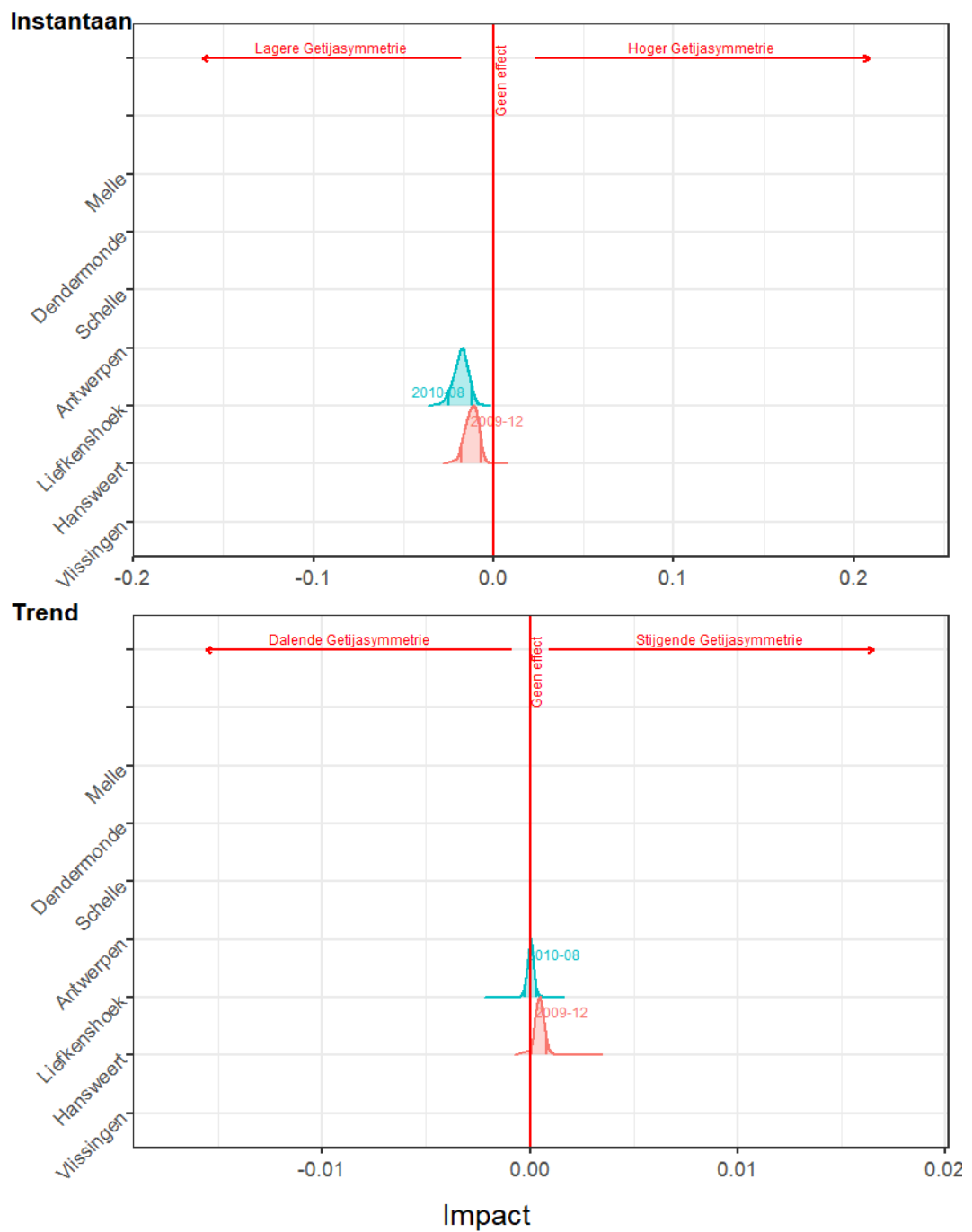




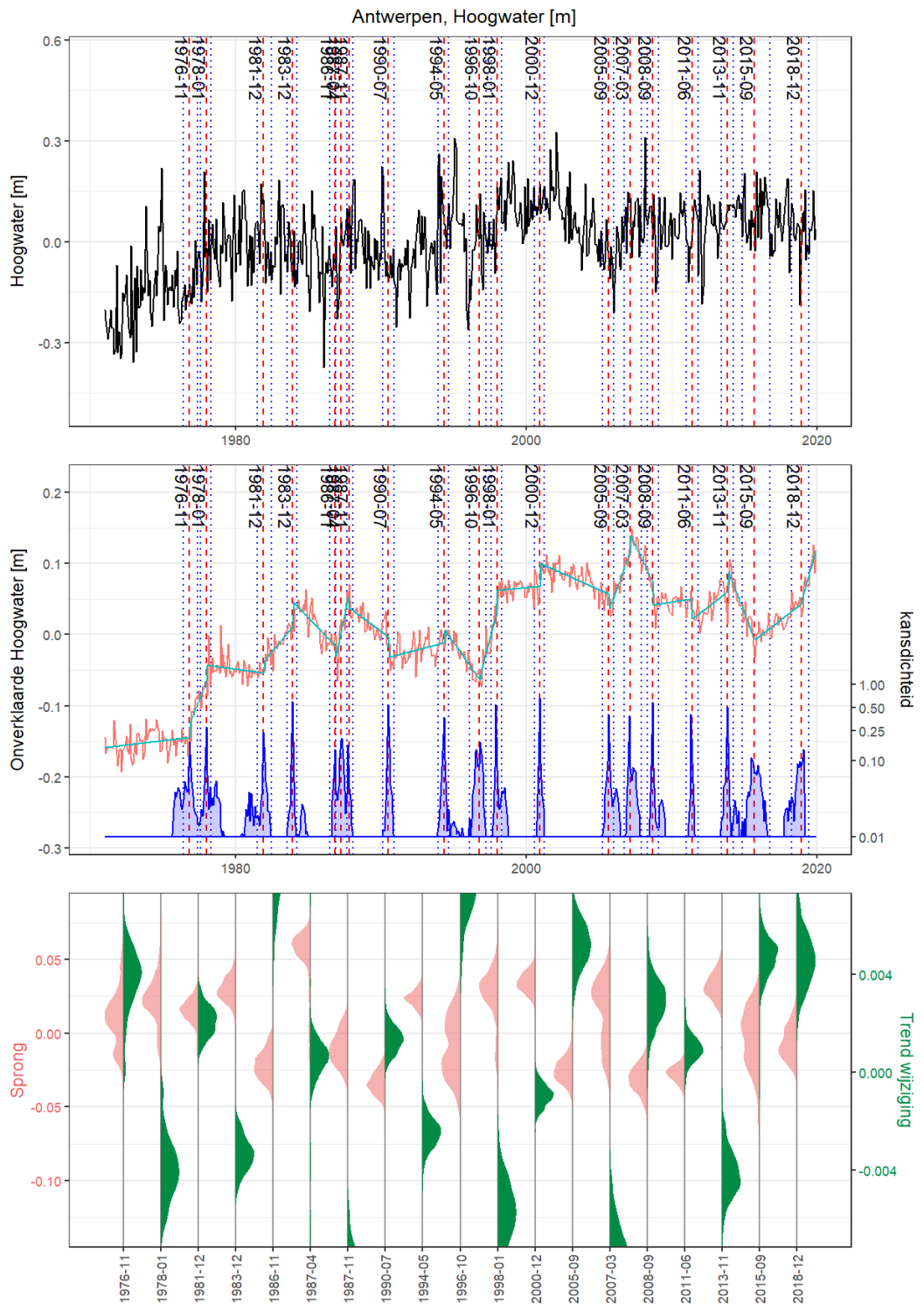
Figuur 84: De effecten van de trendbreuken gelijktijdig met de derde verruiming op hoogwater.



Figuur 85: De effecten van de trendbreuken gelijktijdig met de derde verruiming op de laagwaterstanden.



Figuur 86: De effecten van de trendbreuken gelijktijdig met de derde verruiming op getijasymmetrie.



Figuur 87: De totaal figuur voor Antwerpen, HW.

## 4.7 Besluit Impactstudie

De **algemene trend** vertoont een steeds **diepere getij-indringing** met hogere HW, lagere LW en bijgevolg ook een stijgende getijslag **in de Zeeschelde**. Ook de **getijasymmetrie daalde**. Deze trend manifesteert zich hardnekkiger in stroomopwaartse zin. Nabij Liefkenshoek en Antwerpen lijkt de algemene trend wat gestaagd tot teruggedraaid na ca. 2005 à 2010. De waargenomen veranderingen worden bevestigd door Van Braeckel *et al.* (2012) en Vandenbruwaene *et al.* (2020a; 2020b), die ons leren dat deze **op een verruiming van de geulen en toename van de geuldiepte wijzen**. De beschouwde periode wordt dan ook gekenmerkt door ingrepen die een verruiming en geuldieptetoename bewerkstelligden: aanleg- en onderhoudsbaggerwerk en zandwinning. In de Westerschelde (Vlissingen en Hansweert) stijgen zowel de HW als LW.

Bij het toepassen van de probabilistische impactstudie focusten we ons op de grootste ingrepen, met name: de Eerste, Tweede en Derde Verruiming. Over de individuele verruimingen kunnen we het volgende besluiten:

1. De **Eerste Verruiming** lijkt geen significante impact gehad te hebben op de hydrodynamica nabij de onderzochte posten in de Westerschelde (Vlissingen en Hansweert). In de Zeeschelde lijkt er een sterke link met dalende LW, mogelijk versterkt door inpolderingen en/of afsluiten van zijrivieren. De Eerste Verruiming lijkt weliswaar eerder geen aanzienlijke impact gehad te hebben op het HW in de Zeeschelde; de hierop volgende inpolderingen wel op het HW te Liefkenshoek en Antwerpen.
2. Op basis van ons model en gegeven de data, besluiten we dat de **Tweede Verruiming** geen significante impact gehad heeft op het waargenomen HW, LW of getijasymmetrie. Gezien er in deze periode geen andere ingrepen plaatsvonden die een impact op het volledige estuarium kunnen hebben, schrijven we de waargenomen stijgende HW en LW toe aan een tijdelijke versnelling in de regionale zeespiegelstijging. Deze kon dan ook niet gevat worden door de gefitte trend, getijcycli of andere gefitte meerjarige cycli.
3. Ook de onverklaarbare wijzigingen waargenomen tijdens **de Derde Verruiming** vertonen niet het signaal dat men op basis van Van Braeckel *et al.* (2012) en Vandenbruwaene *et al.* (2020a; 2020b) zou verwachten van een verruiming. We schrijven de daling in zowel HW als LW rond 2008 dan ook toe aan de exogene trend versus de gefitte covariaten: een tijdelijk trager dan verwachte regionale zeespiegelstijging.

Een uitzondering hierop is de plaatselijk zeer sterke daling in het LW te Liefkenshoek, die groter is dan in nabijgelegen posten en zich ook in 2010 manifesteert. Gezien deze meetlocatie zich nabij het centrum van de aanlegbaggerwerken bevond (Drempel van Frederik en Drempel van Lillo), kan dit mogelijks deels het gevolg zijn van een plaatselijke verdieping van de geul. Bovendien is dit de enige post met een (uiterst) beperkte trendwijziging (daling) in de getijasymmetrie tussen eind 2008 en eind 2010, wat ook op een verdieping van de geul kan wijzen. Merk op deze echter vatbaar is voor discussie.

De meetlocaties in de Boven-Zeeschelde vertonen een eigen signaal, onafhankelijk van de 3<sup>de</sup> verruiming. Het waterpeil lijkt hier sterker beïnvloed door lokale zandwinning en onderhoudsbaggerwerken, dan door de derde verruiming. Barneveld *et al.* (2018a) leerde ons dat het gebaggerde sediment grotendeels uit het systeem gehaald wordt en zo eerder een zandextractie is, met uitruiming van de geul tot gevolg.

We kunnen dus besluiten dat – van de 3 verruimingen – **voornamelijk de Eerste Verruiming zijn sporen heeft nagelaten**, weliswaar versterkt door de gelijktijdige en erop volgende inpolderingen. Dit bevestigt de bevindingen van Van Braeckel *et al.* (2012): De effecten van verruiming met terugstorten van baggerspecie wijzen in dezelfde richting als een verruiming zonder terugstorten,

maar zijn veel kleiner. Het (deels) terugstorten van de gebaggerde specie om zo het netto verlies aan sediment in het systeem te reduceren, heeft dus zijn vruchten afgeworpen.

Toch **draagt de historische, hydrodynamische evolutie van het estuarium de stempel van een uitruimend geulensysteem**; zeker in de Boven-Zeeschelde. Men moet dan ook beseffen dat voorliggende impactstudie focust op quasi directe gevolgen van een Verruiming. Het opnemen van morfologische parameters als verklarende variabelen, kan meer inzicht verschaffen over lange termijn evoluties (zie ook §4.5.6).

We willen hier nog eens herhalen dat we steeds de **relatieve waterstand** behandelden. De bodemdaling kan met de huidige beschikbare informatie niet afzonderlijk in rekening gebracht te worden. De verschillende peilschaalcorrecties zijn wel weggewerkt om geen artificiële trendbreuken te veroorzaken.

Deze toepassing onderlijnt nog eens de noodzaak van een menselijke controle en interpretatie via *expert judgement*. De tool bleek wel een handig hulpmiddel. Voor verbetervoorstellen wordt verwezen naar het besluit van de methodologie (§4.5.6).

## 5 Referentielijst

- Baart, F.; Gelder, P.H.A.J.M.; Ronde, J.; van Koningsveld, M. & Wouters, B. (2012).** The Effect of the 18.6-Year Lunar Nodal Cycle on Regional Sea-Level Rise Estimates. *Journal of Coastal Research*. 28. 511-516. 10.2112/JCOASTRES-D-11-00169.1.
- Baart, F.; Rongen, G.; Hijma, M.; Kooi, H.; de Winter, R. & Nicolai, R. (2018).** Zeespiegelmonitor 2018, De stand van zaken rond de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Deltares.
- Barends, Frans; Dillingh, Douwe; Hanssen, Ramon en Onselen, Kyra van (eds), (2008).** Bodemdaling langs de Nederlandse kust, case Hondsbossche en Pettemer zeewering, IOS Press, Amsterdam.
- Barneveld, H.J., Nicolai, R.P., van Veen, M., van Haaster, S., Boudewijn, T.J., de Jong, J.W., van Didderen, K., van de Haterd, R.J.W., Middenveld, P.P., Michielsen, S., van de Moortel, I., Velez, C., de Wilde, E. (2018a).** Analyserapport: T2015-rapportage Schelde-estuarium. Vlaams-Nederlandse Scheldecommissie.
- Barneveld, H.J., Nicolai, R.P., Boudewijn, T.J., de Jong, J.W., van Didderen, K., van de Haterd, R.J.W., Van de Moortel, I., Velez, C. (2018b).** Evaluatierapport: T2015-rapportage Schelde-estuarium. Vlaams-Nederlandse Scheldecommissie.
- Blewitt G., W. C. Hammond, C. Kreemer (2018).** Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science. *Eos*, 99, doi:10.1029/2018EO104623.
- Burgers, E.; Hisgen, R. (g.d.).** Het getij. Geraadpleegd op 17/03/2020 via [www.hoentjen.org/getij/voorspellingsmethode](http://www.hoentjen.org/getij/voorspellingsmethode).
- Breiman, L. and Friedman, J.H. (1985).** "Estimating Optimal Transformations for Multiple Regression and Correlation", *Journal of the American Statistical Association* 80:580–598. doi:10.1080/01621459.1985.10478157
- Coen, L., Peeters, P., Mostaert, F., (2010).** Inventarisatie en historische analyse Zeescheldehabitats: Effect antropogene ingrepen en natuurlijke evoluties op de getijindringing in de Zeeschelde – Ondersteunende numerieke 1D-modellering. WL rapporten. 731\_21. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.
- Codde, R.; De Keyser, L.N. (1954).** Overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken gedurende het tijdperk 1941-1950. [S.n.]: [s.l.]. 76 pp.
- Cornet, E.; Vanlierde, E.; Vereecken, H.; Deschamps, M.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016).** Verwerking en evaluatie van debietijkmetingen: debiet evaluatie systeem. Versie 3.0. WL Rapporten, 12\_077. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. V, 75 pp.
- Crest (2020).** Final Scientific Report. Take home messages and project results. VLIZ Special Publication 85.
- Deltares (2010).** Definitie zeespiegelstijging voor bepaling suppletiebehoefte. Rapportnr. 1201993-002-VEB-0003
- Deng Z., Gendt G., Schöne T. (2015)** Status of the IGS-TIGA Tide Gauge Data Reprocessing at GFZ. In: Rizos C., Willis P. (eds) IAG 150 Years. International Association of Geodesy Symposia, vol 143. Springer, Cham. [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F1345\\_2015\\_156](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F1345_2015_156)
- Depreiter, D., Cleveringa, J., Laan van der, T., Maris, T., Ysebaert, T., Wijnhoven, S. (2014).** T2009-rapportage Schelde-estuarium. 077698096:A – Definitief, C03041.002718.0400. Arcadis, IMDC, Universiteit van Antwerpen, NIOZ en IMARES.

- Dillingh, D.; de Haan, L.; Helmers, R.; Können, GP.; van Malde, J. (1993).** De basispeilen langs de Nederlandse kust, Statistisch Onderzoek. Directoraat – Generaal Rijkswaterstaat, 's Gravenhage.
- Di Marcantonio, M.; De Sutter, R.; Dujardin, A.; D'Haeyer, T.; Heyde, P.; Van de Moortel, I.; Casteleyn, K.; Rommens, W.; Lammerant, J. (2018).** Complex Project Kustvisie- 02 Overzicht van de effecten van de klimaatsverandering aan de Vlaamse kust. Achtergrondrapport Klimaat. Departement Mobiliteit en Openbare Werken. pp. 119.
- Fox, J. ; Monette, G. (1992).** Generalized Collinearity Diagnostics. Journal of the American Statistical Association. Vol. 87. pp. 178-183.
- Hastie, T. J.; Tibshirani, R. J. (1990).** Generalized Additive Models. Chapman & Hall/CRC. ISBN 978-0-412-34390-2.
- Hijma, M. & H. Kooi (2017).** Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens. Tech. Rep. 11200538-008, Deltares. 26, 28
- IMDC nv., Deltares, Svasek, ARCADIS Nederland. (2013a).** Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie: Baggeren en storten. Afdeling Maritieme Toegang. I/RA/11387/12.333/JSN.
- IMDC nv., Deltares, Svasek, ARCADIS Nederland. (2013b).** Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie: Ontwikkeling mesoschaal Zeeschelde (factsheets). Afdeling Maritieme Toegang. I/RA/11387/13.112/GVH.
- Jeuken, C.; Wang, Z.B.; van der Kaaij, T.; Van Helvert, M.; Van Ormondt, M.; Bruinsma, R.; Tanczos, I. (2004).** Morfologische ontwikkelingen in het Schelde estuarium bij voortzetting van het huidige beleid en effecten van een verdere verdieping van de vaargeul en uitpoldering langs de Westerschelde. Deelovereenkomst 2 en 3. Morfologie. Arcadis/Technum/WL | Delft Hydraulics: Delft. 228 pp.
- Maximova, T., Ides, S., Plancke, Y., De Mulder, T., Mostaert, F., (2010a).** Vervolgstudie inventarisatie en historische analyse van slikken en schorren langs de Zeeschelde – Scenario analyse 2D model. Deelrapport 3. WL Rapporten 713\_21. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium.
- Meyvis, L., (1977).** Werken uitgevoerd in de Scheldebedding en haar bijrivieren sinds 1850, tussen Gent en de Belgisch-Nederlandse grens. Deel I. Ministerie van openbare werken. Bestuur der waterwegen. Antwerpse zeediensten.
- Michielsen, S. (2019).** Analyse van de tijdsaanduiding van gedigitaliseerde historische hoog- en laagwaters. Versie 4.0. WM Memo's, 12\_058\_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Michielsen, S.; Hertoghs, R.; Van de Moortel, I.; Coen, L.; Vandenbruwaene, W.; Deschamps, M.; Mostaert, F. (2019).** Het bovenafvoerdebiet te Schelle: Actualisatie en implementatie in WISKI 7. Versie 4.0. WL Rapporten, PA026\_11. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Miles, J., & Shevlin, M. (2001).** Applying regression & correlation: A guide for students and researchers. London: Sage Publications.
- Moritz, S., Sardá, A., Bartz-Beielstein, T., Zaefferer, M., & Stork, J. (2015).** Comparison of different methods for univariate time series imputation in R. arXiv preprint arXiv:1510.03924.
- Muggeo, V & others. (2008).** Segmented: an R package to fit regression models with broken-line relationships. R news, volume 8



- Nationaal Geografisch Instituut (NGI) (2015).** Verbinding van de Belgische maregrafen via GNSS-waarnemingen uitgevoerd van 27 augustus 2015 tot 22 februari 2016. Abdij Ter Kameren, Brussel.
- Nerem, R.S., Beckley, B.D., Fasullo, J.T., Hamlington, B.D., Masters, D., Mitchum, G.T. (2018).** 'Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era', *PNAS*, 115(9), 2022-2025.
- Ozer, J.; Ponsar, S. & Van den Eynde, D. (2019).** Revisiting the trend analysis of relative mean sea level rise at Oostende (southern North Sea – Belgian coast). CREST/X/JO/201906/EN/TR02
- Reudink, R.H.C. en R. Klees (2009).** Vertical control of NAP 2009 – results of the measurement campaign 2009, Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, DEOS/PSG, november 2009.
- Santamaría-Gómez A., M. Gravelle, S. Dangendorf, M. Marcos, G. Spada, G. Wöppelmann (2017).** Uncertainty of the 20th century sea-level rise due to vertical land motion errors. *Earth and Planetary Science Letters*, 473, 24-32.
- Stark, J.; Smolders, S.; Meire, P.; Temmerman, S. (2017).** Impact of intertidal area characteristics on estuarine tidal hydrodynamics: A modelling study for the Scheldt Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 198PA: 138-155. doi:10.1016/j.ecss.2017.09.004
- Stoorvogel, A.A. ; Habets, L.C.G.J.M. (2002).** Rapport tijdreeksanalyse Westerschelde. ICTOO/TU Delft: Eindhoven. 62 + appendices pp.
- Taal, M., Bolle, A., Verheyen, B., Maarse, M., Pieterse, A. (2019).** Kennisvragen Scheldemonding en nabije kusten: Beleid, beheer, kennis kustveiligheid Vlaanderen en Nederland. *Deltares*, 11203725-000.
- Taverniers, E.; Mostaert, F. (2009).** Overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken gedurende het decennium 1991-2000: T.O. tijwaarnemingen Zeescheldebekken 1991-2000. Versie 2.0, heruitg. papieren versie. *WL Rapporten*, 833\_01. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. I, 170 pp.
- Technum, IMDC, Alkyon (2002).** Structureel herstel van de kustverdediging te Oostende en verbetering van de Haventoeegang naar de haven van Oostende. Hydrodynamische randvoorwaarden voor het ontwerp - Waterstanden & golfklimaat
- Tsay R.S., (1998).** Outliers, level shifts, and variance changes in time series. *Journal of forecasting*, volume 7, Wiley Online Library
- Vallis, O., Hochenbaum, J., & Kejariwal, A. (2014).** A novel technique for long-term anomaly detection in the cloud. In 6th {USENIX} workshop on hot topics in cloud computing (HotCloud 14).
- Van Braeckel A., Coen L., Peeters P., Plancke Y., Mikkelsen J. en Van den Bergh E. (2012).** Historische evolutie van Zeescheldehabitats. Kwantitatieve en kwalitatieve analyse van invloedsfactoren. *Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2012 (59)*. Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel i.s.m. het Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.
- Van Camp, M.; de Viron, O.; Scherneck, H.-G.; Hinzen, K.-G.; Williams, S. D. P.; Lecocq, T.; Quinif, Y.; Camelbeeck, T. (2011).** Repeated absolute gravity measurements for monitoring slow intraplate vertical deformation in Western Europe. *Journal of Geophysical Research*, 116, B08402, doi: 10.1029/2010JB008174.

- Van Cauwenberghe, C. (1977).** Overzicht van de tijwaarnemingen langs de Belgische kust – Periode 1941 – 1970 voor Oostende, 1959 – 1970 voor Zeebrugge en Nieuwpoort. Tijdschrift der openbare werken van België. Nr. 4.
- Van Cauwenberghe, C. (1985).** Overzicht van de tijwaarnemingen langs de Belgische kust – Periode 1971 – 1980 voor Nieuwpoort, Oostende en Zeebrugge. Tijdschrift der openbare werken van België. Nr. 5.
- Van Cauwenberghe, C. (1993).** Overzicht van de tijwaarnemingen langs de Belgische kust – Periode 1981 – 1990 voor Nieuwpoort, Oostende en Zeebrugge. Infrastructuur in het leefmilieu. Nr.6/93.
- Van Cauwenberghe, C. (1999).** Relative Sea level rise along the Belgian Coast: Analyses and Conclusions with respect to the high water, the mean sea and the low water levels. Infrastructuur In het Leefmilieu 3/99.
- Vandenbruwaene, W.; Hertoghs, R.; Michiels, S.; Van de Moortel, I.; Vos, G.; Plancke, Y.; Vereecken, H.; Meire, D.; Deschamps, M.; Mostaert, F. (2018).** Monitoring Effecten Ontwikkelingsschets (MONEOS) – Jaarboek monitoring 2017: Deelrapport 7 – Factual data rapportage van monitoring waterbeweging en fysische parameters in de Zeeschelde in 2017. Versie 3.0. WL Rapporten, 12\_070\_7. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Vandenbruwaene, W.; Hertoghs, R.; Meire, D.; Vereecken, H.; Deschamps, M.; Mostaert, F. (2019a).** Optimalisatie monitoring Zeeschelde: Modernisering getijmeetnet en kwaliteitscontrole. Versie 4.0. WL Rapporten, 14\_138\_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Vandenbruwaene, W.; Pauwaert, Z.; Meire, D.; Plancke, Y.; Deschamps, M.; Mostaert, F. (2019b).** Agenda voor de Toekomst - Historische evolutie getij en morfologie Schelde estuarium: Deelrapport 1 – Evolutie van het getij over de periode 1888 – 2017. Versie5.0. WL Rapporten, 14\_147\_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Vandenbruwaene, W.; Beullens, J.; Meire, D.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2020a).** Agenda voor de Toekomst – Schelde-estuarium, Historische evolutie getij en morfologie: Deelrapport 2 – Data-analyse morfologie en getij. Versie 4.0. WLRapporten, 14\_147\_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Vandenbruwaene, W.; Stark J.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2020b).** Agenda voor de Toekomst – Historische evolutie getij en morfologie Schelde estuarium: Deelrapport 5 – Synthese. Versie 4.0. WL Rapporten, 14\_147\_5. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Vanlede, J.; Coen, L.; Deschamps, M. (2014).** Tidal Prediction in the Sea Scheldt (Belgium), Using a Combination of Harmonic Tidal Prediction and 1D Hydraulic Modeling. Natural Resources, 5, 627-633.
- Vanlierde, E.; Cornet, E.; Vereycken, K.; Taverniers, E.; Deschamps, M.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2014).** Methode berekening debieten in de Schelde. Berekening debieten te Schelle, afwaarts Dendermonde en aan de Belgisch-Nederlandse grens. Versie 5.0. WL Rapporten, 12\_077. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.
- van Urk, A.; de Ronde, J.G. (g.d.).** Getijtafels voor Nederland vanaf 1980. Serie 37, 48 pp.
- Vautard, R.; Cattiaux, J.; Yiou, P.; Thépaut, J.-N.; Ciais, P. (2010).** Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness. Nature Geoscience 3, 11, 756–761.
- Vekemans, R. (1946).** Tienjarig overzicht 1931-1940 der tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken. Tijds. Openb. Werken Belg. = Ann. Trav. Publics Belg. augustus: [1-62] + 12 plates

- Vereycken, K; Vanlierde E.; Taverniers, E.; Deschamps, M.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2015).** Over referentievlakken en peilschaalopmetingen in het Zeescheldebekken. Versie 3.0. WL Rapporten, 12\_058. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.
- Vink, A.; Steffen, H.; Reinhardt, L.; Kaufmann, G. (2007).** Holocene relative sea-level change, isostatic subsidence and the radial viscosity structure of the mantle of northwest Europe (Belgium, the Netherlands, Germany...). *Quaternary Science Reviews*, volume 26, issues 25-28, 3249 – 3275, doi:10.1016/j.quascirev.2007.07.014.
- Vlaamse Hydrografie (2011).** Overzicht van de tijwaarnemingen langs de Belgische kust – Periode 2001 – 2010 voor Nieuwpoort, Oostende en Zeebrugge. Vlaamse Hydrografie, Agentschap Maritieme Dienstverlening en Kust. Oostende.
- Wang, Z.B.; Vandenbruwaene, W.; Taal, M.; Winterwerp, H. (2019).** Amplification and deformation of tidal wave in the Upper Scheldt Estuary. *Ocean Dynamics*. doi.org/10.1007/s10236-019-01281-3.

## 6 Bijlagen

Bijlage 1: Inventaris Menselijke Ingrepen

Bijlage 2: Lineaire Regressie Windeffecten

Bijlage 3: Figuren Impactstudie

## Bijlage 1 Inventarisatie Menselijke Ingrepen

| Locatie       | Naam                                    | Start     | Eind       | Beschrijving  |
|---------------|---|-----------|------------|---|
| Westerschelde | Zandwinning                             | 1956      | 2014       | Algemene zandwinning door de overheid en commerciële sector in de Westerschelde. Na 2014 nog zandwinning in het oosten (Schaar van de Waarde) en compensatie met Noordzeezand in het westen (westpunt Suikerplaat)  |
| Westerschelde | Inpoldering Schelde Rijn (1970 - 1972)  | 1/01/1970 | 31/12/1972 | Inpolderingen ten gevolge van het tot stand brengen van het Schelde – Rijn kanaal.  |
| Westerschelde | Eerste verruiming (1973 - 1976)         | 1/01/1973 | 31/12/1976 | De vaargeul werd verdiept en verbreedt om de doortocht van de scheepvaart te verzekeren. De eerste baggerwerken startten in Bath met het verdiepen van de drempel (van der Weck, 2007). In totaal werd voor de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde een volume van respectievelijk 57,5 Mm <sup>3</sup> en 14Mm <sup>3</sup> gebaggerd. De baggerspecie van de Beneden – Zeeschelde werd volledig geborgen op land, terwijl deze van de Westerschelde ook gedeeltelijk werd teruggestort in het estuarium (Van Braeckel <i>et al.</i> , 2012). |
| Westerschelde | Inpoldering Ossendrecht (1976)          | 1/01/1976 | 31/12/1976 | Ingepolderd gebied van 782 ha. Delen van het gebied overstromden tijdens stormvloeden. Momenteel is het vooral gekend vanwege het natuurgebied “Noordpolder Ossendrecht”.   |
| Westerschelde | Inpoldering Mosselbanken (1976)         | 1/01/1976 | 31/12/1976 | Inpoldering van 133 ha ten behoeve van de industrie. (Volgens Vroon et al. (1996) gaat het hier om 148 ha.)   |
| Westerschelde | Verlegging Hoofdvaargeul (1977)         | 1/01/1977 | 31/12/1977 | Verlegging van de hoofdvaargeul naar de vloedgeul Gat van Ossenissee – Overloop Hansweert.  |
| Westerschelde | Ingebruikname Oosterscheldekering       | 1986      | 1986       | Ingebruikname Oosterscheldekering   |
| Westerschelde | Verbreiding kanaal Zuid Beveland (1987) | 1987      | 1987       | Verbreiding van het bestaande kanaal (geopend in 1866).   |

| Locatie       | Naam  | Start     | Eind       | Beschrijving  |
|---------------|---|-----------|------------|---|
| Westerschelde | Opening spuikanaal/spuisluis Bath (1986 - 1987)         | 1986      | 1987       | Constructie van spuisluis en kanaal voor de afvoer van overtollig zoetwater van het Volkerak, Zoommeer en Markiezaatsmeer. Capaciteit van 100 m <sup>3</sup> /s.  |
| Westerschelde | Natuurlijke ontpoldering Selenapolder (1990)            | 1990      | 1990       | Natuurlijke ontpoldering vanwege de definitieve natuurlijke doorbraak van de zomerdijk op 26/02/1990.   |
| Westerschelde | Reconstructie Zeedijk (1990)                            | 1990      | 1990       | Reconstructie van de zeedijk door teruglegging en de aanleg van een hoge berm met 'schor' en broedeiland ter hoogte van de Hooge Platen (natuurherstel en -ontwikkeling).   |
| Westerschelde | Tweede verruiming (1997 - 1998)                         | 1/01/1997 | 31/12/1998 | De tweede verruiming gebeurde in de jaren 1997 en 1998 met de bedoeling een getij – onafhankelijke scheepvaart toe te laten tot 11,6 m diepte. De baggerspecie van o.a. de onderhoudsbaggerwerken voor het op diepte houden van de vaargeul, werden teruggestort volgens de Oost-West strategie |
| Westerschelde | Aanleg Westerscheldetunnel (1999 - 2002)                | 1999      | 2002       | Aanleg van de Westerscheldetunnel.  |
| Westerschelde | Aanleg Strekdammen Valkenisse (2003)                    | 2003      | 2003       | Twee strekdammen die werden aangelegd als fysieke bescherming voor het verdrinken dorp Valkenisse (komt hierdoor onder een sliblaag te liggen waardoor verdere blootstelling vermeden wordt). Het verdrinken Valkenisse is een beschermd historisch rijksmonument.                              |
| Westerschelde | Proefplaatstortingen Plaat van Walsoorden (2004 - 2006) | 2004      | 2006       | Sediment stortingen op de Plaat van Walsoorden als proef om na te gaan hoe het sediment zich gedraagt en de gestorte volumes zich verdelen.   |
| Westerschelde | Margarethapolder natuurontwikkeling (2006 - 2010)       | 2006      | 2010       | Natuurontwikkelingsproject  |

| Locatie       | Naam  | Start      | Eind       | Beschrijving  |
|---------------|---|------------|------------|---|
| Westerschelde | Derde verruiming  | 1/01/2010  | 31/12/2011 | De derde verruiming, 2008 – 2011, had als doel het verdiepen van de ondiepe delen in de Westerschelde en Beneden – Zeeschelde om een getij – onafhankelijke doorvaart tot 13,1 m te verzekeren. De verdiepingen vonden plaats tot 500 m stroomopwaarts van het Deurganckdok (Van Braeckel <i>et al.</i> , 2012). In 2011 startte men met de hierop volgende onderhoudsbaggerwerken. De verdieping duurde in de Westerschelde van 2010 tot in 2011, waarbij men 95% van het sediment in 2010 bovenhaalde. (Barneveld <i>et al.</i> , 2018a). |
| Westerschelde | Flexibel storten op plaatranden, hoofdgeul en nevengeulen | 2010       | 2020       | Ontwikkeling en introductie van het gebruik van verschillende stortstrategieën in de tijd, op microschaal, om eventuele effecten van de strategieën af te wisselen en hun impact te beperken. De strategie van het storten van baggerspecie wordt hierbij bijgestuurd volgens de voortschrijdend inzichten en de monitoring van de effecten.  |
| Westerschelde | Inwerkingtreding GGG Waterdunen (2010 - 2020)             | 27/09/2019 | 27/09/2019 | Ontwikkeling van een natuur- en recreatiegebied (350 ha) + kustversterking in West – Zeeuws Vlaanderen, tussen Breskens en Groede.  |
| Westerschelde | Ontwikkeling Perkpolder (2015)                            | 25/06/2015 | 25/06/2015 | Gebiedsontwikkeling in Oost – Zeeuws Vlaanderen. Ontwikkeling van recreatiegebied en woonzones.   |
| Westerschelde | Aanleg strekdammen Baalhoek (2016)                        | 2016       | 2016       | Aanleg van twee strekdammen ten behoeve van de ontwikkeling van getijdennatuur.   |
| Westerschelde | Aanleg buitendijkse maatregelen                           | 2016       | 2020       | Aanleg en ontwikkeling van buitendijkse schorren, laagdynamisch slib en creatie GGG gebieden (op ontpolderde gebieden). Algemeen natuurherstel in de Westerschelde.   |

| Locatie       | Naam                              | Start     | Eind       | Beschrijving   |
|---------------|-----------------------------------|-----------|------------|--|
| Westerschelde | Inpoldering Braakman (1952)       | 1/01/1952 | 31/12/1952 | De Braakmanpolder is gelegen ter hoogte van Terneuzen en heeft een oppervlakte van 1525 ha. De polder werd toen vooral gebruikt als landbouwzone, natuurgebied en recreatiegebied. De dijk van de polder beschermde het achterland tegen de Watersnood van 1953. |
| Westerschelde | Inpoldering Selenapolder (1966)   | 1/01/1966 | 31/12/1966 | Kleine polder (in de buurt van de Hertogin Hedwigepolder) ontstaan bij de aanleg van de Gasdam en de zomerkade. Op 26/02/1990 was er een doorbraak van de zomerkade, deze werd niet meer opnieuw gedicht.  |
| Westerschelde | Inpoldering Zuid Sloe (1965)      | 1/01/1965 | 31/12/1965 | Zuid Sloe was deel van het voormalig vaarwater tussen Walcheren en Zuid- Beveland. Er werden 2 polders gecreëerd: Quarlespolder en Nieuwe polder. De inpolderingen bij de gebieden Sloe en Kalloot waren goed voor een gebied van 434 ha.                        |
| Westerschelde | Inpoldering Knuitershoek (1962)   | 1/01/1962 | 1/01/1962  | Ingepolderd gebied van 22 ha, gelegen nabij Ossensisse.  |
| Westerschelde | Inpoldering Schor zuidgors (1960) | 1/01/1960 | 1/01/1960  | Gebied nabij Ellewoutsdijk, Nederland. Momenteel een van de enige buitendijkse slik en schorgebieden langs de Westerschelde.   |
| Westerschelde | Inpoldering Schorren Bath (1960)  | 1/01/1960 | 1/01/1960  | Ingepolderd gebied (3 ha) t.h.v. Bath, iets ten noorden van de Belgisch – Nederlandse grens.   |
| Westerschelde | Inpoldering Quarlespolder (1949)  | 1/01/1949 | 1/01/1949  | Polder ingedijkt in 1949, maakte deel uit van het Zuid-Sloe (vaarwater tussen het Veerse gat en Honte) gelegen te Zeeland.   |
| Westerschelde | Baggerwerken                      | 1923      | 2020       | Algemene onderhoudsbaggerwerken op verschillende locaties in de Westerschelde.   |



| Locatie            | Naam                                    | Start     | Eind       | Beschrijving   |
|--------------------|---|-----------|------------|--|
| Beneden-Zeeschelde | Bouw Zandvlietsluis (1961 - 1967)       | 1961      | 1967       | De bouw van de sluis (In het Noordelijkste deel van de haven van Antwerpen) was urgent vanwege het toenemende scheepvaartverkeer en de stijgende wachttijden aan de Kruisschans. De sluis is 500 m lang, 57 m breed en heeft een diepte van 13,6 m TAW. De bouw van de Zandvlietsluis zorgde voor een opdeling tussen het Groot Buitenschoor en Galgenschoor.  |
| Beneden-Zeeschelde | Ophoging schor Ballooi (1968 - 1975)    | 1/01/1968 | 31/12/1975 | Dit schor werd in de periode 1968 – 1975 opgehoogd met huishoudelijk afval. Het is gelegen tussen Temse en Steendorp op de Linker – Schelde oever. Het nabijgelegen Schouselbroek is momenteel een natuurreservaat.  |
| Beneden-Zeeschelde | Bouw lei- en strekdam Ouden Doel (1970) | 1970      | 1970       | De aanleg van deze lei en strekdammen hadden tot doel het uitschuringseffect in de vaargeul te vergroten, waardoor er op natuurlijke wijze een grotere diepte bekomen en behouden werd.  |
| Beneden-Zeeschelde | Eerste verruiming (1973 - 1976)         | 1/01/1973 | 31/12/1976 | Eind de jaren zestig van de vorige eeuw vond de eerste verruiming van de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde plaats. De vaargeul werd verdiept en verbreedt om de doortocht van de scheepvaart te verzekeren. De eerste baggerwerken startten in Bath met het verdiepen van de drempel (van der Weck, 2007). In totaal werd voor de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde een volume van respectievelijk 57,5 Mm <sup>3</sup> en 14Mm <sup>3</sup> gebaggerd. De baggerspecie van de Beneden – Zeeschelde werd volledig geborgen op land, terwijl deze van de Westerschelde ook gedeeltelijk werd teruggestort in het estuarium (Van Braeckel et al., 2012). |

| Locatie            | Naam                                     | Start     | Eind       | Beschrijving  |
|--------------------|--|-----------|------------|---|
| Beneden-Zeeschelde | Opspuiten Paardenschor (1970 - 1989)     | 1970      | 1989       | opspuiten voor aanleg kerncentrale t.h.v. Schor Ouden Doel  |
| Beneden-Zeeschelde | Bouw Kallosluis (1979)                   | 1979      | 1979       | De sluis geeft toegang tot het Waaslandkanaal en de dokken gelegen op de linkeroever van de Schelde. De sluis is 360 m lang en 50 m breed.  |
| Beneden-Zeeschelde | Inpoldering Galgenschoor (1975)          | 1/01/1975 | 31/12/1975 | Inpoldering van een gebied van 22,5 ha op de rechter schelde-oever, gescheiden van het Groot Buitenschoor door de Zandvlietsluis. De gebieden functioneren nu als natuurgebied met getijdenwerking (ontpolderd).  |
| Beneden-Zeeschelde | Verbinding Zeekanaal met Schelde (1979)  | 1979      | 1979       | De verbinding werd tot stand gebracht door het doortrekken van het Zeekanaal (Brussel – Schelde) naar de Zeeschelde via de oude sluis van Wintam.   |
| Beneden-Zeeschelde | Bouw Berendrechtsluis (1980 - 1989)      | 1980      | 1989       | Gebouwd ten gevolge van de toenemende en veranderende scheepvaart, waarbij een capaciteitsverhoging noodzakelijk was. De sluis is 500 m lang, 68 m breed, heeft een diepte van 13,5 NKD en is gelegen in het noordelijkste deel van de haven van Antwerpen. |
| Beneden-Zeeschelde | Extra Zandwinning Liefkenshoek (1989)    | 1989      | 1989       | Zandwinning vanwege de bouw van de Liefkenshoektunnel.  |
| Beneden-Zeeschelde | Europa terminal (1989 - 1990)            | 1989      | 1990       | Aanleg van de eerste getijde containerterminal in de haven van Antwerpen. Kaailengte van 1180 m.  |
| Beneden-Zeeschelde | Inpoldering schorren Blokkersdijk (1990) | 1/01/1990 | 31/12/1990 | Blokkersdijk is een natuurgebied gelegen op de Linker – Schelde oever nabij het Sint – Annabos. Blokkersdijk vormde de scheiding tussen de vroegere Melselepolder en de Borgerweertpolder.  |

| Locatie            | Naam                                     | Start     | Eind       | Beschrijving  |
|--------------------|--|-----------|------------|---|
| Beneden-Zeeschelde | Opening nieuwe zeesluis (1997)           | 1997      | 1997       | Om de capaciteit te vergroten en de doorvaart te verzekeren werd de monding van het Zeekanaal met de Zeeschelde verlegd, de verbinding werd gelegd via de nieuwe zeesluis van Wintam  |
| Beneden-Zeeschelde | Tweede verruiming (1997 - 1998)          | 1/01/1997 | 31/12/1998 | De tweede verruiming gebeurde in de jaren 1997 en 1998 met de bedoeling een getij – onafhankelijke scheepvaart toe te laten tot 11,6 m diepte. De baggerspecie van o.a. de onderhoudsbaggerwerken voor het op diepte houden van de vaargeul, werden teruggestort volgens de Oost-West strategie |
| Beneden-Zeeschelde | Noordzeeterminal (1994 - 1997)           | 1/01/1994 | 31/12/1997 | Tweede getijde containerterminal in de haven van Antwerpen. Deze terminal kan de grootste schepen ter wereld ontvangen. Kaailengte van 1225 m.  |
| Beneden-Zeeschelde | Aanleg Deurganckdok (1999 - 2005)        | 1999      | 2005       | Groot dok gelegen op de Linker – Scheldeoever dat onderhevig is aan de getijdenwerking.   |
| Beneden-Zeeschelde | Ontpoldering Ketenisse (2001 - 2003)     | 2001      | 2003       | Ketenisse was een verhoogde polder die in 2001 – 2003 werd afgegraven tot op niveau onder hoogwater. Het is nu een natuurontwikkelingsgebied.   |
| Beneden-Zeeschelde | Ontpoldering paardenschor (2003 - 2004)  | 2003      | 2004       | Deze polder was een ongebruikt deel van opgespoten gebied ten behoeve van de kerncentrale van Doel in de jaren '80. De ontpoldering van 14 ha van dit gebied gebeurde als compensatie van schorverlies bij de aanleg van Deurganckdok.  |
| Beneden-Zeeschelde | Verdieping drempels van Zandvliet (2005) | 1/01/2005 | 31/12/2005 | Verdiepingen uitgevoerd ten behoeve van de scheepvaart.   |

| Locatie            | Naam                                | Start     | Eind       | Beschrijving  |
|--------------------|-------------------------------------|-----------|------------|---|
| Beneden-Zeeschelde | Derde verruiming                    | 1/01/2008 | 31/12/2010 | De derde verruiming, 2008 – 2011, had als doel het verdiepen van de ondiepe delen in de Westerschelde en Beneden – Zeeschelde om een getij – onafhankelijke doorvaart tot 13,1 m te verzekeren. De verdiepingen vonden plaats tot 500 m stroomopwaarts van het Deurganckdok (Van Braeckel et al., 2012). In 2011 startte men met de hierop volgende onderhoudsbaggerwerken. De verdieping duurde in de Westerschelde van 2010 tot in 2011, waarbij men 95% van het sediment in 2010 bovenhaalde. (Barneveld et al., 2018a). |
| Beneden-Zeeschelde | Bouw CDW (2009 - 2011)              | 2009      | 2011       | De bouw van de current deflecting wall heeft tot doel de aanslibbing in het Deurganckdok te beperken.   |
| Beneden-Zeeschelde | Aantakking Burchtse weel (2011)     | 2011      | 2011       | De Burchtse weel was ooit een recreatievijver, de plas werd gevormd door een eerdere dijkdoorbraak. Naast de recreatievijver werd een dok aangelegd voor de fabricage van onderdelen van de Kennedytunnel. Het dok en de vijver werden omgevormd tot een slikken en schorren gebied.  |
| Beneden-Zeeschelde | Bouw Kieldrechtsluis (2011 - 2016)  | 2011      | 2016       | De Kieldrechtsluis is gelegen op de Linker – Schelde oever en heeft een lengte en breedte van respectievelijk 500m en 68m. Het is de grootste zeesluis ter wereld.  |
| Beneden-Zeeschelde | Ontpoldering potpolder Lillo (2012) | 2012      | 2012       | Deze polder, stroomafwaarts gelegen van het Fort van Lillo, werd omgevormd tot getijdennatuur. Het gaat om een gebied van 10 ha.  |
| Beneden-Zeeschelde | GOG-GGG Kruibekke - DEEL GOG (2015) | 1/01/2015 | 1/01/2015  | Ontwikkeling en ingebruikname van een gecontroleerd overstromingsgebied met gereduceerd getij op de Linker – Schelde oever. Het gebied heeft een oppervlakte van 600 ha.  |

| Locatie            | Naam  | Start      | Eind       | Beschrijving   |
|--------------------|---|------------|------------|--|
| Beneden-Zeeschelde | Dijkverlegging Fort-Filip (2015)                          | 2015       | 2015       | Infrastructuurwerken in het kader van de sanering en herinrichting van de vervuilde site Fort Sint – Filips.   |
| Beneden-Zeeschelde | GOG-GGG Kruikeke - DEEL GGG (2017)                        | 24/06/2017 | 24/06/2017 | Ontwikkeling en ingebruikname van een gecontroleerd overstromingsgebied met gereduceerd getij op de Linker – Schelde oever. Het gebied heeft een oppervlakte van 600 ha.               |
| Beneden-Zeeschelde | Op diepte baggeren Deurganckdok                           | 1/01/2010  | 31/12/2010 | Op diepte baggeren Deurganckdok  |
| Beneden-Zeeschelde | Verdieping drempel Zandvliet (1990)                       | 1/01/1990  | 31/12/1990 | Verdiepingen uitgevoerd ten behoeve van de scheepvaart.  |
| Boven-Zeeschelde   | Aanleg Ringvaart Gent (1948 - 1969)                       | 1/01/1948  | 31/12/1969 | De aanleg van de Ringvaart kwam er om Gent te vrijwaren van frequente overstromingen en de bevaarbaarheid in het Gentse te verhogen.   |
| Boven-Zeeschelde   | Sluiting schutsluis Gent (1969)                           | 1/01/1969  | 31/12/1969 | Sluiting van de schutsluis te Gentbrugge na opening van de Ringvaart rond Gent.  |
| Boven-Zeeschelde   | Bouw stuw Evergem (1969)                                  | 1/01/1969  | 31/12/1969 | Bouw van het sluiscomplex te Evergem voor het versassen van schepen tussen o.a. de Haven van Gent en de Ringvaart.   |
| Boven-Zeeschelde   | Dam op de Durme (1973)                                    | 1/01/1973  | 31/12/1973 | In 1973 werd de dam op de Durme (nabij Lokeren) geplaatst om de getijgolf tegen te houden en zo de stroomopwaarts gelegen zones te vrijwaren van overstromingen.                       |
| Boven-Zeeschelde   | Afsluiting de Vliet (1976 - 1977)                         | 1/01/1976  | 31/12/1977 | De Vliet is een zijrivier van de Rupel, deze werd volledig afgesloten aan de monding in de Rupel in 1976 na de grote overstromingsramp. De Vliet is bijgevolg tijloos gebied geworden. |
| Boven-Zeeschelde   | Verdieping dwarsprofielen Dendermonde - Gentbrugge (1980) | 1/01/1980  | 31/12/1980 | Algemene verdieping dwarsprofielen Dendermonde – Gentbrugge.   |

| Locatie          | Naam                                | Start      | Eind       | Beschrijving  |
|------------------|-------------------------------------|------------|------------|---|
| Boven-Zeeschelde | Aanleg Tielrodebroek (1982)         | 1982       | 1982       | GOG gebied gelegen op de linker Schelde oever, ter hoogte van de Durmemonding. Het werd voor het eerst in gebruik genomen eind 1982. Het is een gebied van 96 ha. |
| Boven-Zeeschelde | Aanleg Paardeweide (1986)           | 1986       | 1986       | De Paardeweide is een GOG gebied van 85 ha bij de gemeenten Berlare en Wichelen op de linkeroever van de Schelde. Het trad voor het eerst in werking in 1986.     |
| Boven-Zeeschelde | Aanleg Bergenmeersen (1989)         | 1989       | 1989       | Het GOG gebied Bergenmeersen (42 ha) werd in gebruik genomen eind 1989. Het is gelegen in Wichelen op de rechter Schelde oever.                                   |
| Boven-Zeeschelde | GOG-GGG Lippenbroek (2006)          | 1/01/2006  | 31/12/2006 | Lippenbroek was het pilootproject voor het testen van de werking van een GOG – GGG gebied. Het gebied is 10 ha en gelegen bij de gemeenten Hamme en Driegoten.    |
| Boven-Zeeschelde | Ontpoldering Heusden (2006)         | 2006       | 2006       | De ontpoldering van Heusden heeft de ontwikkeling van getijdennatuur tot gevolg. Sinds de ontpoldering nam het slik en schor areaal toe met 11,3 ha.              |
| Boven-Zeeschelde | Uitwateringssluizen Wetteren (2011) | 2011       | 2011       | Aanleg van uitwateringssluizen voor het laten terugvloeien van water naar de Schelde vanuit het gebied Scheldemeander Gent – Wetteren.                            |
| Boven-Zeeschelde | GOG-GGG Bergenmeersen (2013)        | 25/04/2013 | 25/04/2013 | Het GOG gebied kent vanaf 2013 ook een gecontroleerd gereduceerd tij (GGG).   |
| Boven-Zeeschelde | GOG Paardeweide (2014)              | 2014       | 2014       | De Paardeweide werd ingericht als natuurgebied met getijdennatuur (GGG).  |
| Boven-Zeeschelde | Uitwateringssluizen Wijmeers (2014) | 2014       | 2014       | De aanleg van de uitwateringssluizen in het Wijmeers gebied, die het overtollige water terug naar de Schelde laten vloeien, is afgerond.                          |
| Boven-Zeeschelde | Ontpoldering Wijmeers 2 (2015)      | 2015       | 2015       | Het ontpolderde gebied heeft een oppervlakte van 28 ha en sluit aan bij Wijmeers 1.   |

| Locatie          | Naam                         | Start | Eind | Beschrijving  |
|------------------|------------------------------|-------|------|---|
| Boven-Zeeschelde | GOG Wijmeers 1 (2016)        | 2016  | 2016 | Het gebied van 159 ha ligt in Berlare, stroomopwaarts van het GOG-GGG Bergenmeersen. Het gebied treedt pas in werking nadat eerst Bergenmeersen en de Paardeweide zijn ondergelopen. Wijmeers 1 zou naar schatting maar 1 keer op de 50 jaar overstromen. |
| Boven-Zeeschelde | Algemene rechttrekkingen     | 1878  | 1903 | Diverse rechttrekkingen langsheen het Schelde traject. Tijdens deze rechttrekkingen werd het riviertraject verschillende keren ingekort. Scherpe en onregelmatige bochten werden rechtgetrokken om de bevaarbaarheid te verhogen en/of land te winnen.    |
| Boven-Zeeschelde | Verruiming en verdieping     | 1960  | 2001 | Verruiming en verdieping.   |
| Boven-Zeeschelde | Uitwateringssluizen te Melle | 2010  | 2011 | Maakt deel uit van het project Scheldemeander Gent – Wetteren. Werden aangelegd tegelijk met de dijkwerken.   |

## Bijlage 2 Lineaire Regressie Windeffecten

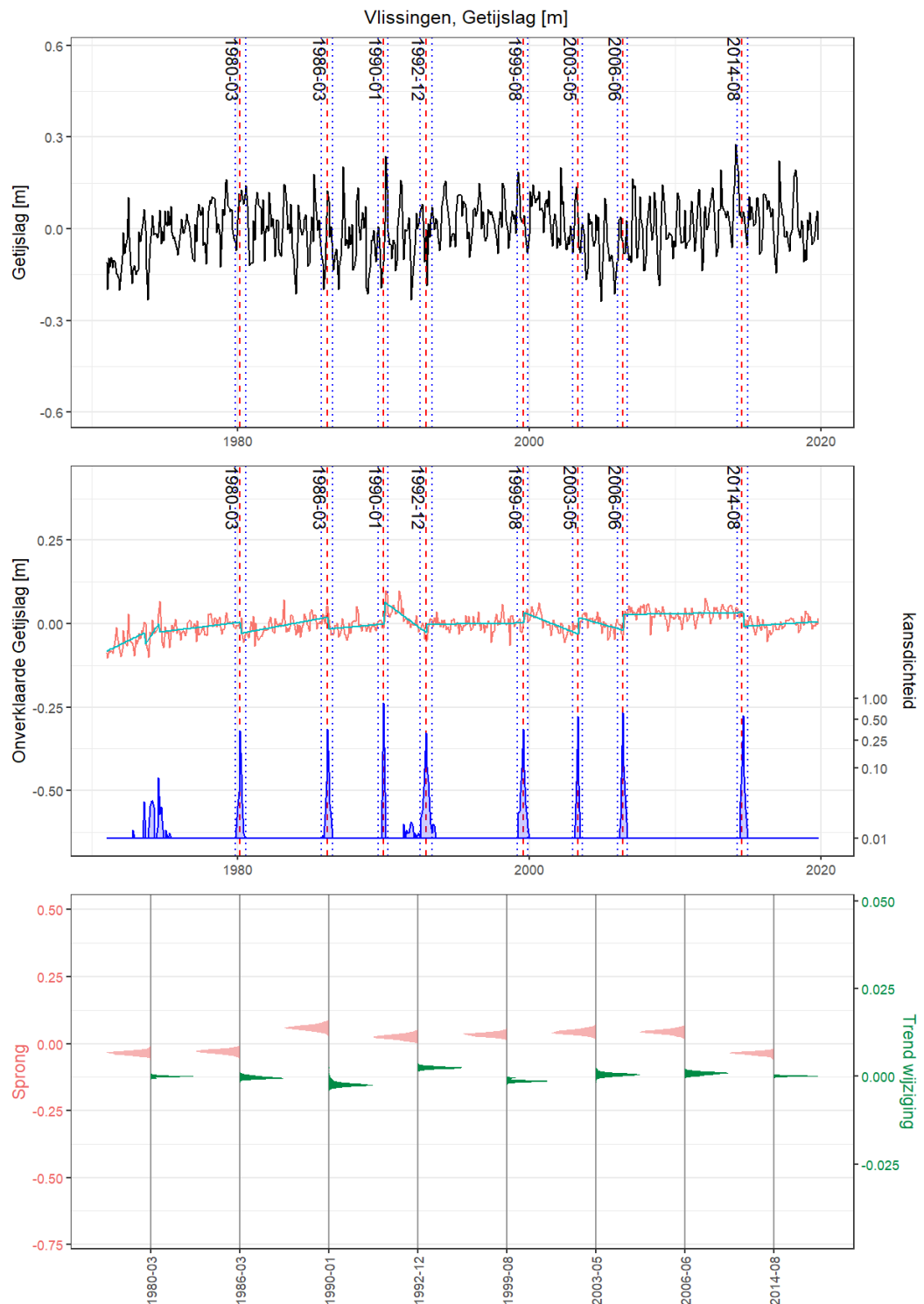
Tabel 26: Tabel met de beschouwde variabele, de ingeschatte coëfficiënt, de standard fout, t-waarde, en bijhorende p-waarde. Verdere diagnostieken: Residual standard error: 0.398 op 54011 vrijheidsgraden (3992 observaties verwijderd) Multiple R-squared: 0.0586, Adjusted R-squared: 0.05852 F-statistic: 672.5 op 5 en 54011 DF, p-value: < 2.2e-16

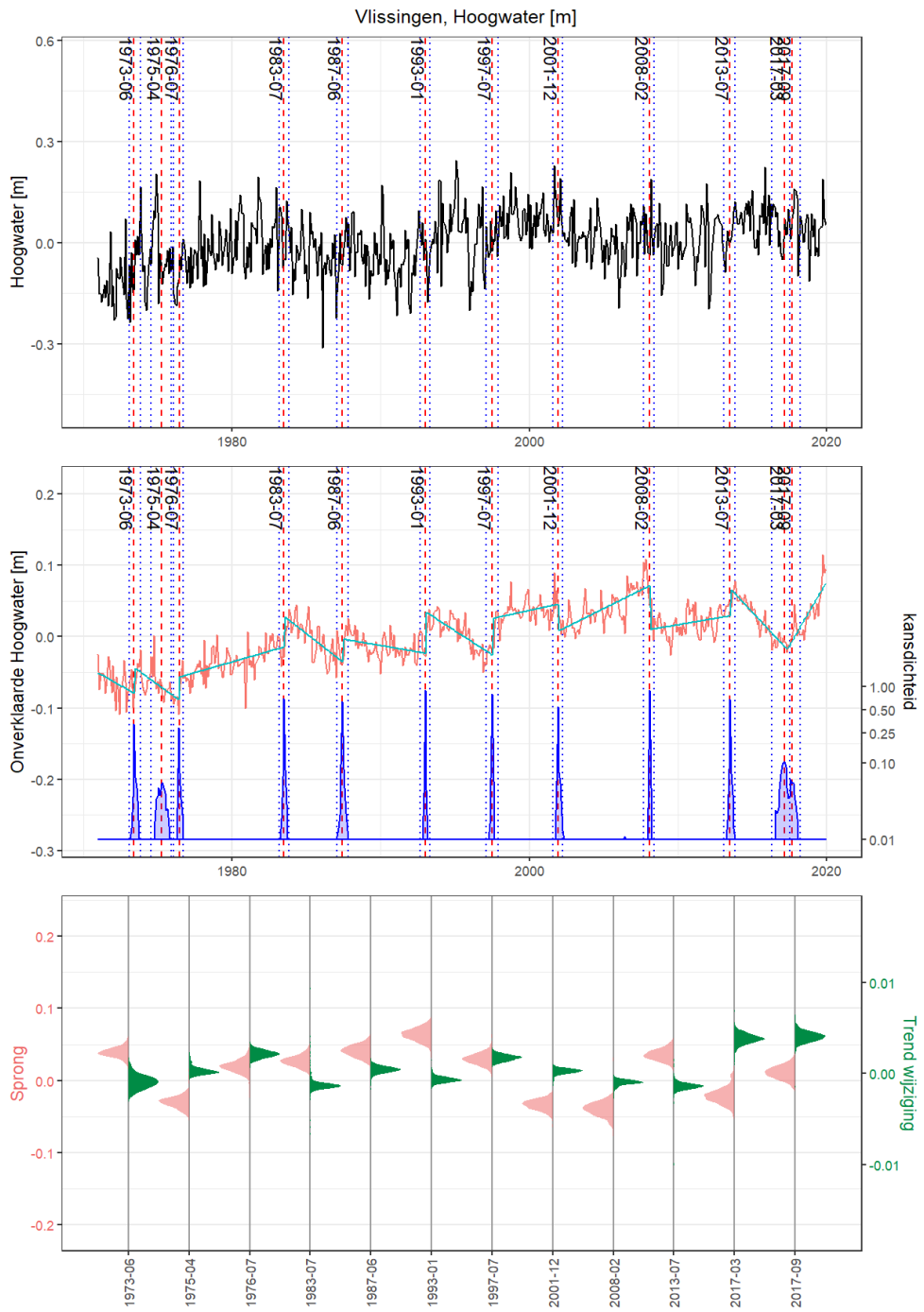
| Variabele                      | Estimate  | Std. Error | t-waarde | Pr(> t ) | significantie |
|--------------------------------|-----------|------------|----------|----------|---------------|
| Intercept                      | 4.25E+00  | 3.95E-03   | 1075.794 | <2e-16   | ***           |
| Gemiddelde E                   | -2.34E-02 | 4.12E-04   | -56.773  | <2e-16   | ***           |
| Dummy N                        | -2.96E-02 | 6.00E-03   | -4.938   | 7.93E-07 | ***           |
| Gemiddelde N                   | 1.77E-03  | 8.26E-04   | 2.143    | 0.0322   | *             |
| Dummy N *<br>gemiddelde N      | 1.45E-02  | 1.53E-03   | 9.455    | <2e-16   | ***           |
| Gemiddelde E *<br>gemiddelde N | -1.62E-03 | 9.69E-05   | -16.732  | <2e-16   | ***           |

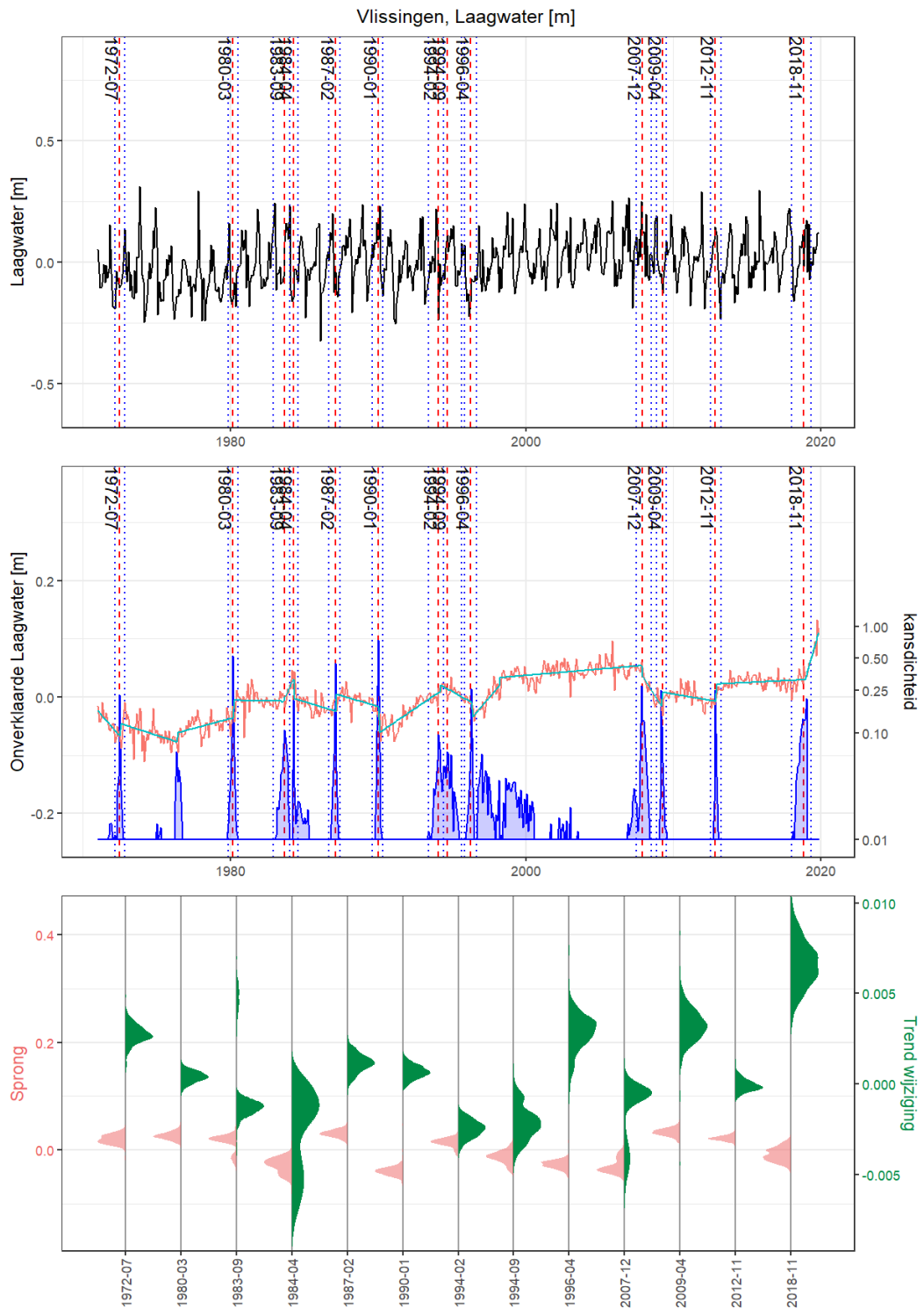


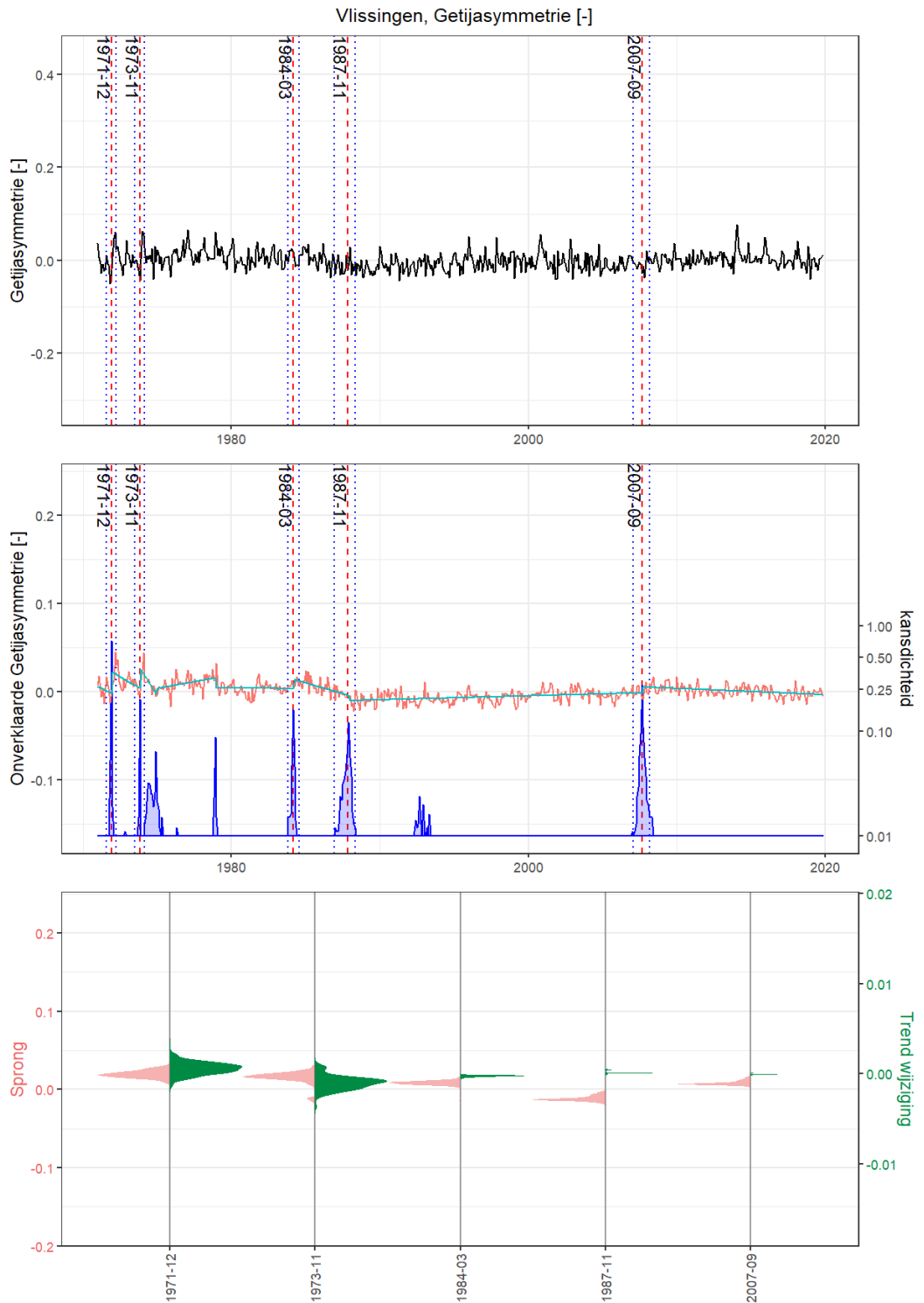
## Bijlage 3 Figuren Impactstudie

### Vlissingen

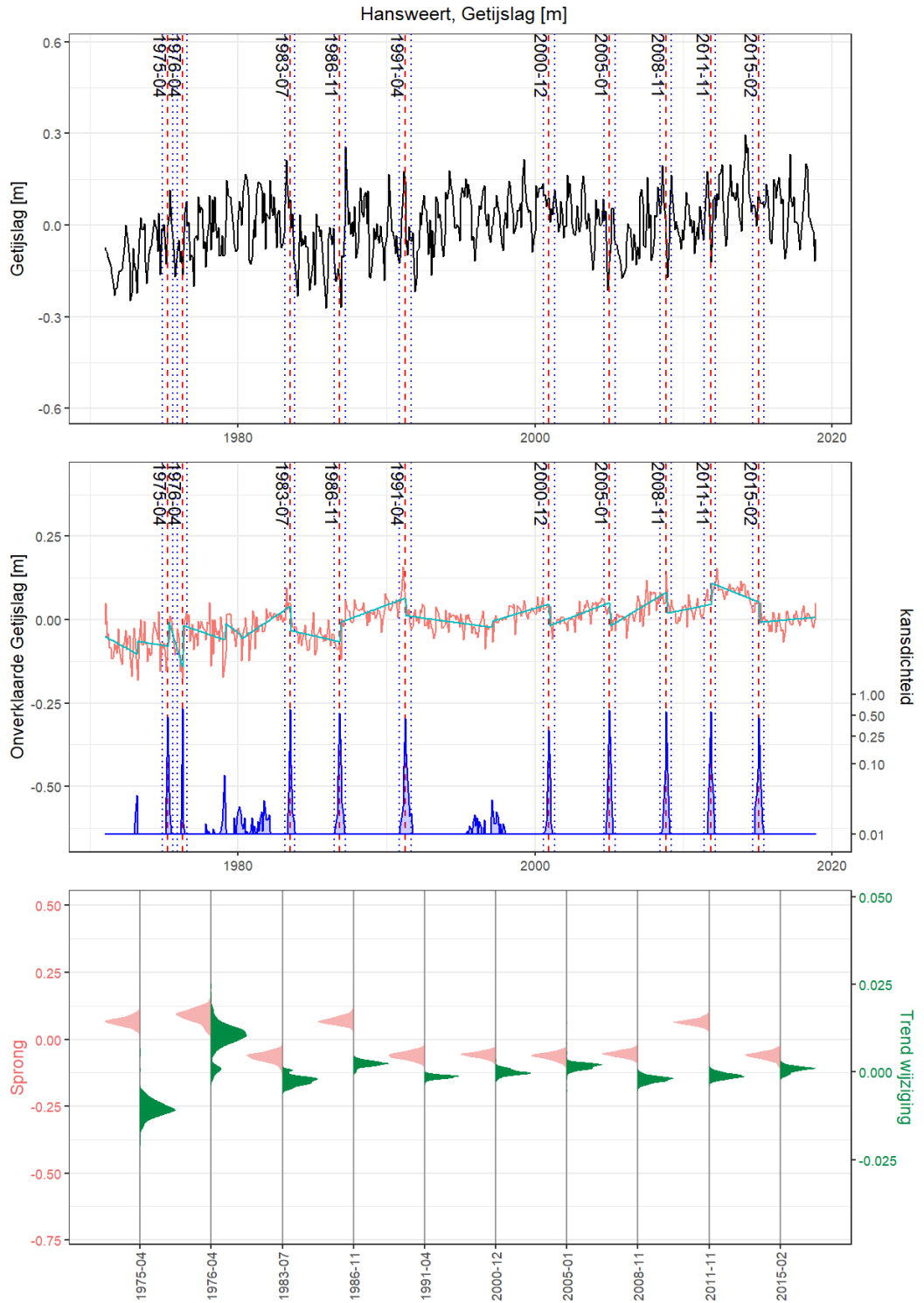


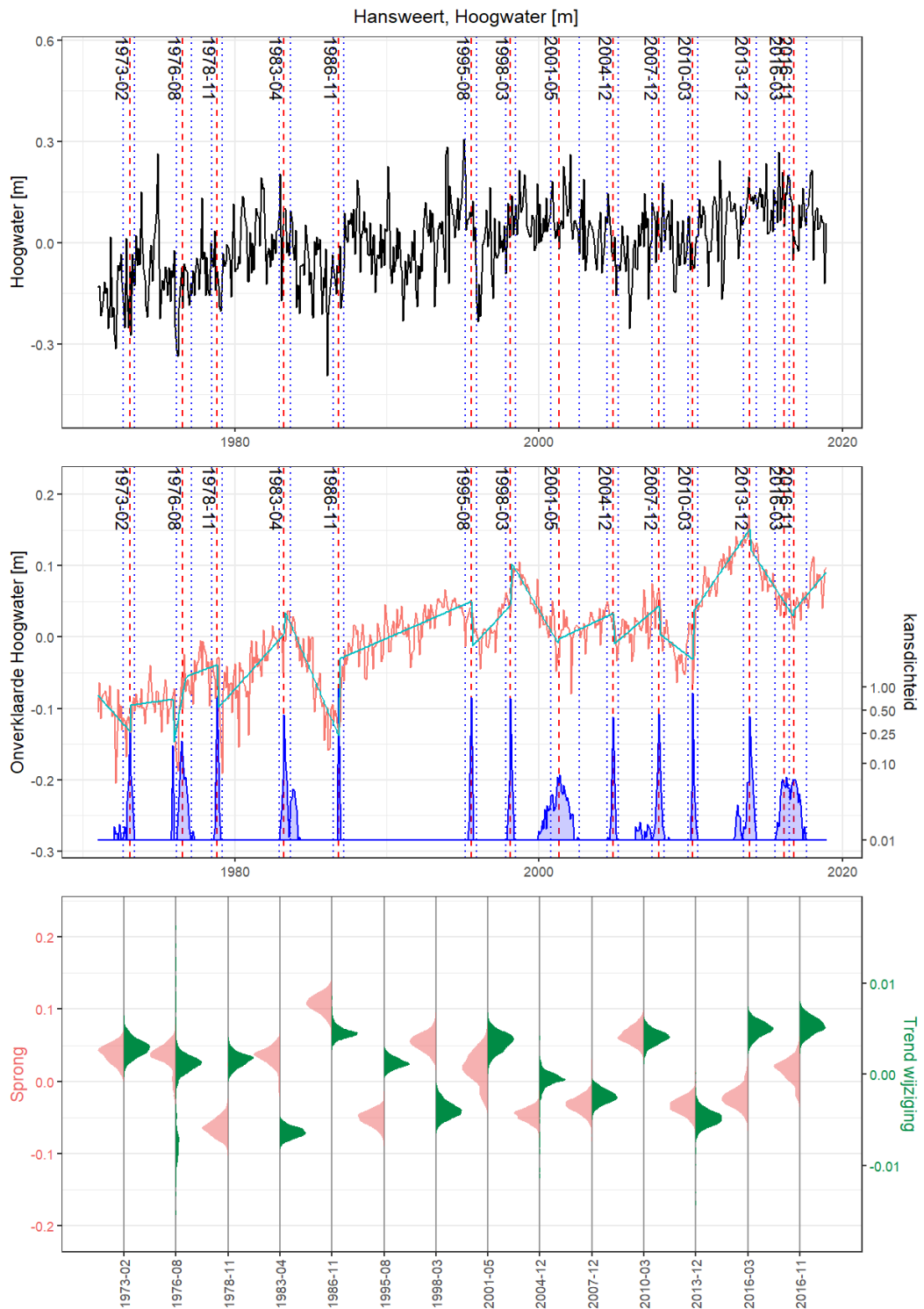


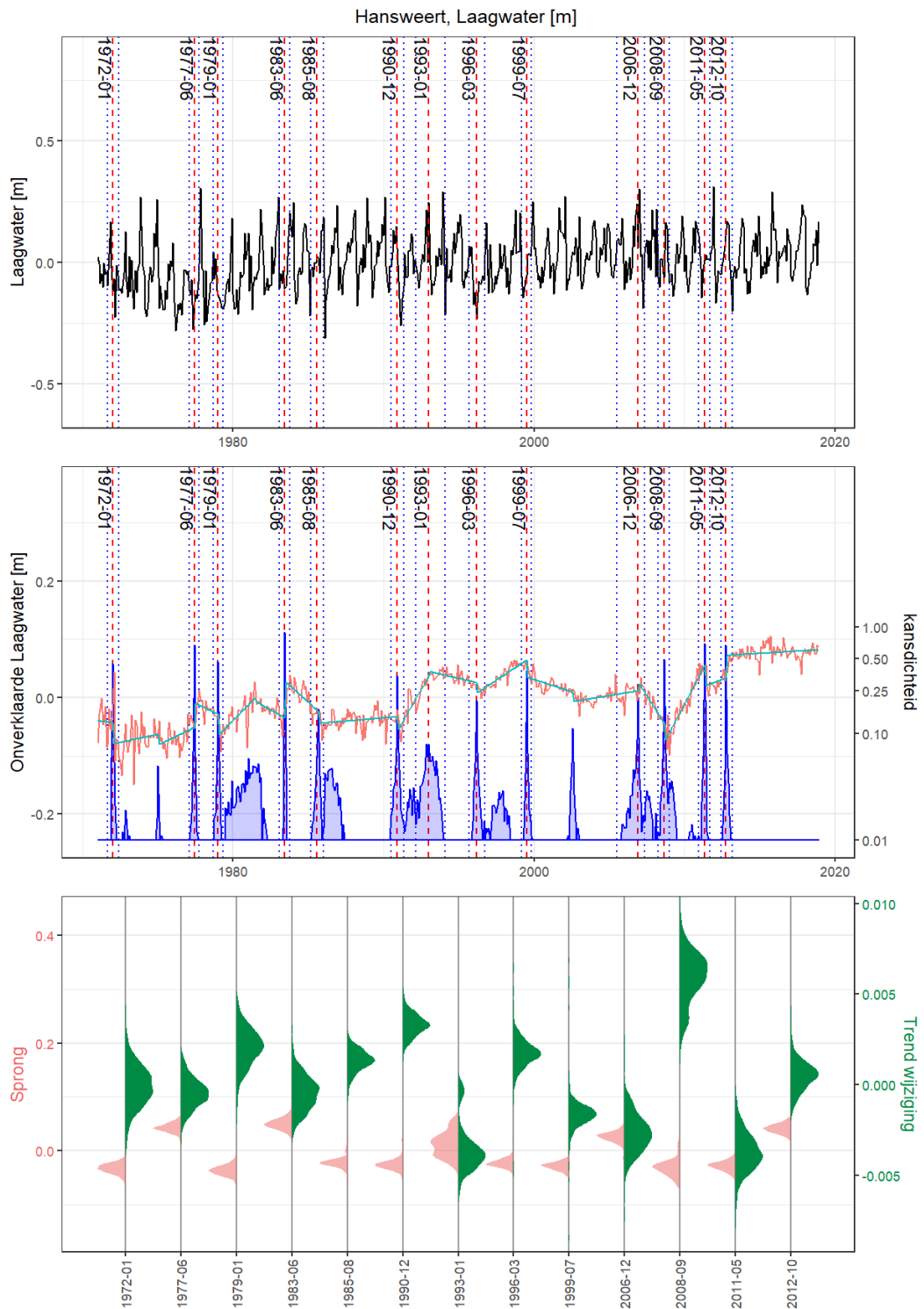


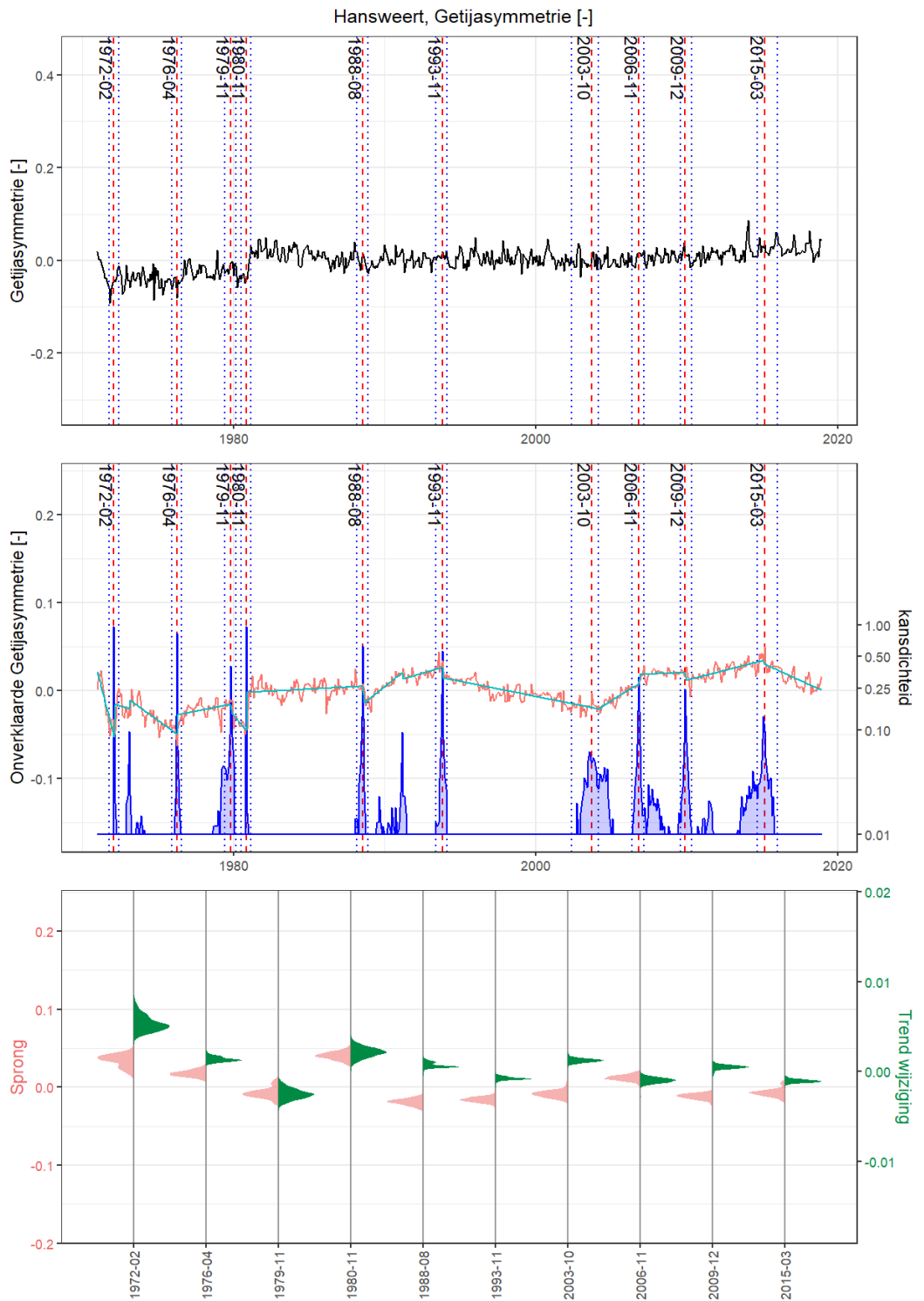


## Hansweert



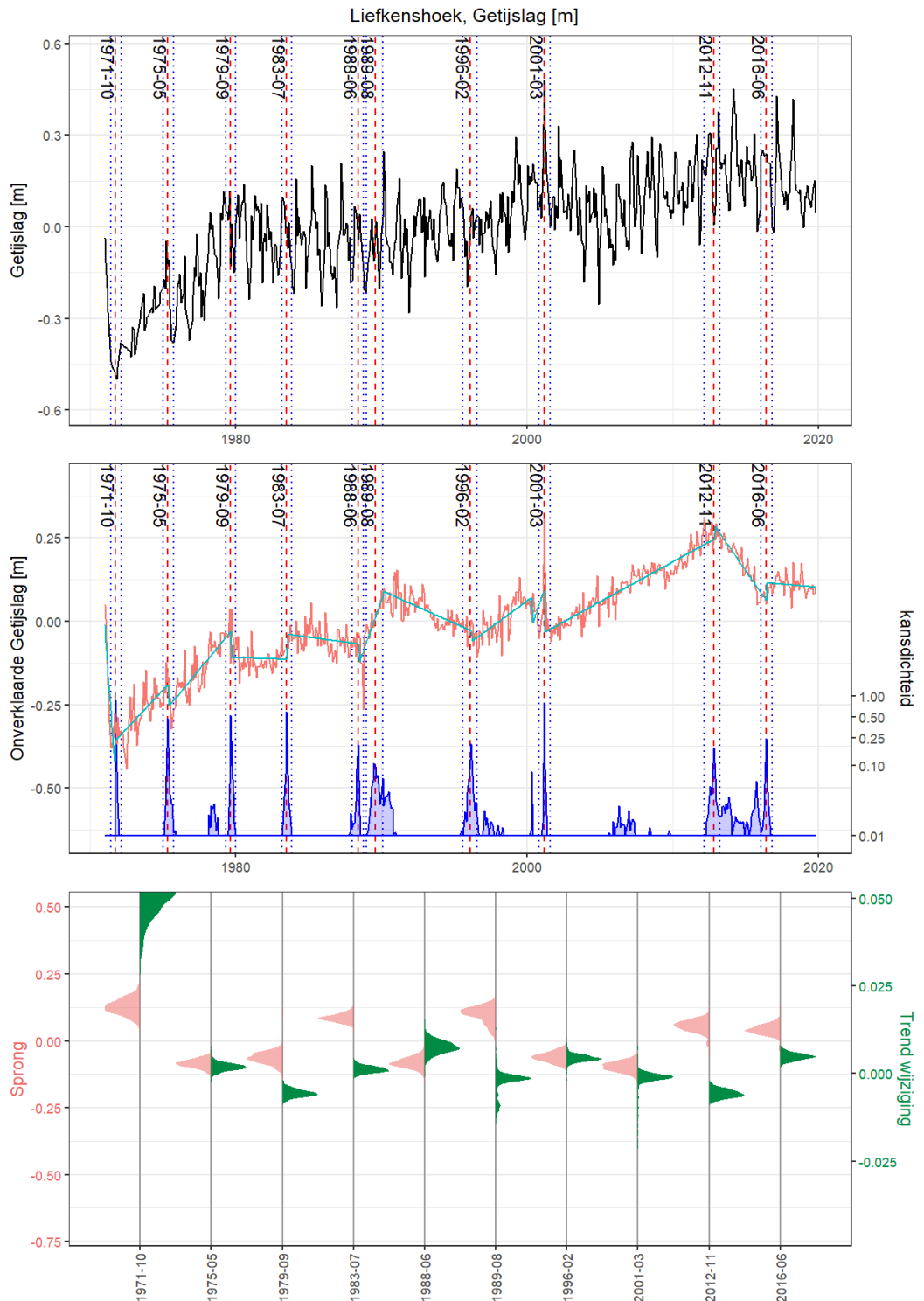


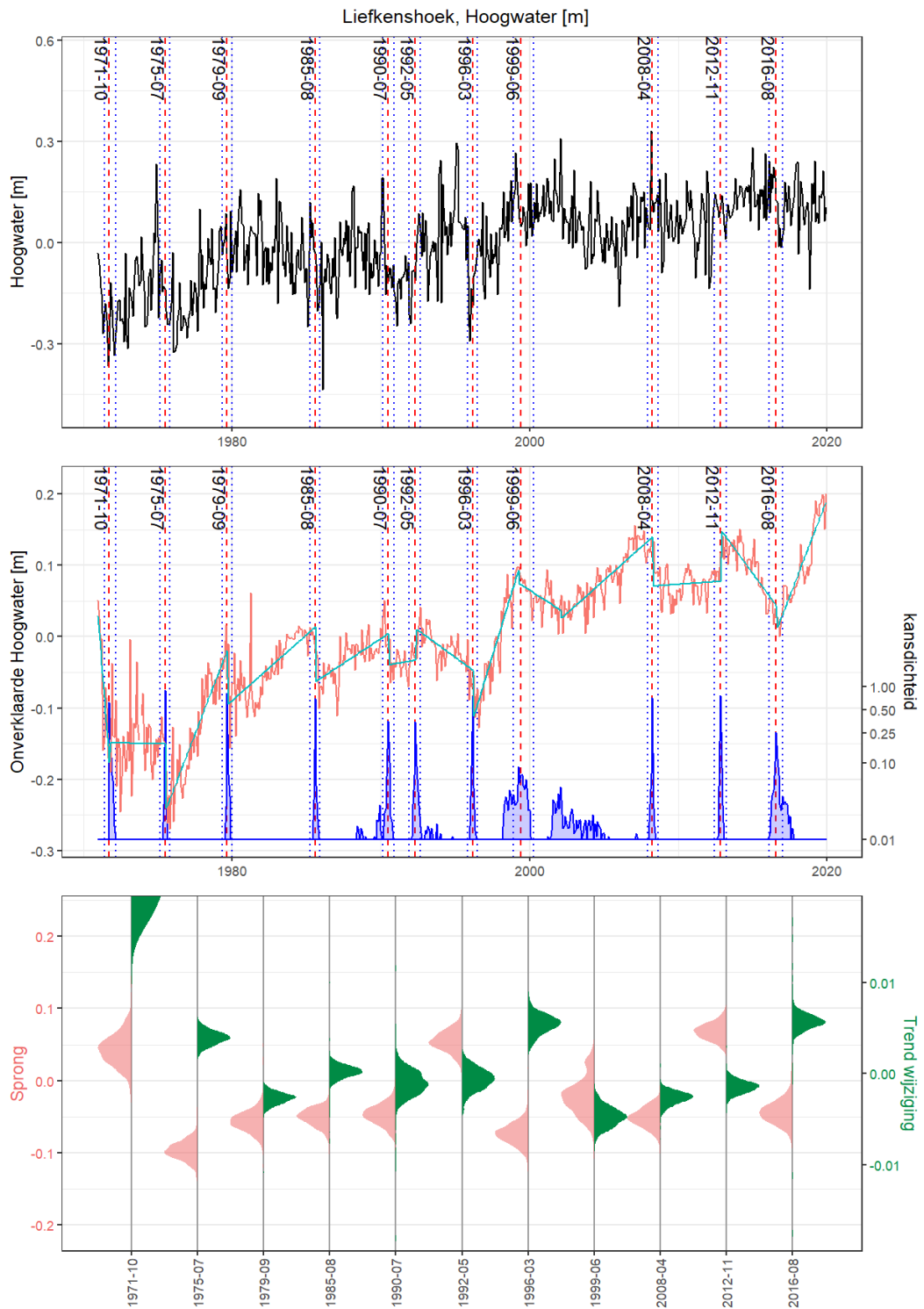


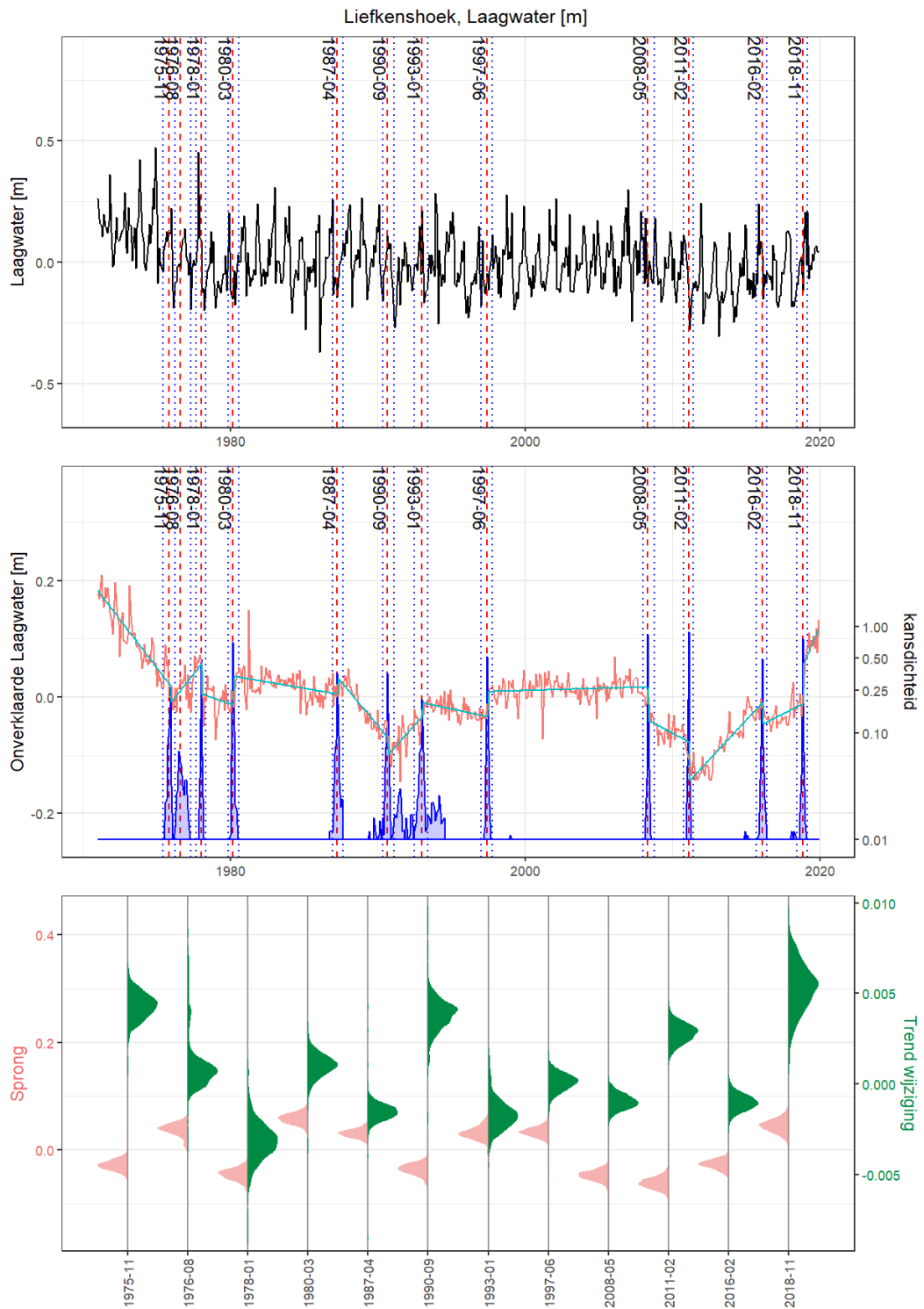


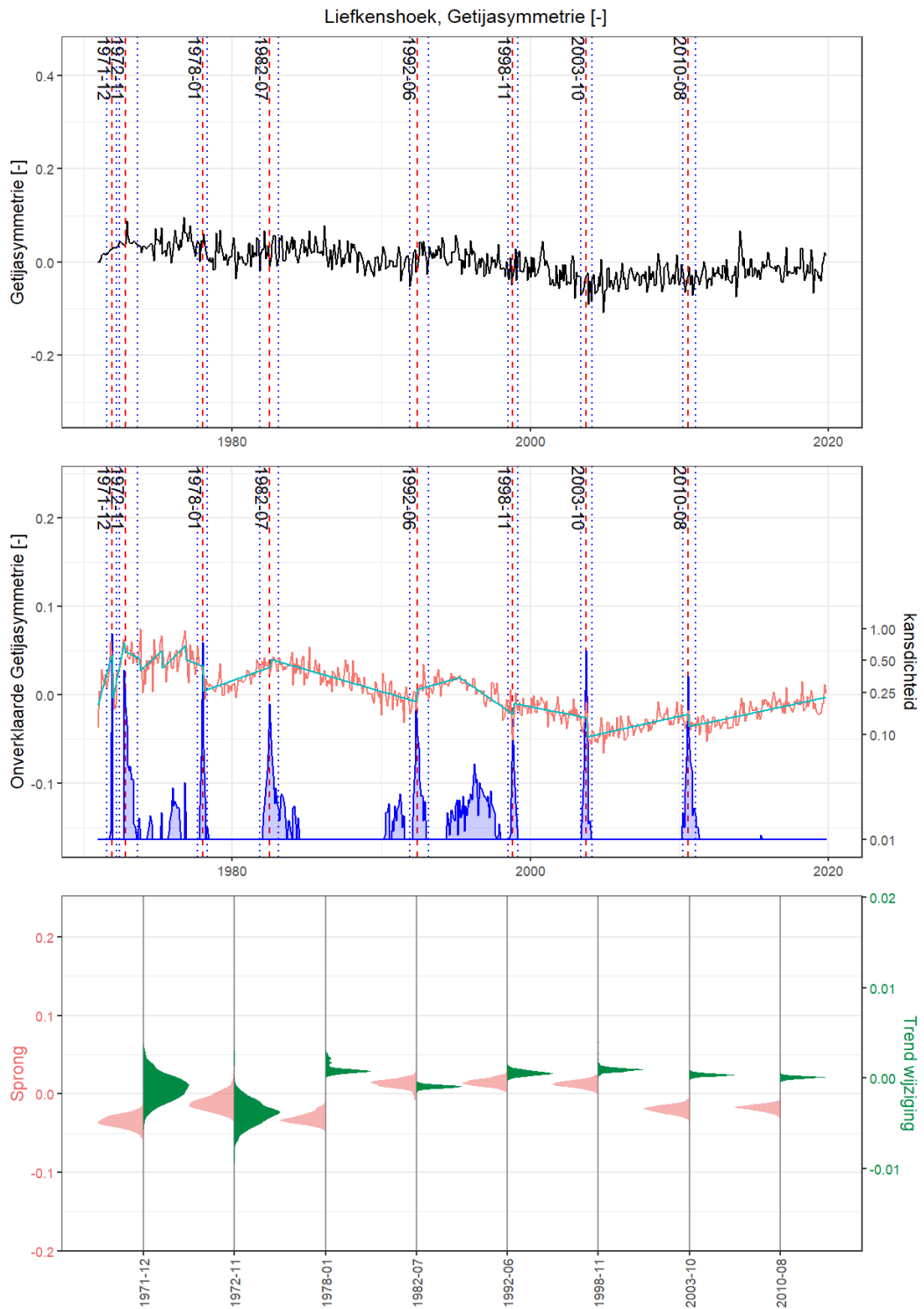


## Liefkenshoek

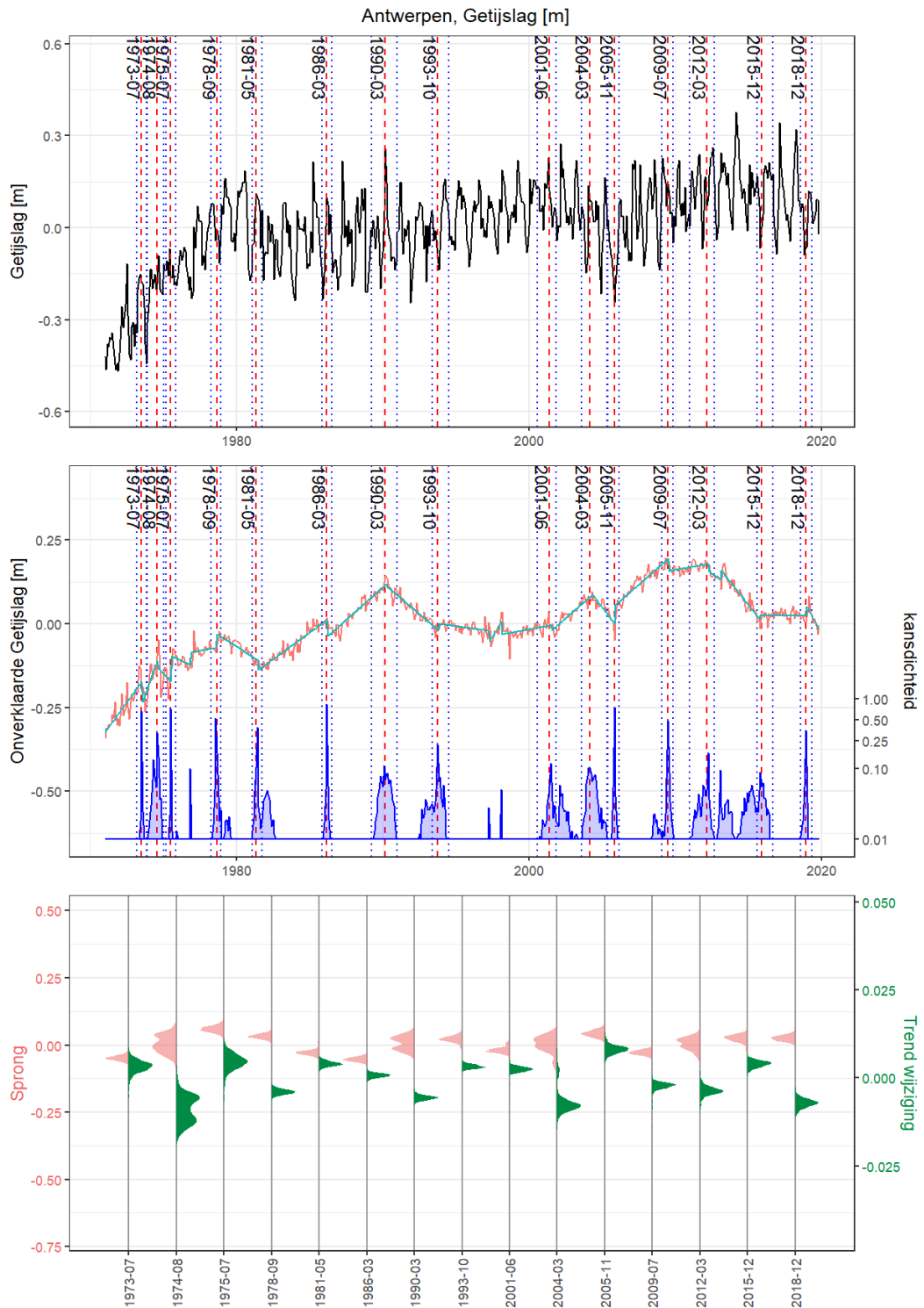


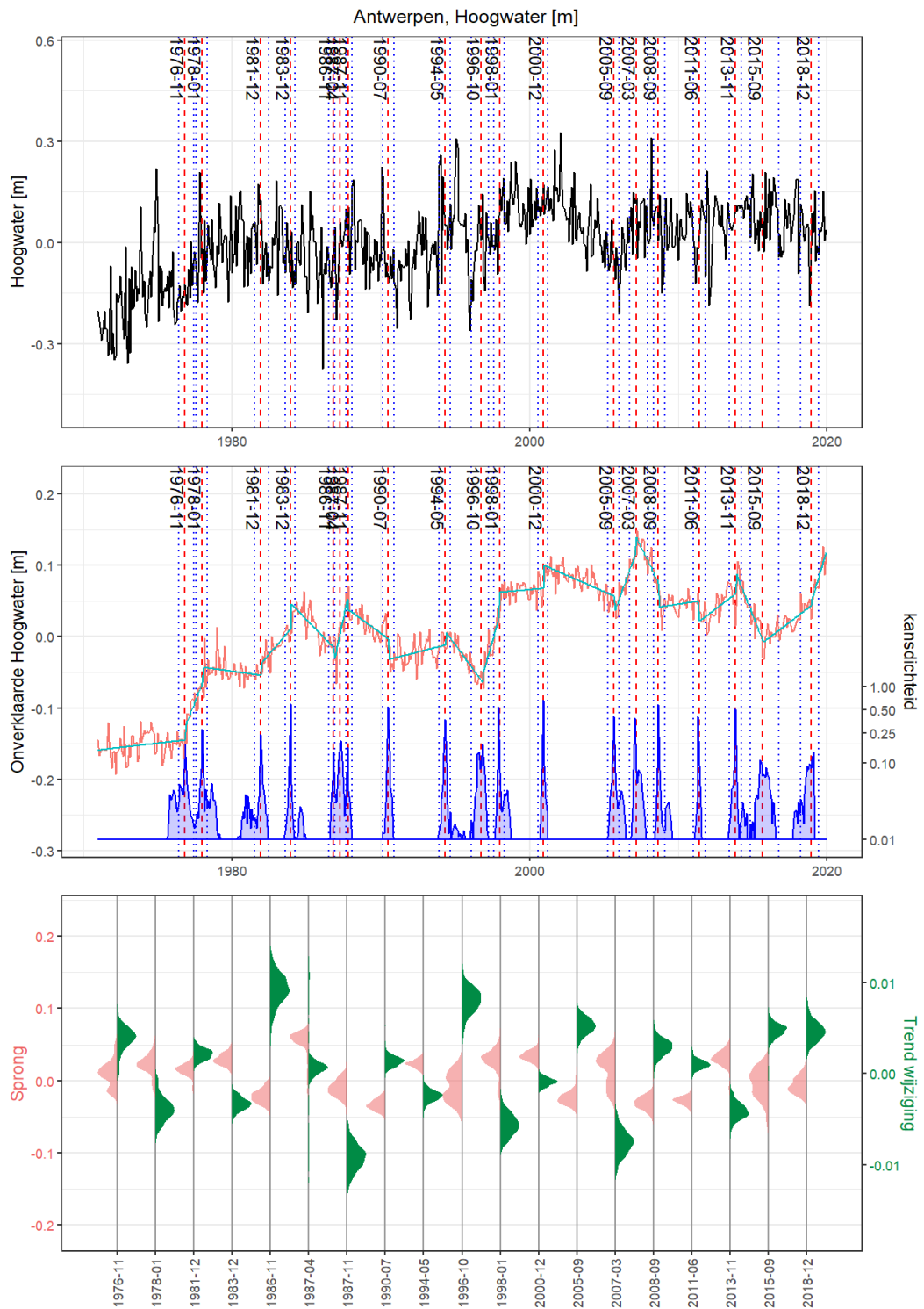


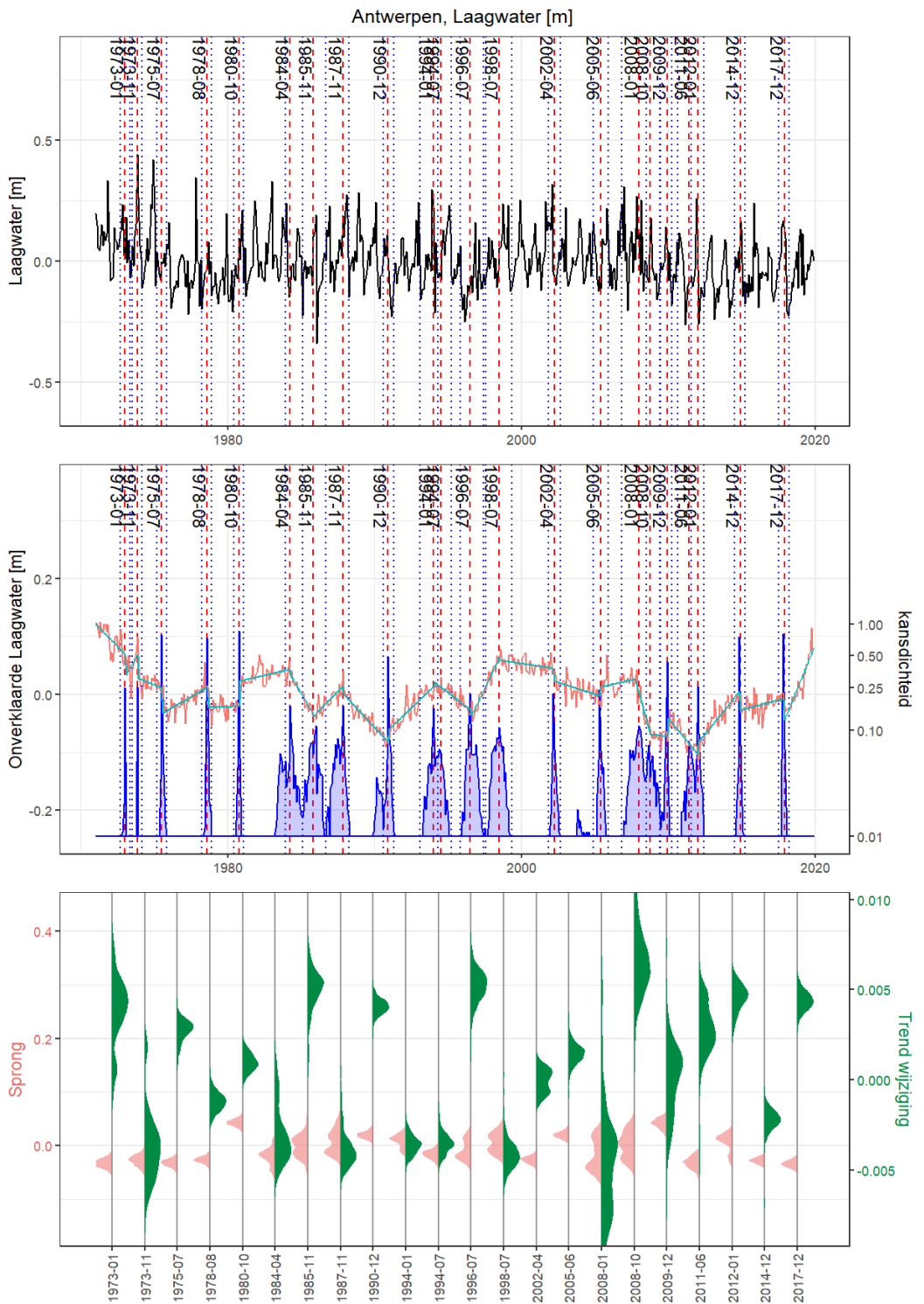


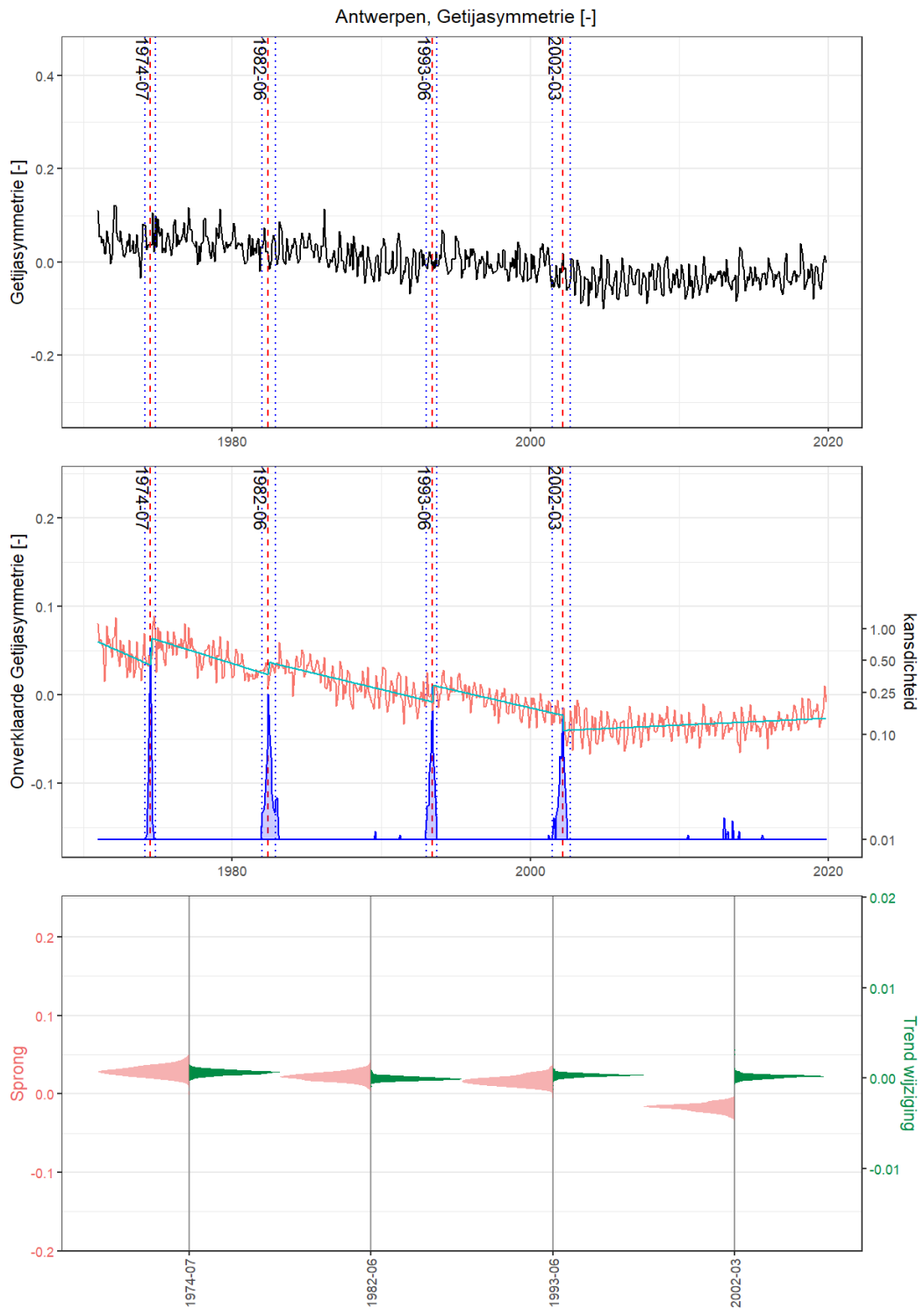


Antwerpen



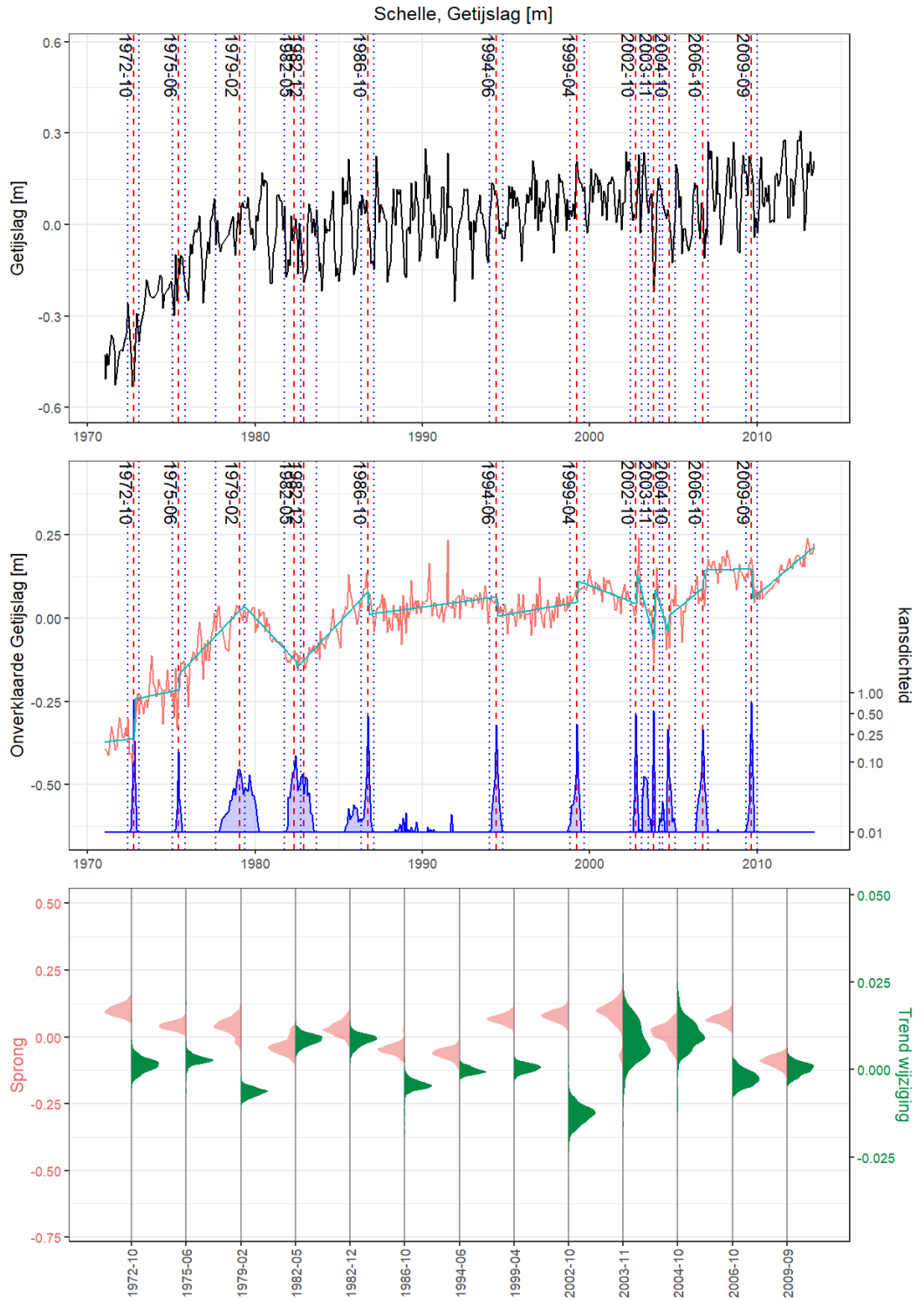


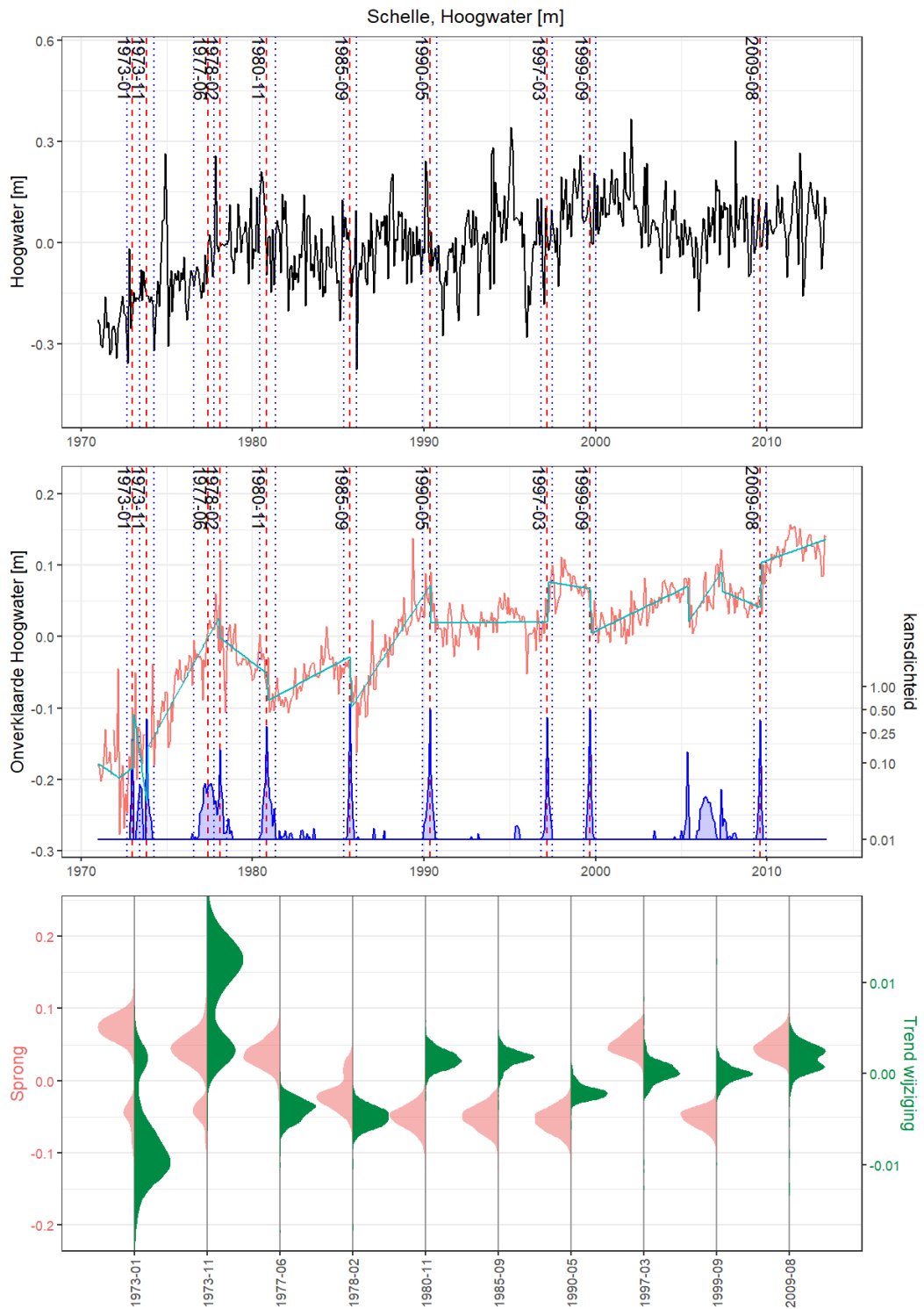


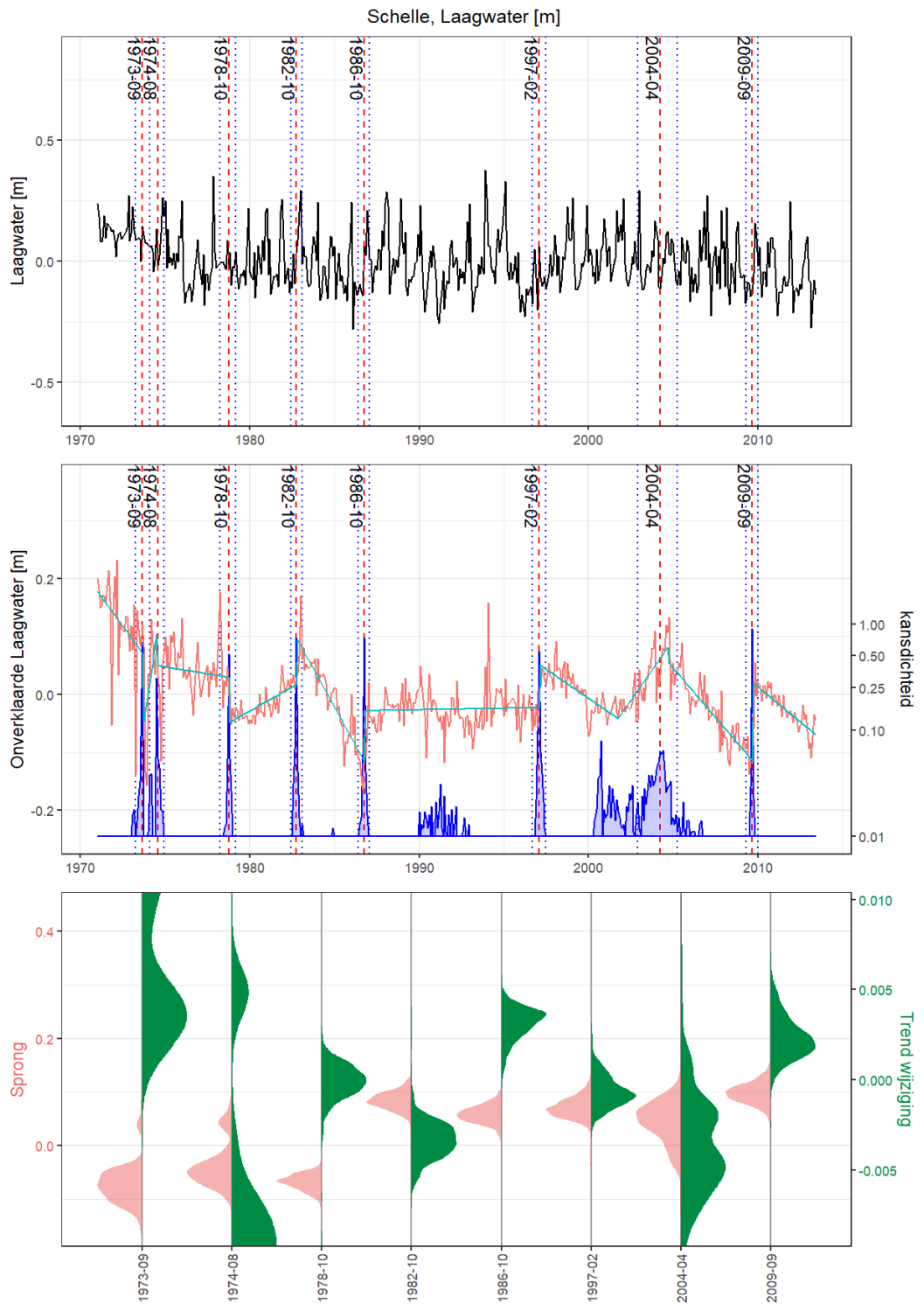


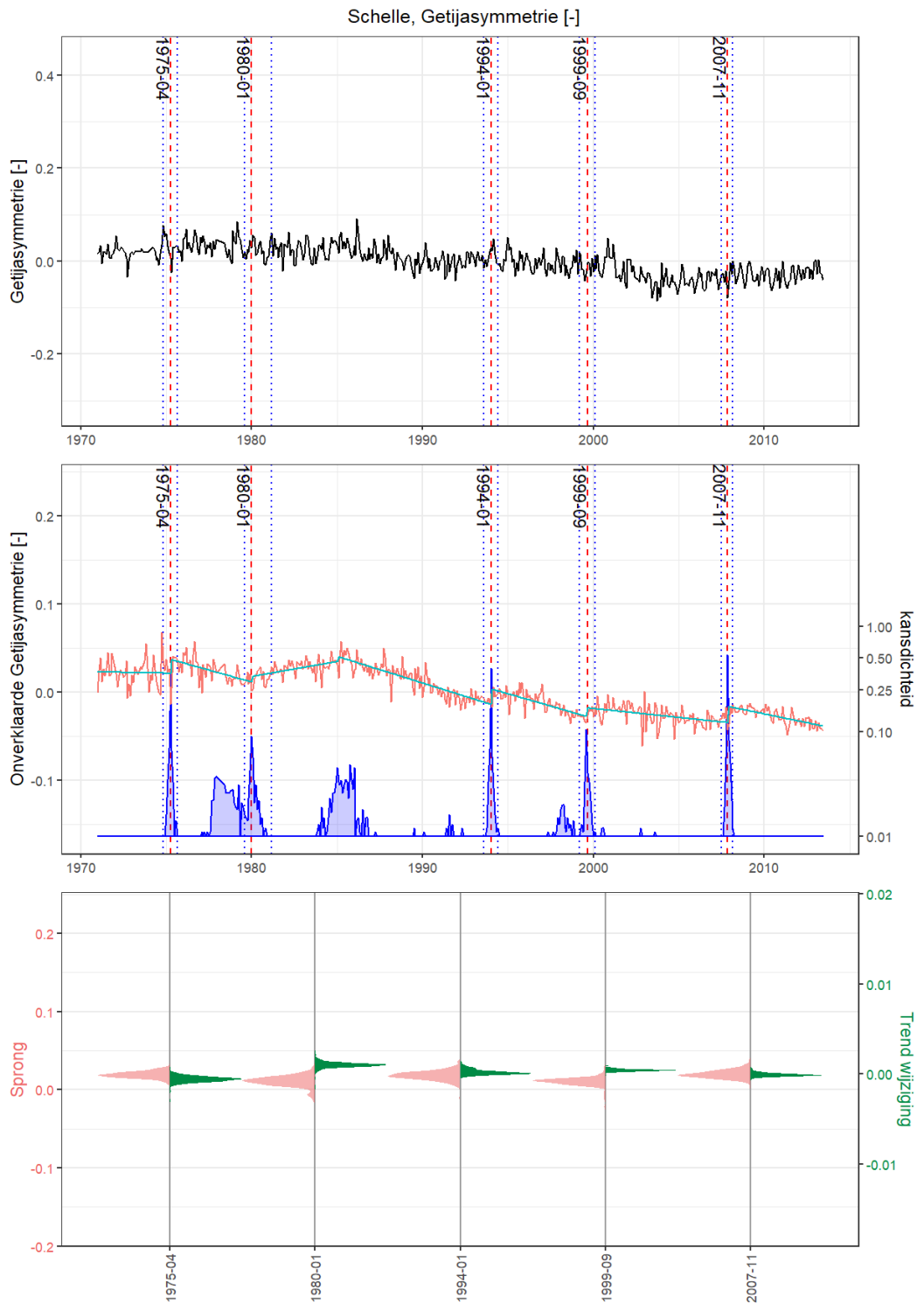


# Schelle

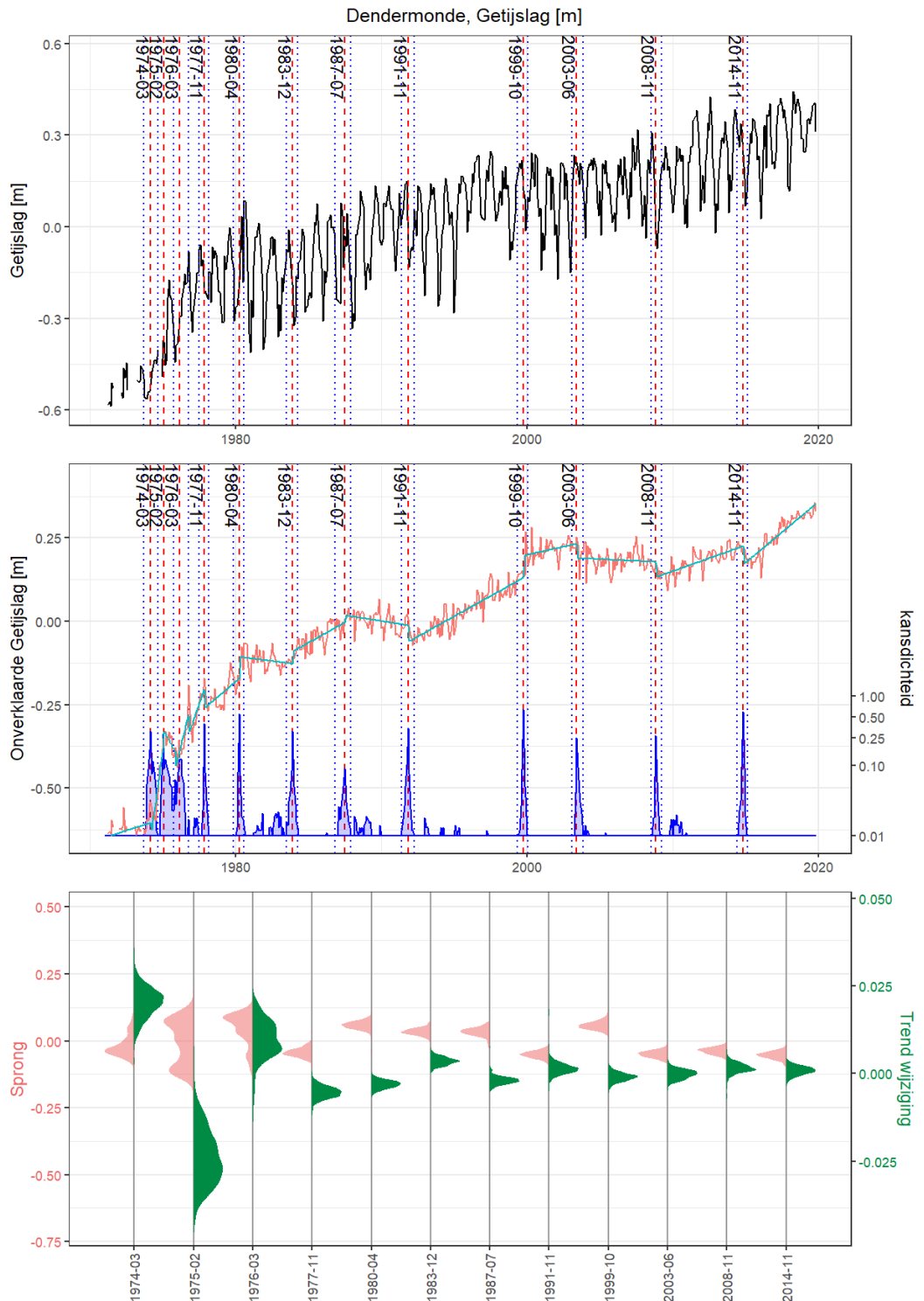


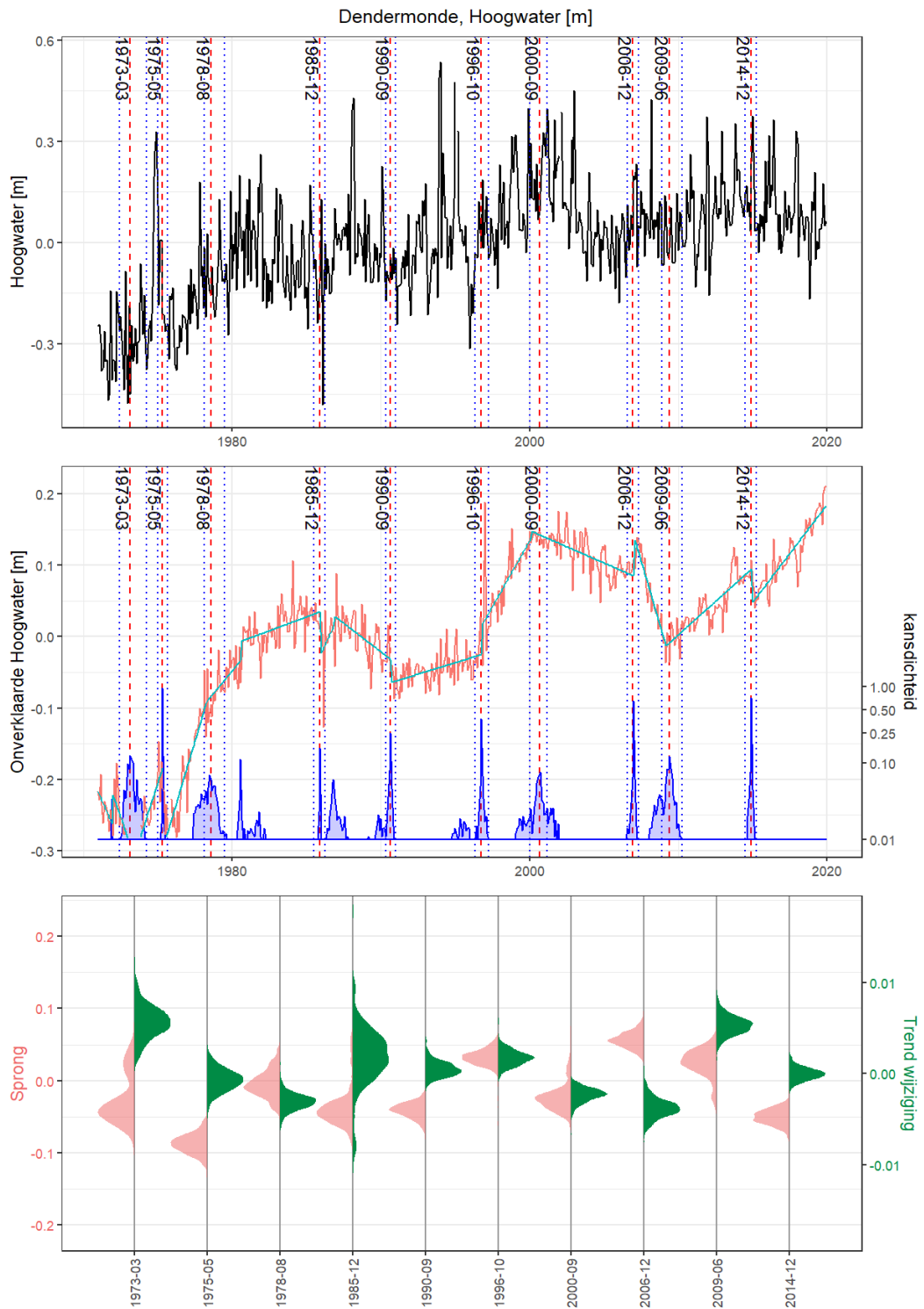


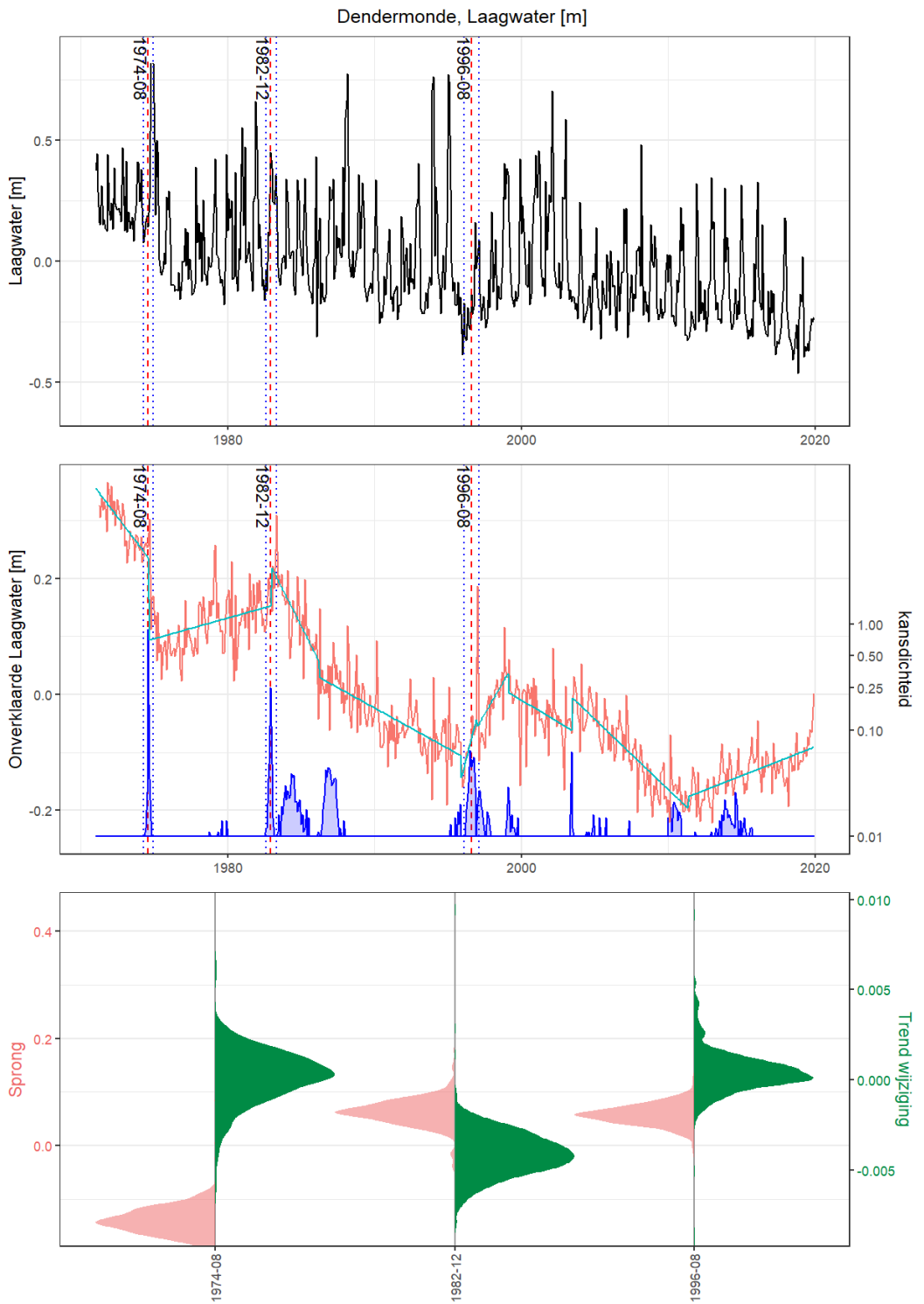


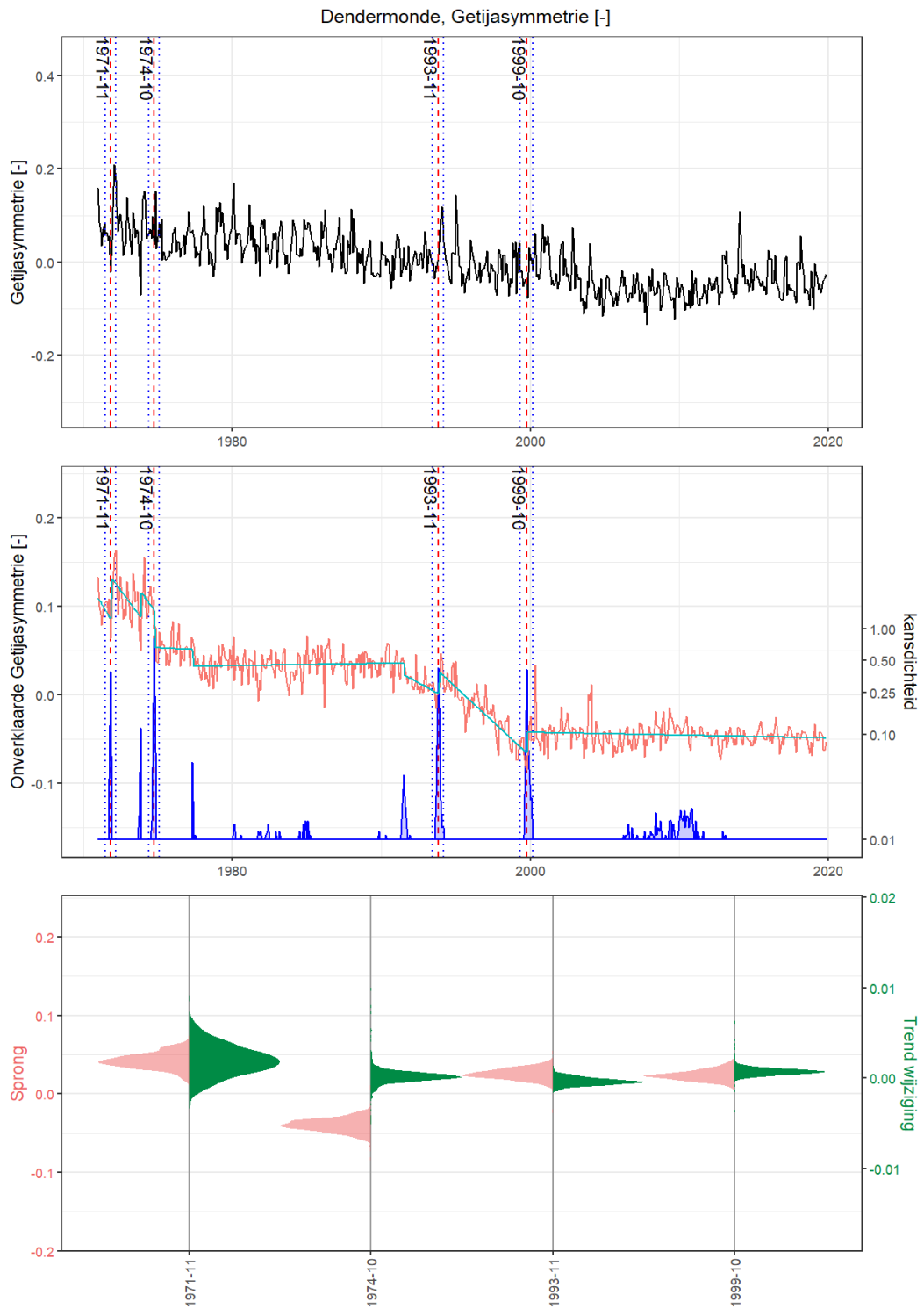


## Dendermonde



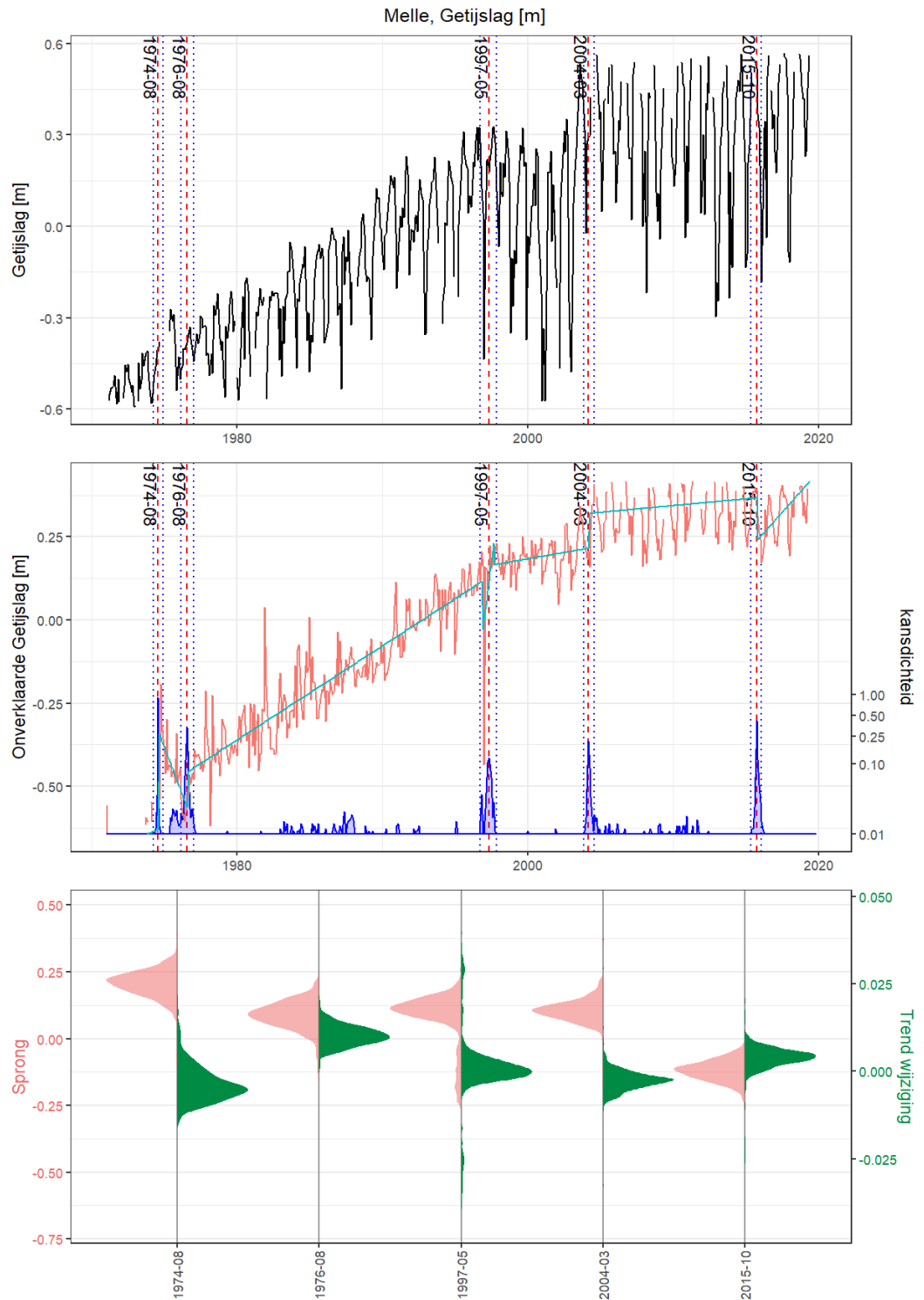


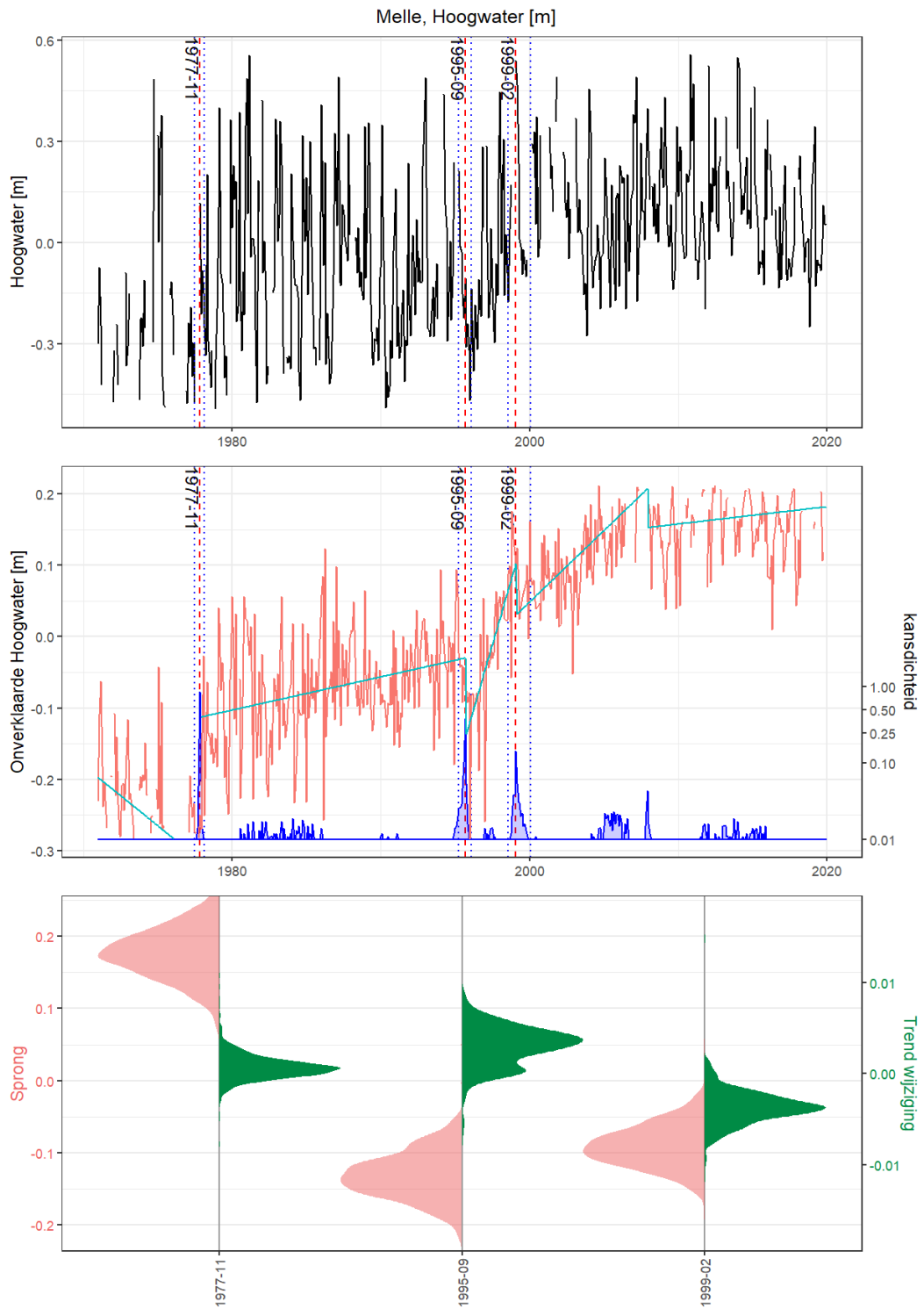


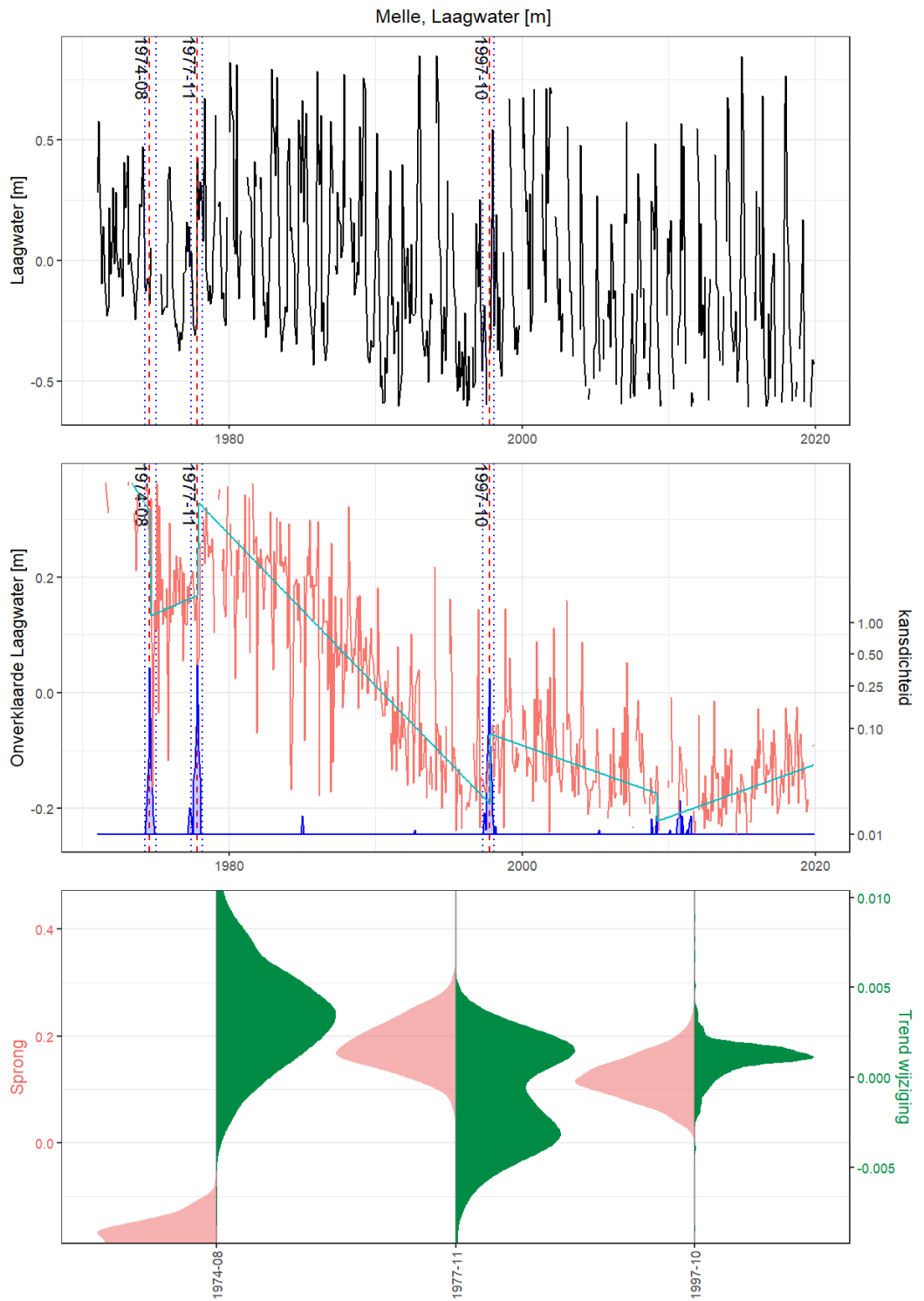


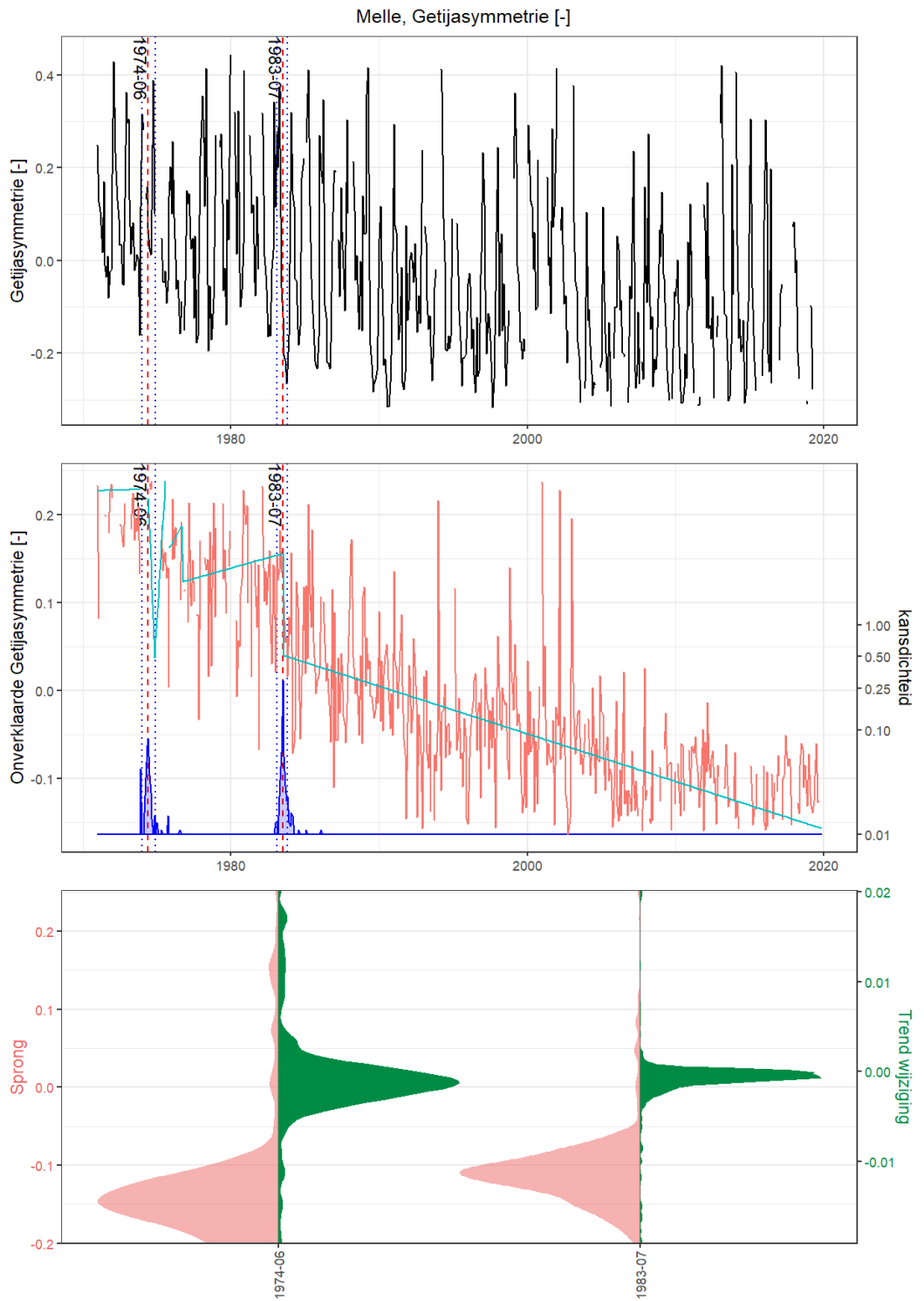


## Melle









© Antea Group 2021

**Zonder de voorafgaande schriftelijke toestemming van Antea Group mag geen enkel onderdeel of uittreksel uit deze tekst worden weergegeven of in een elektronische databank worden gevoegd, noch gefotokopieerd of op een andere manier vermenigvuldigd.**