

# Actualisatie van de extreme-waarden-statistiek van stormvloed en aan de kust

Studie voor Vlaamse Overheid - Waterbouwkundig Laboratorium

Prof. dr. ir. Patrick Willems

januari 2015

---



*Referentie bij dit rapport:*

*Willems, P., 2015. Actualisatie van de extreme-waarden-statistiek van stormvloeden aan de kust, KU Leuven voor Waterbouwkundig Laboratorium, januari 2015.*

*Contactpersoon opdrachtgever:*

*Ir. Toon Verwaest, Waterbouwkundig Laboratorium*

*Leden opvolgingsvergadering bij deze studie:*

*Sieglien De Roo, Koen Trouw, Julien De Rouck, Tomohiro Suzuki, Hans Poppe, Daphné Thoon, Jaak Monbaliu*

# Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding.....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Gebruikte meetwaarden .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Extreme-waarden-analyse hoogwaters Oostende .....</b>	<b>9</b>
	3.1 <i>Keuze methode .....</i>	9
	3.2 <i>Extractie van PDS/POT-extremen .....</i>	9
	3.3 <i>Selectie en kalibratie extreme-waarden-verdeling .....</i>	10
	3.4 <i>Berekening terugkeerperiode .....</i>	10
	3.5 <i>Resultaten extreme-waarden-analyse .....</i>	10
	3.6 <i>Betrouwbaarheidsintervallen .....</i>	12
<b>4</b>	<b>Vergelijking extreme-waarden-analyse hoog- en laagwaters Oostende, Nieuwpoort en Zeebrugge .....</b>	<b>14</b>
<b>5</b>	<b>Trendstijging hoogwaters Oostende.....</b>	<b>20</b>
	5.1 <i>Trendstijging totale hoogwaters .....</i>	20
	5.2 <i>Trendstijging astronomische hoogwaters.....</i>	21
	5.3 <i>Trendstijging stormopzet bij hoogwaters.....</i>	25
	<b>Referenties .....</b>	<b>31</b>

# 1 Inleiding

Deze studie betreft de actualisatie van de extreme-waarden-statistiek van stormvloed en langs de Belgische kust. Het is een actualisatie van de studie die door KU Leuven in 2007 werd uitgevoerd (Willems, 2007) op basis van de hoogwaterstanden te Oostende voor de periode 1925-2000. Voor de voorliggende studie werden deze metingen uitgebreid met de meer recente metingen van hoogwaters door kustmaregrafen aan de Belgische kust t.e.m. juni 2014 (meetnet Vlaamse banken; zie Vlaamse Hydrografie, 2010). Voor Oostende is het verband (kromme) geactualiseerd die de verwachte waarden weergeeft van de hoogwaterhoogte in functie van de terugkeerperiode en omgekeerd. Ook zijn de percentiel-curven geactualiseerd die de onzekerheidsband weergeven. Op basis van de hoogwaterhoogten te Oostende, Nieuwpoort en Zeebrugge voor de periode van september 2000 t.e.m. juni 2014 werden systematische verschillen afgeleid van de extreme-waarden-statistieken voor de hoogwaterhoogten tussen de drie locaties langs de Belgische kust. Daarnaast is een actualisatie uitgevoerd van de waargenomen trendstijging in hoogwaters te Oostende voor de periode 1925-2014. Naast de trend werden ook de langjarige schommelingen (multi-decadale oscillaties, nodale getij) in gemiddelde hoogwaterstanden en extreme stormopzethoogten onderzocht.

## 2 Gebruikte meetwaarden

Deze studie maakte gebruik van de hoogwaterstanden (totale, stormopzet en astronomische) te Oostende, zoals gebruikt in de studie van Willems (2007), aangevuld met:

- gemeten hoogwaters te Oostende, Nieuwpoort en Zeebrugge voor de periode januari 2000 - juni 2014;
- de astronomische 5-minutenreeksen te Oostende, Nieuwpoort en Zeebrugge voor de periode januari 2000 - juni 2014.

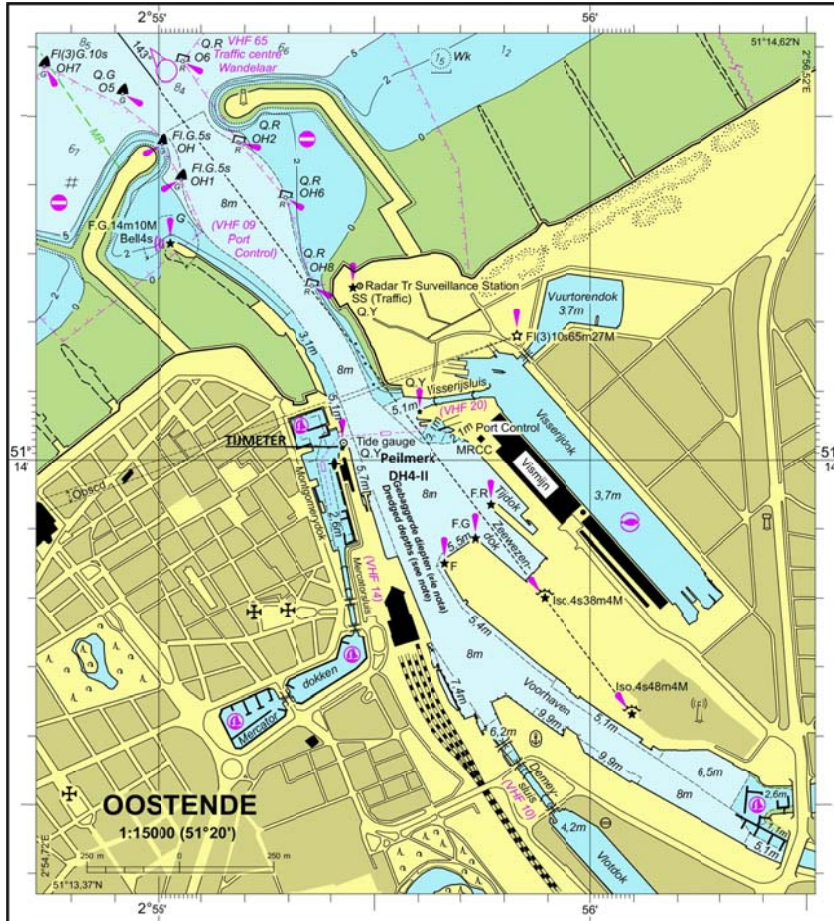
Voor het jaar 1980 ontbraken de stormopzet- en astronomische gegevens voor Oostende.

Voor de “Sinterklaasstorm” van 6/12/2013 was er wat fout gegaan bij de waterstandsregistratie te Oostende, en werd de gecorrigeerde hoogwaterwaarde gebruikt (619,45 cm TAW i.p.v. de oorspronkelijke meetwaarde van 607,23 cm TAW), zoals besproken in het stormverslag “05-06 december 2013” van het Oceanografisch Meteorologisch Station, Agentschap Maritieme Dienstverlening en Kust.

Oorspronkelijk werden ook gedigitaliseerde meetwaarden van oude maragraafbladen te Nieuwpoort en Zeebrugge, sinds 1950, vooropgesteld, maar deze bleken finaal niet beschikbaar voor deze studie.

Zie het rapport van Vlaamse Hydrografie (2010) voor meer details bij de meetposten en de nieuwe metingen.

Voor de kustmaregraaf te Oostende wordt hieronder de locatie (51°14',07 N - 2°55',50 E) en een foto getoond (Figuur 1 en Figuur 2). Vanaf 1 januari 1995 werd een nieuw toestel gebruikt als hoofdmaregraaf.



Figuur 1: Locatie van kustmaregraaf te Oostende (Vlaamse Hydrografie, 2010).



Figuur 2: Foto van de kustmaregraaf te Oostende (Vlaamse Hydrografie, 2010).

Vermits voor de periode 1 september – 31 december 2000 de nieuwe hoogwatergegevens te Oostende overlappen met de gegevens gebruikt in de studie van Willems (2007), werden beide eerst vergeleken (Figuur 3). Over het algemeen zijn de twee meetreeksen sterk gelijklopend, maar voor bepaalde deelperioden worden verschillen gevonden, waarvan de oorzaak onduidelijk is.

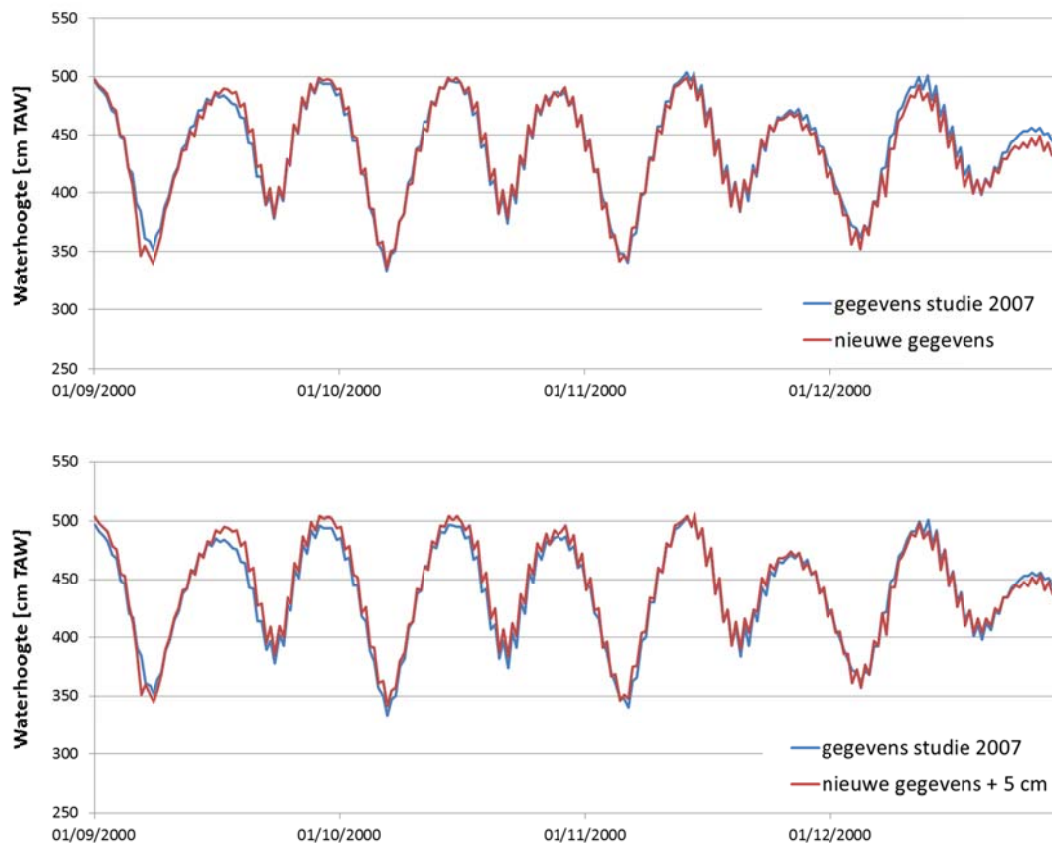


**Figuur 3: Vergelijking hoogwaterstanden tussen de nieuwe meetgegevens en de gegevens gebruikt in de studie van Willems (2007), voor de overlappende periode september – december 2000.**

Eenzelfde type vergelijking van de nieuwe astronomische hoogwaterstanden met deze gebruikt in de studie van Willems (2007) voor de overlappende periode 1 september – 31 december 2000, geeft sterk gelijklopende waarden, maar met een systematisch verschil van een 5tal cm voor de laatste weken van 2000 (Figuur 4). Ook hiervan is de oorzaak onduidelijk. Mogelijks zijn voor de berekening van de nieuwe en de oude astronomische waterhoogten niet geheel dezelfde harmonische componenten gebruikt (vb. bepaald uitgaande van andere perioden). Dit dient verder nagegaan.

Wanneer bij de nieuwe astronomische hoogwaterstanden 5 cm wordt bijgeteld, verdwijnt dit systematisch verschil voor november en december 2000 (zie Figuur 4), maar ontstaat een systematisch positief verschil voor september en oktober 2000.

In de verdere analyse zijn t.e.m. 31 december 2000 de hoogwaterhoogten gebruikt uit de studie van 2007, aangevuld met de nieuwe waarden vanaf 1 januari 2001.



**Figuur 4: Vergelijking astronomische hoogwaterstanden tussen de nieuwe meetgegevens en de gegevens gebruikt in de studie van Willems (2007), voor de overlappende periode september – december 2000.**



## 3 Extreme-waarden-analyse hoogwaters Oostende

### 3.1 Keuze methode

In de studie van Willems (2007) werd een vergelijking gemaakt tussen de methode van de jaarlijkse maxima en de methode op basis van Partial Duration Series (PDS) of Peak-Over-Threshold (POT) extremen. Ook werden bij de toepassing van de PDS/POT-methode verschillende onafhankelijkheidscriteria vergeleken. Finaal werd de extreme-waarden-analyse gebaseerd op de PDS/POT-methode voor welbepaalde criteria.

Deze ganse analyse werd hier niet herhaald op basis van de nieuwe metingen, omdat de motivatie bij de keuze van de methode niet bepaald wordt door de meetperiode. De methode die in de studie van Willems (2007) finaal werd geselecteerd voor de afleiding van de overschrijdingskromme en betrouwbaarheidsmarges, werd daarom ook in deze studie onveranderd gebruikt. Dit laat ook toe om de resultaten te vergelijken met deze van de vorige studie.

Hierna wordt de gebruikte methode in de verschillende deelaspecten eerst samengevat.

### 3.2 Extractie van PDS/POT-extremen

Uit de beschikbare tijdreeks van waterhoogten worden onafhankelijke extremen afgeleid op basis van onafhankelijkheidscriteria. Hierbij worden twee opeenvolgende extreme waterhoogten als onafhankelijk beschouwd wanneer de tussentijd tussen deze extreme waterhoogten langer is dan welbepaalde waarde  $k$ , indien de minimale waterhoogte tussen beide extremen lager is dan een welbepaalde fractie  $f$  van de hoogste extreme waarde, en indien beide extremen een minimale waarde hebben. De overeenkomstige reeks van (nagenoeg) onafhankelijke extreme waarden wordt Partial Duration Series (PDS) genoemd, of ook Peak-Over-Threshold (POT) waarden omdat enkel waarden boven een zekere drempel worden geselecteerd. Merk op dat de basis POT-methode erin bestaat om verschillende overschrijdingen van een voldoende hoge drempelwaarde als onafhankelijk te beschouwen, maar de methode is hier verder uitgebreid door bijkomende onafhankelijkheidscriteria te gebruiken, zoals de minimale tussentijd ( $k$ ) en de minimale fractie ( $f$ ) van de extreme hoogwaters over de laagwaters.

In Willems (2007) werden vergelijkingen gemaakt met een alternatieve methode op basis van jaarlijkse maxima (Annual Maxima: AM), leidend tot eenzelfde asymptotisch staartgedrag van de verschillende extreme-waarden-verdelingen gekalibreerd aan de AM- en PDS/POT-extremen. Ook werd een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op de waarden (voor  $k$  en  $f$ ) geselecteerd voor de onafhankelijkheidscriteria. Ook hierbij werd geconcludeerd dat de keuze van andere waarden voor de onafhankelijkheidscriteria tot eenzelfde asymptotisch staartgedrag van de extreme-waarden-verdeling leidt. Zie de paper Willems et al. (2007) voor een uitgebreide discussie over dit staartgedrag en het belang ervan en van de verschillen tussen extreme-waarden-analysemethoden.

Finaal werden in de studie van Willems (2007) de volgende waarden gebruikt voor de onafhankelijkheidscriteria bij de PDS/POT-methode:  $k = 10$  tijcycli,  $f = 0.5$ , minimale waterhoogte voor de extremen = astronomische waterhoogte + 20 cm stormopzethoogte.

### 3.3 Selectie en kalibratie extreme-waarden-verdeling

Overeenkomstig de extreme-waarden-theorie van Pickands (1975) volgen onafhankelijke PDS/POT-extremen de Generalized Pareto Distribution (GPD verdeling). Deze heeft de volgende vergelijking voor de cumulatieve kansverdeling:

$$G(x) = 1 - \left(1 + \gamma \frac{x - x_t}{\beta}\right)^{-1/\gamma} \quad \text{voor } \gamma \neq 0 \quad (1)$$

$$G(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x - x_t}{\beta}\right) \quad \text{voor } \gamma = 0 \quad (2)$$

met  $x_t$  de drempelwaarde boven dewelke de verdeling opgaat,  $\beta$  de schaalparameter en  $\gamma$  de vormparameter. Voor  $\gamma = 0$  komt de GPD verdeling overeen met de exponentiële (EXP) verdeling. De parameter  $\gamma$  wordt ook 'extreme-waarden-index' genoemd en bepaalt de vorm van de staart van de verdeling (zwarte staart bij  $\gamma > 0$ , normale staart bij  $\gamma = 0$ , lichte staart bij  $\gamma < 0$ ). De correcte identificatie van deze vorm (dus van het teken van de extreme-waarden-index) is hierbij zeer belangrijk. Dit gebeurt op basis van kwantielplots. Ook de meer precieze kalibratie van de GPD-parameters gebeurt in kwantielplots (via gewogen regressie). Hoe dit precies gebeurt staat uitgebreid beschreven in Willems (2007) en de referenties daarin.

### 3.4 Berekening terugkeerperiode

De gemiddelde tijd tussen twee opeenvolgende overschrijdingen van een welbepaalde waterhoogte, de zogenaamde terugkeerperiode, kan na kalibratie van de extreme-waarden-verdeling – conform the PDS/POT-methode – als volgt worden berekend:

$$T = \frac{n}{t(1 - G(x))} \quad (3)$$

met  $T$  de terugkeerperiode,  $n$  de lengte van de gebruikte tijdreeks (waaruit de empirische extremen werden geëxtraheerd),  $t$  het aantal empirische extremen boven de gekalibreerde drempelwaarde  $x_t$ , en  $G(x)$  de cumulatieve kansverdeling zoals hiervoor gedefinieerd.

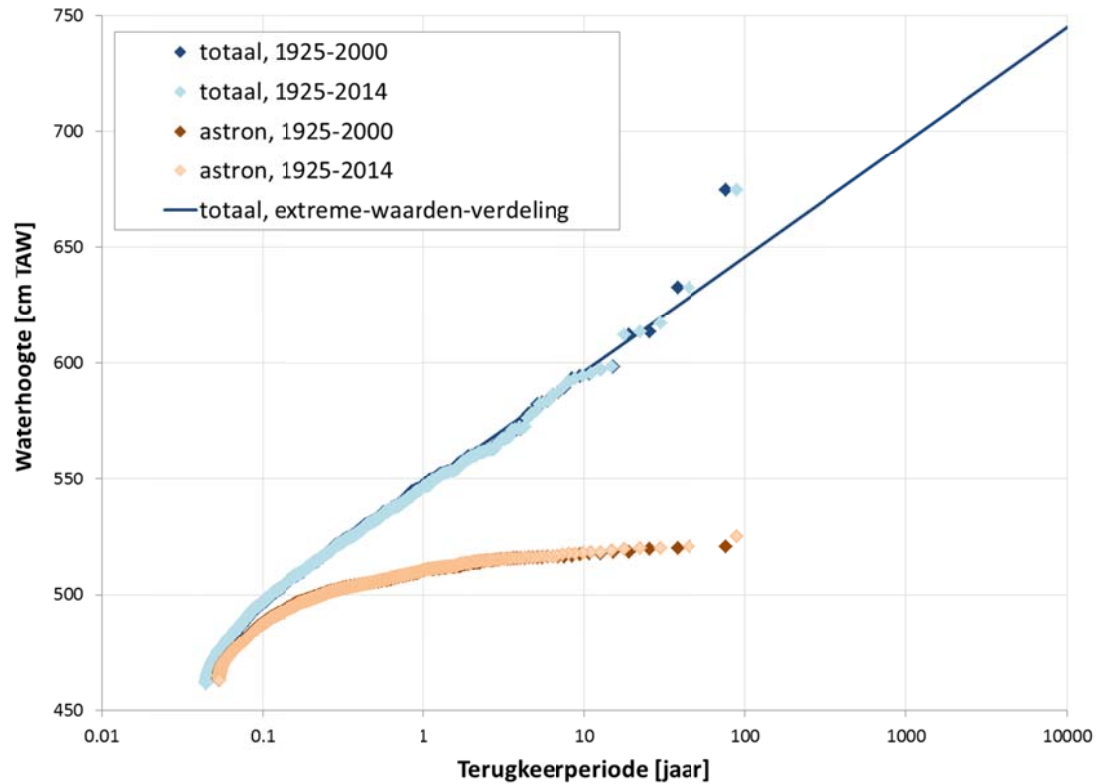
### 3.5 Resultaten extreme-waarden-analyse

Figuur 5 toont de vergelijking tussen de empirische hoogwaterextremen te Oostende, zoals bekomen in de vorige studie o.b.v. de metingen t.e.m. het jaar 2000, en deze aangevuld met de meer recente metingen t.e.m. juni 2014. Op de metingen t.e.m. 2000 werd, zoals in de studie van 2007, een trendcorrectie toegepast met 1.8 mm/jaar om alle metingen naar het referentiejaar 2000 te brengen. Op de nieuwe metingen is bij de opmaak van Figuur 5 geen trendcorrectie toegepast.

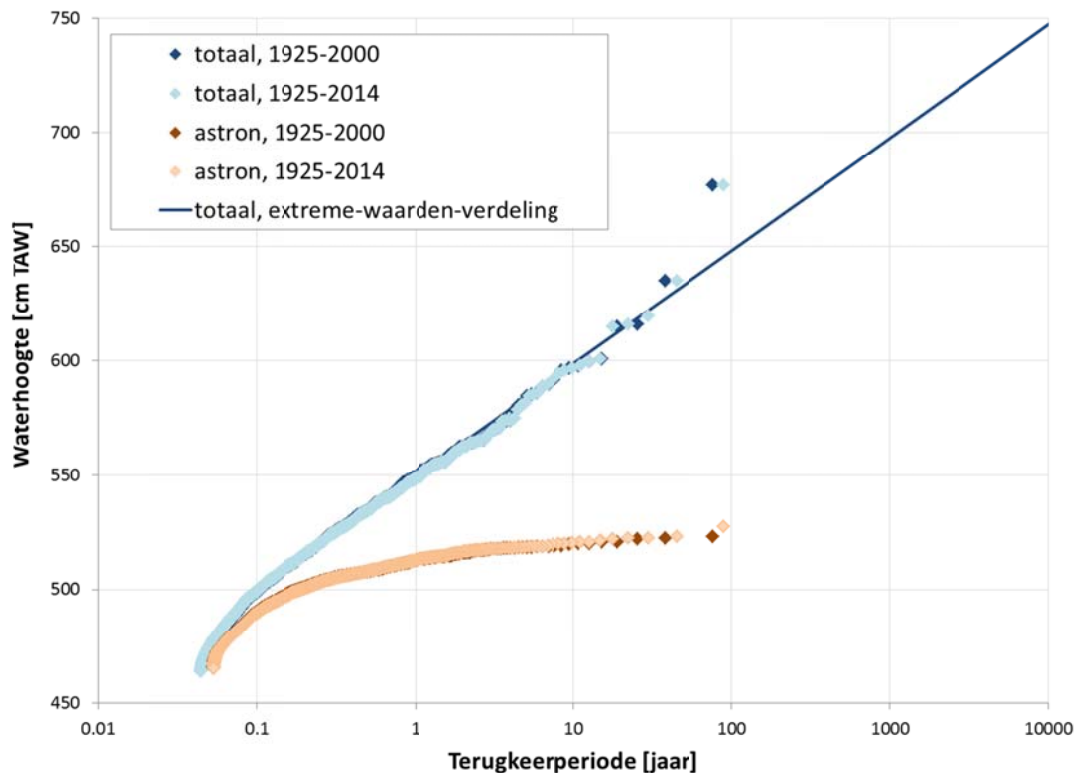
In Figuur 5 wordt naast de empirische hoogwaterextremen ook de extreme-waarden-verdeling weergegeven, die in de vorige studie aan de empirische extremen – na trendcorrectie – werd gekalibreerd. De meer recente extremen blijken volledig in de lijn te liggen van de vroegere extremen. Herkalibratie van de extreme-waarden-verdeling levert geen significante opschuiving op. Hoofdconclusie van deze extreme-waarden-analyse is dus dat de overschrijdingskromme afgeleid in de studie van 2007, nagenoeg ongewijzigd geldig blijft.

Indien het referentiejaar 2000 wordt vervangen door het huidige jaar 2014 (dus trendcorrectie van 1.8 mm/jaar toegepast op alle metingen voor 2014), treedt een kleine verschuiving op; de overschrijdingskromme van Figuur 6 wordt dan bekomen.

Voor de volledigheid geeft Tabel 1 de geactualiseerde parameterwaarden van de GPD extreme-waarden-verdeling, gekalibreerd aan de volledige meetperiode 1925-2014, en geldig voor het nieuwe referentiejaar 2014.



**Figuur 5: Vergelijking van de extreme-waarden-verdeling en bijhorende overschrijdingskromme met de empirische extreme totale and astronomische hoogwaterhoogten te Oostende, exclusief en inclusief de recente extremen voor 2000-2014, voor referentiejaar 2000.**



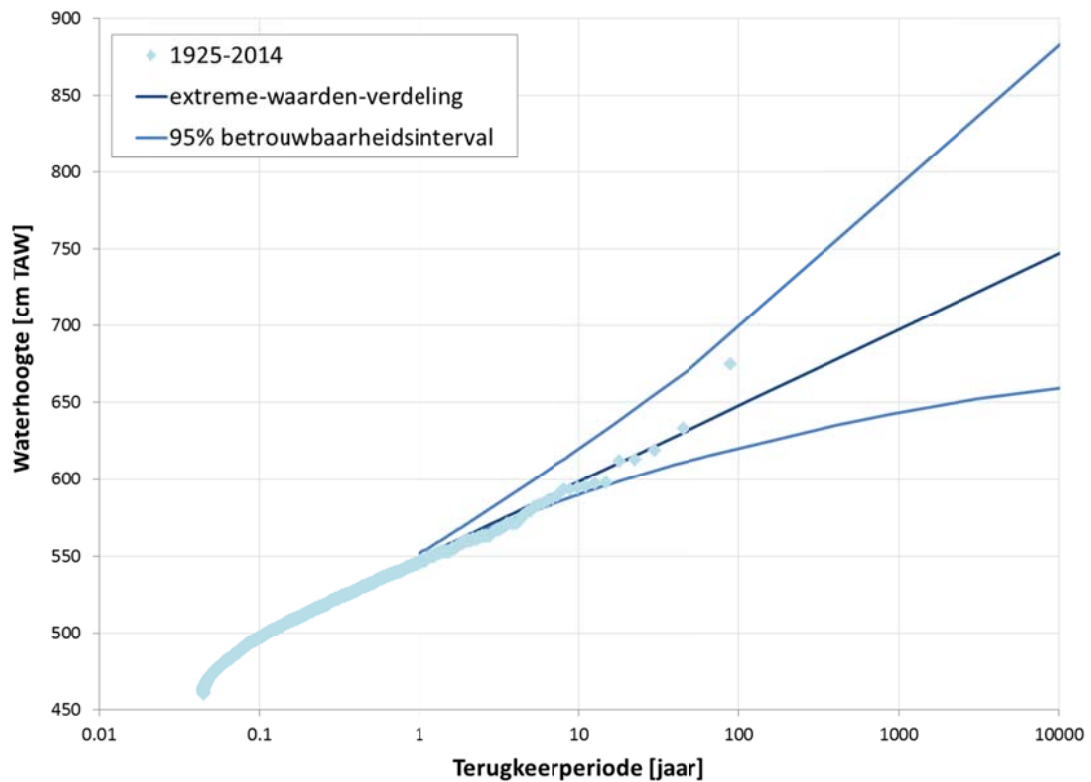
**Figuur 6: Vergelijking van de extreme-waarden-verdeling en bijhorende overschrijdingskromme met de empirische extreme totale and astronomische hoogwaterhoogten te Oostende, exclusief en inclusief de recente extremen voor 2000-2014, voor referentiejaar 2014.**

### 3.6 Betrouwbaarheidsintervallen

Voor de berekening van de betrouwbaarheidsintervallen werd in Willems (2007) de parametrische bootstrapmethode toegepast. Deze methode is gebaseerd op een groot aantal herkalibraties van de extreme-waarden-verdeling, telkens na een willekeurige trekking van waterhoogten uit de hiervoor gekalibreerde verdeling. Het aantal waarden dat willekeurig wordt getrokken is gelijk aan de oorspronkelijke steekproefomvang (aantal historische waarnemingen). Rangschikking van de kwantielwaarden bij de also bekomen verdelingen laat toe om boven- en onderlimieten te bekomen van deze kwantielwaarden volgens bepaalde (vb. 95%) betrouwbaarheidsintervallen.

Door de iets langere meetreeks (grotere steekproef) worden de betrouwbaarheidsintervallen iets smaller in vergelijking met deze afgeleid in Willems (2007), maar het verschil is zeer beperkt.

Figuur 7 toont de bekomen boven- en onderlimieten voor de extreme-waarden-verdeling van de totale hoogwaterhoogte, voor het nieuwe referentiejaar 2014. Terwijl de mediaan-verdeling overeenstemt met een normale staart, heeft de bovenlimiet-verdeling een zware staart en de onderlimiet-verdeling een lichte staart. Tabel 1 geeft de bijhorende parameterwaarden.



**Figuur 7: 95% betrouwbaarheidsintervallen op de extreme-waarden-verdeling en bijhorende overschrijdingskromme op basis van de empirische extreme totale hoogwaterhoogten te Oostende, inclusief de recente extremen voor 2000-2014, voor referentiejaar 2014.**

	Parameters GPD-verdeling waterhoogte-extremen			
	$\gamma$	$\beta$ [cm]	$x_t$ [cm TAW]	$T$
Mediaan	0	21.55	539	137
Bovenlimiet 68%-betr.interval	0.03	23.8	539	137
Onderlimiet 68%-betr.interval	-0.07	21.0	539	137
Bovenlimiet 95%-betr.interval	0.05	27.5	539	137
Onderlimiet 95%-betr.interval	-0.13	22.0	539	137

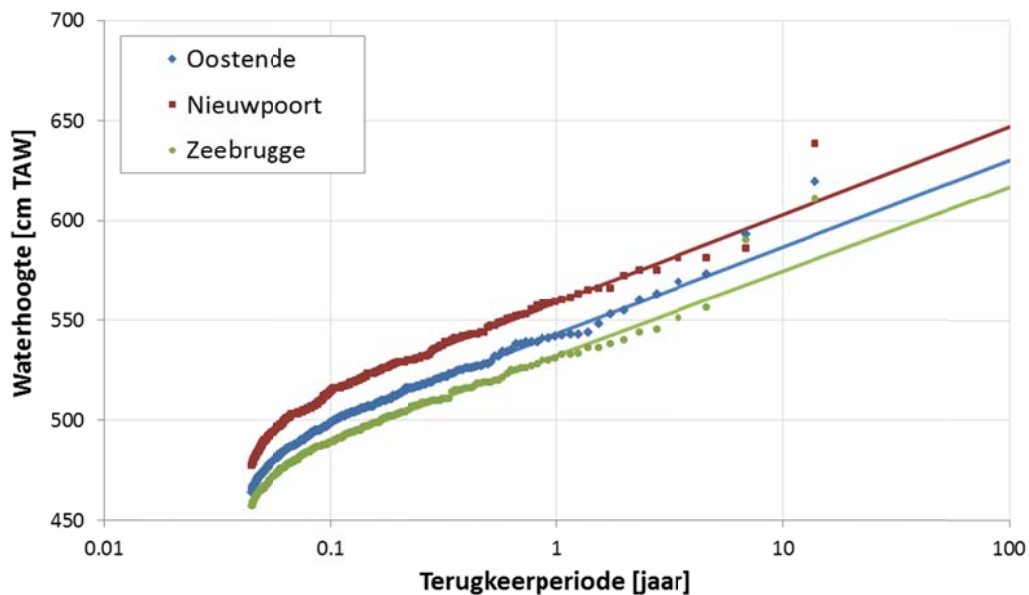
**Tabel 1: Gekalibreerde modelparameters van de GPD extreme-waarden-verdeling voor de totale hoogwaterhoogten te Oostende voor de totale periode 1925-2014, en de 68%- en 95%-betrouwbaarheidsintervallen, voor referentiejaar 2014.**

De bijhorende overschrijdingskrommen worden bekomen via de formule (3) voor de berekening van de terugkeerperiode, na invulling van de formule van de GPD extreme-waarden-verdeling voor  $G(x)$ . De formule voor  $G(x)$  is deze van vergelijking (1) bij een normale staart ( $\gamma=0$ ), of formule (2) bij een zware of lichte staart ( $\gamma < > 0$ ). De parameterwaarden staan vermeld in Tabel 1. De lengte van de meetreeks is  $n = 89$  jaar.

## 4 Vergelijking extreme-waarden-analyse hoog- en laagwaters Oostende, Nieuwpoort en Zeebrugge

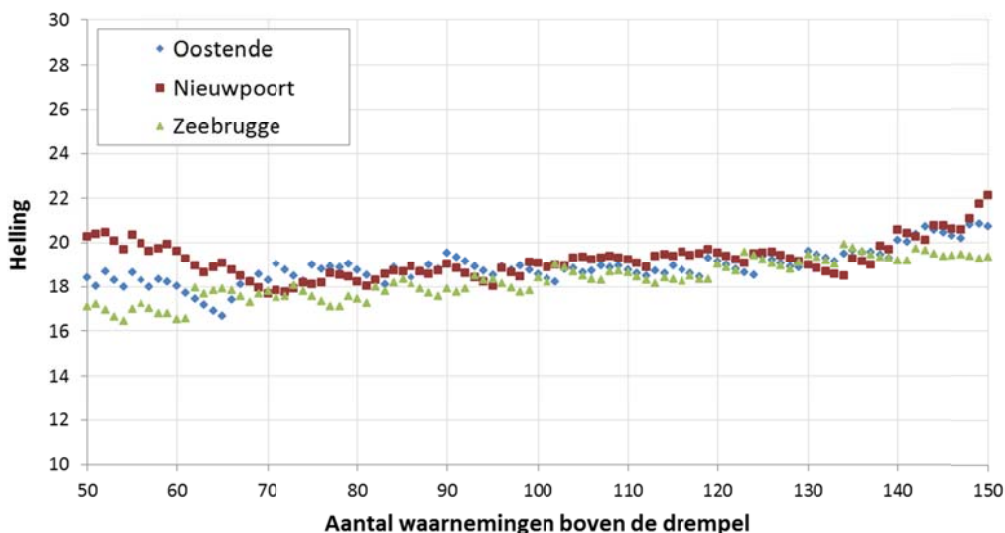
In de nieuwe hoogwatergegevens zijn voor de periode van 1 september 2000 t.e.m. 30 juni 2014 niet enkel de hoogwaterstanden beschikbaar voor Oostende, maar ook voor Nieuwpoort en Zeebrugge. Deze periode 13.8 jaar is te kort voor een nauwkeurige extreme-waarden-analyse, maar de gegevens kunnen wel gebruikt worden om het systematisch verschil in hoogwaterstanden te analyseren. Gemiddeld voor de terugkeerperioden tussen 0.1 en 13.8 jaar en afgerond zijn de hoogwaterstanden in Nieuwpoort 16 cm hoger dan in Oostende, en in Zeebrugge 11 cm lager dan in Oostende (zie Figuur 8).

Naast deze verschuiving van de overschrijdingskromme (verhoging voor meer de zuidelijke locatie Nieuwpoort, verlaging voor de meer noordelijke locatie Zeebrugge), worden op basis van de beperkte meetperiode van 13.8 jaar geen sterke verschillen vastgesteld in de vorm van de overschrijdingskromme. Het staartgedrag van de extreme-waarden-verdeling is voor alle 3 de locaties normaal (extreme-waarden-index  $\gamma=0$ ). De waarde van de parameter  $\beta$  van de GPD extreme-waarden-verdeling (helling van de verdeling in Figuur 8) vertoont wel kleine verschillen. Dit betekent dat de extreme-waarden-verdeling van hoogwaterstanden (overschrijdingskromme) te Oostende niet zomaar met 16 cm kan verhoogd worden om de overschrijdingskromme te Nieuwpoort te bekomen, of met 11 cm verlaagd om de overschrijdingskromme te Zeebrugge te bekomen (eventueel wel benaderend). De meetperiode is echter te kort om een nauwkeurige inschatting te bekomen van het ruimtelijk verschil in de  $\beta$ -parameterwaarde. Wel kunnen ruwe inschattingen worden gemaakt.



**Figuur 8: Vergelijking van de extreme-waarden-verdelingen en bijhorende overschrijdingskrommen afgeleid in de studie Willems (2007) met de empirische extreme totale hoogwaterhoogten te Oostende, Nieuwpoort en Zeebrugge voor de periode 2000-2014.**

Figuur 9 geeft het verschil weer in de schatting van de parameter  $\beta$  van de GPD extreme-waarden-verdeling versus de drempelwaterhoogte  $x_t$  boven dewelke deze parameter wordt geschat. Zoals hierboven toegelicht, komt de parameter  $\beta$  overeen met de helling van de overschrijdingskromme (de helling van de staart van de extreme-waarden-verdeling, zoals aangeduid via de gehelde lijnen in Figuur 8). Het verschil in helling tussen de drie locaties Oostende, Nieuwpoort en Zeebrugge is zeer beperkt. Er is wel een klein verschil merkbaar naar een iets steilere helling van de overschrijdingskromme te Nieuwpoort en een iets zwakkere helling te Zeebrugge.



**Figuur 9: Helling van de empirische overschrijdingskrommen (parameter  $\beta$  van de GPD extreme-waarden-verdeling) versus het aantal waarnemingen boven de beschouwde drempel, voor de empirische extreme totale hoogwaterhoogten te Oostende, Nieuwpoort en Zeebrugge voor de periode 2000-2014.**

Het concrete verschil in helling boven de optimale drempel staat gekwantificeerd in Tabel 3. Merk op dat voor Oostende de optimale  $\beta$ -parameterwaarde ( $\beta = 18.88$ ) verschilt van de optimale waarde ( $\beta = 21.55$ ) op basis van de volledige meetreeks (zie Tabel 1). Dit verschil is het gevolg van de veel kortere meetreeks 2000-2014 i.v.m. de volledige meetreeks vanaf 1925. Het gebruik van een kortere meetreeks zorgt voor een grotere onzekerheid op de parameterschatting. De schatting kan bovendien vertekend zijn door het voorkomen van langjarige schommelingen in de hoogwaterstanden (zie Deel 5). Daarom is in Tabel 3 ook het relatieve verschil weergegeven. Dit relatieve verschil zou gebruikt kunnen worden om de overschrijdingskromme te Oostende benaderend te corrigeren. De nadruk wordt hier gelegd op “benaderend” want de correctiefactoren zijn gebaseerd op de kortere periode 2000-2014. Indien later bijkomende meetwaarden (voor een langere meetperiode) beschikbaar zouden komen voor Nieuwpoort en Zeebrugge, kan de nauwkeurigheid van deze correctiefactoren verder verhoogd worden. Mogelijks kunnen ze ook via modellering van de kuststroming (hydrodynamische modellering) nauwkeuriger ingeschat worden (afhankelijk van de fysische nauwkeurigheid van zulke modellering)?

Het overeenkomstige verschil in de optimale drempelwaterhoogte (parameter  $x_t$ ) voor Nieuwpoort en Zeebrugge staat gekwantificeerd in Tabel 3.

Locatie	$\beta$ parameter GPD-verdeling waterhoogte-extremen	
	$\beta$ [cm]	Vershil t.o.v. Oostende
Nieuwpoort	19.13	+1.3%
Oostende	18.88	-
Zeebrugge	18.35	-2.8%

**Tabel 2: Ruimtelijk verschil in de gekalibreerde  $\beta$ -parameter van de GPD extreme-waarden-verdeling voor de totale hoogwaterhoogten te Nieuwpoort, Oostende en Zeebrugge, op basis van de periode 2000-2014.**

Locatie	$x_t$ -parameter GPD-verdeling waterhoogte-extremen	
	$x_t$ [cm TAW]	Vershil t.o.v. Oostende
Nieuwpoort	527	+15 cm
Oostende	512	-
Zeebrugge	502	-10 cm

**Tabel 3: Ruimtelijk verschil in de gekalibreerde  $x_t$ -parameter van de GPD extreme-waarden-verdeling voor de totale hoogwaterhoogten te Nieuwpoort, Oostende en Zeebrugge, op basis van de periode 2000-2014.**

Op basis van de kortere meetperiode 2000-2014 zou men dus kunnen stellen dat de overschrijdingskromme afgeleid voor Oostende op basis van de langere meetperiode, bij benadering ook geldig is op andere plaatsen langs de Belgische kust, mits het toepassen van correctiefactoren op de parameters  $\beta$  en  $x_t$ . De correctiefactor op  $x_t$  houdt rekening met het systematische verschil in hoogwaterstanden (voor de lagere terugkeerperioden) tussen de verschillende locaties, zoals gevisualiseerd in Figuur 8 (+15 cm te Nieuwpoort, -10 cm te Zeebrugge). De correctiefactor op  $\beta$  houdt er rekening mee dat dit systematisch verschil in hoogwaterstanden toeneemt met toenemende terugkeerperiode (in Nieuwpoort is deze toename sterker dan in Oostende, in Zeebrugge is deze toename lager). Tabel 4 geeft een meer concreet beeld van hoe die toename hoogwaterstand er precies uitziet i.f.v. de terugkeerperiode, indien de ruimtelijke variaties in parameterwaarden  $\beta$  en  $x_t$  uit Tabel 2 en Tabel 3 worden toegepast.

Voor andere locaties langs de kust zou geïnterpoleerd kunnen worden; al dan niet op basis van de resultaten van hydrodynamische modellering.

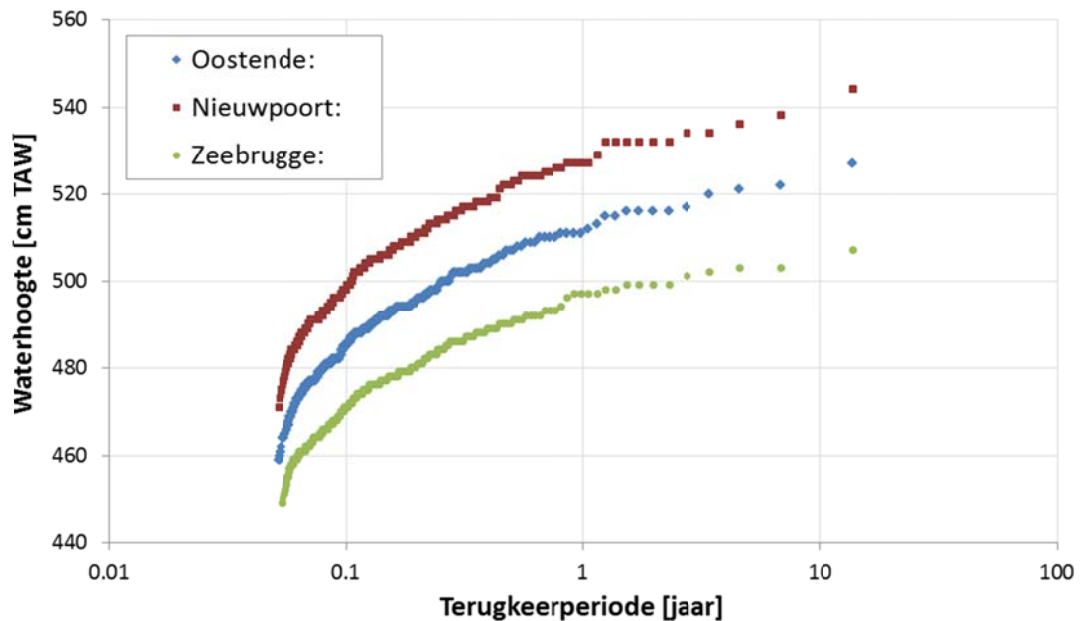


Locatie	Terugkeerperiode [jaar]				
	1	10	100	1000	10000
Nieuwpoort	+15.7cm	+16.3cm	+16.9cm	+17.4cm	+18cm
Oostende	-	-	-	-	-
Zeebrugge	-10.7cm	-11.9cm	-13.1cm	-14.3cm	-15.6cm

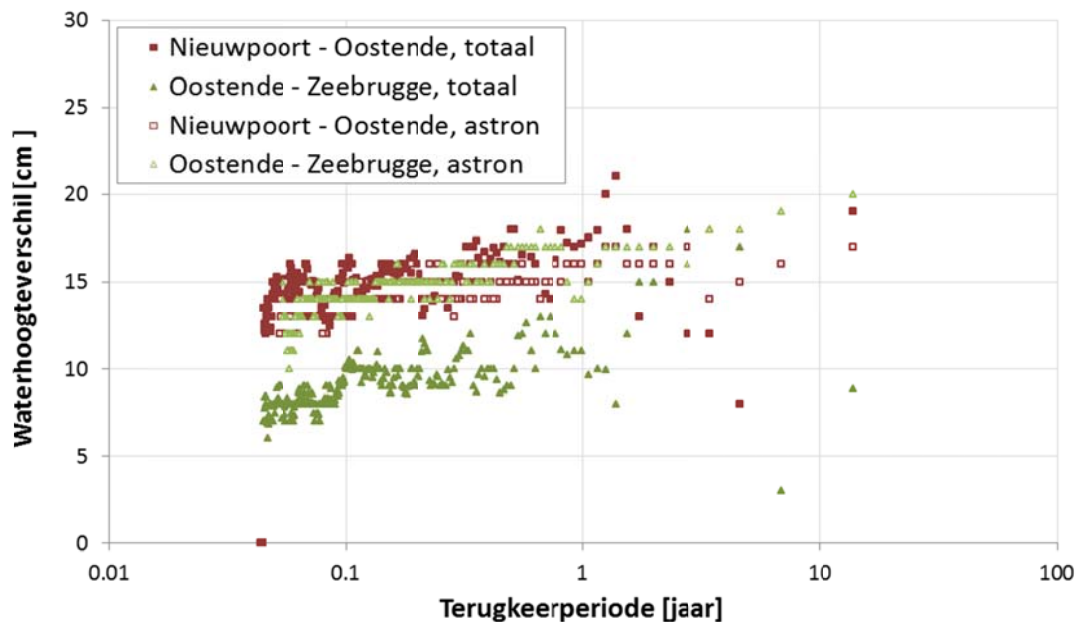
**Tabel 4: Ruimtelijk verschil in totale kustwaterhoogten i.f.v. de terugkeerperiode, na kalibratie van de GPD extreme-waarden-verdeling te Nieuwpoort, Oostende en Zeebrugge voor de periode 2000-2014.**

Verdere analyse geeft aan dat het verschil in astronomische tijamplitude, en dus het verschil in astronomische hoogwaterhoogten, tussen de drie locaties (Oostende, Nieuwpoort, Zeebrugge) grotendeels het systematisch verschil in hoogwaterextremen verklaart op de drie locaties. Zie Figuur 10 voor de empirische overschrijdingskromme van de astronomische hoogwaterhoogte voor de periode 2000-2014. Wanneer in functie van de empirische terugkeerperiode het verschil in hoogwaterhoogte wordt geanalyseerd tussen Nieuwpoort en Oostende en tussen Oostende en Zeebrugge (Figuur 11), blijkt dat het systematisch verschil van 15 cm in totale hoogwaterhoogte tussen Nieuwpoort en Oostende haast volledig verklaard wordt door het verschil in astronomische hoogwaterhoogte. Het systematisch verschil van 10 cm in totale hoogwaterhoogte tussen Oostende en Zeebrugge blijkt anderzijds minder dan het systematisch verschil in astronomische hoogwaterhoogten tussen deze locaties. Dit laatste verschil blijkt vergelijkbaar met het verschil in astronomische hoogwaterhoogte tussen Nieuwpoort en Oostende: ongeveer 15 cm. Onder de veronderstelling dat de totale en astronomische hoogwatergegevens nauwkeurig zijn, moet dit verschil dus het gevolg zijn van systematisch hogere stormopzethoogten te Zeebrugge in vergelijking met Oostende. De astronomische hoogwaterhoogten kunnen evenwel een onzekerheid van een 5tal cm vertonen (zie deel 2 van dit rapport), wat dus ook een verklaring kan zijn.

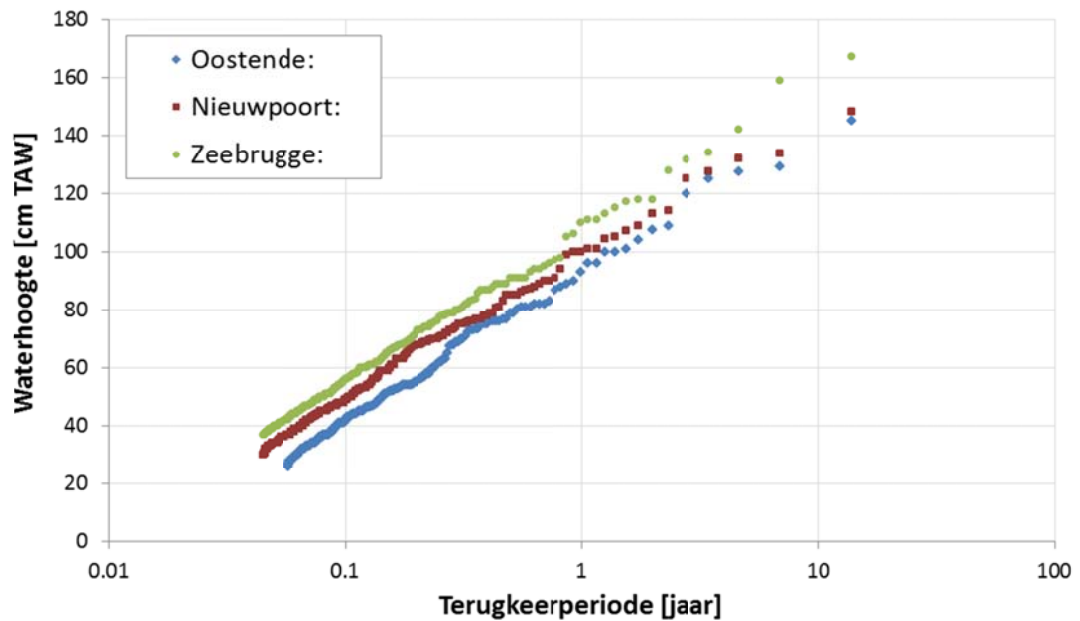
Voor Nieuwpoort en Oostende worden op basis van de resultaten in Figuur 11 vergelijkbare stormopzethoogten verwacht. Dit wordt bevestigd in Figuur 12. De verschillen in extreme stormopzethoogten zijn wel groter dan het systematisch verschil in extreme totale versus astronomische hoogwaterhoogten, maar dat is waarschijnlijk het gevolg van het gebruik van scheve i.p.v. rechte stormopzethoogten in Figuur 12. Bij de extreme scheve stormopzethoogten is het systematisch verschil ongeveer 5 cm tussen Nieuwpoort en Oostende, en ongeveer 15 cm tussen Zeebrugge en Oostende (Figuur 13). Op basis van de analyses van de extreme totale en astronomische hoogwaterhoogten wordt een kleiner verschil verwacht van ongeveer 0 cm tussen Nieuwpoort en Oostende, en ongeveer 5 cm tussen Zeebrugge en Oostende.



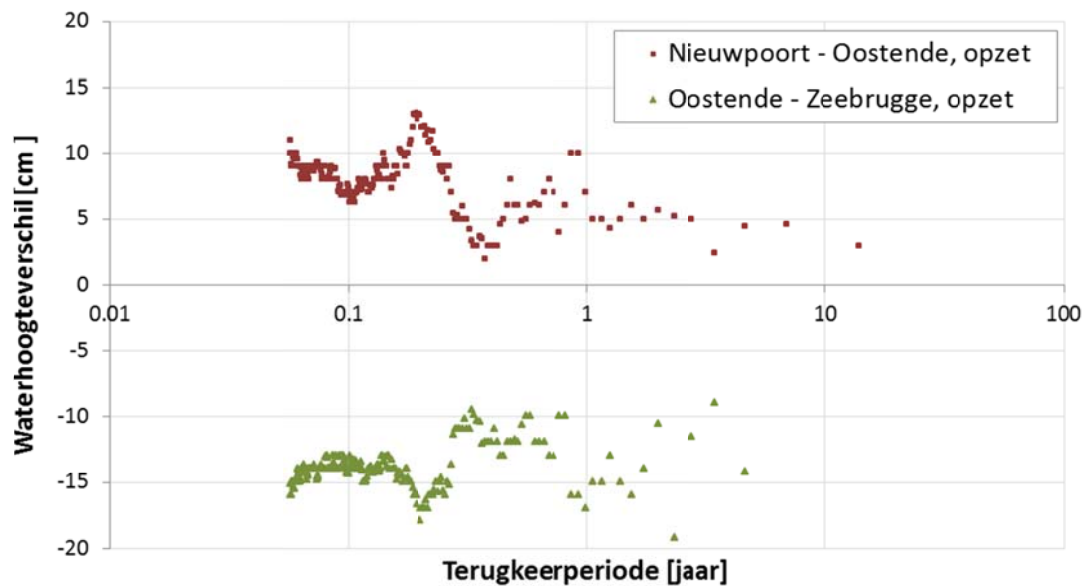
Figuur 10: Vergelijking van de empirische extreme astronomische hoogwaterhoogten te Oostende, Nieuwpoort en Zeebrugge voor de periode 2000-2014.



Figuur 11: Vergelijking van het verschil in totale en astronomische hoogwaterhoogten tussen Nieuwpoort en Oostende, en tussen Oostende en Zeebrugge versus de empirische terugkeerperiode voor de periode 2000-2014.



Figuur 12: Vergelijking van de empirische extreme scheve stormopzethoogten te Oostende, Nieuwpoort en Zeebrugge voor de periode 2000-2014.

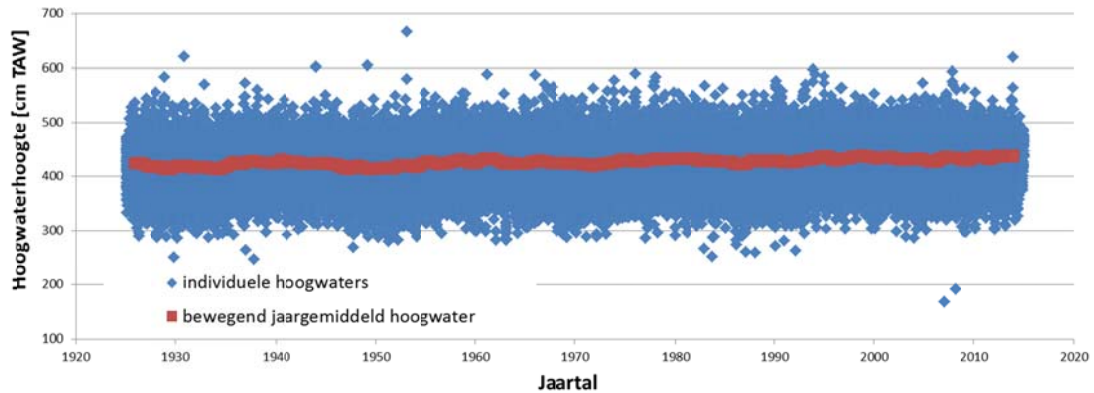


Figuur 13: Vergelijking van het verschil in stormopzethoogten tussen Nieuwpoort en Oostende, en tussen Oostende en Zeebrugge versus de empirische terugkeerperiode voor de periode 2000-2014.

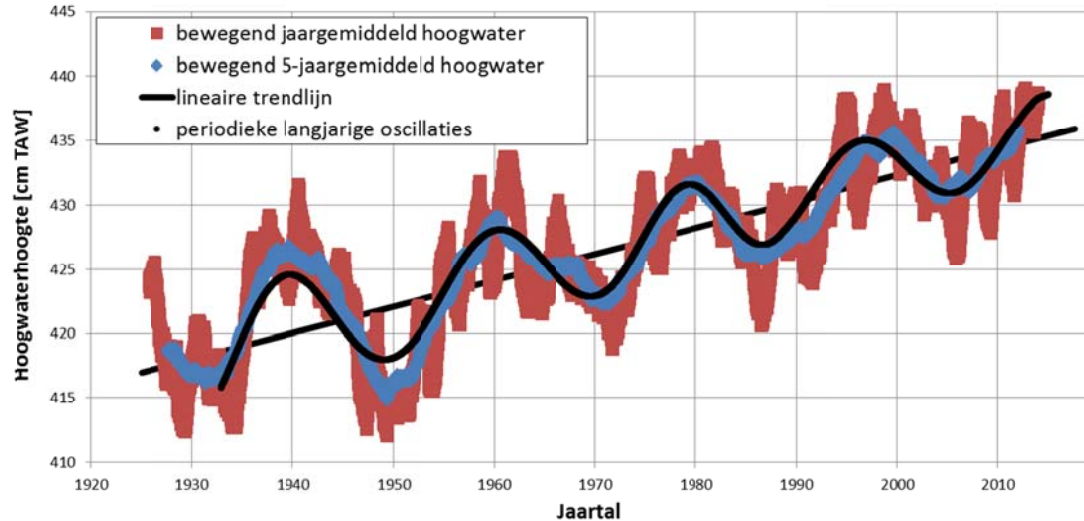
## 5 Trendstijging hoogwaters Oostende

### 5.1 Trendstijging totale hoogwaters

De hoogwaters (totale waterhoogten) te Oostende werden aan een trendanalyse onderworpen. Ook werden de langjarige schommelingen onderzocht. Hiertoe werden de hoogwaters uitgemiddeld over bewegende vensters van 1 jaar en 5 jaar; zie Figuur 14 en Figuur 15. Merk het jaar met ontbrekende hoogwatergegevens in 1980.



**Figuur 14:** Tijdreeks van de totale hoogwaterhoogten te Oostende voor 1925-2014, voor en na uitmiddeling op basis van een bewegend venster met een periode van 1 jaar.



**Figuur 15:** Analyse van trend en langjarige schommelingen voor de totale hoogwaterhoogten te Oostende voor 1925-2014, na uitmiddeling op basis van een bewegend venster over perioden van 1 jaar en 5 jaar.

Er wordt een gemiddelde, bij benadering lineaire trendstijging vastgesteld van de hoogwaterstanden, van 0,20 cm per jaar (dus 20 cm over 100 jaar). Deze stijging is vergelijkbaar met de elders gerapporteerde stijging in de gemiddelde zeespiegel (vb. CLIMAR-studie; Van den Eynde et al., 2008).

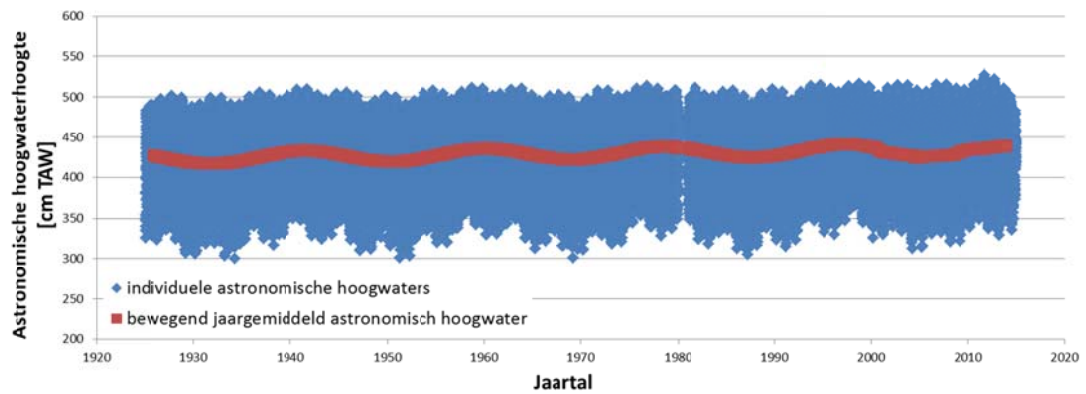
Bovenop deze gemiddelde, lineaire trendstijging doet zich een nagenoeg periodieke schommeling voor met een periode van 18.61 jaar, wat overeenkomt met de welbekende "nodale tijcyclus". Deze periodieke schommeling wordt fysisch verklaard door het baanvlak van de maan dat een hoek van 5° maakt met de ecliptica en met een periodieke periode van 18.61 jaar om de as loodrecht daarop schommelt. Overeenkomstig schommelt ook de aantrekkingskracht van de maan op het wateroppervlak.

Over de meetperiode van 1925 t.e.m. 2014 is er geen significante versnelling of verzwakking van de lineaire langjarige trend merkbaar. De lichte stijging sinds 2010 is het gevolg van de stijgende flank van de nodale tijcyclus (zie Figuur 15), eerder dan een versnelling van de langjarige trend. Wel wordt opgemerkt dat de schommelingsamplitude (de amplitude van de nodale tijcyclus) systematisch afneemt: van +/- 5 cm in de jaren 1940 tot +/- 3 cm in de meest recente periode. De fysische verklaring hiervoor is niet meteen duidelijk. Mogelijks is er ook een invloed van temporele veranderingen in de locatie en type van maregraaf, de wijze waarop de hoogwaterstanden worden afgeleid uit de metingen (al dan niet ogenblikkelijk), de gewijzigde invloed van de havens langs de kust, enz.

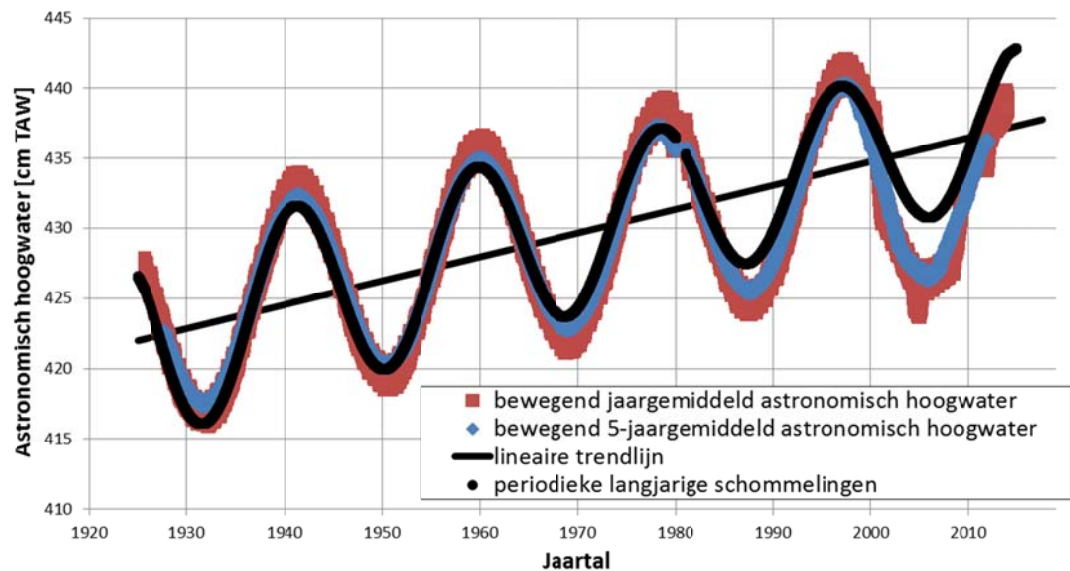
## 5.2 Trendstijging astronomische hoogwaters

Dezelfde analyse uitgevoerd op de astronomische hoogwaters geeft de resultaten voorgesteld in Figuur 16 en Figuur 17. Voor de nieuwe astronomische hoogwaterhoogten worden vanaf 2000 wat lagere waarden vastgesteld in vergelijking met de extrapolatie op basis van de lineaire regressielijn en de nodale tijcyclus. Na correctie met +5 cm (zie ook Deel 2) worden juistere waarden bekomen: Figuur 18 en Figuur 19.

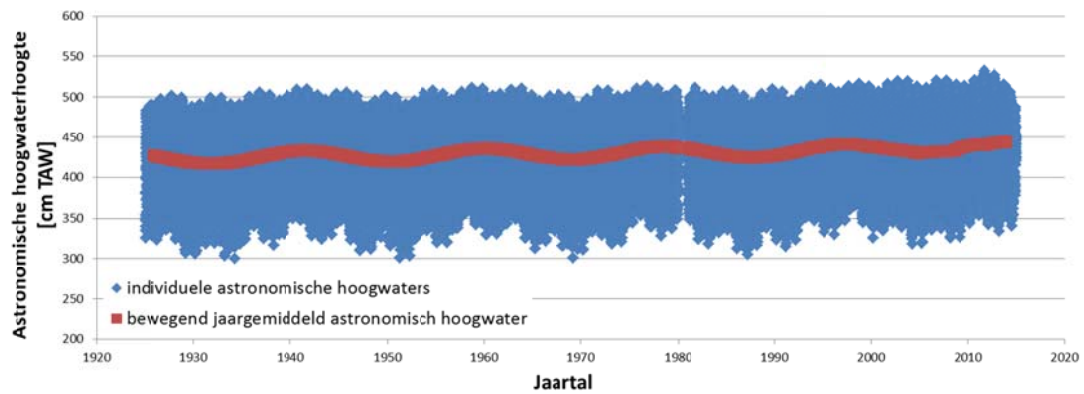
Uit deze tijdreeksanalyse blijkt dat de nodale tijcyclus effectief in hoofdzaak bepaald worden door de astronomische component (Figuur 20). Ook de lineaire trend is aanwezig in de astronomische component. Deze trend is wel minder groot dan voor de totale hoogwaterhoogte: 0,175 cm per jaar (17,5 cm over 100 jaar). De nodale tijcyclus heeft een grotere amplitude dan voor de totale hoogwaterhoogte: van +/- 7.5 cm in de jaren 1940 tot +/- 5 cm in de meest recente periode. In Figuur 21 wordt deze lineaire trend en nodale tijcyclus o.b.v. de astronomische component vergeleken met de tijdreeks van uitgemiddelde totale hoogwaterhoogten. De lineaire trendlijn o.b.v. van de astronomische component blijkt systematisch enkele cm hoger dan deze op basis van de totale hoogwaterhoogte, maar met een iets minder sterke toename in de tijd (0,175 cm per jaar voor de astronomische component versus 0,20 cm per jaar voor de totale hoogwaterhoogte).



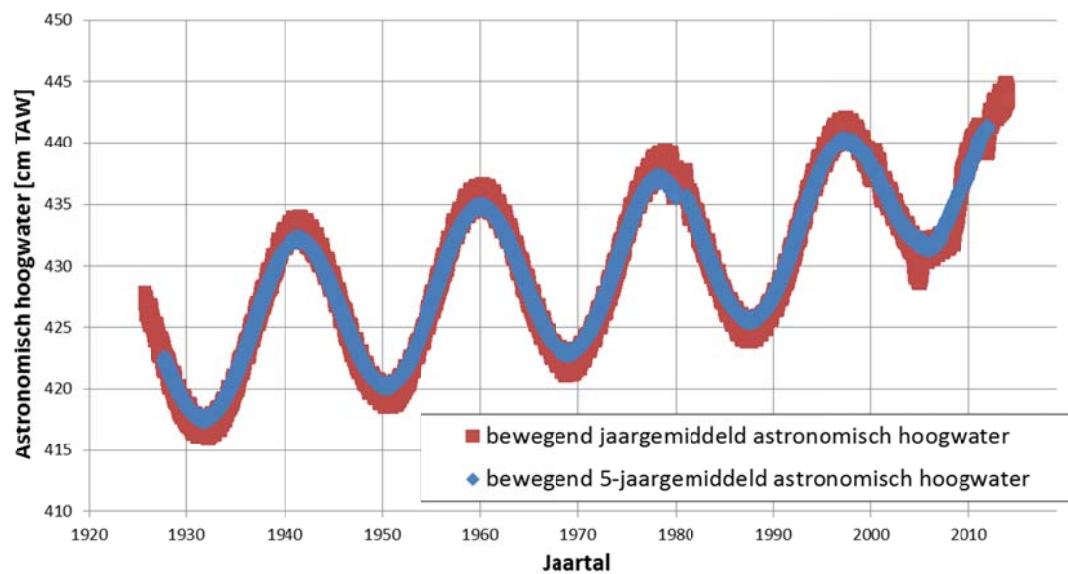
**Figuur 16:** Tijdreeks van de astronomische hoogwaterhoogten te Oostende voor 1925-2014, voor en na uitmiddeling op basis van een bewegend venster met een periode van 1 jaar.



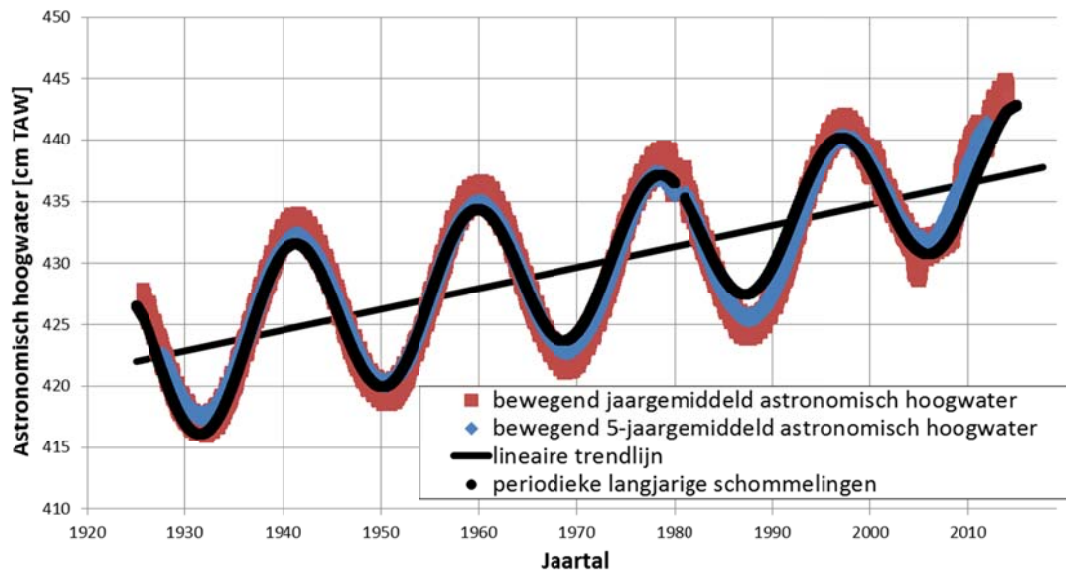
**Figuur 17:** Tijdreeks van de astronomische hoogwaterhoogten te Oostende voor 1925-2014, na uitmiddeling op basis van een bewegend venster over perioden van 1 jaar en 5 jaar.



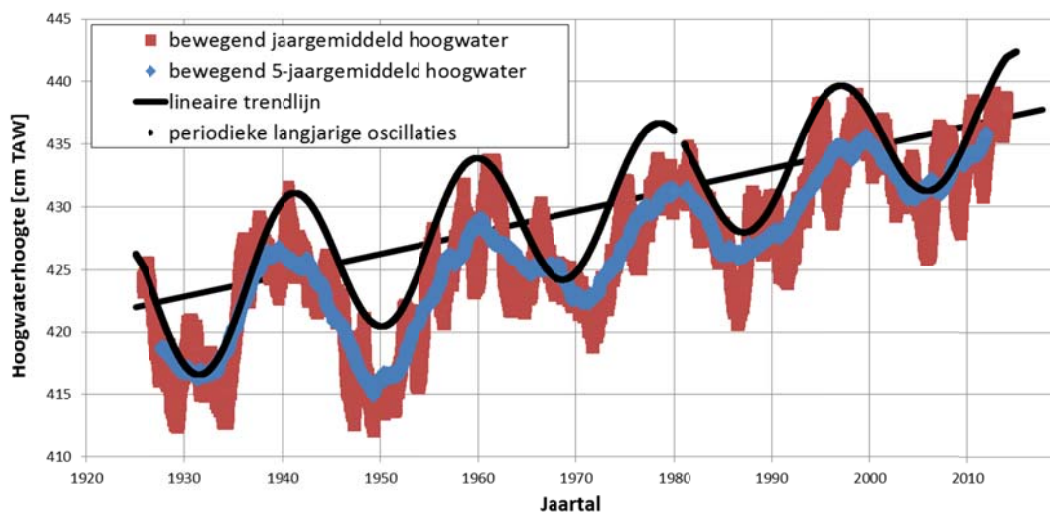
**Figuur 18:** Tijdreeks van de astronomische hoogwaterhoogten te Oostende voor 1925-2014, voor en na uitmiddeling op basis van een bewegend venster met een periode van 1 jaar, na correctie van de nieuwe astronomische hoogwaterhoogten vanaf 2000 met +5 cm.



**Figuur 19:** Tijdreeks van de astronomische hoogwaterhoogten te Oostende voor 1925-2014, na uitmiddeling op basis van een bewegend venster over perioden van 1 jaar en 5 jaar, na correctie van de nieuwe astronomische hoogwaterhoogten vanaf 2000 met +5 cm.



**Figuur 20:** Analyse van trend en langjarige schommelingen voor de astronomische hoogwaterhoogten te Oostende voor 1925-2014, na uitmiding op basis van een bewegend venster over perioden van 1 jaar en 5 jaar, na correctie van de nieuwe astronomische hoogwaterhoogten vanaf 2000 met +5 cm.



**Figuur 21:** Tijdreeks van de totale hoogwaterhoogten te Oostende voor 1925-2014, na uitmiding op basis van een bewegend venster over perioden van 1 jaar en 5 jaar, met toevoeging van de lineaire trendlijn en periodieke langjarige oscillaties o.b.v. de astronomische component.



### 5.3 Trendstijging stormopzet bij hoogwaters

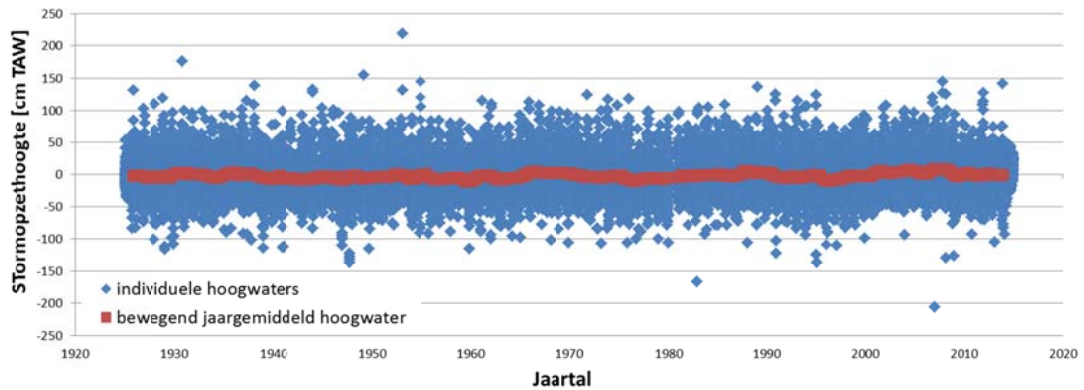
Na aftrekking van de astronomische hoogwaterhoogten van de totale waterhoogten, is de trendanalyse ook uitgevoerd op de stormopzethoogten bij hoogwater. De stormopzethoogten kunnen hierbij op twee manieren berekend worden: de zogenaamde rechte opzet of de scheve opzet. De scheve opzet is deze waarbij de totale hoogwaterhoogte wordt verminderd met de astronomische hoogwaterhoogte tijdens dezelfde tijcyclus, waarbij beiden zich vaak niet op hetzelfde ogenblik voordoen. De rechte opzet is deze waarbij de totale hoogwaterhoogte wordt verminderd met de astronomische waterhoogte op hetzelfde ogenblik. Omdat in de studie van 2007 de scheve stormopzethoogte werd gebruikt, is deze ook hier gebruikt. Figuur 22 en Figuur 23 tonen de resultaten.

Er wordt geen significant lineaire trend gevonden. Vergelijking van de trendanalyse op de totale hoogwaterhoogten en de astronomische hoogwaterhoogten wijst op een verschil van  $0,20 \text{ cm} - 0,175 \text{ cm} = 0,025 \text{ cm/jaar}$ . Vraag is wel of deze kleine trendstijging in de stormopzethoogten bij hoogwater reëel is, of het gevolg is van de berekening van de stormopzethoogte als het verschil tussen het gemeten hoogwater en de berekende astronomische waterhoogte.

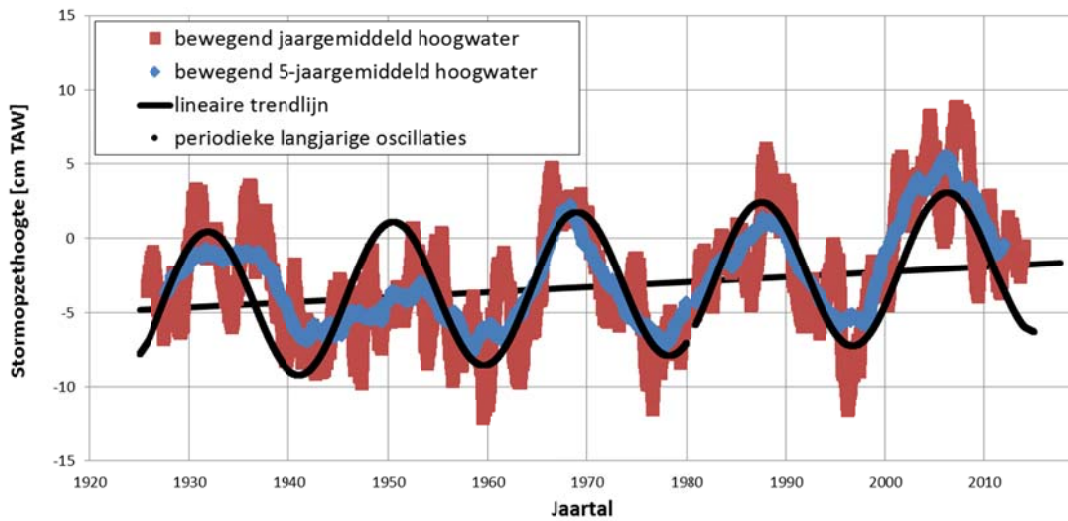
De langjarig gemiddelde stormopzethoogte bij hoogwater bedraagt  $-3.23 \text{ cm}$ . Het is deze negatieve waarde die verklaart waarom de gemiddelde totale hoogwaters lager zijn dan de gemiddelde astronomische hoogwaters (zie Figuur 21).

Dezelfde langjarige schommelingen als bij de totale en astronomische hoogwaterhoogten worden gevonden, maar anti-gecorrleerd met deze van de astronomische hoogwaterhoogten. De amplitude van de schommeling bedraagt ongeveer  $5 \text{ cm}$  (Figuur 23), maar is kleiner voor de periode vóór 1960 en groter voor de meest recente schommelingspiek na 2000. De schommelingshoogte van het stormopzet is meest negatief wanneer de schommelingshoogte van het astronomisch hoogwater meest positief is en omgekeerd. Dit wordt waarschijnlijk verklaard door de invloed die de zeespiegel heeft op het stormopzet. Het is deze anti-correlatie tussen de langjarige schommelingen van de astronomische hoogwaterhoogten en deze van de stormopzethoogten die verklaart waarom de amplitude van de langjarige schommelingen van de totale hoogwaters kleiner is dan de amplitude van het nodale getij (zie Deel 5.2).

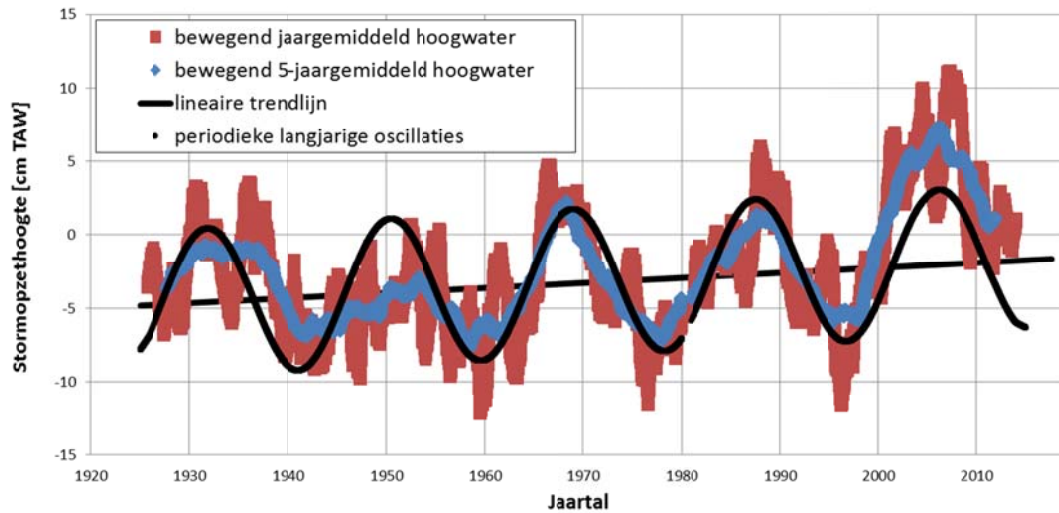
Wanneer voor de nieuwe periode vanaf 2000 rechte stormopzethoogten worden gebruikt i.p.v. scheve, wordt het resultaat van Figuur 24 bekomen. De meest recente schommelingsperiode vertoont nu stormopzethoogten die ongeveer  $5 \text{ cm}$  hoger zijn dan deze van de vroegere stormopzethoogten. Wanneer de rechte stormopzethoogten vanaf 2000 gecorrigeerd worden met  $-5 \text{ cm}$  (komt overeen met de correctie van de astronomische hoogwaterhoogten met  $+5 \text{ cm}$ ; zie Deel 2 en Deel 5.2), wordt het resultaat van Figuur 26 bekomen. De amplitude van de stormopzethoogten wordt voor de meest recente schommelingsperiode nu vergelijkbaar met deze van de vroegere perioden.



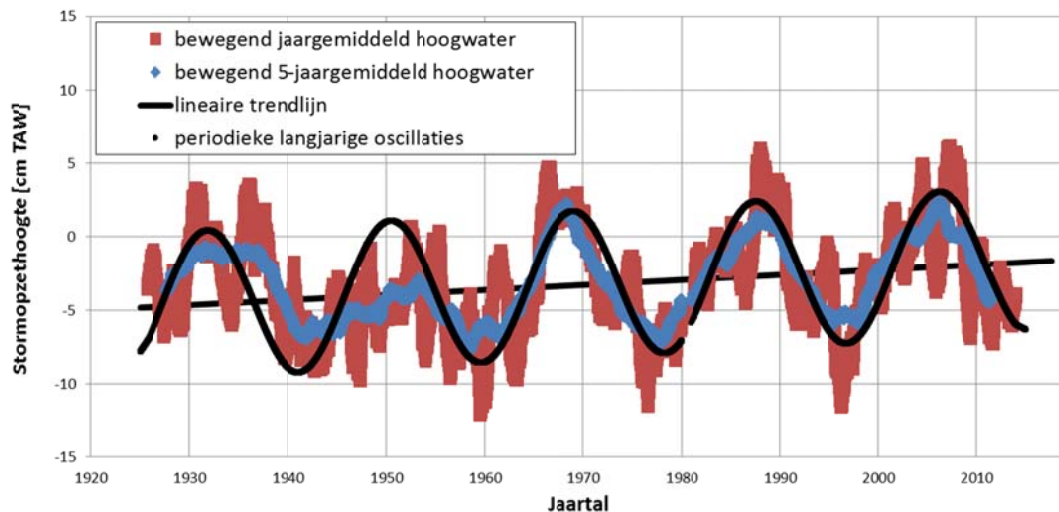
**Figuur 22:** Tijdreeks van de scheve stormopzethoogten bij hoogwater te Oostende voor 1925-2014, voor en na uitmiddeling op basis van een bewegend venster met een periode van 1 jaar.



**Figuur 23:** Analyse van trend en langjarige schommelingen voor de scheve stormopzethoogten bij hoogwater te Oostende voor 1925-2014, na uitmiddeling op basis van een bewegend venster over perioden van 1 jaar en 5 jaar, zonder correctie van de nieuwe astronomische hoogwaterhoogten vanaf 2000 met +5 cm.



**Figuur 24:** Analyse van trend en langjarige schommelingen voor de stormopzethoogten bij hoogwater te Oostende voor 1925-2014, na uitmidingeling op basis van een bewegend venster over perioden van 1 jaar en 5 jaar, na gebruik van rechte stormopzethoogten i.p.v. scheve vanaf 2000.

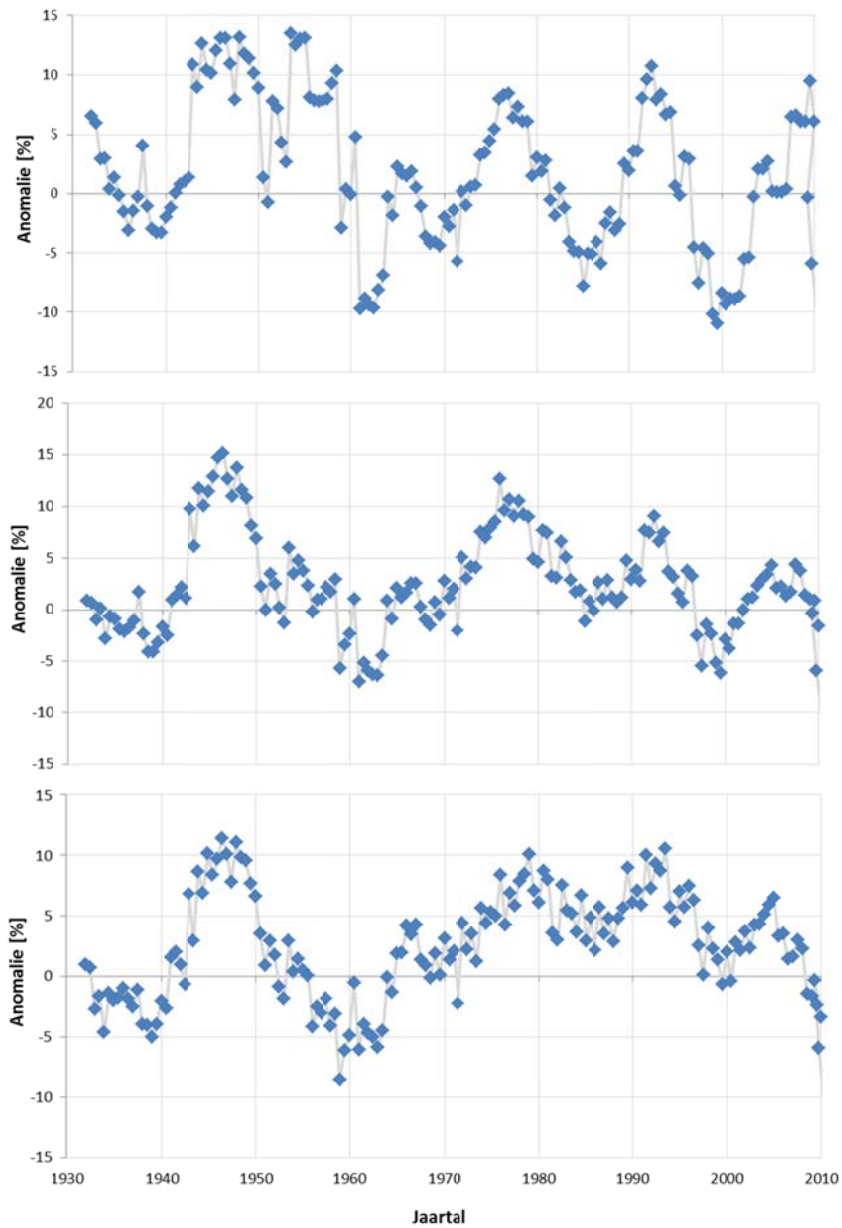


**Figuur 25:** Analyse van trend en langjarige schommelingen voor de stormopzethoogten bij hoogwater te Oostende voor 1925-2014, na uitmidingeling op basis van een bewegend venster over perioden van 1 jaar en 5 jaar, na gebruik van rechte stormopzethoogten i.p.v. scheve vanaf 2000 en na correctie van deze nieuwe stormopzethoogten vanaf 2000 met +5 cm.

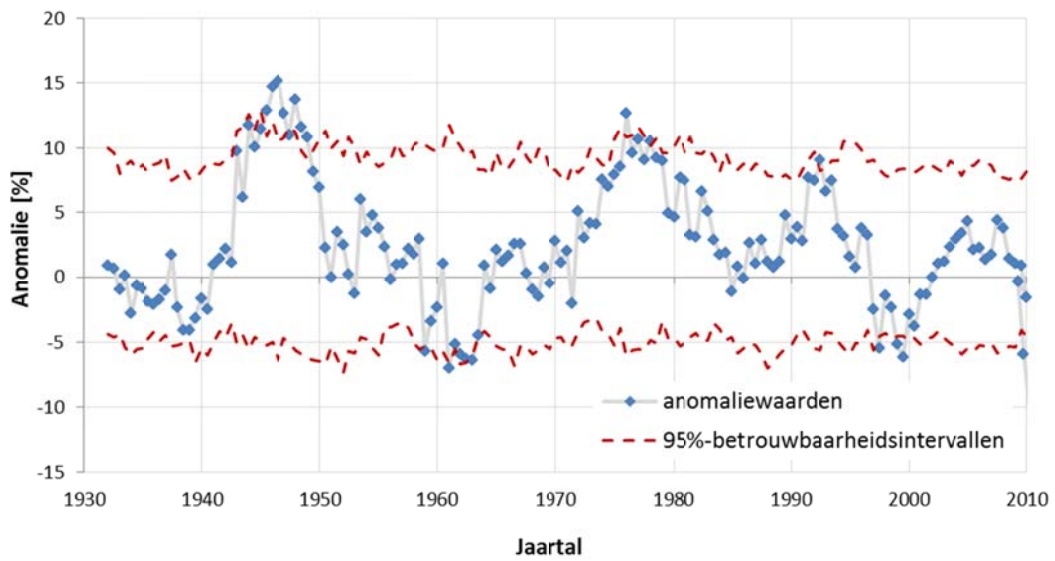
Verder werd een afzonderlijke analyse uitgevoerd op de extreme stormopzethoogten. Er werd nagegaan of extreme stormopzethoogtekwantielen (stormopzethoogten bij welbepaalde grote terugkeerperioden) een significante trend vertonen of ook onderhevig zijn aan langjarige (multi-)decadale schommelingen. Hiertoe werd de methode toegepast die recent door de auteur werd ontwikkeld om (multi-) anomalieën in extreme kwantielwaarden te detecteren (Willems, 2013).

Het resultaat van deze analyse toegepast op de scheve stormopzethoogten wordt getoond in Figuur 26. De anomalie-waarde geeft het % verschil weer in extreme stormopzethoogtekwantielen (dus stormopzethoogtewaarden voor bepaalde hoge terugkeerperioden) indien ze zouden berekend worden op basis van een kortere periode (blokperiode) dan de volledig beschikbare meetperiode. De lengte van de blokperiode werd 15 jaar gekozen voor de analyse in Figuur 26, en alle mogelijke blokperiodes van 15 jaar werden beschouwd volgens een bewegend venster met een tijdstap van 1 jaar: d.w.z. voor de blokperiodes 1925-1939, 1926-1940, enz. De anomaliewaarden in Figuur 26 werden geplotted versus het gemiddeld jaartal van elke blokperiode. De significantie van deze anomaliewaarden wordt getest op basis van de methode van niet-parametrische bootstrapping. Voor meer details bij de methode, zie Willems (2013).

Uit de resultaten in Figuur 26 blijkt dat er bepaalde periodes van 15 jaar zijn waarvoor de extreme kwantielstormopzethoogten tot 10 – 15 % hoger of tot 10% lager zijn in vergelijking met de ganse meetperiode 1925-2014, maar deze volgen niet dezelfde schommelingsperiodes als deze van het nodale getij. Bovendien zijn de schommelingen niet – of slechts voor een beperkt aantal deelperiodes – significant (Figuur 27). Dit wil zeggen dat voor de meeste deelperiodes de schommelingen even goed het gevolg kunnen zijn van toeval dan van het gegroepeerd voorkomen van de stormopzethoogte-extremen in de tijd (multi-decadale oscillaties). Ook is er geen significante trend aanwezig in de stormopzethoogte-extremen. Algemene conclusie van deze analyse is dat de stormopzethoogte-extremen nagenoeg willekeurig in de tijd voorkomen, zonder significante trend of systematische oscillaties/cycli. Wel zijn er bepaalde deelperiodes tijdens dewelke de stormopzethoogte-extremen significant hoger of lager zijn in vergelijking met de langjarige extreme-waarden-statistiek. Voor de meeste recente decaden zijn de stormopzethoogte-extremen niet significant hoger.



**Figuur 26: Anomalie in extreme kwantielwaarden van de scheve stormopzethoogte te Oostende voor 1925-2014, voor blokperioden van 15 jaar, en voor verschillende drempelwaarden voor de kwantielwaarden: (figuur boven) gemiddeld 1 extreme waarde per jaar, (figuur midden) gemiddeld 3 extreme waarden per jaar, (figuur onder) gemiddeld 10 extreme waarden per jaar.**



**Figuur 27: 95%-betrouwbaarheidsintervallen op de anomalieën in extreme kwantielwaarden van de scheve stormopzethoogte te Oostende voor 1925-2014, voor blokperioden van 15 jaar, en voor een drempelwaarde van de stormopzetextremen van gemiddeld 3 extreme waarden per jaar.**

## Referenties

Van den Eynde, D., Francken, F., Ponsar, S., Ozer, J. (2008), 'Evaluation of climate change impacts and adaptation responses for marine activities: CLIMAR - Bepaling van de primaire impacten van klimaatsverandering: statistische analyse van metingen van golven, windsnelheid en –richting en van zeewatertemperatuur', CLIMAR project voor Federaal Wetenschapsbeleid.

Vlaamse Hydrografie (2010), 'Overzicht van de tijwaarnemingen langs de Belgische kust - periode 2001-2010 voor Nieuwpoort, Oostende en Zeebrugge', Rapport van Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Agentschap Maritieme Dienstverlening en Kust, Afdeling Kust, Vlaamse Hydrografie, Oostende, 41 p.

Willems, P. (2007), 'Extreme-waarden-analyse hoogwaterstanden te Oostende', rapport KU Leuven – Afdeling Hydraulica, voor Vlaamse Overheid - Waterbouwkundig Laboratorium, juni 2007, 18 p.

Willems, P., Guillou, A., Beirlant, J. (2007), 'Bias correction in hydrologic GPD based extreme value analysis by means of a slowly varying function'. *Journal of Hydrology*, 338, 221-236.

Willems P. (2013), 'Multidecadal oscillatory behaviour of rainfall extremes in Europe', *Climatic Change*, 120(4), 931–944.





AFDELING HYDRAULICA  
Kasteelpark Arenberg 40 bus 2448  
3001 HEVERLEE (LEUVEN), BELGIË  
tel. + 32 16 32 16 58  
tel. secr. +32 16 32 14 74  
fax + 32 16 32 19 89  
Patrick.Willems@bwk.kuleuven.be  
bwk.kuleuven.be/hydr

