



Faculteit Ingenieurswetenschappen
Departement Burgerlijke Bouwkunde

Afdeling Hydraulica

Kasteelpark Arenberg 40
BE-3001 Heverlee (Leuven)

tel. 016 32 16 58

fax 016 32 19 89

Patrick.Willems@bwk.kuleuven.be

www.kuleuven.be/hydr

Extreme-waarden-analyse hoogwaterstanden te Oostende

Studie uitgevoerd voor
Vlaamse Overheid - Departement Mobiliteit en Openbare Werken
Waterbouwkundig Laboratorium

Eindrapport, juni 2007

Dr. ir. Patrick Willems

Faculteit Ingenieurswetenschappen
Departement Burgerlijke Bouwkunde
Afdeling Hydraulica
Kasteelpark Arenberg 40
BE-3001 Heverlee (Leuven)



tel. 016 32 16 58
fax 016 32 19 89

Patrick.Willems@bwk.kuleuven.be

www.kuleuven.be/hydr

Inhoud

1	Inleiding	1
2	Vertekbasis	1
3	Methode extreme-waarden-analyse	1
4	Selectie onafhankelijke extremen (PDS-reeks).....	2
5	Extreme-waarden-analyse.....	2
5.1	Totale waterhoogte en astronomische component	2
5.2	Stormopzet-component	5
5.3	Convolutie astronomische en stormopzetcomponenten	7
6	Betrouwbaarheidsmarges	9
7	Samengevat.....	11
8	Vergelijking met vroegere studies	12
9	Referenties.....	14

1 Inleiding

Deze studie is uitgevoerd voor het Waterbouwkundig Laboratorium van de Vlaamse Overheid en kadert in voor de afdeling Kust uit te voeren kustoverstromingsrisicoberekeningen. Bedoeling is om in die berekeningen rekening te houden met de onzekerheid op de overschrijdingskromme van de extreme waterstanden. Ook de risico's (=verwachte schade en slachtoffers in 2010-2050) zullen berekend worden rekening houdend met deze onzekerheidsbron.

2 Vertekbasis

Vertrekbasis van de studie zijn de hoogwaterstanden te Oostende 1925-2000, opgemaakt in de studie van Technum-IMDC-Alkyon (2002). Het databestand bevat de gegevens van:

- enerzijds de opzetcomponent;
- anderzijds de astronomische component (inclusief zeespiegelstijging en 18,6 jarige cyclus; de zeespiegelstijging bedraagt ca. 1,8 mm/jaar; de 18,6 jarige cyclus heeft een amplitude van +/- ca. 3,5 cm).

Er werd een trendcorrectie doorgevoerd volgens de gemiddelde zeespiegelstijging van 1.8 mm/jaar (naar referentiejaar 2000).

3 Methode extreme-waarden-analyse

De extreme-waarden-analysemethode beschreven in Willems et al. (2000) werd gevolgd. Deze methode analyseert het staartgedrag van de verdeling op basis van kwantielplots en ijkt de verdeling bij een asymptotisch staartgedrag dat voldoet aan de asymptotische Generalized Pareto Distribution (GPD verdeling), overeenkomstig de extreme-waarden-theorie van Pickands (1975), aan de vergelijking van deze verdeling:

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

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

waarbij x_t de drempelwaarde voorstelt boven dewelke de verdeling opgaat, β de schaalparameter en γ de vormparameter. Voor $\gamma = 0$ komt de GPD verdeling overeen met de exponentiële (EXP) verdeling. De parameter γ wordt ook 'extreme warden 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 methode vereist dat onafhankelijke extremen wordt afgeleid uit de tijdreeks van beschikbare waterhoogtewaarden. Dit gebeurt via onafhankelijkheidscriteria waarbij twee extremen als onafhankelijk worden verondersteld indien de tussentijd tussen het eerste extrema en het ogenblik van de minimale waarde tussen beide extrema groter is dan een welbepaalde waarde k , indien de minimale waarde lager is dan een welbepaalde fractie f van het hoogste extrema, en indien de extrema een minimale waarde hebben. De overeenkomstige reeks van (nagenoeg) onafhankelijke extreme waarden wordt Partial Duration Series (PDS) genoemd. Meer strict is de toepassing van jaarlijkse maxima (Annual Maxima: AM). In dit laatste geval dient de GEV verdeling (Generalized Extreme Value distribution) toegepast te worden in plaats van de GPD verdeling.

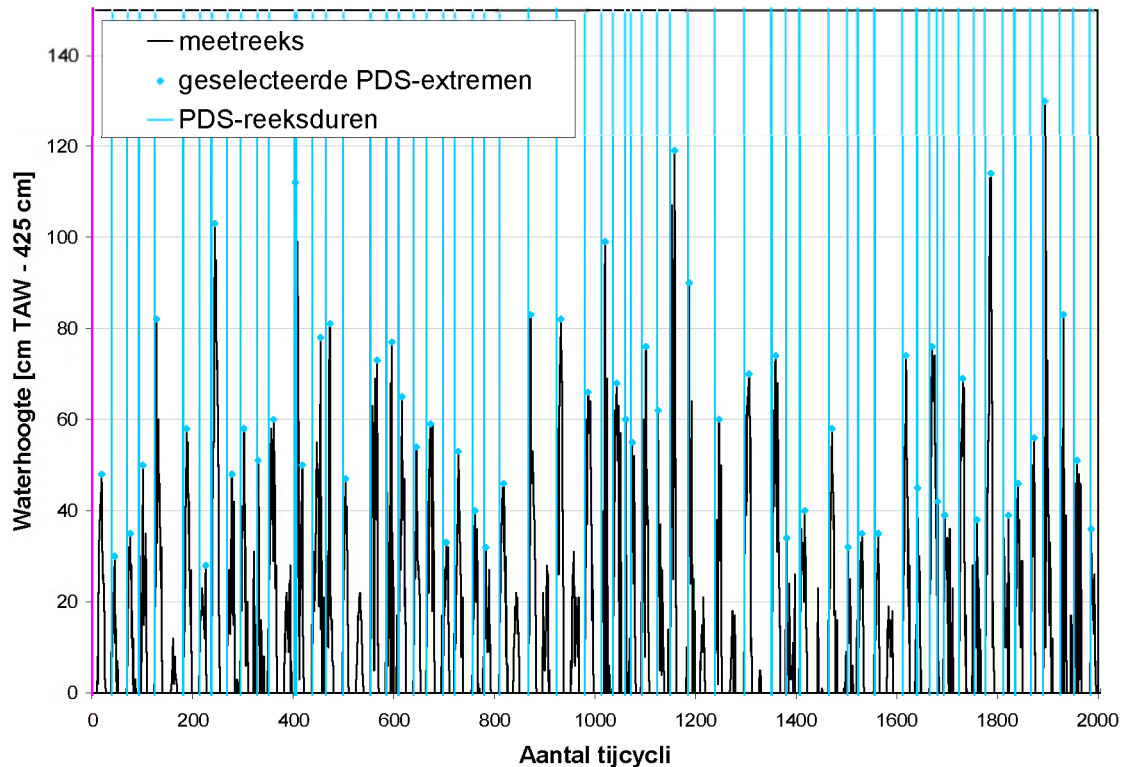
In deze studie zijn zowel de volledige tijdreeks van waterhoogten toegepast, als de PDS onafhankelijke extremen en de AM waarden. Deze drie reeksen waterhoogten dienen asymptotisch hetzelfde staartgedrag te vertonen (zie mijn recente paper Willems et al., 2007).

Hieronder worden de resultaten weergegeven.

4 Selectie onafhankelijke extremen (PDS-reeks)

Voor de afleiding van de PDS-reeks werden in de onafhankelijkheidscriteria de volgende parameterwaarden gebruikt: $k = 10$ tijdcycli, $f = 0.5$, minimale stormopzetwaarde van 20 cm.

Figuur 1 toont de geëxtraheerde PDS-extremen voor de tijdreeks van totale waterhoogten. De volledige tijdreeks wordt dus opgedeeld in onafhankelijke deelperioden (de zogenaamde Partial Duration Series: PDS) volgens hoger gedefinieerde onafhankelijkheidscriteria, en de hoogste waarde geselecteerd per deelperiode.



Figuur 1. Geselecteerde PDS-hoogwaterextremen in de tijdreeks van totale waterhoogten.

5 Extreme-waarden-analyse

5.1 Totale waterhoogte en astronomische component

De GPD-kansverdeling werd gecalibreerd volgens de methode beschreven in Willems et al. (2000) (QQR-methode genoemd in Willems et al., 2007) via regressie in kwantielplots. Bij een normale staart (EXP-verdeling) convergeert de staart van de verdeling asymptotisch naar een lineair staartgedrag in de exponentiële kwantielplot (dit is de plot van waterhoogten H versus de overschrijdingskans na $-\ln$ transformatie; zie Figuur 2). Via een gewogen lineaire regressie in deze plot worden de parameterwaarden bepaald. De optimale drempel boven dewelke deze regressie gebeurt kan worden bepaald via minimalisatie van de gemiddeld kwadratische afwijking (Mean Square Error: MSE) van de regressie. Figuur 2 en Figuur 3 illustreren deze aanpak voor de totale waterhoogte en de PDS-reeks.

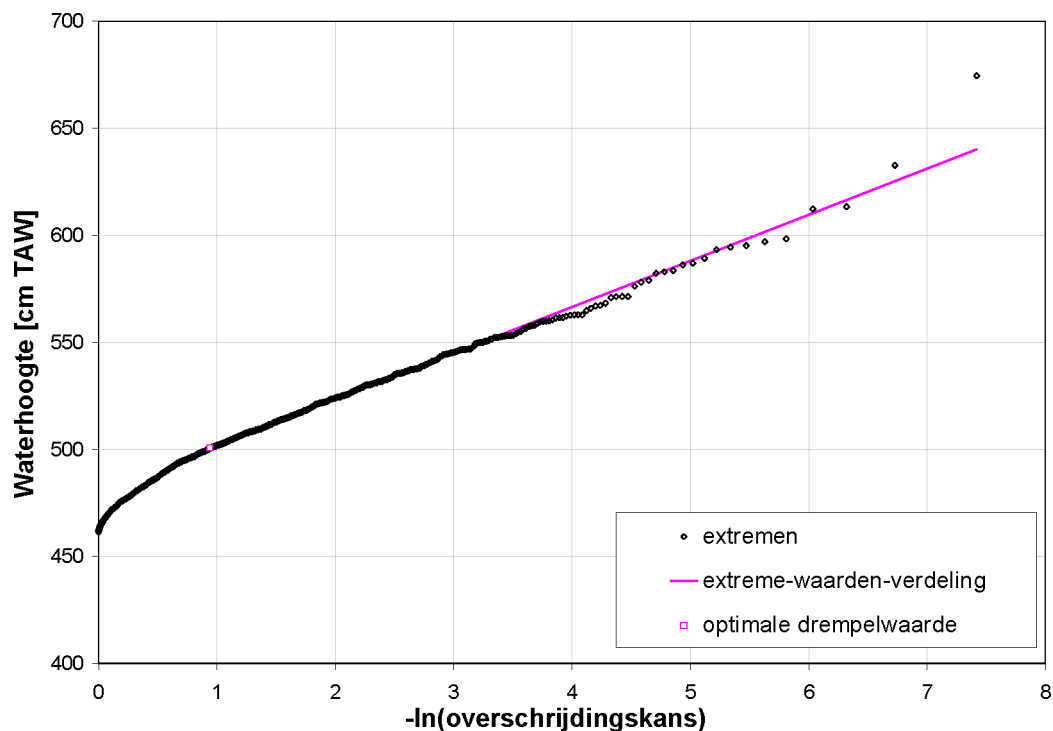
Calibraties zijn doorgevoerd voor de totale waterhoogte, de waterhoogte volgens de astronomische component en de stormopzet-waterhoogte, en dit voor en na trendcorrectie, en op basis van de volledige meetreeks, de PDS-reeks van extreme waterhoogten en de AM-reeks.

Figuur 4 geeft de gekalibreerde GPD-verdelingen weer voor de totale waterhoogte en astronomische component:

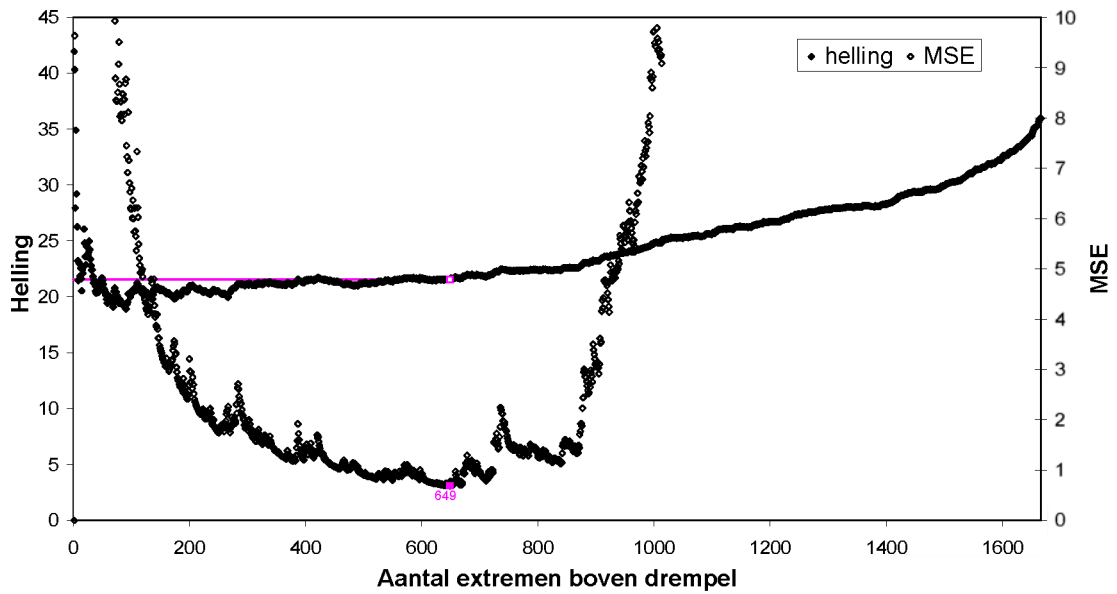
- voor en na trendcorrectie;
- voor de volledige reeks van waterhoogten, voor de PDS-reeks en voor de AM-waarden.

Een normale staart werd gevonden voor de totale waterhoogte; een lichte staart voor de astronomische component (met een bovengrens voor de astronomische waterhoogte tussen 521 en 522 cm TAW; deze wordt gegeven door $x_t - \beta / \gamma$). De parameterwaarden van de gecalibreerde verdelingen staan vermeld in Tabel 1 voor de totale waterhoogte en in Tabel 2 voor de astronomische component.

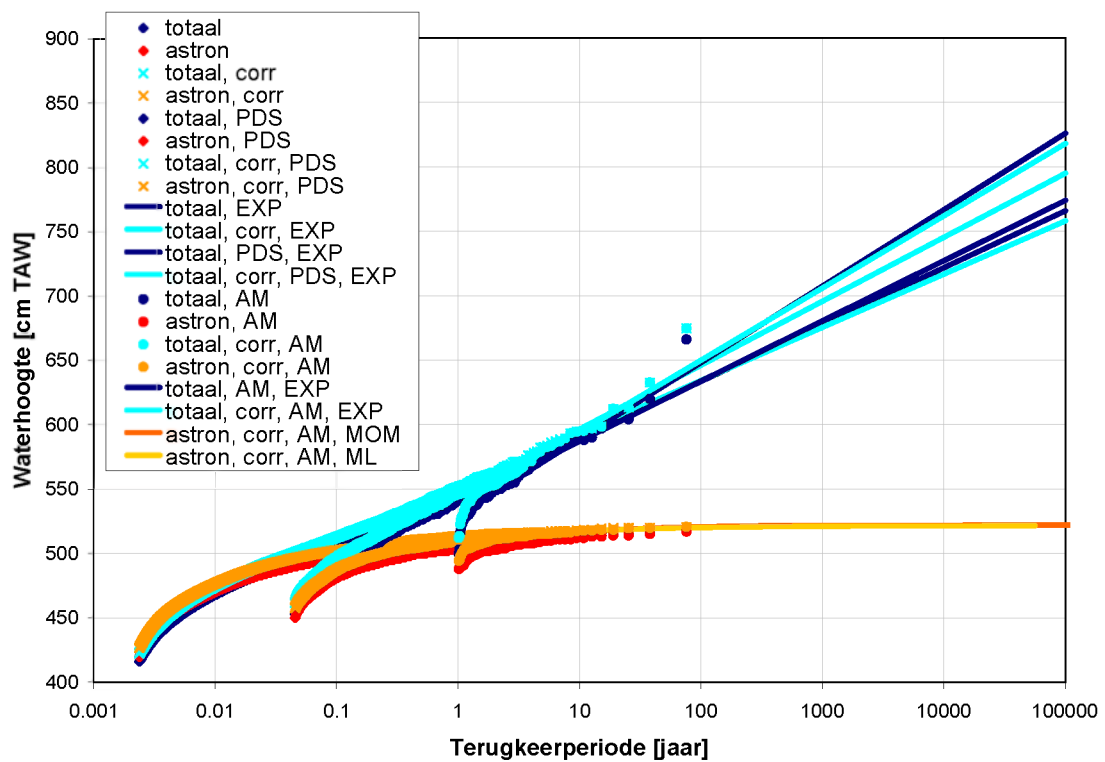
De astronomische component is deterministisch bepaald via de stand van de hemellichamen. Dit betekent evenwel niet dat het geen kansverdeling heeft of er geen extreme-waarden-verdeling van kan berekend worden; de kansverdeling is hier te interpreteren als de verdeling van astronomische tijhoogten die zich (willekeurig en onafhankelijk) kunnen voordoen tijdens de ogenblikken met een hoge stormopzethoogte.



Figuur 2. Exponentiële kwantielplot van PDS-hoogwaterextremen voor de totale waterhoogte, samen met het calibratieresultaat van de EXP extreme-waarden-verdeling



Figuur 3. Bepaling optimale drempel voor calibratie EXP extreme-waarden-verdeling in de exponentiële kwantielplot van PDS-hoogwaterextremen voor de totale waterhoogte



Figuur 4. Totale waterhoogte en astronomische component versus terugkeerperiode

Type extremen	Parameters GPD-verdeling totale waterhoogte			
	γ	β [cm]	x_t [cm TAW]	t
Alle hoogwaterstanden, zonder trendcorr.	0	19.16	531	160
PDS-reeks, zonder trendcorr.	0	20.31	512	305
AM-reeks, zonder trendcorr.	0	25.75	537	57
Alle hoogwaterstanden, na trendcorr.	0	17.94	525	329
PDS-reeks, na trendcorr.	0	21.55	500.5	649
AM-reeks, na trendcorr.	0	24.33	545	57

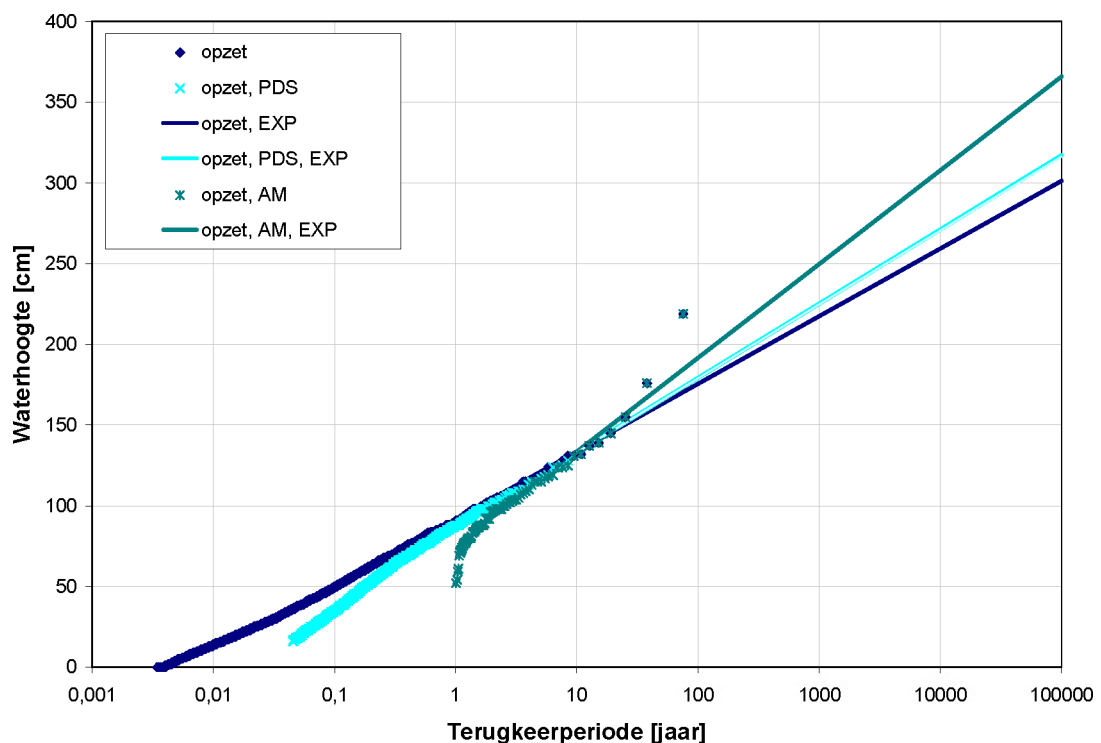
Tabel 1. Parameters GPD/EXP-verdeling totale waterhoogte

Type extremen	Parameters GPD-verdeling waterhoogte astronomische component			
	γ	β [cm]	x_t [cm TAW]	t
PDS-reeks, na trendcorr.	-0.38	4.29	511	60

Tabel 2. Parameters GPD-verdeling astronomische component

5.2 Stormopzet-component

Figuur 5 geeft de gekalibreerde GPD-verdelingen weer van de stormopzetcomponent voor de volledige reeks van waterhoogten, voor de PDS-reeks en voor de AM-waarden. Opnieuw wordt een normale staart gevonden. De parameterwaarden staan vermeld in Tabel 3.



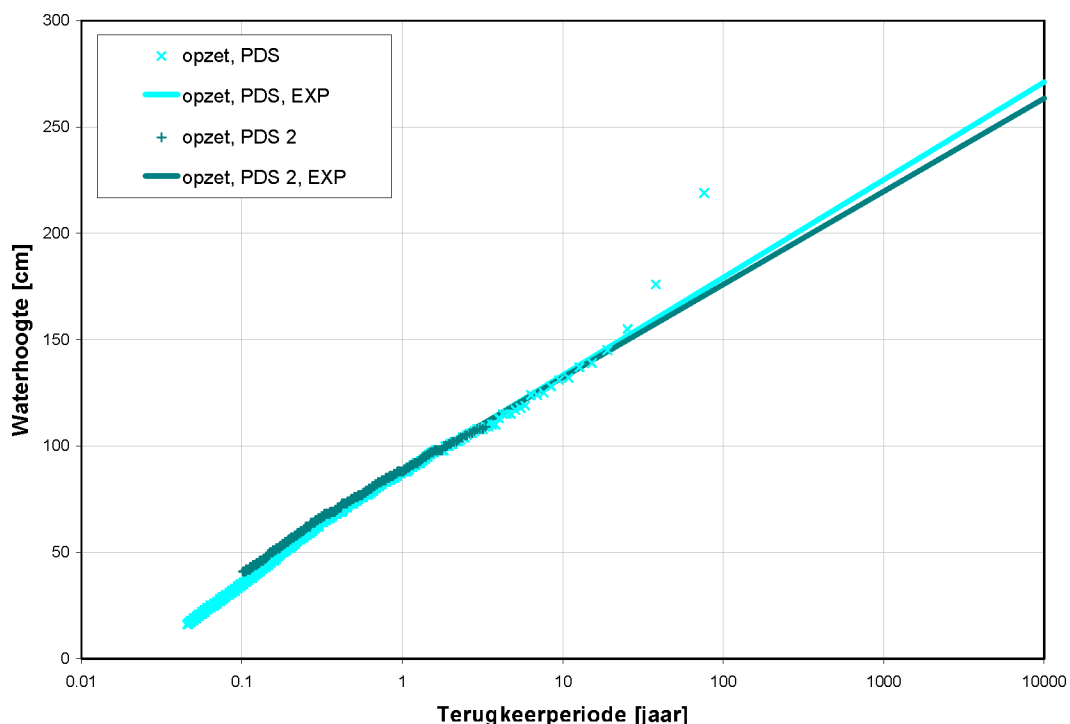
Figuur 5. Stormopzethoogte versus terugkeerperiode

Type extremen	Parameters GPD-verdeling stormopzethoogte			
	γ	β [cm]	x_t [cm]	t
Alle hoogwaterstanden	0	18.22	45	979
PDS-reeks	0	19.96	64	244
AM-reeks	0	25.23	84	54

Tabel 3. Parameters GPD/EXP-verdeling stormopzethoogte

Om de gevoeligheid van de criteria te onderzoeken die gebruikt werden bij de selectie van de onafhankelijke stormopzetwaarden, is de PDS-reeks herberekend met $k = 4$ tijcycli i.p.v. 10 en een verhoging van de minimale stormopzetwaarde van 20 cm naar 40 cm. Deze wijziging is getest op aangeven van IMDC (K.Trouw, J.Blanckaert) dat $k = 10$ tijcycli een streng criterium is, en dat onafhankelijkheid reeds vanaf $k = 4$ tot 6 tijcycli goed opgaat. De gevoeligheidsanalyse (Figuur 6) geeft aan dat dit de stormopzetverdeling evenwel slechts in zeer beperkte mate beïnvloed.

Omwille van de grote waarde van k heeft de keuze van het criterium voor f geen invloed op de selectie van extremen. De minimale stormopzetwaarde werd verhoogd van 20 cm naar 40 cm aangezien IMDC stelde dat de harmonische analyse een foutenmarge heeft die waarschijnlijk groter is dan 20 cm. Deze keuze beïnvloedt de resultaten helemaal niet aangezien bij de calibratie van de verdeling finaal een optimale drempelwaarde wordt gekozen die beduidend groter is dan deze 20 cm (64 cm bij de PDS-reeks).



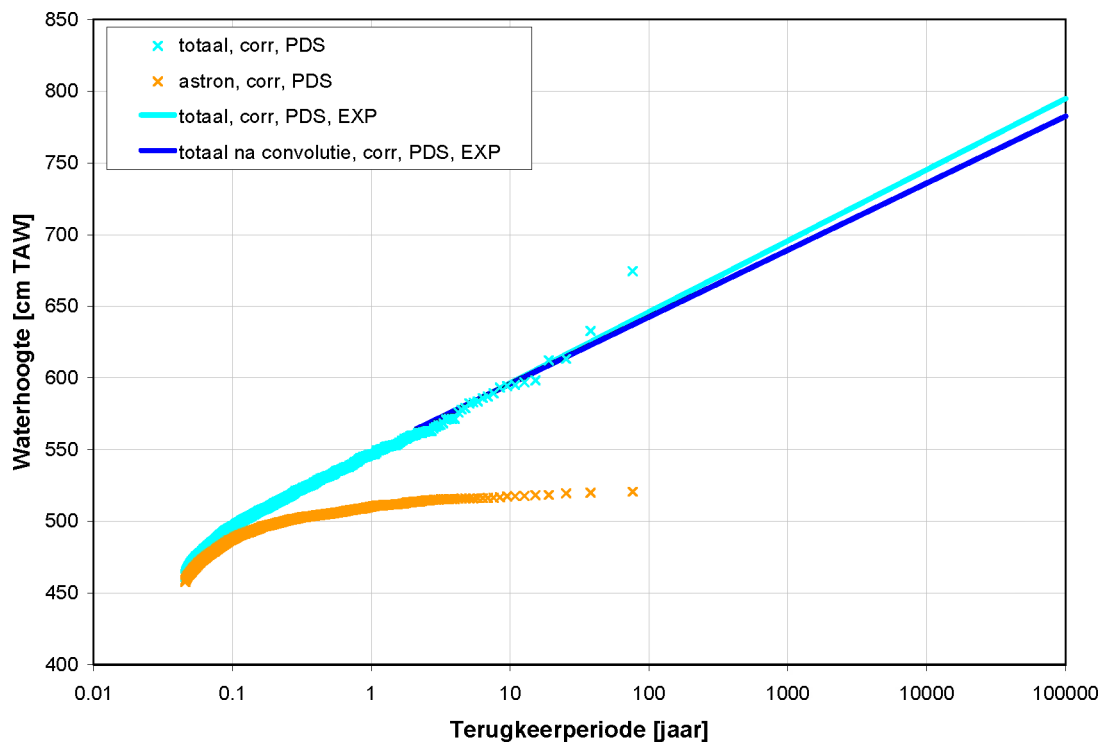
Figuur 6. Stormopzethoogte versus terugkeerperiode: gevoeligheidsanalyse op de onafhankelijkheidscriteria (oorspronkelijke (PDS) versus aangepaste (PDS 2) criteria)

5.3 Convolutie astronomische en stormopzetcomponenten

De extreme totale waterhoogten zijn vooral het gevolg van de extreme stormopzetwaarden, zodat ook een convolutie kan toegepast worden tussen de stormopzet-extreme-waarden-verdeling en de volledige verdeling van astronomische componentwaarden. Beide kunnen onafhankelijk verondersteld worden (Figuur 8).

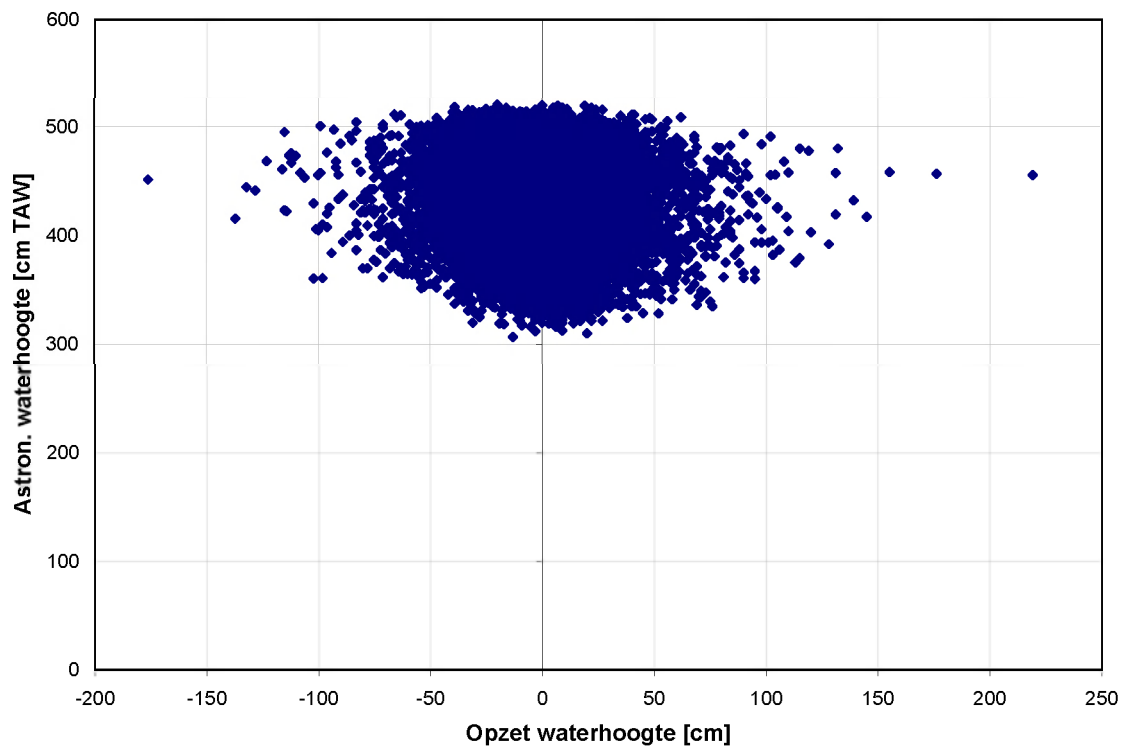
De convolutie is toegepast via random simulatie waarbij 1000 willekeurige onafhankelijke waarden zijn geselecteerd uit de verdeling van astronomische tijwaterhoogten en de verdeling van stormopzethoogten. Voor de stormopzethoogte is de EXP-verdeling volgens de PDS-reeks (zie Tabel 3) gebruikt. Dit betekent dat enkel stormopzethoogten boven een drempelwaarde van 64 cm werden beschouwd. Deze bepalen inderdaad de verdeling van extreme totale waterhoogten. Ze werden gecombineerd met astronomische tijhoogten geselecteerd uit de volledige verdeling. Hiertoe is de empirische verdeling gebruikt (de historisch vastgestelde waarden over de meetperiode van 4 maal de 18.6 jarige cyclus, na trendcorrectie gerefereerd aan het jaar 2000); de PDS-reeks bestaat uit 1690 waarden zodat het centraal gedeelte van de verdeling voldoende gedetailleerd beschreven wordt door de empirische waarden. Voor het staartgedeelte van de verdeling (boven een drempelwaarde van 511 cm TAW) is de gecalibreerde GPD-verdeling van extreme astronomische tijhoogten gebruikt (zie parameters Tabel 2).

Deze convolutie levert opnieuw een exponentiële extreme-waarden-verdeling (normale staart) (Figuur 7). Deze wijkt weinig af van de verdeling die werd bekomen bij rechtstreekse afijking aan de totale waterhoogte (zie Figuur 7).

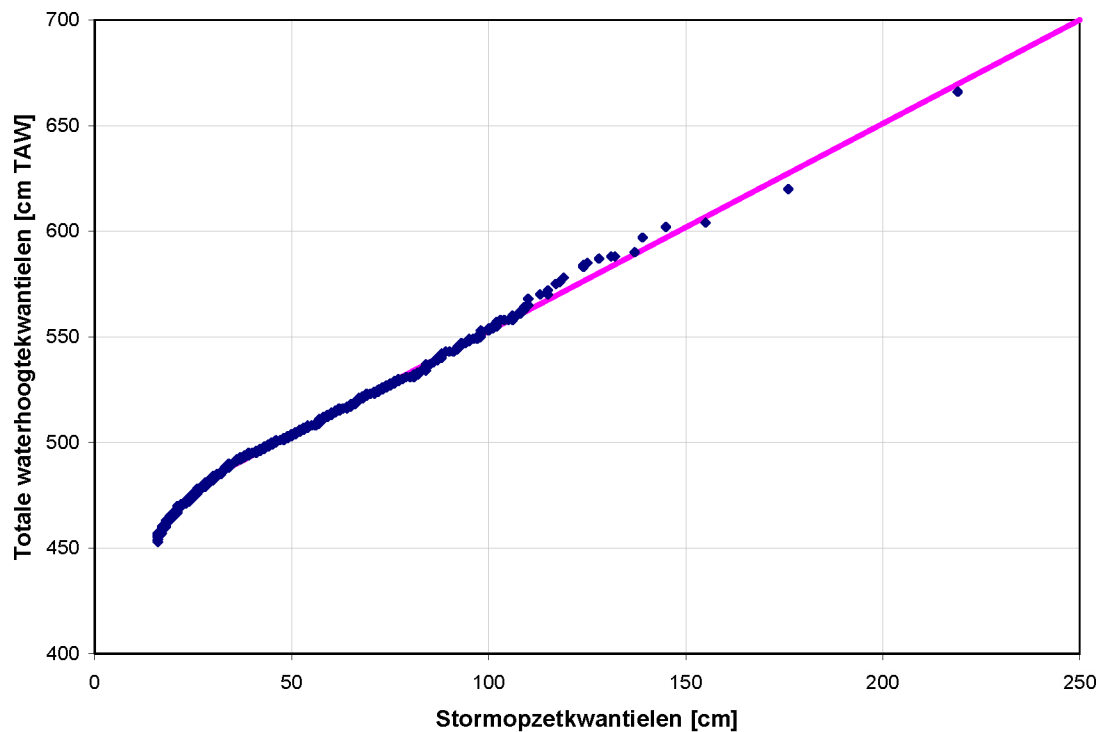


Figuur 7. Totale waterhoogte versus terugkeerperiode: vergelijking EXP calibratieresultaat zonder en met toepassing van convolutie

De reden van het kleine verschil tussen het convolutieresultaat en de rechtstreekse afijking aan de totale waterhoogte is het lineair verband tussen de extreme stormopzetkwantielen en de extreme totale waterhoogtekantielen voor waterhoogten groter dan 500 cm TAW (zie Figuur 9). Het is dus logisch dat beide grootheden eenzelfde type verdeling vertonen in de staart (beide "normale staart" of rechte lijn in de $H - \ln(T)$ plots).



Figuur 8. Astronomische waterhoogtecomponent versus stormopzethoogte

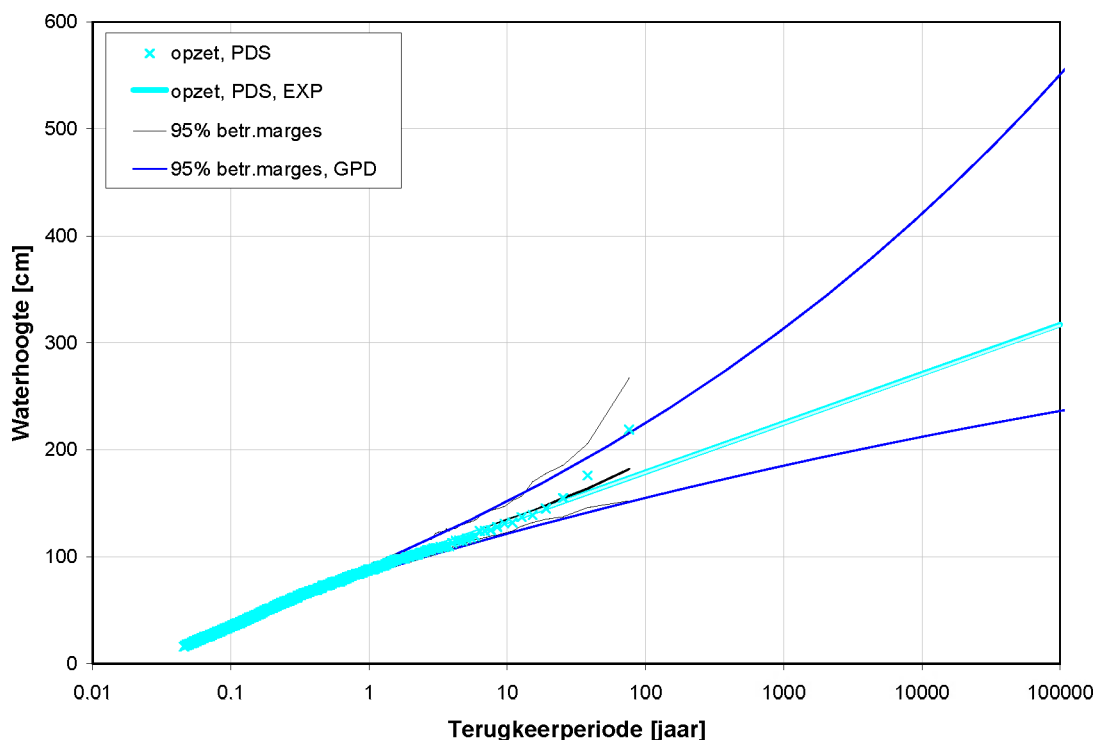


Figuur 9. Totale waterhoogtekwantielen versus stormopzethoogtekwantielen

6 Betrouwbaarheidsmarges

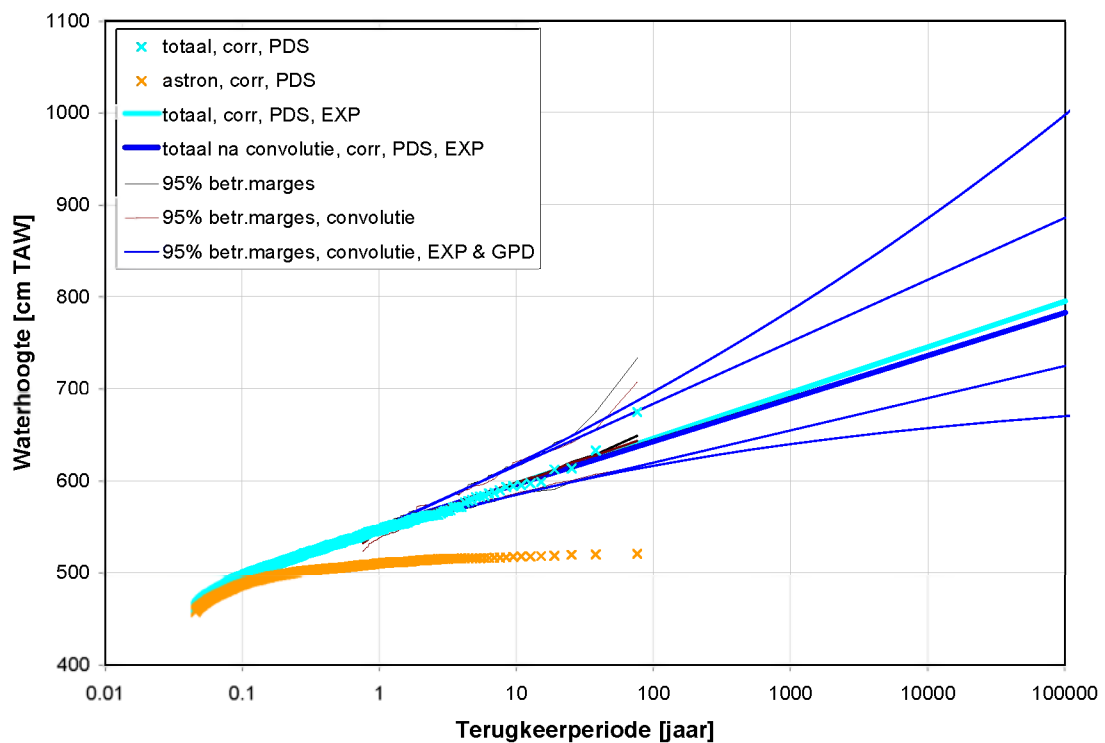
De random simulaties bij de convolutiemethode laten toe naast de “beste schatting” (de 50%-kwantielwaarden) ook betrouwbaarheidsmarges te berekenen. Volgens de methode van “parametrische bootstrapping” wordt bij elke simulatie van een aantal willekeurige waarden, gelijk aan het aantal empirische waarden waaraan de GPD/EXP werd gecalibreerd, en willekeurig gesampled uit de gecalibreerde verdeling, opnieuw de verdeling afgeijkt zodat bij 200 simulatiesets 200 verschillende GPD/EXP-verdelingen worden bekomen. Rangschikking van deze verdelingen van groot naar kleine kwantielwaarden laat toe om boven- en onderlimieten te bekomen van deze verdelingen volgens bepaalde betrouwbaarheidsintervallen. Bijvoorbeeld, de 5^{de} hoogste verdeling en de 5% laagste verdeling in de set van 200 verdelingen komen overeen met de boven- en onderlimieten volgens een 95%-betrouwbaarheidsinterval. Er werden binnen het huidig tijdsbestek geen statistische convergentietesten uitgevoerd, maar verdere verhoging van het aantal simulaties bleek de resultaten nog nauwelijks te veranderen.

Figuur 10 toont de bekomen boven- en onderlimieten voor de stormopzethoogte. Terwijl de mediaan-verdeling overeenstemt met een normale staart, heeft de bovenlimiet-verdeling een zware staart en de onderlimiet-verdeling een lichte staart. In Figuur 10 zijn naast de boven- en onderlimietverdelingen ook de 95%-betrouwbaarheidsmarges weergegeven op de willekeurig gesimuleerde waterhoogten.



Figuur 10. Stormopzethoogte versus terugkeerperiode: beste schatting EXP-kansverdeling en boven- en onderlimieten volgens GPD-verdeling overeenkomstig 95% betrouwbaarheidsintervallen

In Figuur 11 zijn deze boven- en onderlimietverdelingen getoond voor de totale waterhoogte na toepassing van de convolutiemethode. In dit geval zijn twee typen boven- en onderlimietwaarden berekend: een type waarbij enkel normale staart verdelingen werden verondersteld (EXP-verdeling) en een type waarbij ook zware en lichte staart verdelingen werden toegelaten (GPD-verdeling). De betrouwbaarheidsmarges op de willekeurig gesimuleerde waterhoogten zijn zowel berekend voor de convolutiemethode als op basis van de rechtstreekse calibratie aan de totale waterhoogtemetingen.



Figuur 11. Totale waterhoogte versus terugkeerperiode: beste schatting EXP-kansverdeling en boven- en onderlimieten volgens EXP- en GPD-verdelingen overeenkomstig 95%-betrouwbaarheidsintervallen

Tabel 4 geeft een overzicht van de parameterwaarden van de gecalibreerde kansverdelingen voor de totale waterhoogte na toepassing van convolutie. Zowel de “beste schatting” volgens de 50%-kwantielen als de boven- en ondergrenzen volgens 68%- en 95%-betrouwbaarheidsmarges zijn weergegeven. In Tabel 5 zijn de overeenkomstige resultaten gegeven voor de stormopzethoogte.

	Parameters GPD-verdeling totale waterhoogte na convolutie stormopzet met astronomisch getij			
Type extremen	γ	β [cm]	x_t [cm TAW]	t
Mediaan	0	20.26	564	36
Bovenlimiet 68% betr.interval, normale staart	0	25.63	547	76
Onderlimiet 68% betr.interval, normale staart	0	17.14	565	30
Bovenlimiet 95% betr.interval, normale staart	0	29.26	544	90
Onderlimiet 95% betr.interval, normale staart	0	15.20	570	20
Bovenlimiet 68% betr.interval, zware staart	0.04	22.54	562	46
Onderlimiet 68% betr.interval, lichte staart	-0.13	18.86	561	30
Bovenlimiet 95% betr.interval, zware staart	0.05	28.17	542	95
Onderlimiet 95% betr.interval, lichte staart	-0.13	18.86	561	30

Tabel 4. Parameters GPD/EXP-verdeling totale waterhoogte na toepassing convolutie overeenkomstig mediaan en 68%- en 95%-betrouwbaarheidsintervallen

	Parameters GPD-verdeling stormopzethoogte			
Type extremen	γ	β [cm]	x_t [cm]	t
Bovenlimiet 95% betr.interval, zware staart	0.08	23.23	85	100
Onderlimiet 95% betr.interval, lichte staart	-0.05	17.35	79.5	100

Tabel 5. Parameters GPD/EXP-verdeling stormopzethoogte na toepassing convolutie overeenkomstig mediaan en 95%-betrouwbaarheidsintervallen

7 Samengevat

Kansverdelingen werden gecalculeerd aan de totale waterhoogte en aan de afzonderlijke stormopzetcomponent en astronomische component gebaseerd op de hoogwaterobservaties langs de Belgische kust te Oostende voor de periode 1925 - 2000. Vergelijking werd gemaakt tussen de resultaten waarbij de GPD/EXP-kansverdeling rechtstreeks werd gecalculeerd aan de totale waterhoogtemetingen en deze waarbij convolutie is toegepast van de kansverdelingen voor de stormopzetcomponent en de astronomische component. Er worden slechts kleine verschillen gevonden. Ook zijn de calibratieresultaten vergeleken tussen het gebruik van de volledige meetreeks van hoogwaterstanden, het gebruik van enkel de onafhankelijke hoogwaterstanden (PDS-reeks) en de jaarlijkse maxima. Er wordt asymptotische convergentie gevonden naar eenzelfde staartgedrag van de GPD/EXP-verdeling.

De GPD/EXP-verdeling op basis van de convolutiemethode wordt hier aanbevolen om als basis te gebruiken van verdere kustoverstromingsrisicoberekeningen. De convolutiemethode is

toegepast op basis van de Monte-Carlo random simulaties. Deze methode liet toe om volgens het principe van de methode van “parametrische bootstrapping” boven- en onderlimieten af te leiden overeenkomstig verschillende betrouwbaarheidsintervallen (discrete kansintervallen).

Tabel 6 geeft een overzicht van de parameters van deze finaal aanbevolen kansverdelingen.

Type extremen	Parameters GPD-verdeling totale waterhoogte na convolutie stormopzet met astronomisch getij			
	γ	β [cm]	x_t [cm TAW]	t
Mediaan	0	20.26	564.4	36
Bovenlimiet 68% betr.interval, zware staart	0.04	22.54	562	46
Bovenlimiet 95% betr.interval, zware staart	0.05	28.17	542	95
Onderlimiet 68% betr.interval, lichte staart	-0.05	17.50	565	30
Onderlimiet 95% betr.interval, lichte staart	-0.13	18.86	561	30

Tabel 6. Overzicht parameters GPD/EXP-verdeling totale waterhoogte na toepassing convolutie overeenkomstig mediaan en 68%- en 95%-betrouwbaarheidsintervallen, te gebruiken aan de basis van de kustoverstromingsrisico's

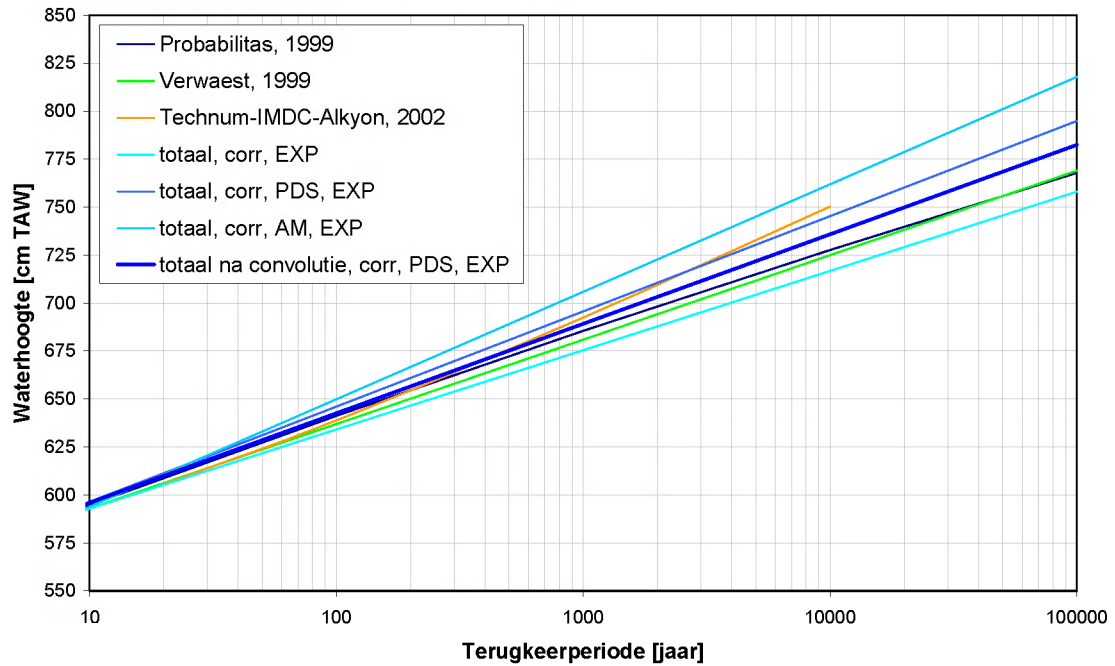
Het verband tussen de terugkeerperiode T (in aantal jaar) en de waterhoogte x (in cm TAW) kan op basis van de parameters van de EXP- en GPD-verdelingen als volgt berekend worden, met $n = 76$ (het aantal jaar van de tijdreeks) en t het aantal extremen boven de optimale drempel:

$$x_T = x_t + \beta (\ln(T) - \ln(\frac{n}{t})) \quad \text{voor de EXP-verdeling (bij } \gamma=0\text{)}$$

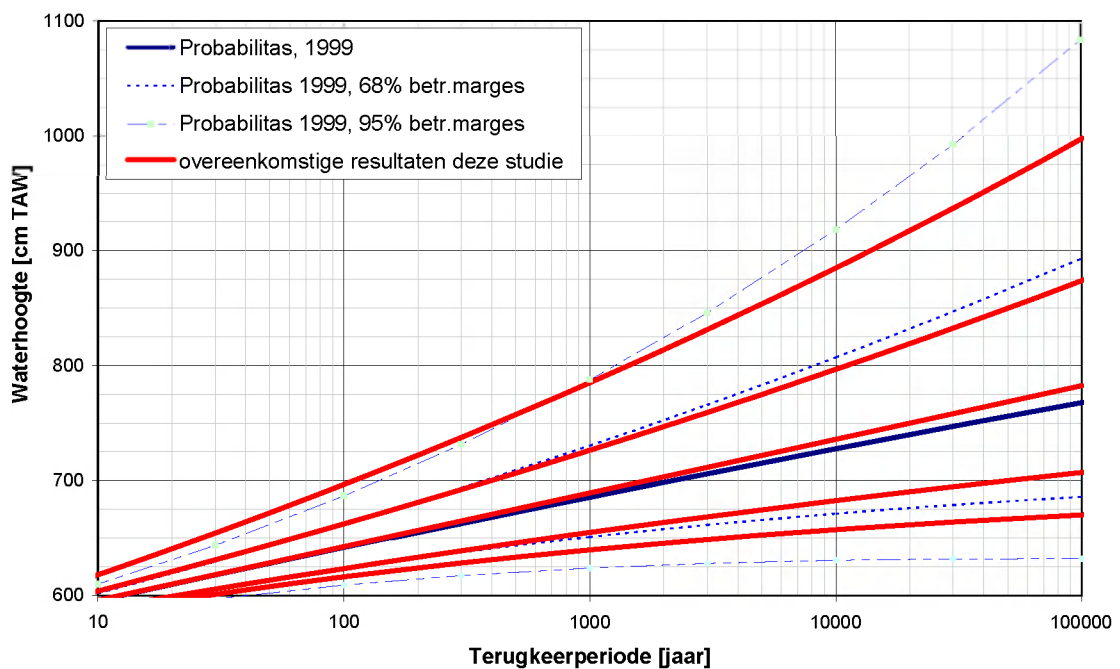
$$x_T = x_t + \frac{\beta}{\gamma} ((\frac{n}{tT})^{-\gamma} - 1) \quad \text{voor de GPD-verdeling (bij } \gamma < 0\text{)}$$

8 Vergelijking met vroegere studies

Figuur 12 en Figuur 13 vergelijken de resultaten bekomen in deze studie met de resultaten die eerder werden gerapporteerd in de studies van Probabilitas (1999), Verwaest (1999) en Technum-IMDC-Alkyon (2002).



Figuur 12. Totale waterhoogte versus terugkeerperiode: vergelijking EXP-kansverdelingen uit deze studie met deze van eerdere studies.



Figuur 13. Totale waterhoogte versus terugkeerperiode: vergelijking GPD/EXP-verdelingen volgens beste schatting en 68% en 95%-betrouwbaarheidsintervallen met deze van Probabilitas (1999).

9 Referenties

Technum-IMDC-Alkyon, 2002. Hydrodynamische randvoorwaarden voor het ontwerp – waterstanden en golfklimaat (structureel herstel van de kustverdediging te Oostende en verbetering van de haventoeegang naar de haven van Oostende, 2002, in opdracht van AWZ Afdeling Waterwegen Kust

Probabilitas, 1999. Statistische modellering van extreme hoogwaterstanden en het overeenkomstige zeeklimaat in relatief diep water, in opdracht van AWZ Afdeling Waterwegen Kust

Verwaest, 1999. Overschrijdingskromme extreme stormpeilen te Oostende – berekening volgens convolutie van astronomische componente en opzetcomponente, interne nota AWZ – AWK

Willems, P., Qvick, A., Vaes, G., Berlamont, J., Christiaens, K., Feyen, J., 2000. Algemene methodologie voor het modelleren van bevaarbare waterlopen in Vlaanderen, door K.U.Leuven in opdracht van het Waterbouwkundig Laboratorium, April 2000.

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, vol. 338, 221-236

Faculteit Ingenieurswetenschappen
Departement Burgerlijke Bouwkunde
Afdeling Hydraulica
Kasteelpark Arenberg 40
BE-3001 Heverlee (Leuven)



tel. 016 32 16 58
fax 016 32 19 89

Patrick.Willems@bwk.kuleuven.be

www.kuleuven.be/hydr