



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Extreme wind en druk in de ECMWF seizoensverwachtingen

H. van den Brink

De Bilt, 2018 | Technisch rapport; TR-364

Extreme wind en druk in de ECMWF seizoensverwachtingen

**Een verkenning van de toepasbaarheid van de ECMWF
seizoensverwachtingen dataset voor de bepaling van de hydraulische
randvoorwaarden langs de Nederlandse kust**

Henk van den Brink
KNMI

16 maart 2018

Executive Summary

The combined seasonal forecasts of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) provides a global dataset of meteorological data that cumulate to 6282 years in length for the current so-called system-4. These forecasts describe the current climate, as they are initialized over the period 1981-2015.

Although the climatology of the extreme wind speed over sea at 10m height corresponds well with observations, we have to take the following aspects in mind. First, the observational records are relatively short, which makes direct verification of the most extreme wind speeds of the model impossible. Second, the resolution in space (80km) and time (6-hourly) of the model data complicates the intercomparison. We carefully intercompare the effect of the resolution by making use of the high-resolution meteorological model HARMONIE, and show that - given the coarse resolution of the ECMWF model - the generated extreme winds are realistic.

This result is confirmed by driving the surge model WAQUA-DCSMv5 with the ECMWF data. The results for Hoek van Holland show excellent agreement for annual maxima. However, the most extreme surges seem to be slightly underestimated. This may be caused either by sampling, or by the resolution, or by the parametrisation of the drag in the ECMWF model.

The system-4 dataset indicates that application of the Gumbel distribution to the annual maxima of the water levels along the Dutch coast tends to a small overestimation of the required design levels. There are no indications for underestimations.

The most extreme events impact not only the whole Dutch coast, but also that of Belgium, France, and England. There is a tendency that more extreme events have impact on a longer coast.

It is fortunate that a new version of the ECMWF seasonal forecast has become available in September 2017 (called system-5). This dataset contains 5400 years, with a higher resolution and more parameters than system-4. We plan to explore this dataset in 2018, and are optimistic about its quality and even wider range of applications for hydraulic boundary conditions than the currently explored system-4.

The ECMWF seasonal forecasts dataset cumulates to more than 10,000 year of excellent quality (assuming the same or even better quality for system-5). With this dataset, the large statistical uncertainty that is characteristic for the observational dataset, can be reduced with a factor of 10. Also the implicit assumptions that are made with statistical extrapolation (i.e., about the scalability of the depressions, about the roughness increase of the sea surface with wind speed, and about the existence of physical upper limits) can be explored with the ECMWF dataset. Although the use of model data implies uncertainties, they do not outweigh the advantages. We therefore advise to base the future hydraulic boundary conditions on results obtained from meteorological models instead of on statistical extrapolation from observations.

Samenvatting

De combinatie van de seizoensverwachtingen van het ECMWF (system-4) levert een wereldwijde dataset van meteorologische gegevens op die cumuleren tot 6282 jaar. Deze verwachtingen zijn geïnitieerd over de periode 1981-2015, en beschrijven dus het huidige klimaat. De 10m-wind over zee correspondeert goed met waarnemingen, mits in ogenschouw wordt genomen dat de modeluitvoer een lagere resolutie heeft in tijd en ruimte.

Wereldwijde analyse laat zien dat het model geen indicaties geeft voor een bovengrens in de wind of een ondergrens in de druk. Mochten deze grenzen er al zijn, dan liggen ze ver buiten het bereik dat van belang is voor de hydraulische belastingen.

De ECMWF data is gebruikt om het waterstandsmodel WAQUA-DCSMv5 aan te drijven. De klimatologie van extreme waterstanden langs de Nederlandse kust komt verrassend goed overeen met de waarnemingen. De mogelijk lichte onderschatting die de ECMWF/WAQUA-DCSMv5 combinatie laat zien voor Hoek van Holland kan het gevolg zijn van de (te) lage resolutie van het ECMWF model.

De meest extreme stormen zorgen voor eens-in-de-1000-jaar waterstanden over een groot gebied. De maatgevende stormen zijn dus groot van omvang. Verwacht mag worden dat de voorspelbaarheid derhalve hoog is.

Er zijn vanuit de system-4 ECMWF data geen indicaties dat de GEV verdeling van de waterstand langs de Nederlandse kust een negatieve vormparameter heeft (dwz omhoog kromt op een Gumbelplot). Daarmee geeft extrapolatie vanuit een Gumbel verdeling een conservatieve schatting van de hydraulische randvoorwaarden.

Extrapolatie van de wind en de druk op zeeniveau leiden gemiddeld tot een onderschatting voor grote herhaaltijden, terwijl extrapolatie van de geostrofe wind tot overschatting leidt.

De sinds September 2017 beschikbare data van system-5 (5400 jaar, met een hogere resolutie en meer parameters dan system-4) biedt veelbelovende perspectieven, zoals het verband tussen wind en stress bij hoge winden. Dit is van groot belang voor Werkpakket 3.

De ECMWF seizoensverwachtingen - van system-4 en waarschijnlijk ook van system-5 - vormen samen een dataset van meer dan 10,000 jaar van uitstekende kwaliteit. Met deze dataset kan de statistische onzekerheid die de extrapolatie vanuit de waarnemingen kenmerkt, met een factor 10 verkleind worden. Ook de impliciete aannames die gedaan worden bij de statistische extrapolatie (zoals over de opschaalbaarheid van stormen, over de ruwheidstoename van het zee-oppervlak, en over het wel of niet bestaan van fysische bovengrenzen) kunnen met de ECMWF dataset onderzocht worden. Hoewel het gebruik van modeldata onzekerheden met zich meebrengt, wegen deze niet op tegen de voordelen. We adviseren daarom om de hydraulische randvoorwaarden in te toekomst te baseren op resultaten van modellen in plaats van op extrapolatie vanuit waarnemingen.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
2	Modelbeschrijving en waarnemingen	6
2.1	Seizoensverwachtingen	6
2.2	ERA-Interim	7
2.3	ERA-5	7
2.4	HARMONIE	7
2.5	WAQUA-DCSMv5 model	9
2.6	Waarnemingen	9
2.6.1	Windmetingen	9
2.6.2	Waterstandsmetingen	9
3	Methodologische concepten	12
3.1	Extreme-waarden theorie	12
3.2	Statistische verdeling van uitbijters	12
3.3	Kolmogorov-Smirnov test	13
3.4	Opzet-genererende wind	13
3.5	Pseudowind	15
3.6	Geostrofe wind	15
4	Validatie en verificatie	16
4.1	Interpretatie van waargenomen en gemodelleerde parameters	16
4.2	Tijdreeks	17
4.3	Klimatologie van extreme wind voor verschillende middelingen	18
4.4	Extreme waterstanden	20
5	Resultaten	23
5.1	Wind en druk boven de Noordzee	23
5.2	Wereldwijde extreme wind en druk	27
5.3	Pseudowind in ERA-Interim	28
5.4	Conclusies pseudowind	31
6	Toepassingen	32
6.1	Optimale parameter voor statistische extrapolatie	32
6.2	Herhaaltijd van impact	36
6.3	Ruimtelijke variaties in GEV vormparameter	41
6.4	Extrapolatie van waterstand	42
7	Conclusies en discussie	45
7.1	Vooruitblik	45

1 Inleiding

Voor de ontwerpcriteria van de dijken langs de Nederlandse kust is kennis van de wind boven de Noordzee van groot belang. De wind zorgt immers zowel voor de golven als voor de opstuwing van het water tegen de kust, en is daarmee de dominante grootheid die de hoogte van de dijken bepaalt.

De ontwerpcriteria zijn gebaseerd op waterstanden die tot eens in de 10^7 jaar voorkomen (Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III). Eén aanpak is om vanuit de gemeten waterstanden (die ruim 100 jaar in lengte zijn) via de theorie van extreme waarden tot de eens-in-de- 10^7 -jaar waarden te komen. Dit brengt echter aanzienlijke onzekerheden met zich mee, omdat het niet eenduidig is hoe de extrapolatie gedaan moet worden (Van den Brink en Können, 2008).

In dit rapport onderzoeken we een andere aanpak, namelijk in hoeverre resultaten van weer- en klimaat-modellen kunnen dienen om de invloed van de statistische extrapolatie te verkleinen. We gebruiken hiervoor de seizoensverwachtingen van het ECMWF, die in totaal meer dan 6000 jaar omvatten. Daarmee wordt de statistische onzekerheid aanzienlijk verkleind. Voorwaarde voor het gebruik is uiteraard wel dat de uitkomsten van het model overeenstemmen met de waargenomen klimatologie. In dit rapport onderzoeken we de kwaliteit van de 10m-wind en druk op zeeniveau van het ECMWF model. Tevens geven we enkele voorbeelden van de toepassingen die de modelgegevens bieden. Deze richten zich voornamelijk op de optimale keuze voor de parameter die gebruikt kan worden voor extrapolatie, en op de analyse van de waterstanden die corresponderen met de meteorologische gegevens van de ECMWF data.

2 Modelbeschrijving en waarnemingen

In dit hoofdstuk beschrijven we de modellen die in het onderzoek gebruikt zijn. De seizoensverwachtingen van het ECMWF (paragraaf 2.1) genereren de meteorologische gegevens. Het hoge-resolutie model HARMONIE (paragraaf 2.4) is gebruikt om te onderzoeken in hoeverre de relatief lage resolutie van het ECMWF van invloed is op de verkregen resultaten. Het waterstandsmodel WAQUA-DCSMv5 (paragraaf 2.5) is gebruikt om vanuit de meteorologische gegevens van het ECMWF de waterstanden langs de Noordzeekust te berekenen.

In paragraaf 2.6 bespreken we de gebruikte waarnemingen (wind en waterstand).

2.1 Seizoensverwachtingen

Vanaf November 2011 maak het ECMWF elke maand een ensemble van 51 globale seizoensverwachtingen van 7 maanden vooruit, dus ver voorbij de 2 weken horizon waarop (op onze breedten) er voorspelbaarheid in de verwachting zit. Over de periode 1981-2011 zijn hindcasts¹ met minder ensembleleden gemaakt om het systeem te kalibreren. We gebruiken deze dataset om extreme windsnelheden boven de Noordzee te analyseren. De eerste maand van elke verwachting wordt niet gebruikt, om afhankelijkheid tussen de onderlinge ensemble leden te voorkomen. Van den Brink et al (2005) laten zien dat de correlatie van de Noord-Atlantische Oscillatie (NAO) index voor verwachtingen van 1 maand of meer verwaarloosbaar is. Door verwachtingen die een half kalenderjaar in startdatum verschillen te combineren, kunnen volledige kalenderjaren geconstrueerd worden.

Tabel 1: *Combinatie van individuele ensemble leden om een 6282-jarige tijdreeks te construeren. De nummers in de tweede kolom geven het startjaar aan (1981-2015) gevolgd bij het ensemble nummer (0-50).*

year	eerste half jaar		tweede half jaar
1	jan 1981-0	+	jul 1981-0
2	jan 1982-0	+	jul 1982-0
⋮			
35	jan 2015-0	+	jul 2015-0
36	jan 1981-1	+	jul 1981-1
⋮			
669	jan 2015-50	+	jul 2015-50
670	feb 1981-0	+	aug 1981-0
⋮			
6282	jun 2015-50	+	dec 2015-50

Tabel 1 laat zien hoe de combinaties zijn gemaakt. Door deze combinatie-keuzes is de dataset zo continue mogelijk. Toch zijn er nog een paar discontinuïteiten. Allereerst is er een discontinuïteit bij elk concatenatie, die de temporele correlatie in de meteorologische situatie onderbreekt. De correlatie in het astronomisch getij wordt echter wel behouden. Omdat de opeenvolgende jaren de historische orde volgen voor elk perturbatie nummer, worden mogelijk aanwezige laagfrequente variabiliteit (bijvoorbeeld in de zeewater temperaturen) gehandhaafd.

¹Een hindcast is een verwachting die in het verleden ligt. Dit biedt de mogelijkheid om de verwachting te vergelijken met het opgetreden weer, zodat ijking mogelijk is.

Door de toegepaste volgorde wordt ook de 18.6-jarige maancyclus in het astronomisch getij gehandhaafd. De enige discontinuïteiten in de beginsituaties vinden plaats als het jaar 2015 is bereikt en het volgende jaar weer begint met 1981 (van jaar 35 naar 36 in Tabel 1).

Discontinuïteiten in het kalenderjaar worden gemaakt als het perturbatie nummer terugspringt van 50 naar 0. In dat geval wordt een kalendermaand overgeslagen (van jaar 669 naar 670 in Tabel 1). De discontinuïteiten blijken geen systematisch effect te hebben op de uitkomsten.

2.2 ERA-Interim

Het regionale model HARMONIE wordt aangedreven door de ERA-Interim analyses, berekend door het ECMWF. Deze analyses zijn beschikbaar vanaf 1979.

De kracht van de ERA-Interim dataset is dat het één van de toonaangevende weersverwachtingsmodellen (het ECMWF model) combineert met een geavanceerd systeem om de observaties te assimileren (Dee et al., 2011). De resulterende analyses kunnen beschouwd worden als de best mogelijke weergave van de toestand van de atmosfeer, gegeven de model informatie en de observaties. ERA-Interim bevat 3D analyses van de atmosfeer op een resolutie van ongeveer 80 km. De dataset die gebruikt is voor HARMONIE was gesampled op een resolutie van 0.5°. De tijdsresolutie van de analyses is 6 uur. Alle variaties in het weer die plaatsvinden binnen 80 km en/of 6 uur kunnen dus niet door ERA-Interim worden weergegeven. Alleen de grootschalige weerfenomenen worden door ERA-Interim gerepresenteerd, zoals depressies en hogedrukpatronen. De bijbehorende kleinschalige fenomenen, zoals fronten en buien, zijn echter niet of nauwelijks in ERA-Interim waarneembaar.

2.3 ERA-5

ERA-5 is de opvolger van ERA-Interim. Op dit moment zijn de analyses van 2010-2016 beschikbaar. De belangrijkste verschillen met ERA-Interim zijn de hogere resolutie in tijd (1-uurlijks) en ruimte (35km).

2.4 HARMONIE

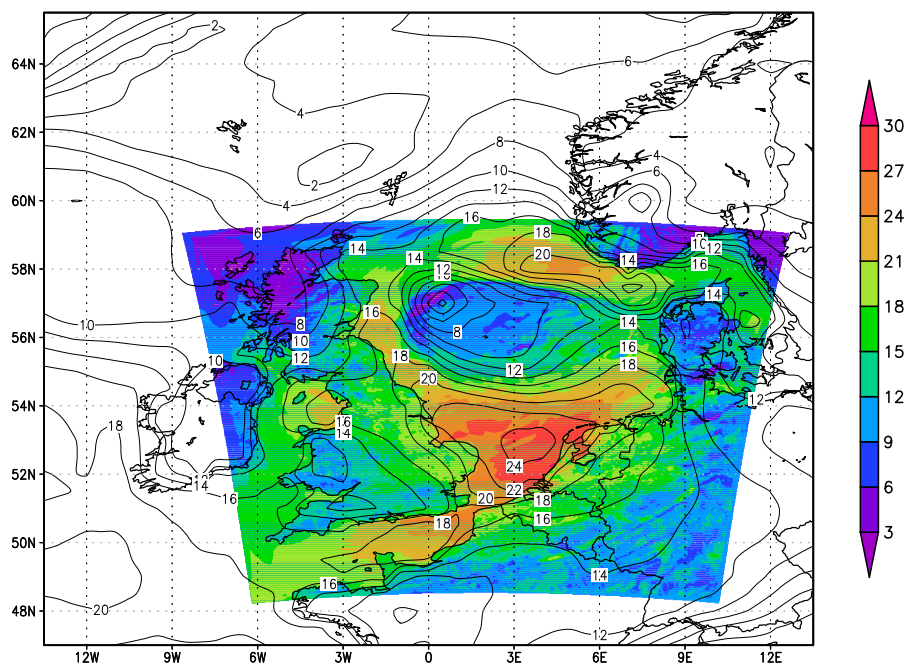
Sinds zomer 2012, is HARMONIE (*HIRLAM ALADIN Research On Mesoscale Operational NWP in Europe*) één van de operationele weermodellen van het KNMI. Het is een regionaal model dat ontwikkeld is, en voortdurend verder ontwikkeld, gemonitord en verbeterd wordt door het HIRLAM consortium, waarin vele Europese landen participeren. Nauwe samenwerking met onder andere het ECMWF zorgt voor een continue borging en verdere verbetering van de kwaliteit.

HARMONIE is de opvolger van de HIRLAM en ALADIN modellen. De belangrijkste verschillen zijn dat HARMONIE rekent op een rooster met een zeer hoge resolutie (standaard met een roosterpuntsafstand van 2.5 km) en dat het een zogenaamd niet-hydrostatisch model is, wat betekent dat het een realistischer beschrijving geeft van de atmosferische processen, bijvoorbeeld door het berekenen van de verticale bewegingen. Het HIRLAM-ALADIN consortium heeft het model uitvoerig getest. HARMONIE is ook bekend onder de naam 'AROME'. Meer details over het HARMONIE/AROME model zijn te vinden in Seity et al. (2011) en op www.hirlam.org.

De belangrijkste elementen van de model-setup zijn:

- We gebruiken HARMONIE versie CY37h1.1 (vrijgegeven in Juni 2012)

- We gebruiken (in overeenstemming met de standaard HARMONIE set-up) de ECUME ruwheids formulering (Weill et al., 2003) boven zee, en een Charnock formulering ($\alpha=0.015$) voor meren en rivieren.
- Het model is gerund op een domein van 500x500 roosterpunten op een Lambert-rooster. Dit houdt in dat de onderlinge afstanden naar de dichtstbijzijnde roosterpunten overal gelijk zijn. In dit geval van HARMONIE is deze roosterpuntsafstand 2.5x2.5 km. Het domein is gecentreerd op 54°N, 2°O (zie Figuur 1). De positie is zodanig gekozen dat voor Nederland relevante depressies zo goed mogelijk binnen het domein passen. Het aantal van 500x500 roosterpunten geeft een goede balans tussen de rekenintensiteit en de grootte waar HARMONIE zich vrij ontwikkelt, zonder verstoring van de randen.
- Het aantal gebruikte verticale niveaus van HARMONIE is 60. Deze niveaus hebben dicht bij het oppervlak een kleine onderlinge afstand die toeneemt met de hoogte. Het onderste modelniveau volgt het aardoppervlak; hogere rekenniveaus volgen drukvlakken.
- Elke 6 uur is een verwachting van 6 uur geïnitieerd vanuit de ERA-Interim heranalyse van het ECMWF.
- Uurlijkse velden van de windvectoren zijn gearchiveerd voor hoogtes van 10, 20, 40, 60, 80, 100, 150 en 200 m boven het oppervlak.
- Vanaf elke analyse zijn de +1u tm +6u verwachtingen gebruikt. Het model heeft dus 1 uur de tijd vanuit de analyse om zich 'aan te passen' van de ERA-Interim toestand naar de HARMONIE toestand.
- De tijdsresolutie van de modelberekeningen is 1 minuut, de uitvoer is uurlijks. De uitvoer representeert de modeltoestand op het aangegeven moment.



Figuur 1: Domein van HARMONIE (500x500 roosterpunten) zoals gebruikt in de huidige set-up. De kleuren geven de windsnelheid op 25 januari 1990, 18:00 UTC aan; de contouren op de achtergrond geven de windsnelheid voor hetzelfde moment volgens ERA-Interim. Duidelijk is het effect van HARMONIE te zien op de toename van de details in de wind.

2.5 WAQUA-DCSMv5 model

Om waterstanden in de Noordzee af te leiden van de ECMWF uitvoer gebruiken we WAQUA-DCSMv5 (Gerritsen et al., 1995). Dit model lost de 2-dimensionale ondiep-water vergelijkingen op op een $\frac{1}{12} \times \frac{1}{8}$ (ongeveer 8 km \times 8 km) rooster voor de Noordwestelijke Europese shelf (?) regio. Het model wordt operationeel gebruikt op het KNMI om de waterstanden langs de Nederlandse kust te verwachten. De meteorologische invoer is de druk op zeeniveau en de 10m-wind. De wind wordt vertaald naar stress via een Charnock relatie (Charnock, 1955) met een Charnock parameter van 0.032.²

Het astronomisch getij wordt aan de randen voorgeschreven met behulp van 10 harmonische componenten ($O_1, K_1, N_2, M_2, S_2, K_2, Q_1, P_1, \nu_2$ en L_2) en propageert daarvandaan het model-domein in. De modeluitvoer bestaat uit de waterstand en de hoogte van het astronomisch getij in afwezigheid van meteorologische forcering.

We merken op dat de operationele versie die gebruikt wordt voor de waterstandsberekeningen op een veel hogere resolutie draait (1.6 km) dan WAQUA-DCSMv5 (8 km). Om rekentechnische redenen is in deze fase gekozen voor de WAQUA-DCSMv5 versie. De situaties die leiden tot extreme waterstanden kunnen desgewenst overgedraaid worden met de hoge-resolutie versie, om zodoende een nauwkeuriger beeld te krijgen van de bijbehorende waterstand. De verwachting is dat de verschillen langs de Hollandse kust relatief klein zullen zijn, maar dat voornamelijk in het Eems-Dollard gebied de waterstanden onderschat worden door WAQUA-DCSMv5.

2.6 Waarnemingen

2.6.1 Windmetingen

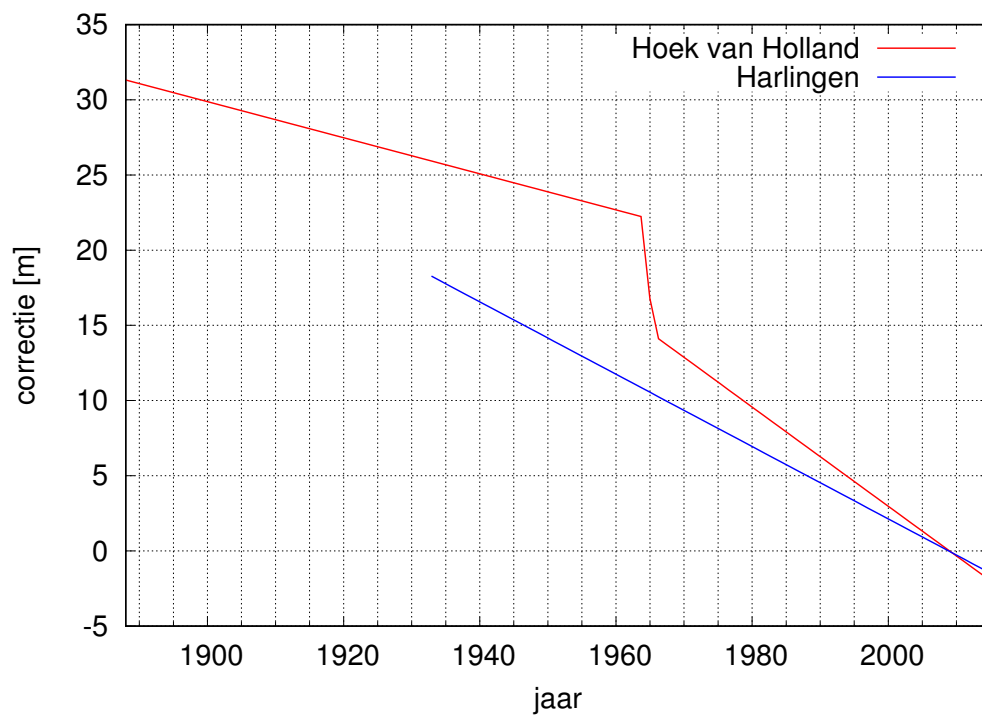
De tijdreeksen bestaan uit uurgemiddelden en uit 10minuut-gemiddelde over het laatste tijdvak van het uur.

We gebruiken de Benschop correctie om windsnelheden van afwijkende hoogten naar 10m te vertalen (Benschop, 1996). Deze Benschop correctie transformeert de waargenomen wind op meethoogte naar de referentie hoogte van 10m. Hierbij wordt een logaritmisches profiel aangenomen en gebruik gemaakt van de lokale ruwheid. Baas (2014) laat zien dat de Benschop correctie gerechtvaardigd is.

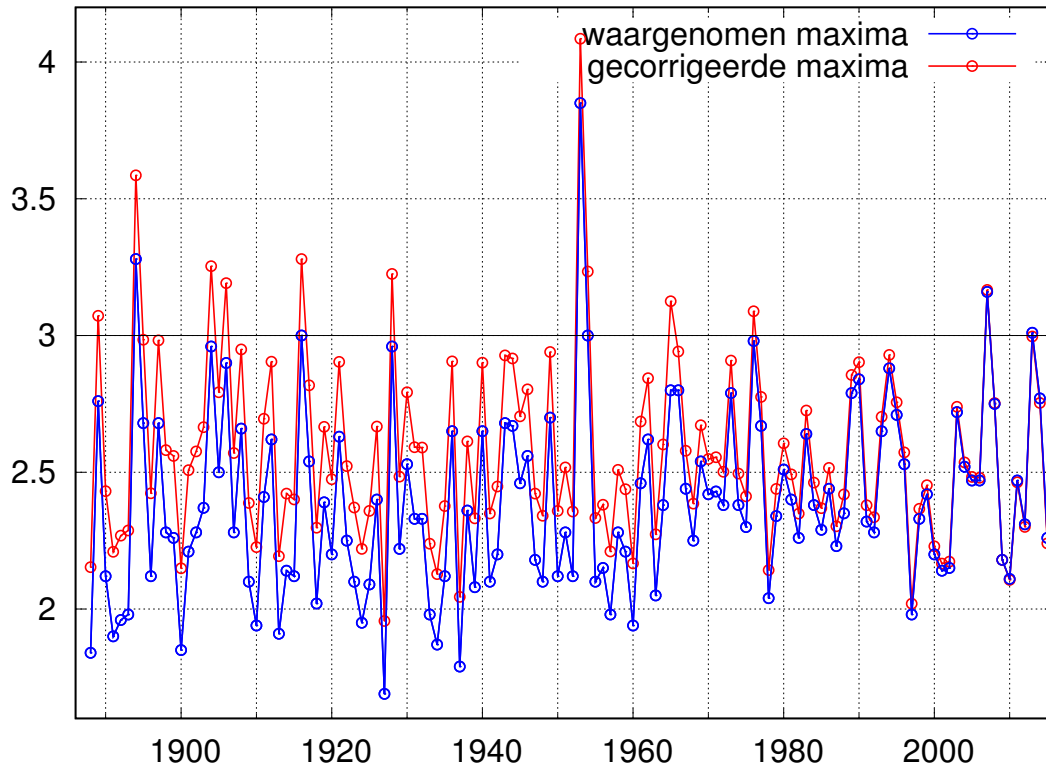
2.6.2 Waterstandsmetingen

De waarnemingsreeks van waterstanden in Hoek van Holland begint in 1864 (Holgate et al., 2013; PSMSL, 2017). Nauwkeurige waarnemingen zijn er vanaf Augustus 1887. We gebruiken de data vanaf 1888. Vanwege zeespiegelstijging en landdaling dienen de reeksen gecorrigeerd te worden voor deze invloeden. Figuur 2 laat zien hoe de waarnemingen in Hoek van Holland en Harlingen aangepast zijn tussen 1880 en 2015 om representatief te zijn voor het jaar 2009. De correctie varieert tussen 31cm voor 1888 en -2cm voor 2015. De snelle verandering rond 1965 en de verandering in de helling kan toegeschreven worden aan de uitbreiding van de Rotterdamse haven in westelijke richting (Dillingh et al., 1993; Hollebrandse, 2005; Becker et al., 2009). De (gecorrigeerde en ongecorrigeerde) jaarmaxima van de waterstand in Hoek van Holland zijn weergegeven in Figuur 3.

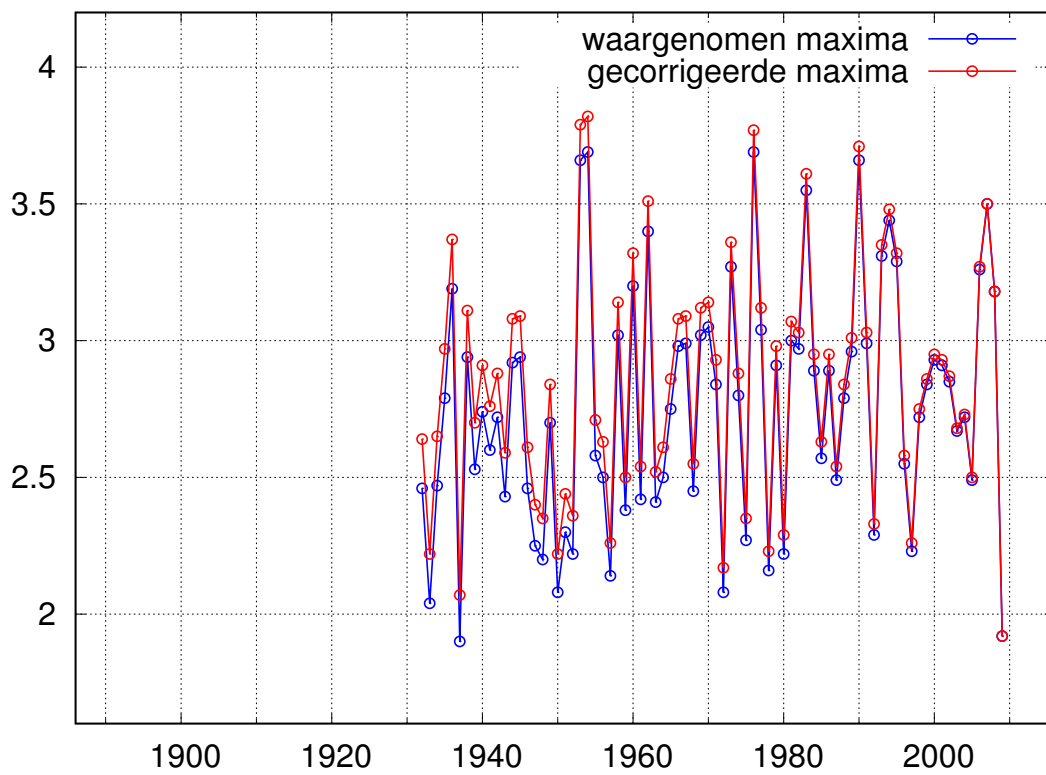
²Deze relatief hoge waarde van de Charnock parameter is deels gekozen voor tunings doeleinden. De waarde is ook hoger dan het gemiddelde van het ECMWF model, waar de waarde gelijk is aan 0.0185, (Hersbach, 2010).



Figuur 2: Aanpassing van de waargenomen waterstanden in Hoek van Holland (rood) en Harlingen (blauw) om te corrigeren voor zeespiegelstijging en landdaling. De waarnemreeks is aangepast om representatief te zijn voor de situatie in 2009.



(a) Hoek van Holland



(b) Harlingen

Figuur 3: Jaarmaxima van de waargenomen waterstanden in Hoek van Holland (a) en Harlingen (b). Correctie volgens de lijnen in Figuur 2 leidt tot de rode lijn.

3 Methodologische concepten

In dit hoofdstuk bespreken we de methodologische concepten die later in het rapport gebruikt worden. Allereerst geven we een introductie in de Extreme-waarden theorie (3.1), en in paragraaf 3.2 behandelen we de statistische verdeling van uitbijters.

De meteorologische aspecten worden besproken in de volgende paragrafen: opzet-genererende wind in paragraaf 3.4, pseudowind in paragraaf 3.5 en geostrofe wind in paragraaf 3.6.

3.1 Extreme-waarden theorie

Om de windsnelheid U te bepalen die gemiddeld één keer in een gegeven tijd voorkomt (de herhaaltijd), fitten we de maxima in een gegeven tijd aan de Gegeneraliseerde Extreme Waarden (engels: Generalized Extreme Value: GEV) verdeling. Dit is de theoretische verdeling voor zgn. blokmaxima³ (zie bijvoorbeeld Coles, 2001):

$$G(U) = \exp\left\{-\left[1 - \xi\left(\frac{U - \mu}{\sigma}\right)\right]^{1/\xi}\right\} \quad (1)$$

Hierin zijn μ , σ en ξ respectievelijk de locatie-, schaal- en vormparameter, en U is de windsnelheid. Als $|\xi| \rightarrow 0$ kan Formule 1 geschreven worden als:

$$G(U) = \exp\left\{-\exp\left(-\frac{U - \mu}{\sigma}\right)\right\} \quad (2)$$

Deze verdeling wordt de Gumbel verdeling genoemd. Als ξ in Formule 1 positief is, dan is de staart van de GEV verdeling minder dik dan die van een Gumbel verdeling; een negatieve waarde van ξ impliceert een dikkere staart ten opzichte van de Gumbel verdeling.

De herhaaltijd T , de gemiddelde tijd tussen twee momenten waarop een bepaalde waarde wordt overschreden, is gedefinieerd door:

$$T = \frac{1}{1 - G(U)} \quad (3)$$

In dit rapport worden de blokmaxima gepresenteerd in de vorm van Gumbelplots, waarin de blokmaxima weergegeven worden als functie van de Gumbel variabele $x = -\ln(-\ln(G(U)))$. Bij een Gumbel distributie resulteert dit in een rechte lijn. Via Formule 3 is de Gumbel variabele rechtstreeks gerelateerd aan de herhaaltijd, die op de bovenste horizontale as wordt weergegeven.

3.2 Statistische verdeling van uitbijters

Stel dat we m onafhankelijke reeksen hebben van elk n jaar, dan mag verwacht worden om - ergens in de m reeksen - m eens-per- n -jaar gebeurtenissen aan te treffen, n eens-per- m -jaar gebeurtenissen, en één eens-per- $m \times n$ -jaar gebeurtenis. Omdat deze eens-per- $m \times n$ -jaar gebeurtenis zich in één van de m reeksen moet bevinden, veronderstelt dit een extrapolatie van een factor n voor de specifieke locatie. Door de geschatte herhaaltijden (gebaseerd op de gefitte verdeling aan de data van de specifieke locatie) voor alle locaties te vergelijken met deze theoretische herhaaltijd, kan er vastgesteld worden of de gefitte verdeling voldoet voor extrapolatie doeleinden.

³Blokmaxima zijn de maxima per vaste periode, meestal een jaar. Een andere benadering is door alle onafhankelijke extremen boven een bepaalde drempel te beschouwen. Dit leidt tot een andere - maar uiteraard gerelateerde - verdeling, de zogenaamde Generalized Pareto Distribution (GPD).

Van den Brink en Können (2008, 2011) hebben dit concept gegeneraliseerd, en bewezen dat de logaritmische afstand tussen de geschatte herhalingstijd van het waargenomen maximum en het aantal jaren n (die zij ΔX_n noemen), exact beschreven wordt door de gestandaardiseerde Gumbel verdeling, d.w.z. met locatie parameter $\mu=0$ en schaal parameter $\sigma=1$.

De waarde van ΔX_n wordt gegeven door:

$$\Delta X_n = -\ln(-\ln(F(U_n))) - \ln(n) \quad (4)$$

waarin U_n de maximale waarde in de n -jarige reeks is, en F de gefitte distributie. Aangetoond wordt dus dat:

$$\Pr(\Delta X_n \leq x) = \text{Gumbel}(x, 0, 1) \quad (5)$$

met $\text{Gumbel}(x,0,1)$ de gestandaardiseerde Gumbel distributie, mits F de goede fit geeft.

Van den Brink en Können (2008) gebruikten dit resultaat om te onderzoeken hoe goed de GEV verdeling, gefit aan een tijdreeks van beperkte lengte, geschikt is voor extrapolatie. Zij laten zien dat het bepalen van 3 parameters van korte tijdreeksen (<100 jaar) tot overfitting leidt, wat resulteert in (meestal) overschatting voor grote herhaaltijden. De reden is dat een uitbijter de fit 'naar zich toe trekt' zodat de fit bij extrapolatie tot te hoge waarden leidt. Van den Brink en Können (2011) laten zien dat de 2-parameter Gumbel verdeling voor meetreeksen (< 100 jaar) de beste pragmatische optie is.

3.3 Kolmogorov-Smirnov test

Met de Kolmogorov-Smirnovtoets wordt getoetst of een dataset beschreven kan worden met een bekende verdeling F_0 . De toetsingsgrootte is D_n , die gegeven wordt door:

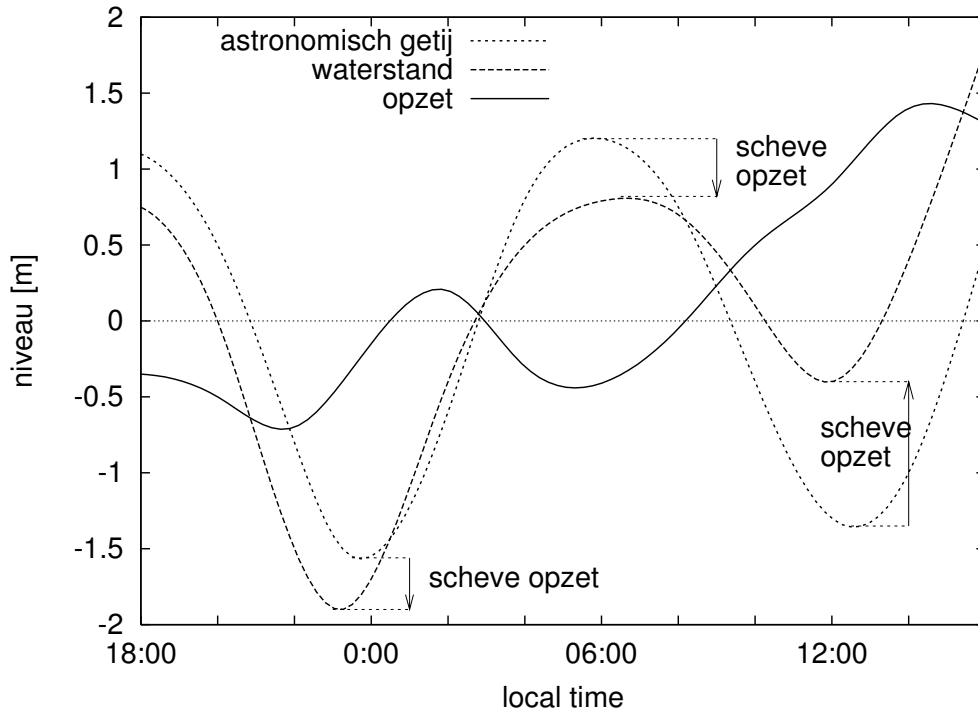
$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F_0(x)| \quad (6)$$

In woorden is D_n gegeven door het maximale verschil tussen de empirische verdeling F_n en de bekende verdeling F_0 . Er zijn tabellen beschikbaar voor de drempelwaarden van D_n . Voor te grote waarden van de toetsingsgrootte wordt de nulhypothese dat F_n gelijk is aan F_0 verworpen.

3.4 Opzet-genererende wind

Hoewel het verband tussen waterstand en meteorologische omstandigheden complex is, kunnen een aantal vereenvoudigingen gemaakt worden waardoor er een eerste-orde schatting gemaakt kan worden van de wateropzet of waterstand op basis van de windsnelheid.

De eerste benadering is door de wisselwerking tussen wateropzet en astronomisch getij te negeren. Er kan dan een schatting gemaakt worden van de waterstand door het astronomisch hoogwater op te tellen bij de zogenaamde *scheve opzet*. Dit is de maximale waterstand min het maximale astronomisch getij binnen enkele uren van de maximale waterstand. De definitie van scheve opzet is weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4: Definitie van de scheve opzet H als het verschil in maximale waterstand min het maximale astronomisch getij binnen enkele uren.

Timmerman (1977) gebruikt een tabel om de bijdrage van verschillende delen van de Noordzee aan de scheve opzet te berekenen als functie van de windsterkte en -richting. Van den Brink et al. (2005) heeft deze tabellen vereenvoudigd tot de volgende analytische uitdrukking:

$$H = A C_d U^2 \cos(\phi - \beta) + \frac{1015 - p}{100.5} \quad [\text{m}] \quad (7)$$

Hierin is C_d de drag coëfficiënt, U de windsnelheid, ϕ de windrichting, en A en β empirisch bepaalde constanten op basis van Timmerman (1977). Voor de wind wordt een punt centraal op de Noordzee genomen ($4^\circ\text{E}, 56^\circ\text{N}$). De tweede term aan de rechterkant van Formule 7 geeft het barometrisch effect aan, met p de instantane druk op zeeniveau in hPa ter plekke van het betreffende kuststation. De parameters A en β variëren per station. De factor A geeft aan hoe sterk de betreffende locatie gevoelig is voor opzet, en de hoek β geeft de windrichting aan die leidt tot maximale opzet. Deze hoek is sterk gerelateerd aan de optimale strijklengte (engels: "fetch") en heeft voor alle Nederlandse stations een waarde die rond de Noordwestelijke wind ligt. Zo is voor Hoek van Holland de optimale waarde $\beta=312^\circ$.

Op basis hiervan definiëren we de opzet-genererende wind als de windsnelheid die voor wateropzet H in Hoek van Holland zorgt als de projectie van de wind op de richting van $\beta=315^\circ$:

$$U_H = U \sqrt{\cos(\phi - \beta)} \quad (8)$$

De opzet-genererende wind U_H is altijd lager dan (of gelijk aan) de actuele wind. De mate waarin U_H lager is geeft een indicatie in hoeverre de windrichting van belang is ten opzichte van de windsterkte.

3.5 Pseudowind

Hydrodynamische modellen worden aangedreven door de stress. Om de wind te vertalen naar stress wordt een keuze gemaakt voor een dragrelatie. Het is belangrijk dat dezelfde relatie wordt gebruikt in het hydrodynamische model als in het atmosferische model, zodat het hydrodynamische model dezelfde stress als invoer heeft die het meteorologische model berekent. Om modellen met verschillende formuleringen toch te koppelen, kan de wind herschreven worden naar de zogenaamde pseudowind. Dit is de wind die het model geproduceerd zou hebben bij de gegeven drag parameterisatie. Zie bijvoorbeeld van Nieuwkoop et al. (2015) voor een uitgebreidere beschrijving.

Het ECMWF heeft een complexe, tijdsafhankelijke parameterisatie van de drag (Janssen, 2004). Helaas is deze grootte niet op hoge tijdsresolutie beschikbaar voor de seizoensverwachtingen. Daarmee is het niet mogelijk om de 10m-winden te transformeren naar pseudowind⁴.

3.6 Geostrofe wind

The geostrofe wind is de theoretische wind die resulteert van een balans tussen het Coriolis effect en de druk gradiënt:

$$2\Omega \times U_{geo} = \frac{1}{\rho} \nabla p \quad (9)$$

met U_{geo} de geostrofe wind vector, Ω de the hoeksnelheid van de aarde, ρ de dichtheid van lucht, and p de druk op zeeniveau (MSLP). Dit kan herschreven worden in:

$$2\Omega \sin(\phi)v_{geo} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (10)$$

$$2\Omega \sin(\phi)u_{geo} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (11)$$

waarin ϕ de breedtegraad is.

⁴Voor system-5 is de stress wel gearchiveerd, en kan de pseudowind dus berekend worden.

4 Validatie en verificatie

In dit hoofdstuk onderzoeken we in hoeverre de extreme winden en drukken van de ECMWF dataset overeenkomen met waarnemingen. Ook de waterstanden vanuit de ECMWF/WAQUA-DCSM5 modelketen worden vergeleken met waarnemingen.

4.1 Interpretatie van waargenomen en gemodelleerde parameters

Om een goede vergelijking te kunnen maken tussen de gemodelleerde wind en de waargenomen wind, is het belangrijk om te onderzoeken wat het effect van de verschillende karakteristieken zijn. De waarnemingen betreffen puntwaarnemingen op een hoge tijdsresolutie, terwijl de ECMWF model-uitvoer gemiddelden over een groot gebied betreffen met een lagere tijdsresolutie.

De volgende aspecten zijn van invloed op de hoogte van extreme winden die het ECMWF model genereert:

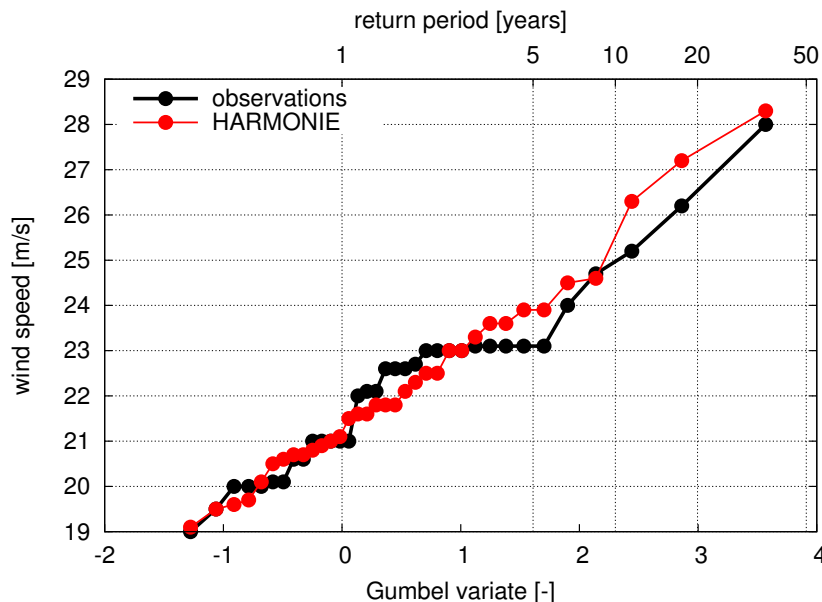
- Het ECMWF model heeft een tijdstap van 30 minuten. De uitvoer kan daarom gezien worden als het gemiddelde over ongeveer 30 minuten.
- De uitvoer is eens per 6 uur. Van de 12 tijdstappen van 30 minuten in 6 uur wordt alleen de laatste uitgevoerd. Er is dus een grote kans dat één van de 11 niet uitgevoerde tijdstappen een hogere wind geeft dan de uitgevoerde tijdstap. Hoeveel deze wind hoger is, hangt af van de (in eerste instantie onbekende) temporele correlatie tussen opeenvolgende tijdstappen.
- De ruimtelijke resolutie is T255, wat correspondeert met ongeveer 80km. Omdat de variabiliteit op kleine schalen echter te sterk wordt gedempt, ligt de effectieve resolutie lager, in de orde van 150-200km.
- de 10m-wind over water wordt bepaald door de parameterisatie van de drag coëfficiënt. Verandering van de drag heeft dus een rechtstreeks effect op de wind snelheid, en pas in tweede orde op de stress (zie ook Zweers et al., 2010).

Voor de windwaarnemingen zijn de volgende aspecten van belang:

- De tijdstap is 10 minuten. Vanaf 1 april 2003 zijn alle 10-minuten gemiddelden gearchiiveerd, vóór die datum alleen het gemiddelde van het laatste 10-minuten tijdvak van het uur, alsook het gemiddelde over het hele uur.
- Voor kuststations en locaties op zee is de meethoogte vaak ongelijk aan 10m. De waarneming moet dus vertaald worden van meethoogte naar een hoogte van 10m.
- De hoogte van het zeeniveau variëert in de tijd door astronomisch getij en opzet. Idealiter zou de hoogte van de meting dus tijdsafhankelijk gecorrigeerd moeten worden. Dit effect kan (bij een meethoogte van 16.5 m boven NAP en een windsnelheid van 30 m/s) leiden tot een onderschatting van de 10m wind van ongeveer 1 m/s.

Om de temporele en ruimtelijke aspecten van de middeling inzichtelijk te maken gebruiken we de uitvoer van de 35-jarige hindcast die is uitgevoerd met het hoge-resolutie model HARMONIE (zie paragraaf 2.4 voor een beschrijving). Door de veel hogere ruimtelijke resolutie (2.5km) en de uurlijkse uitvoer is HARMONIE veel beter rechtstreeks te vergelijken met waarnemingen dan de ECMWF data. De vergelijking van waarnemingen met ECMWF resultaten gaan we daarom doen via de HARMONIE data.

Figuur 5 laat de Gumbelplot zien van de 10m in Hoek van Holland voor de eens-per-uur 10-minuut gemiddelde waarnemingen (zwart) en HARMONIE (rood) over de periode 1979-2013. Te zien is dat HARMONIE geen systematische bias heeft in het reproduceren van de extreme winden. We concluderen hieruit dat de extreme wind vanuit HARMONIE klimatologisch beschouwd kan worden als een 10-minuut gemiddelde wind.



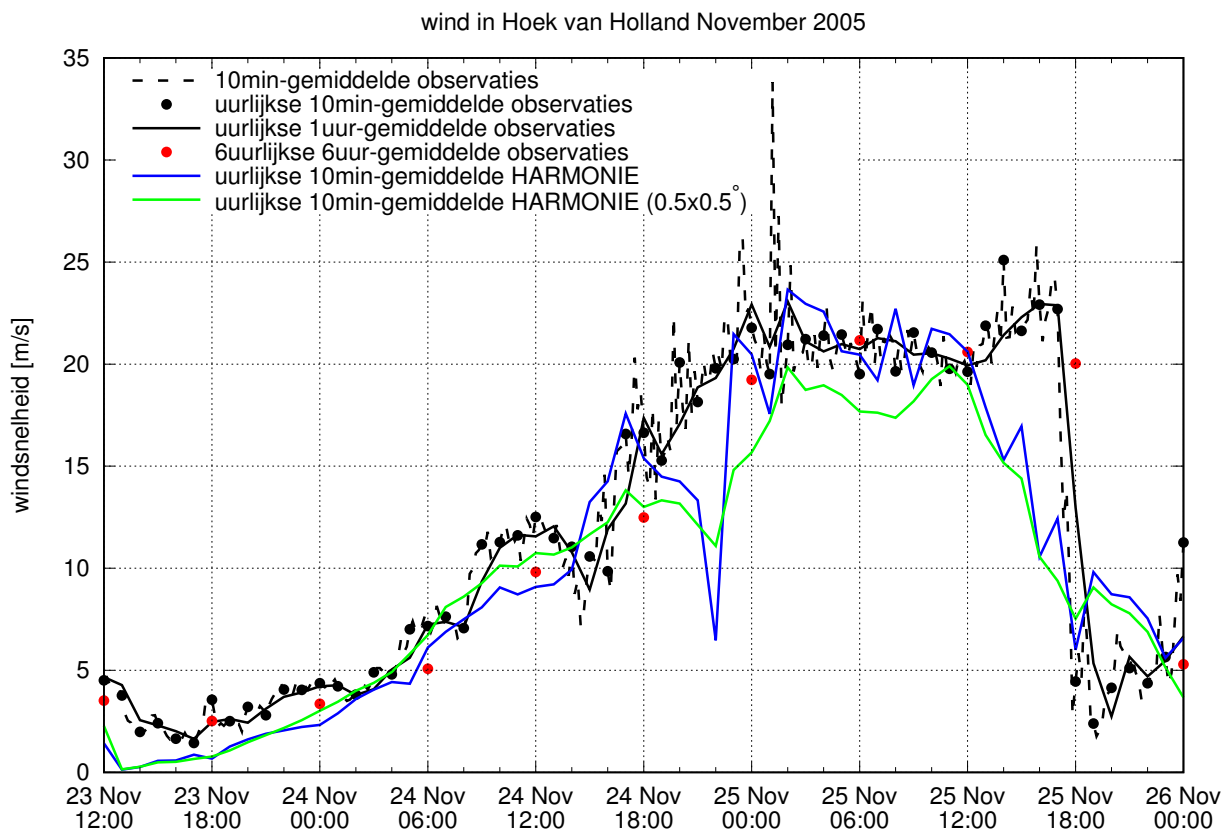
Figuur 5: *Gumbelplot van de jaarmaxima van de 10m wind in Hoek van Holland voor de waarnemingen (zwart) en HARMONIE (rood) over de period 1979-2013.*

4.2 Tijdreeks

Om een kwalitatieve indruk te krijgen van de effecten van zowel temporele als ruimtelijke middeling op de extreme wind, laat Figuur 6 een tijdreeks zien van de wind in Hoek van Holland tijdens de storm van 25 November 2005. De onderbroken zwarte lijn laat de 10min-gemiddelde waarnemingen zien, de doorgetrokken zwarte lijn de uurgemiddelde waarnemingen, de zwarte punten de eens-per-uur gesamplede 10min-gemiddelde waarden, en de rode punten de 6uur-gemiddelde waarnemingen. Daaraan zijn de HARMONIE waarden toegevoegd: de 10min-gemiddelde uurwaarden in blauw, en de 10min-gemiddelde uurwaarden gemiddeld over $0.5 \times 0.5^\circ$ in groen. We concluderen het volgende uit Figuur 6:

- De extreme 10min-gemiddelde piek in de waarnemingen van 33.8 m/s is in geen van de andere reeksen terug te zien. Dit is niet verwonderlijk om twee redenen. Ten eerste is de sampling van de andere reeksen eens per uur. Dat de uitschieter niet in de HARMONIE data te zien is heeft ook als oorzaak dat de variabiliteit op kleine tijdschalen van HARMONIE nog te veel gedempt is vanwege de korte spin-up tijd, waardoor dergelijke uitschieters in HARMONIE minder vaak voor zullen komen dan in waarnemingen.
- Er lijkt weinig verschil te zijn tussen de uurgemiddelde waarden (zwarte doorgetrokken lijn) en de uurlijks gesamplede 10min-gemiddelde waarden (zwarte stippen). De 6uur-gemiddelden (rode stippen) zijn lager dan de 1uur-gemiddelde waarden (zwarte lijn).
- De uurlijks gesamplede waarden van de observaties (zwarte stippen) en van HARMONIE (blauwe lijn) komen goed overeen in maximale waarden.

- Ruimtelijke middeling over $0.5 \times 0.5^\circ$ (groen) heeft een aanzienlijke afname van de extremen tot gevolg.



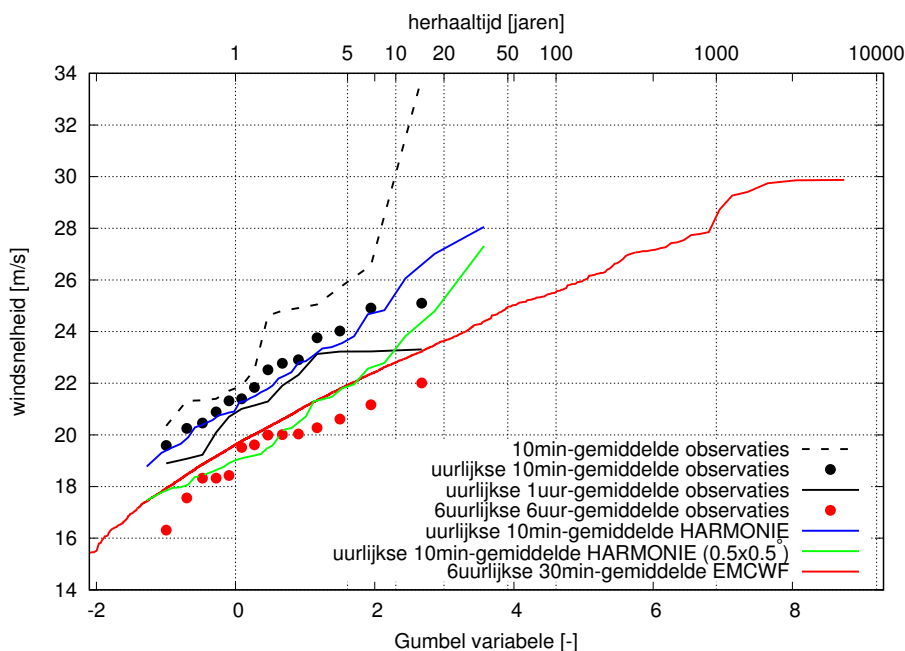
Figuur 6: Windsnelheden in Hoek van Holland tijdens de storm van 25 November 2005. De onderbroken zwarte lijn laat de 10min-gemiddelde waarnemingen zien, de doorgetrokken zwarte lijn de uurgemiddelde waarnemingen, de zwarte punten de eens-per-uur gesampled 10min-gemiddelde waarden, en de rode punten de 6uur-gemiddelde waarnemingen. Daarbij zijn de HARMONIE waarden toegevoegd: de 10min-gemiddelde uurwaarden in blauw, en de 10min-gemiddelde uurwaarden gemiddeld over $0.5 \times 0.5^\circ$ in groen.

4.3 Klimatologie van extreme wind voor verschillende middelingen

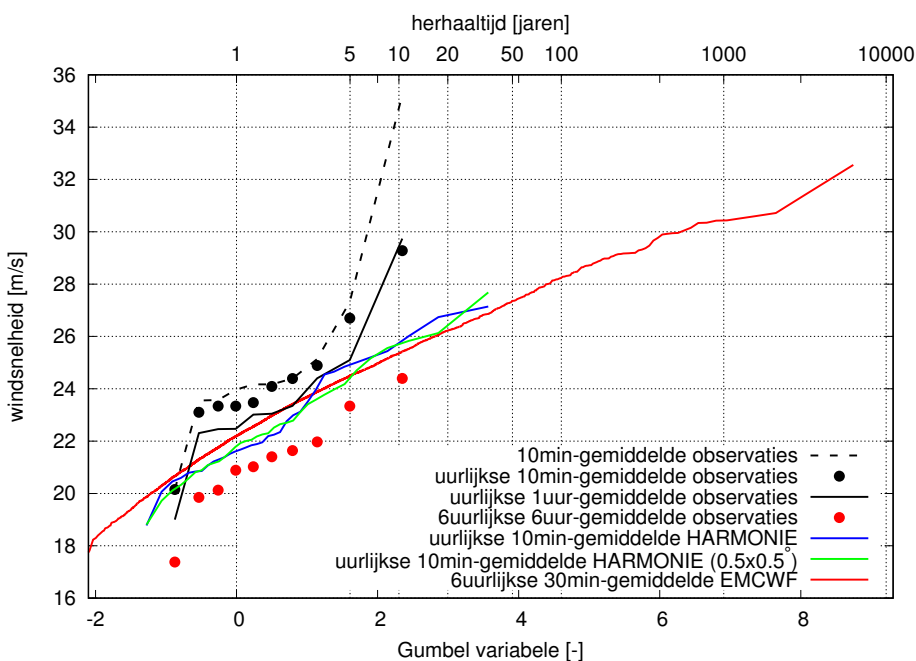
Waar Figuur 6 een individuele casus laat zien, onderzoeken we nu hoe het effect van middeling doorwerkt in de klimatologie van de extremen.

Figuur 7 geeft de effecten van de verschillende middelingsbewerkingen weer op de verdeling van de extremen, weergegeven als een Gumbelplot, voor Hoek van Holland (a) en Vlieland (b). Voor de waarnemingen is de periode 2003-2016 genomen, omdat over deze periode 10min-gemiddelden voor alle tijdvakken beschikbaar zijn. Voor HARMONIE is de 1979-2013 periode genomen, en voor de ECMWF data de 6282-jarige dataset. De hoogste 10min-gemiddelde waarde in de waarnemingen in Hoek van Holland (onderbroken zwarte lijn) van 33.8 m/s correspondeert met Figuur 6. De maximale uurlijkse gesampled 10min-gemiddelde extreme wind (zwarte stippen) is 'slechts' 25.1 m/s, een afname van 8.7 m/s. Middeling over klokuren (zwarte doorgetrokken lijn) doet de extremen nog iets verder afnemen, en middeling over 6 uur (rode stippen) doet de maxima niet verder komen dan 22.0 m/s. De HARMONIE data (blauw - die volgens Figuur 5 correspondeert met uurlijkse 10min-gemiddelde wind) laat hier hetzelfde resultaat zien als de waarnemingen. Middeling van de HARMONIE data over $0.5 \times 0.5^\circ$ (groen)

laat een aanzienlijke afname zien van ruim 2 m/s. De ECMWF dataset (onderbroken rode lijn) geeft ongeveer dezelfde verdeling te zien als de ruimtelijk gemiddelde HARMONIE data.



(a) Hoek van Holland



(b) Vlieland

Figuur 7: Gumbelplots van de windsnelheid in Hoek van Holland (a) en Vlieland (b). De onderbroken zwarte lijn laat de 10min-gemiddelde waarnemingen zien, de doorgetrokken zwarte lijn de uurgemiddelde waarnemingen, de zwarte punten de eens-per-uur gesampled 10min-gemiddelde waarden, en de rode punten de 6uur-gemiddelde waarnemingen. Daarbij zijn de HARMONIE waarden toegevoegd: de 10min-gemiddelde uurwaarden in blauw, en de 10min-gemiddelde uurwaarden gemiddeld over $0.5 \times 0.5^\circ$ in groen. De onderbroken rode lijn geeft de ECMWF dataset aan.

Uit Figuur 6 en 7 blijkt dat de verschillende middelings-bewerkingen een aanzienlijke invloed hebben op de verdeling van de extremen. Opmerkelijk is ook dat hoge waarden van de 10min-gemiddelde observaties. Dit is mogelijk een gevolg van squalls⁵ Hoewel de ECMWF data voor het dichtstbijzijnde roosterpunt bij Hoek van Holland slechts tot 30 m/s komt in 6282 jaar, kunnen we op basis van Figuur 7 niet concluderen dat deze wind te laag is. Vanuit de Gumbelplot voor Vlieland volgt dezelfde constatering.

We concluderen dat de meest extreme winden in system-4 mogelijk aan de lage kant zijn. Waarschijnlijk is dat analyse van de system-5 winden uitsluitsel kan geven, omdat hiervoor de stress beschikbaar is. Ook is de ruimtelijke resolutie van system-5 hoger.

4.4 Extreme waterstanden

Alle 6282 jaar van de ECMWF dataset zijn doorgerekend met het waterstandsmodel WAQUA-DCSMv5 (zie paragraaf 2.5). De jaarmaxima van Hoek van Holland en Harlingen zijn weergegeven in Figuur 8. De ECMWF/WAQUA-DCSMv5 combinatie geeft nauwkeurige waarden in Hoek van Holland voor lagere herhaaltijden, maar een lichte onderschatting voor hogere herhaaltijden. Er zijn verschillende redenen waarom de ECMWF/WAQUA-DCSMv5 combinatie lagere waarden geeft voor hoge herhaaltijden dan de waarnemingen suggereren:

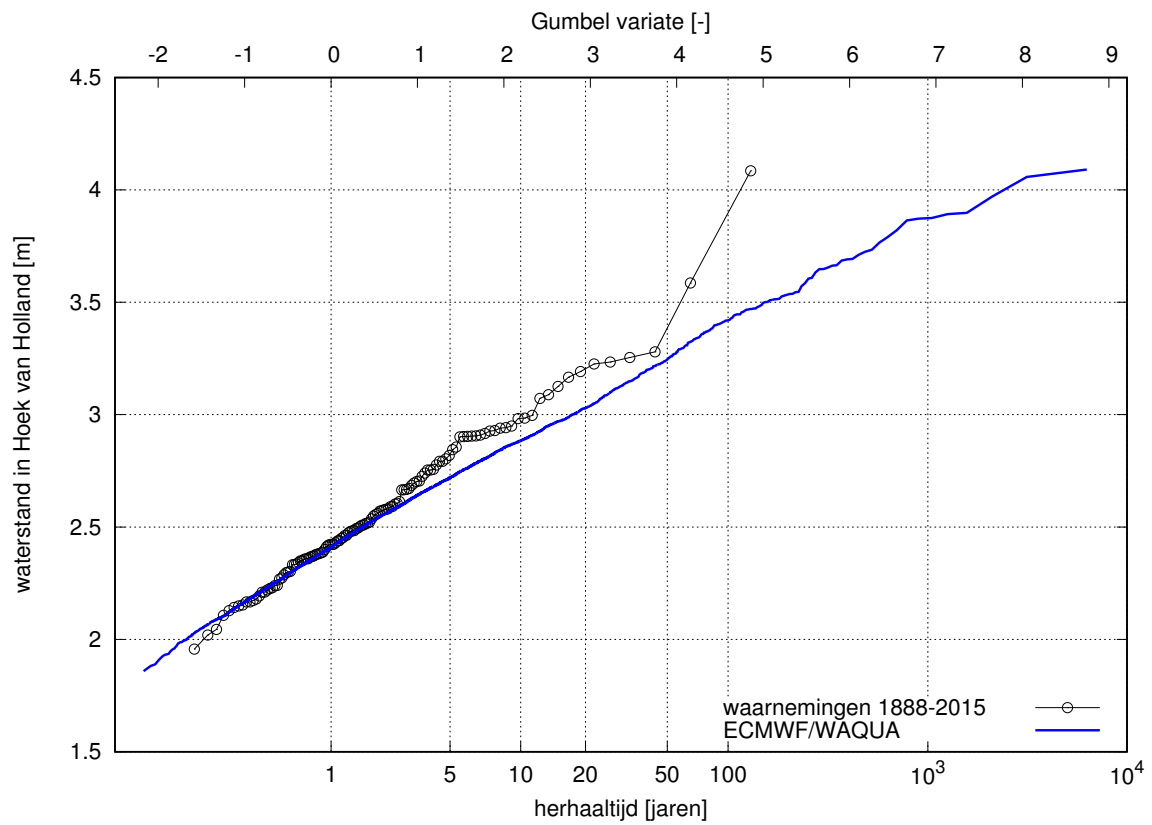
- de plotpositie van de meest extreme waarnemingen wordt sterk beïnvloed door de uitbijter van 1953 (hoogste waterstand van 4.09 m). Als deze enkele waarneming er niet was geweest, was de overeenkomst goed over de hele range van waarnemingen.
- de waarnemingen van Hoek van Holland zijn gecorrigeerd voor zeespiegelstijging en verandering van de omgeving (zie ook van den Brink en de Goederen, 2017) waardoor de 1953-waarneming 24 cm verhoogd is.
- onduidelijk is of de (niet gearchiveerde) stress van het ECMWF een hogere waarde van de waterstand zou hebben gegeven dan de 10m-wind geeft.
- De lage temporele en ruimtelijke resolutie van het ECMWF model kan de oorzaak zijn van de onderschatting van de meest extreme waterstanden.
- De oorzaak van de onderschatting kan echter ook in WAQUA-DCSMv5 liggen. Het model is immers afgeregeld op minder extreme stormen dan degene die nu onderzocht worden.

De Gumbelplot voor Harlingen (Figuur 8) geeft geen onderschatting te zien voor de ECMWF/WAQUA-DCSMv5 resultaten. Er zijn de volgende overwegingen die deze verschillen in uitkomsten ten opzichte van Hoek van Holland kunnen verklaren:

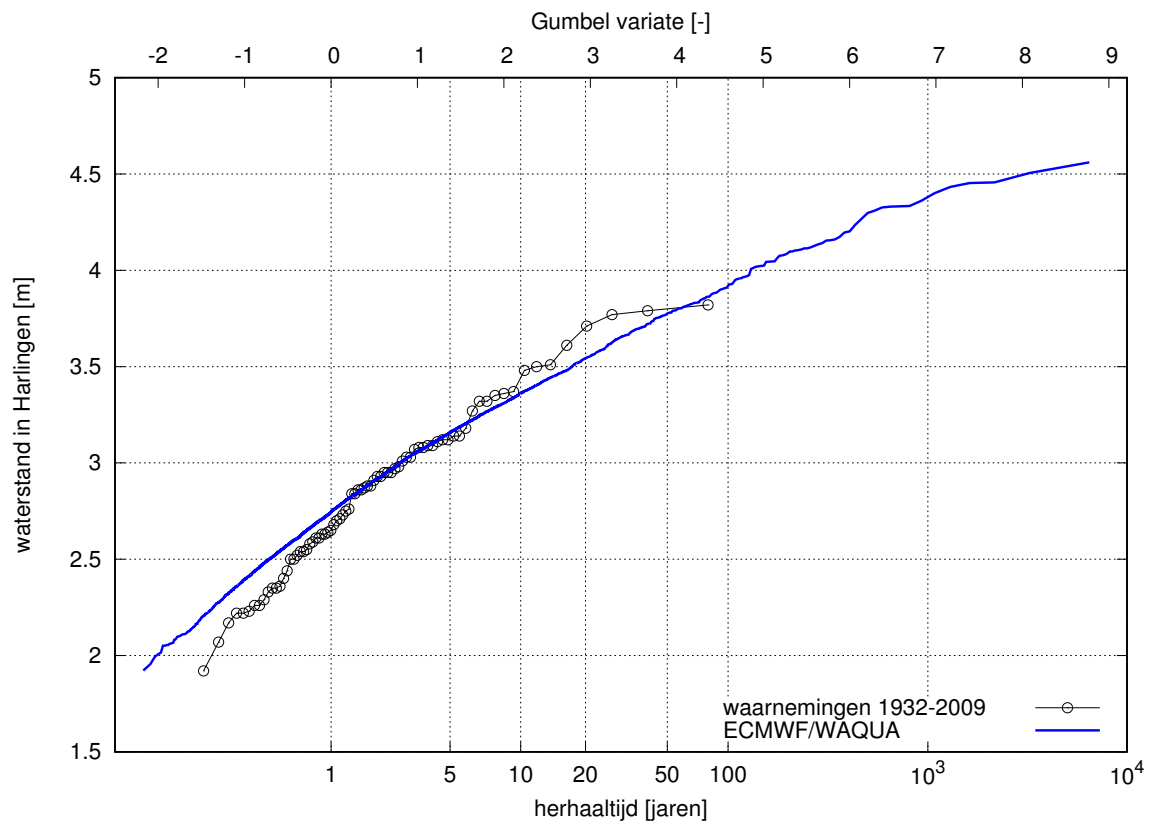
- De storm van 1953 gaf geen extreme waterstand in Harlingen, waardoor de visuele weergave anders is.
- De lijnen in Harlingen zijn sterker gekromd (met een GEV vormparameter ξ die positief is, zie paragraaf 3.1) dan in Hoek van Holland⁶. Dit kan een fysische oorzaak hebben, bijvoorbeeld de ondiepte van de Waddenzee. Hierdoor is de sterkte van de wind op de open Noordzee van minder belang in Harlingen dan in Hoek van Holland.

⁵De effecten van squalls zijn voor zeewaterstanden niet van groot belang (mogelijk voor seiches), maar wel voor golven op de niet-kustwateren. Gebruik van ECMWF data geeft derhalve het risico dat deze verschijnselen niet gemodelleerd worden. Een mogelijke oplossing is het gebruik van hoge-resolutie modellen (zoals HARMONIE) op hoge tijdsresolutie.

⁶Zie ook Figuur 25 voor het verloop van de GEV vormparameter langs de Noordzee kust.



(a) Hoek van Holland



(b) Harlingen

Figuur 8: Gumbelplots voor de waterstand in Hoek van Holland (a) en Harlingen (b) uit waarnemingen (zwart) en uit de ECMWF/WAQUA-DCSMv5 combinatie (blauw).

We concluderen dat de klimatologie van de extreme wind die het ECMWF model geeft, ongeveer 10% lager is dan de 10minuut-gemiddelde lokale gemeten wind. Deze afwijkingen kunnen waarschijnlijk toegeschreven worden aan de lagere temporele en ruimtelijke resolutie van het ECMWF model.

Omdat de verhoging van de waterstand een cumulatief effect is over grotere afstanden en tijden, is het effect van de lagere resolutie op de waterstand kleiner dan op de wind. De ECMWF/WAQUA-DCSMv5 combinatie geeft zelfs verrassend goede resultaten langs de Nederlandse kust. De mogelijk te lage meest extreme waarden voor Hoek van Holland kunnen veroorzaakt worden door WAQUA-DCSMv5, door de drag-parameterisatie, of door de (te) lage resolutie van het ECMWF model. Deze aspecten kunnen onderzocht worden met de nieuwe versie van het ECMWF seizoensverwachtingen model (system-5). Hierin is de ruimtelijke resolutie hoger (35 km) en is de stress ook gearchiveerd.

Om te onderzoeken in hoeverre de onderschatting van de meest extreme situaties in Hoek van Holland te maken heeft met de resolutie van WAQUA-DCSMv5, kunnen een aantal situaties doorgerekend worden met de nieuwere versie WAQUA-DCSMv6, die een 5 keer hogere ruimtelijke resolutie heeft dan WAQUA-DCSMv5.

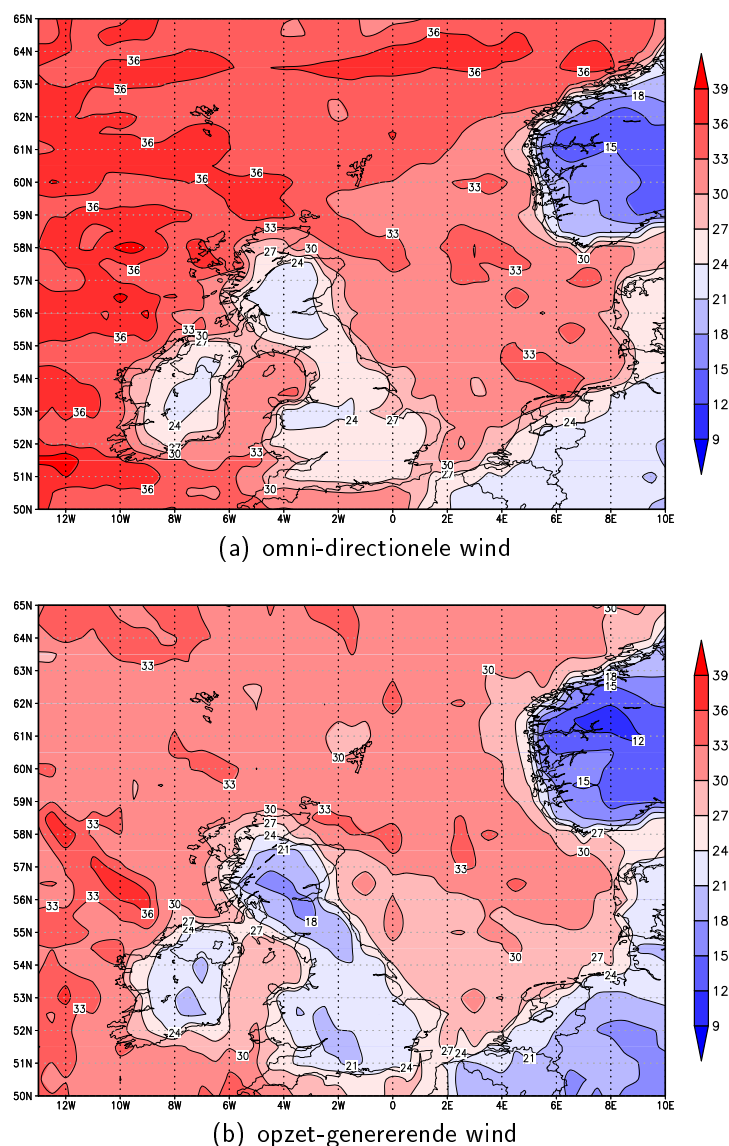
5 Resultaten

In dit hoofdstuk bespreken we de maximale 10m-wind en de minimale druk van het ECMWF model voor achtereenvolgens de Noordzee (paragraaf 5.1) en wereldwijd (paragraaf 5.2).

5.1 Wind en druk boven de Noordzee

Figuur 9 laat de maximale wind zien rond de Noordzee. Voor het Noordzee gebied is de maximale wind rond de 35 m/s. De maximale opzet-genererende wind (Formule 8) is 33 m/s.

Opmerkelijk is dat de opzet-genererende wind slechts 5 á 6% lager is dan de omni-directionele wind.



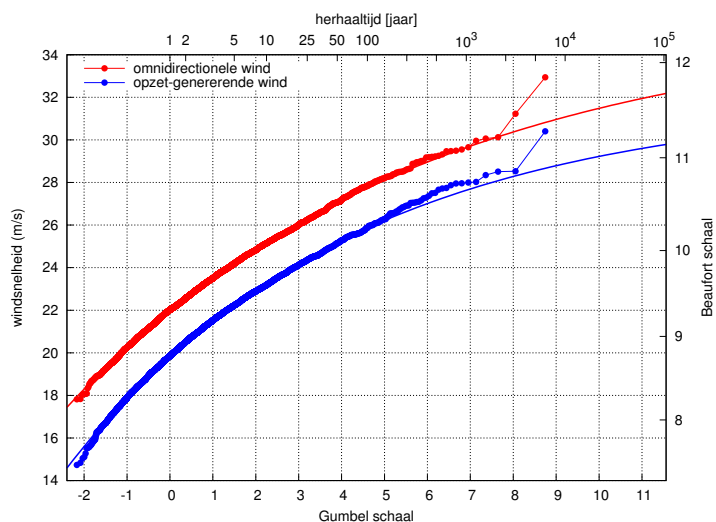
Figuur 9: Maximale omnidirectionele wind (a) en maximale opzet-genererende wind (b) in m/s in 6282 jaar in de ECMWF seizoensverwachtingen dataset voor het gebied rond de Noordzee.

Figuur 10(a) toont de Gumbelplot van de wind voor een punt centraal op de Noordzee (4°E,55°N, zie de stip in Figuur 11). De rode punten geven de maximale wind aan, de blauwe tonen de opzet-genererende wind volgens Formule 8. De jaarmaxima van de opzet-genererende

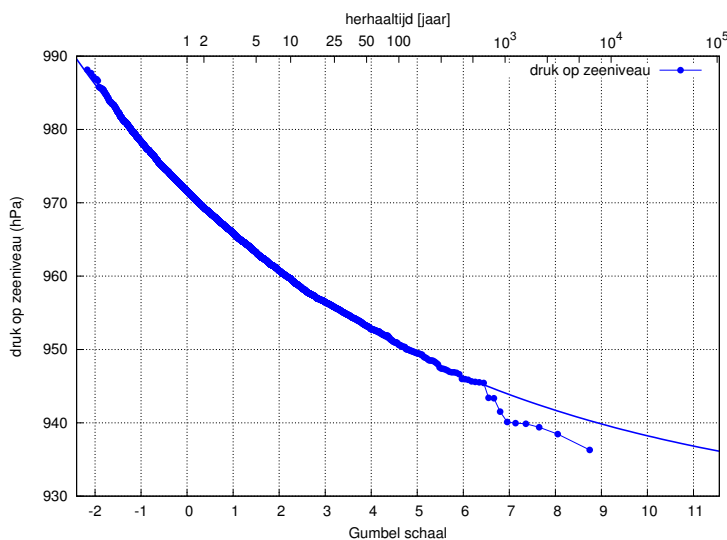
wind zijn gemiddeld 2.1 m/s lager dan die van de omni-directionele wind. Opmerkelijk is dat het hoogste punt voor zowel de omni-directionele als de opzet-genererende wind boven de lijn ligt, en een corresponderende herhaaltijd heeft die voorbij 10^5 jaar ligt⁷.

Figuur 10(b) toont de minimale druk in ($9^{\circ}\text{E}, 56^{\circ}\text{N}$). Dit roosterpunt is gekozen omdat depressies die een sterke Noordwestelijke component hebben hun kern in de buurt van dit punt zullen hebben (zie ook Sterl et al., 2009). Dit figuur laat zien dat het ECMWF model in staat is om extreem diepe depressies te genereren, met kerndrukken tot onder 940 hPa.

Opmerkelijk is dat zowel voor de wind als voor de druk de meest extreme gevallen afwijken van de gefitte verdeling. In paragraaf 6.1 wordt hier verder op ingegaan.



(a) omni-directionele en opzet-genererende wind in $4^{\circ}\text{E}, 55^{\circ}\text{N}$

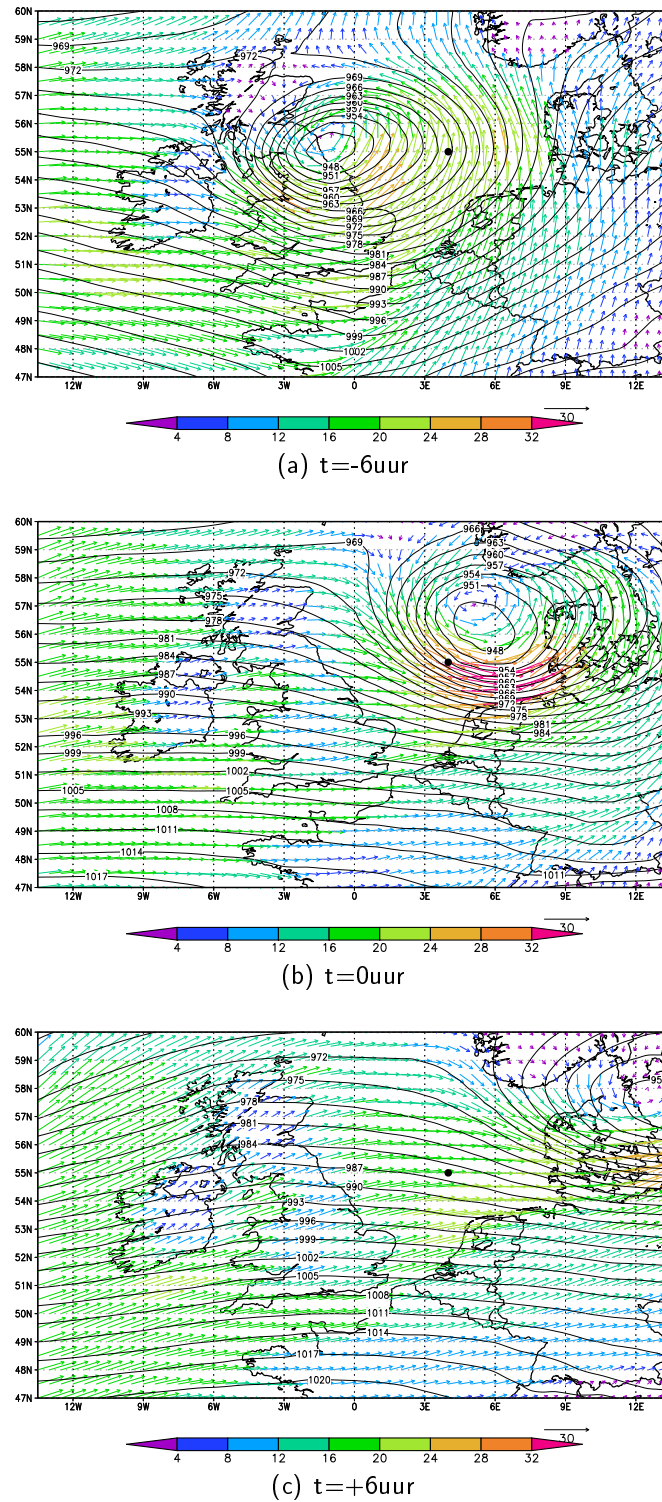


(b) druk in $9^{\circ}\text{E}, 56^{\circ}\text{N}$

Figuur 10: Gumbelplot van de wind (boven) en druk (onder) in 6282 jaar in de ECMWF seizoensverwachtingen dataset. In de bovenste figuur geven de rode punten de omnidirectionele wind aan, de blauwe punten de opzet-genererende wind volgens Formule 8. De doorgetrokken lijnen geven de gefitte GEV verdelingen aan.

⁷De corresponderende herhaaltijd kan bepaald worden door het punt horizontaal te verplaatsten tot aan de gefitte distributie.

Analyse van de herkomst van de hoogste omni-directionele en opzet-genererende wind laat zien dat deze bij dezelfde meteorologische situatie behoren. De wind en druk op zeeniveau van het moment voor, tijdens en na maximale wind in roosterpunt ($4^{\circ}\text{E}, 55^{\circ}\text{N}$) is weergegeven in Figuur 11.

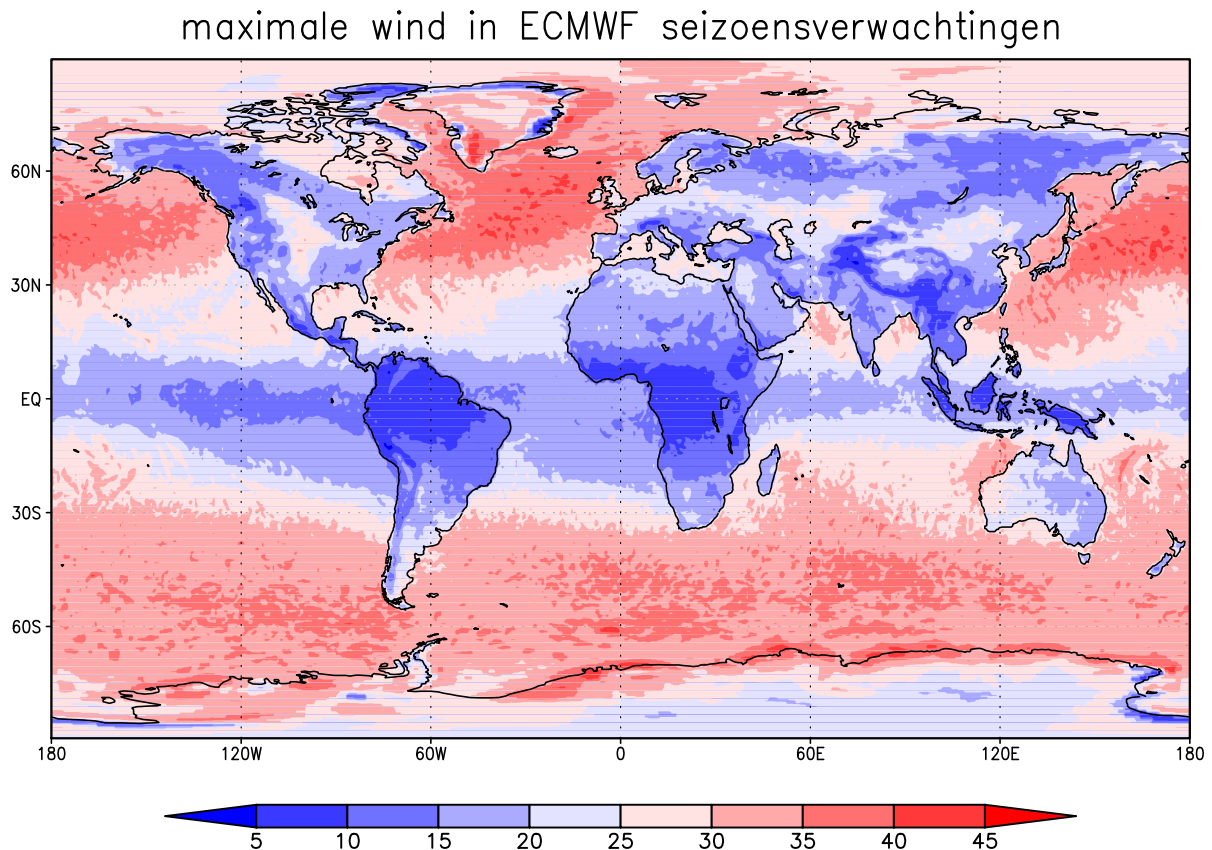


Figuur 11: Synoptische ontwikkeling van de depressie met de hoogste omni-directionele en opzet-genererende wind in (4° E, 55° N) in de ECMWF seizoensverwachtingen dataset. De pijlen geven in lengte en kleur de windsterkte en richting aan, de doorgetrokken lijnen de druk op zeeniveau in hPa. De locatie (4° E, 55° N) is aangegeven met een stip.

Hoewel de depressie hoge windsnelheden produceert en een diepe kerndruk heeft van 945 hPa, geeft de storm een maximale scheve opzet van slechts 1.04 m in Hoek van Holland. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt doordat de depressie sneller overtrekt dan de responstijd van de

Noordzee (≈ 9 uur). Dit voorbeeld laat zien dat extrapolatie van de meest extreme Noordwesten winden niet voldoende informatie geeft over extreme waterstanden.

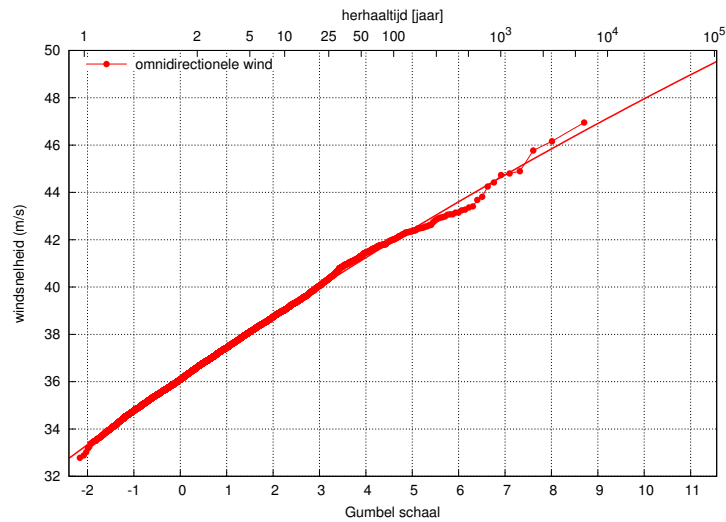
5.2 Wereldwijde extreme wind en druk



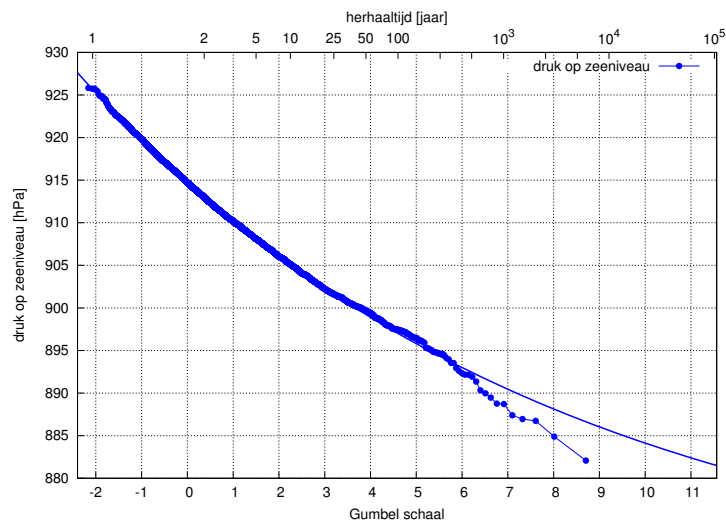
Figuur 12: Maximale wind [m/s] in 6282 jaar in de ECMWF seizoenverwachtingen dataset

Figuur 12 laat de maximale wind zien per roosterpunt in de 6282 jaar van de ECMWF seizoenverwachtingen dataset. De waarde varieert tussen 3.7 en 46.9 m/s. Duidelijk is te zien dat de wind laag is rond de evenaar en maximaal in de extratropen.

De Gumbelplot van de maximale omni-directionele wind voor een willekeurige locatie tussen 35°N en 70°N op aarde is weergegeven in Figuur 13. Een conclusie die getrokken kan worden uit Figuur 13 is dat de Gumbelplots - zowel van wind als van druk - geen verzadiging laten zien. Blijkbaar zijn er, ook in een 6282-jarige reeks - geen fysische limieten die de sterkte van de wind en de diepte van extra-tropische depressies begrenzen.



(a) maximale wind



(b) minimale druk

Figuur 13: Maximale wind (a) en minimale druk op zeeniveau (b) in 6282 jaar in de ECMWF seizoensverwachtingen dataset voor een willekeurige locatie tussen 35° en 70° Noord.

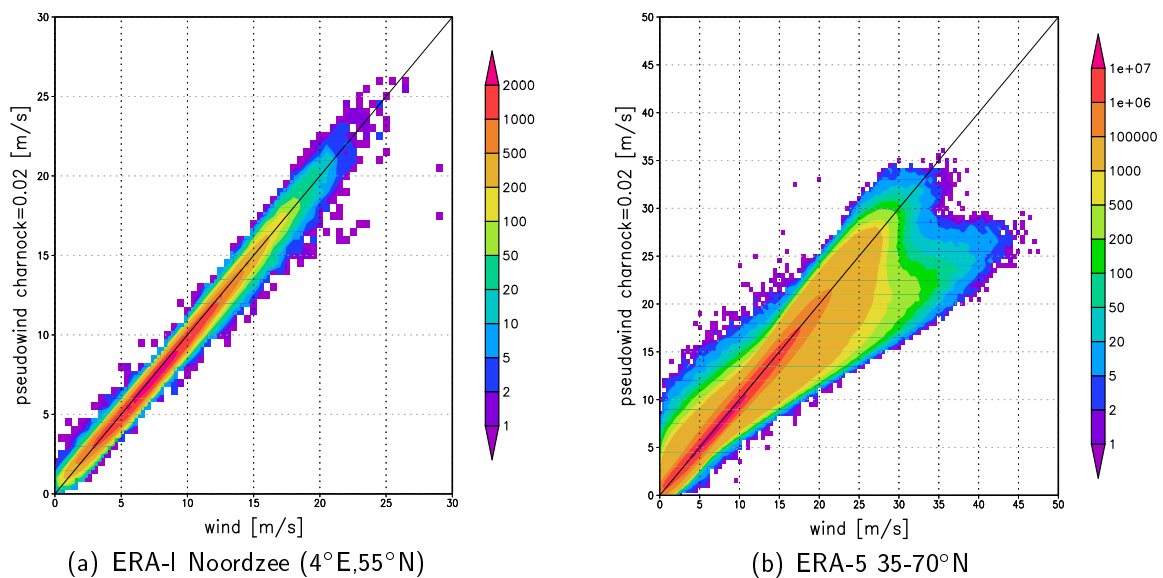
Combinatie van Figuur 13 met Figuur 10 geeft aan dat in de noordelijke extra-tropen (35°N - 70°N) elk jaar maxima aangetroffen worden die hoger zijn dan de maxima boven de Noordzee. De hoogste wereldwijde maxima corresponderen met herhaaltijden - als ze zouden optreden boven de Noordzee - die veel hoger zijn dan de huidige normen. Dit biedt mogelijkheden om de eigenschappen van dergelijke depressies te onderzoeken en daarmee meer inzicht te krijgen in de dynamische aspecten van de maatgevende stormen⁸.

5.3 Pseudowind in ERA-Interim

Figuur 14 laat de pseudowind zien (met Charnock parameter $\alpha=0.020$) als functie van de 10m-windsnelheid. Paneel (a) laat de scatterplot zien voor het centrale punt op de Noordzee, en paneel (b) de scatterplot voor alle zeepunten tussen 35°N en 70°N . Figuur 14 toont de volgende aspecten:

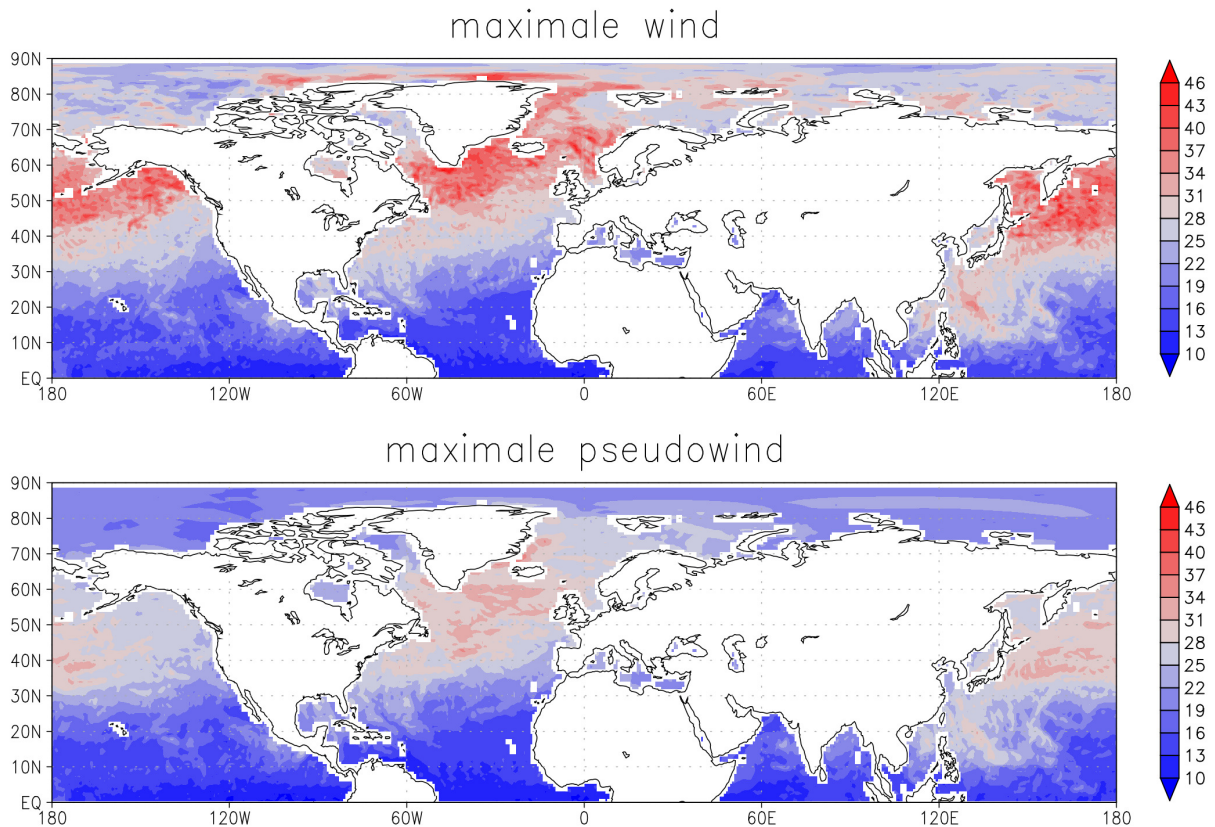
⁸Dit onderzoek moet nog gedaan worden.

- Het verband tussen pseudowind en 10m-wind boven de Noordzee laat zich gemiddeld goed beschrijven met een Charnock parameter van $\alpha=0.020$.
- De twee hoogste windsnelheden boven de Noordzee vertegenwoordigen een aanzienlijke lagere pseudowind dan $\alpha=0.020$ veronderstelt. Dat dit structureel is laat paneel (b) zien, waar twee lobben te zien zijn; één rond de diagonaal (die dus een Charnock parameter van 0.020 representeert), en één die aanzienlijk hogere winden heeft, maar lagere pseudowinden. In de lob met hoge winden (tot 48 m/s) komt de pseudowind niet hoger dan 30 m/s.
- Zelfs in het hele Noordelijke extratropische gebied komen de pseudowinden van het ERA-Interim model niet boven de 36 m/s. We merken op dat aftopping zoals onderzocht wordt in Werkpakket 3 niet (expliciet) in het ERA-Interim model gemodelleerd wordt.
- Hoewel de ERA-Interim dataset slechts 37 jaar beslaat (1979-2015), komen er hogere winden in voor dan in de 6282-jarige seizoensverwachtingen dataset. Dit suggereert dat de seizoensverwachtingen de meest extreme windsnelheden onderschat. We merken op dat dit niet hoeft te betekenen dat ook de winden over de Noordzee onderschat worden. Het is (vanwege het ontbreken van de stress in de seizoensverwachtingen dataset) of ook de pseudowind lager is in de seizoensverwachtingen dan in ERA-Interim.



Figuur 14: Scatterplots van de pseudowind versus de 10m-wind voor een centraal punt op de Noordzee (a) en voor alle punten tussen 35° N en 70° N (b) volgens ERA-Interim. De pseudowind is berekend met een Charnock parameter $\alpha=0.020$.

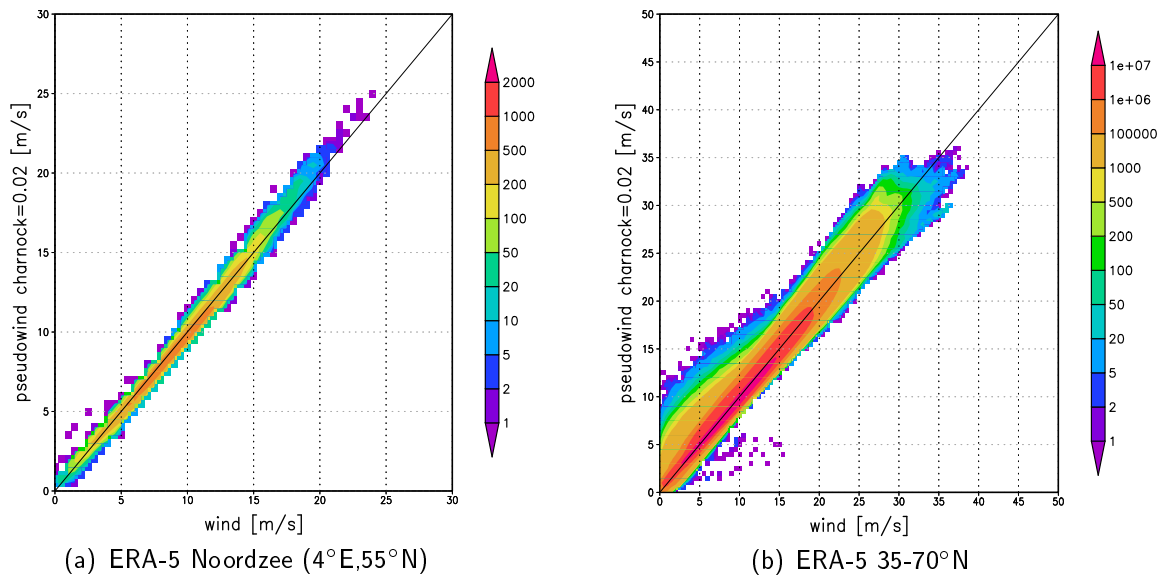
Figuur 15 toont de ruimtelijke verdeling over zee van de maximale wind (boven) en de maximale pseudowind (onder) voor een Charnock parameter van $\alpha=0.020$. In overeenstemming met Figuur 14 blijkt dat de pseudowind niet hoger wordt dan 36 m/s.



Figuur 15: Maximale wind (boven) en pseudowind (onder) op het noordelijk halfrond in de ERA-Interim dataset van 1979-20215. De pseudowind is berekend met een Charnock parameter $\alpha=0.020$.

We concluderen dat de hoogste pseudowinden in de ERA-Interim dataset aanzienlijk lager zijn dan de hoogste 10m-winden op plaatsen waar de 10m-wind boven 30 m/s uitkomt. Extrapolatie van 10m-winden die boven 30 m/s uitkomen worden daarom sterk beïnvloed door parameterisatie van de drag coëfficiënt. Dit resultaat is opmerkelijk omdat het ECMWF model aftopping niet expliciet modelleert.

Om dit verder te onderzoeken is ook de opvolger van ERA-Interim (ERA-5 genoemd) onderzocht. Hiervan is momenteel 2010-2016 jaar beschikbaar. Figuur 16 toont dezelfde informatie als Figuur 14 maar nu voor ERA-5. Hier is de lob met hoge winden en lage pseudowinden niet aanwezig. We concluderen dat er waarschijnlijk een bug in ERA-Interim aanwezig is die deze hoge winden veroorzaakt. Het is aannemelijk dat de (niet-produceerbare) scatterplot van de system-4 seizoensverwachtingen lijkt op de ERA-5 figuur, en dat de wind dus in goede benadering beschreven kan worden met een Charnock parameter $\alpha=0.020$.



Figuur 16: Scatterplots van de pseudowind versus de 10m-wind voor een centraal punt op de Noordzee (a) en voor alle punten tussen 35° N en 70° N (b) volgens ERA-5. De pseudowind is berekend met een Charnock parameter $\alpha=0.020$.

5.4 Conclusies pseudowind

Op basis van Figuur 16 concluderen we dat de wind in ERA-5 - en hoogstwaarschijnlijk ook in system-4 - goed beschreven kan worden met een Charnock-parameter met een Charnock parameter $\alpha=0.020$. Dit betekent dat de normgevende winden boven de Noordzee niet ver boven de 30 m/s uit zullen komen (zie Figuur 10), en het effect van aftopping daarom gering zal zijn.

6 Toepassingen

In dit hoofdstuk onderzoeken we enkele toepassingen van de ECMWF seizoensverwachtingen dataset. De nadruk ligt hierbij niet zozeer op de kwantitatieve uitkomsten, maar op het illustreren van de meerwaarde die de dataset biedt boven statistische extrapolatie vanuit waarnemingen.

Als eerste onderzoeken we welke meteorologische parameter het beste in aanmerking komt om te extrapoleren (paragraaf 6.1). Vervolgens bekijken we hoe de ruimtelijke uitgestrektheid van de impact van een storm varieert met de herhaaltijd (paragraaf 6.2). De derde illustratie betreft het verloop van de GEV vormparameter langs de Noordzee kust (paragraaf 6.3). Als laatste onderzoeken we hoe goed er vanuit 125-jarige waterstandsreeksen geëxtrapoleerd kan worden, en of er voorkeur is voor toepassing voor de Gumbel of de GEV verdeling (paragraaf 6.4).

6.1 Optimale parameter voor statistische extrapolatie

Hoewel de ECMWF dataset ongeveer 50 keer groter in omvang is dan de waarnemingen, blijft de noodzaak van extrapolatie aanwezig. Voor sommige toepassingen is immers informatie nodig voor herhaaltijden van 10^7 jaar (Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III). De vraag doet zich dan voor welke parameter het beste geëxtrapoleerd kan worden. Deze vraag geldt uiteraard ook voor de waarnemingen, maar is daar om praktische redenen nooit expliciet gesteld omdat altijd de waargenomen grootte (wind of waterstand) geëxtrapoleerd werd. Met de introductie van weer- en klimaatmodellen doet de vraag zich voor welke grootte het best voldoet aan de voorwaarden die de extreme-waarden theorie stelt. Een belangrijke voorwaarde van de theorie is dat - vanaf de herhaaltijd van waaruit geëxtrapoleerd wordt tot aan de gewenste geëxtrapoleerde herhaaltijd - de onderliggende verdeling een exponentiële afval in de staart van de verdeling heeft.

Binnen model-context zijn wind en stress de twee meest voor de hand liggende grootheden die in aanmerking komen voor extrapolatie. Extrapolatie van de wind heeft als voordeel dat de resultaten vergeleken kunnen worden met waarnemingen. Nadeel van de wind is dat deze grootte uit het model sterk afhankelijk is van de parameterisatie van de drag coëfficiënt. Een andere complicatie bij het extrapoleren van de wind is dat aftopping van de drag coëfficiënt (zoals onderzocht in Werkpakket 3) extrapolatie vanuit wind snelheden via de extreme-waarden theorie belemmert. De afname van de drag zal immers gedeeltelijk gecompenseerd worden door een toename van de wind, wat de voorwaarde van een exponentiële afname in de staart van de verdeling schendt. Beide problemen zouden ondervangen kunnen worden door de pseudowind als extrapolatie parameter te nemen.

Meer voor de hand ligt dan echter om niet de wind maar de stress zelf te nemen. De belangrijkste reden is dat de stress de grootte is die mate van dissipatie kwantificeert. Het is plausibel om te veronderstellen dat de dissipatie in evenwicht is met de productie van energie, en dat deze grootte dus niet (rechtstreeks) beïnvloed wordt door de drag parameterisatie van het model.

Een derde optie is om de geostrofe wind (paragraaf 3.6) te nemen als extrapolatie variabele. Ook deze grootte is niet afhankelijk van de parameterisatie van de drag, en kan gezien worden als een maat voor de energie die zich in vrije atmosfeer bevindt. De geostrofe wind wordt bepaald uit de druk op zeeniveau.

Een vierde optie is om de de druk op zeeniveau zelf als extrapolatie parameter te nemen. Deze grootte geeft immers aan hoe diep depressies kunnen worden, en daarmee (indirect) hoe sterk de depressies zijn⁹.

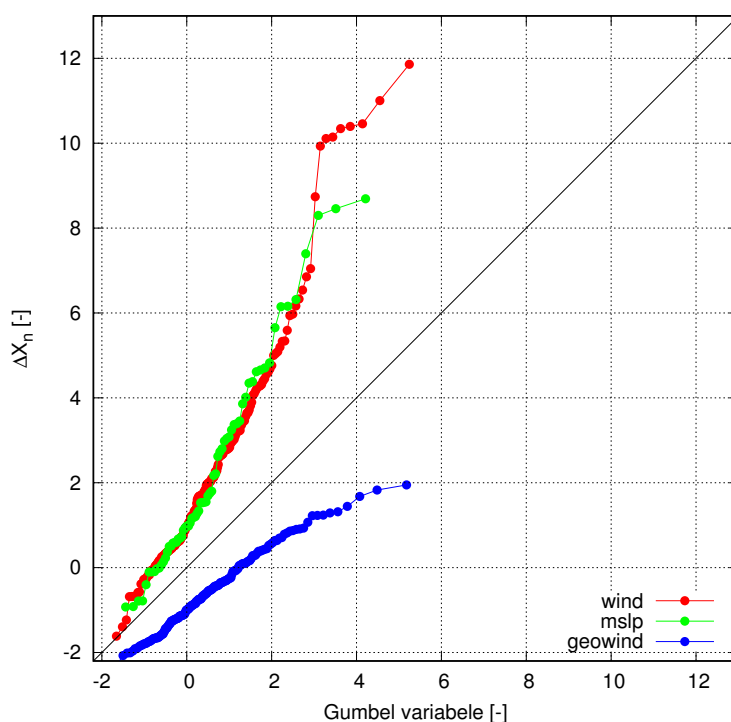
⁹De windsnelheid is gerelateerd aan de drukgradiënt (zie Formule 9). De druk geeft dus niet rechtstreeks

Helaas is de drag coëfficiënt van de ECMWF seizoensverwachtingen niet gearchiveerd, en kunnen de pseudowind en de stress daarom niet berekend worden.

Om te onderzoeken welke van bovengenoemde variabelen (wind, geostrofe wind of druk op zeeniveau) het beste geschikt is voor extrapolatie wordt de theorie van paragraaf 3.2 gebruikt. Voor elk roosterpunt in het gebied rond de Noordzee worden de jaarmaxima bepaald, een GEV verdeling gefit, en wordt ΔX_n (formule 4) berekend. Voor roosterpunten waarvan het maximum door dezelfde gebeurtenis gegenereerd wordt, wordt alleen de hoogste waarde van ΔX_n gebruikt. Hierdoor kunnen de overblijvende waarden van ΔX_n als onafhankelijk beschouwd worden.

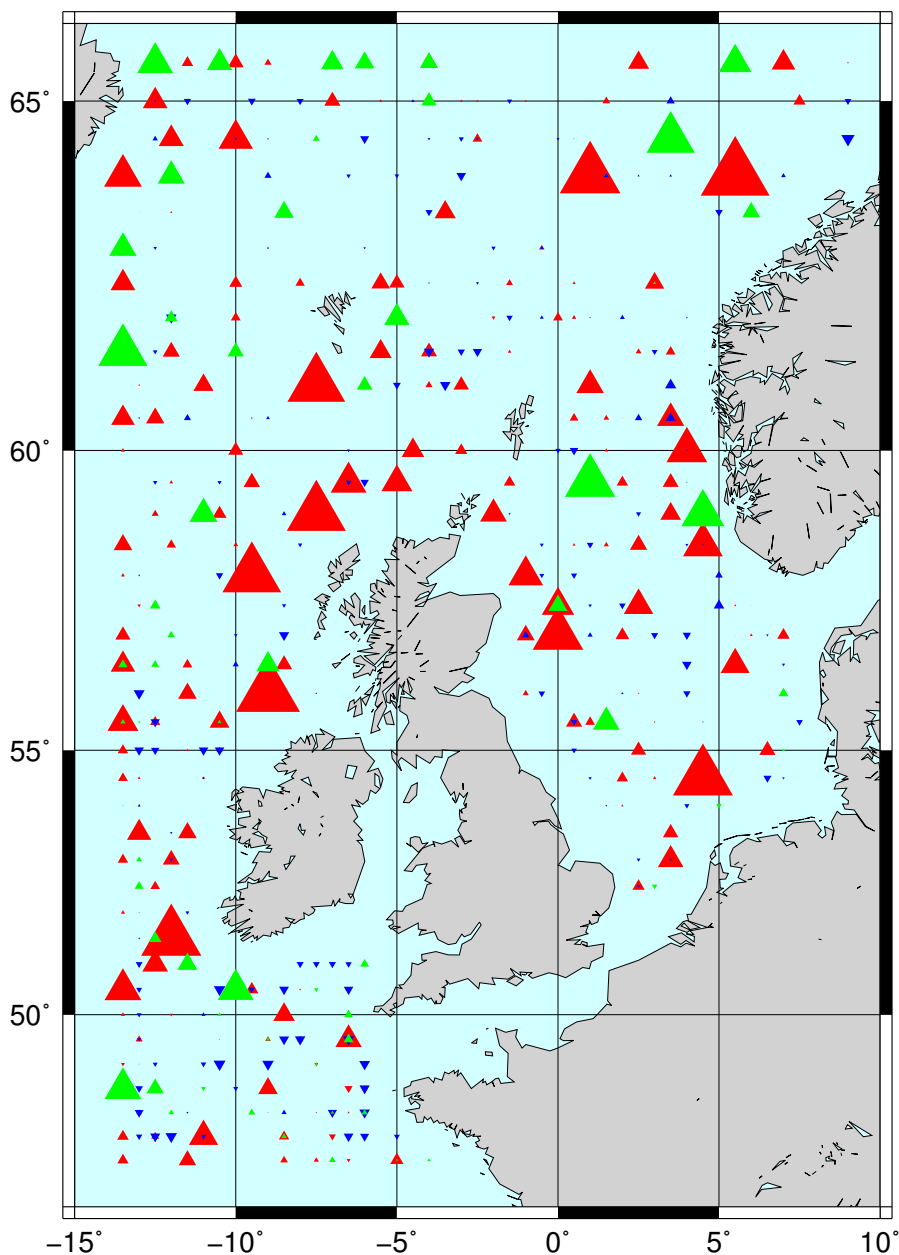
Figuur 17 geeft de verdeling van ΔX_n op een Gumbelplot voor zowel de wind (rood), de druk op zeeniveau (groen) en de geostrofe wind (blauw). Alleen waarden van ΔX_n boven zee worden geanalyseerd. Die diagonaal lijn geeft de theoretische verdeling aan die gevolgd wordt als de fit goed geschat is. De figuur laat zien dat geen van de parameters een goede basis is voor extrapolatie. De wind en de druk geven te hoge waarden voor ΔX_n , wat impliceert dat de fit te lage waarden voor de extrapolatie geeft. De geostrofe wind geeft te lage waarden voor ΔX_n , dus te hoge waarden voor de extrapolatie.

De gemiddelde grootte van de onder- en overschatting kan als volgt bepaald worden: Om voor een reeks van 6282 jaar naar een herhaaltijd van 10^5 jaar te gaan moet over een afstand $\ln(10^5) - \ln(6282) = 2.76$ geëxtrapoleerd worden. Figuur 17 laat zien dat voor deze waarde de wind en druk een waarden van ΔX_n van meer dan 6 geven. De eens-per- 10^5 -jaar waarden wordt dus gemiddeld geschat als een $\exp(\ln(6282) + 6) = 25 \cdot 10^5$ jaar, een onderschatting van een factor 25. Evenzo kan afgeleid worden dat de herhaaltijde van de geowind met een factor 8 wordt overschat.



Figuur 17: Gumbelplot van ΔX_n voor de wind (rood), de druk op zeeniveau (groen) en de geostrofe wind (blauw). De grootte ΔX_n is een maat van de extremitet van de meest extreme waarde in de reeks. Bij een juiste fit is deze grootte Gumbel(0,1) verdeeld, zie onderdeel 3.2. Deze theoretische lijn wordt weergegeven door de diagonaal.

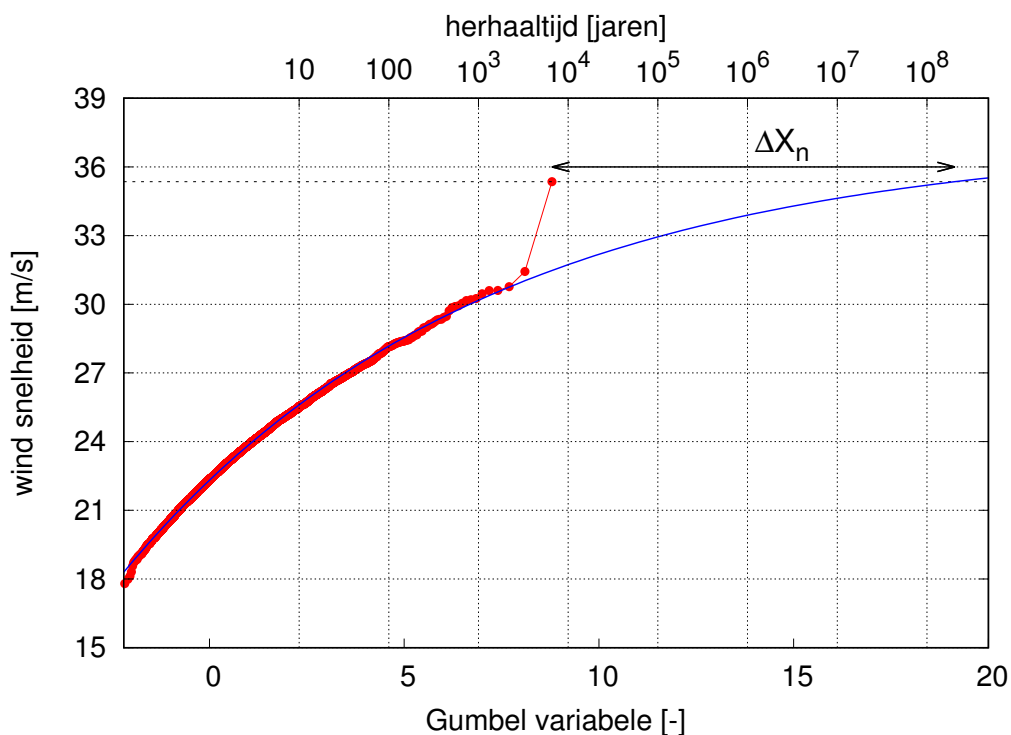
De geografische posities van de punten uit Figuur 17 zijn weergegeven in Figuur 18. Er is geen uitgesproken geografische voorkeurspositie te detecteren uit Figuur 18, wat een aanwijzing is dat de bias in de extrapolaties niet veroorzaakt wordt door lokale effecten maar een algemener karakter heeft.



Figuur 18: Ruimtelijke verdeling van de uitbijters in de ECMWF dataset. De grootte van de driehoeken geven de waarde van ΔX_n weer (geïnverteerde driehoeken representeren negatieve waarden). Rode driehoeken geven ΔX_n voor de wind weer, blauwe driehoeken de gestrofe wind, en groene driehoeken de druk op zeeniveau. De grootste (rode) driehoek representeert een waarde van $\Delta X_n = 11.86$. De Gumbelplot van de wind die hoort bij het roosterpunt ($4.5^\circ E, 54.5^\circ N$) is weergegeven in Figuur 19.

De hoogste waarde van ΔX_n in Figuren 25 en 18 wordt aangetroffen voor de wind in roosterpunt ($4.5^\circ E, 54.5^\circ N$). De Gumbel plot van de jaarmaxima van de wind voor dit roosterpunt is weergegeven in Figuur 19. De maximale wind van 35.4 m/s heeft volgens de GEV fit een

geschatte herhaaltijd van $2 \cdot 10^8$ jaar. De kans dat deze waarde op deze locatie wordt aange- troffen is dus $6282/(2 \cdot 10^8) = 3 \cdot 10^{-6}$. Zelfs in het geanalyseerde gebied (zoals weergegeven in Figuur 18) waarin 189 onafhankelijke waarden van ΔX_n zijn, is de kans slechts 0.05%.

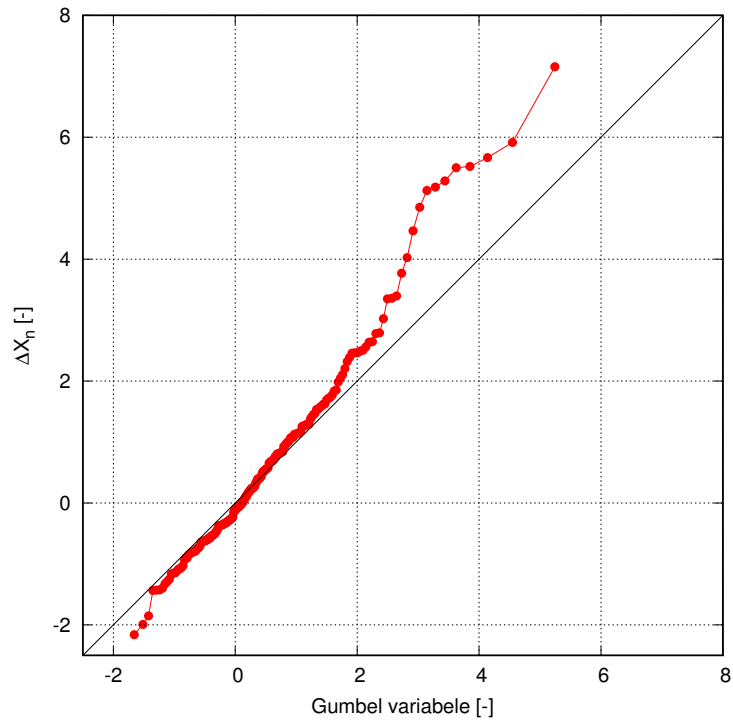


Figuur 19: Gumbel plot van de jaarmaxima van de wind in het roosterpunt ($4.5^\circ E, 54.5^\circ N$). De blauwe lijn is de GEV fit. De waarde van ΔX_n wordt gegeven door de horizontale afstand van het hoogste punt (met een windsnelheid van 35.4 m/s) en de fit. De waarde van ΔX_n voor dit roosterpunt bedraagt 11.86. De corresponderende herhaaltijd is $2 \cdot 10^8$ jaar

De conclusie is dat extrapolatie van de wind met een GEV verdeling tot onderschatting van de extreme wind leidt. Om te onderzoeken hoe goed de extrapolatie van de stress zou zijn, veronderstellen we (mede op basis van Figuur 16) dat het verband tussen stress en wind beschreven kan worden met een Charnock parameterisatie met $\alpha=0.020$. Een fit tussen de stress τ en wind U blijkt tussen 20-35 m/s goed beschreven te kunnen worden met:

$$\tau \approx U^{2.7} \tag{12}$$

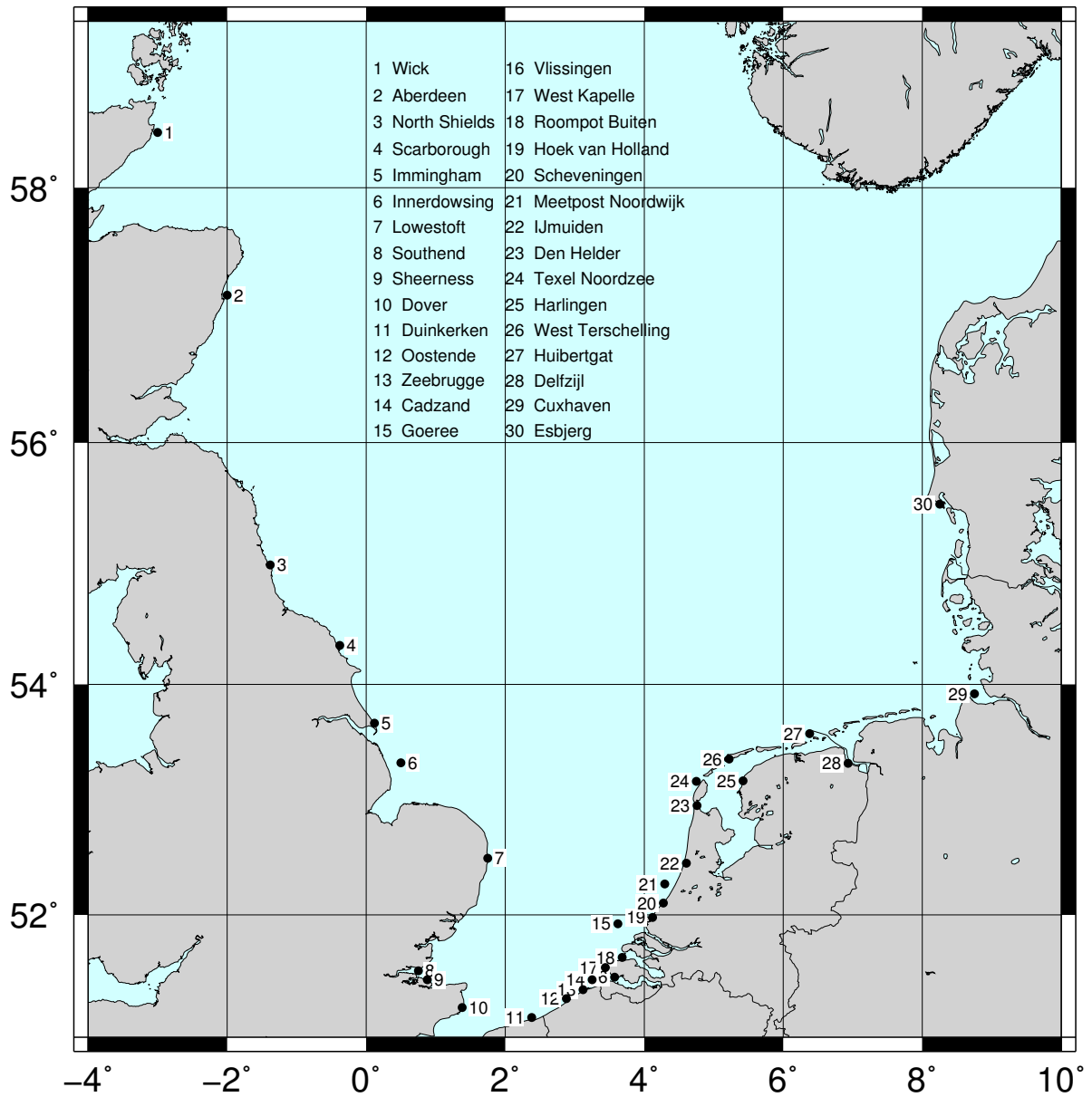
Figuur 20 geeft de Gumbelplot van ΔX_n voor $U^{2.7}$. De afwijking van de theoretische verdeling is aanzienlijk kleiner voor deze proxy van de stress dan voor de wind (zie Figuur 17). Dit is een aanwijzing dat de stress de meest optimale parameter is voor extrapolatie doeleinden. In de system-5 dataset - waarin de stress is gearchiveerd - kan dit verder onderzocht worden.



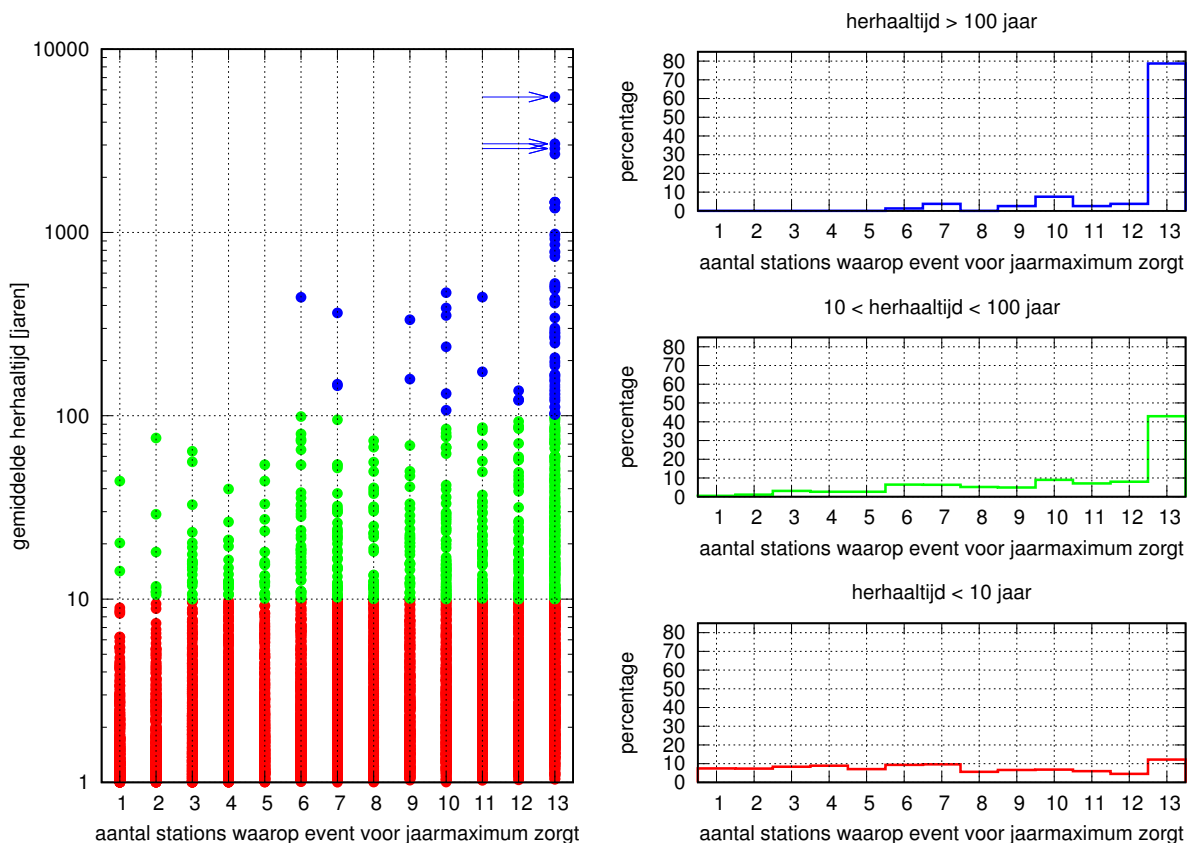
Figuur 20: Gumbelplot van ΔX_n voor $U^{2.7}$, als proxy voor de stress. De grootheid ΔX_n is een maat van de extremititeit van de meest extreme waarde in de reeks. Bij een juiste fit is deze grootheid Gumbel(0,1) verdeeld, zie onderdeel 3.2. Deze theoretische lijn wordt weergegeven door de diagonaal.

6.2 Herhaaltijd van impact

Eén van de voordelen van het gebruik van de uitvoer van weer- en klimaatmodellen ten opzichte van statistische extrapolatie is dat de ruimtelijke coherentie van extreme gebeurtenissen gehandhaafd blijft. Daarmee kan onderzocht worden over welk gedeelte van de (Nederlandse) kust de impact van de storm zich voordoet. We onderzoeken dit als volgt: voor alle gebeurtenissen die jaarmaxima op één van de 13 Nederlandse stations (weergegeven in Figuur 21 met de nummers 16-28) veroorzaken, wordt bepaald op hoeveel stations dit gebeurt. Hierbij worden hoogwaters met een onderling tijdsverschil van minder dan 24 uur als behorend tot hetzelfde event gezien. Voor de stations waarvoor het event een jaarmaximum geeft wordt de corresponderende herhaaltijd gemiddeld over deze stations. Figuur 22 laat het verband zien tussen de gemiddelde herhaaltijd van het event en het aantal stations waar het event voor een jaarmaximum zorgt.



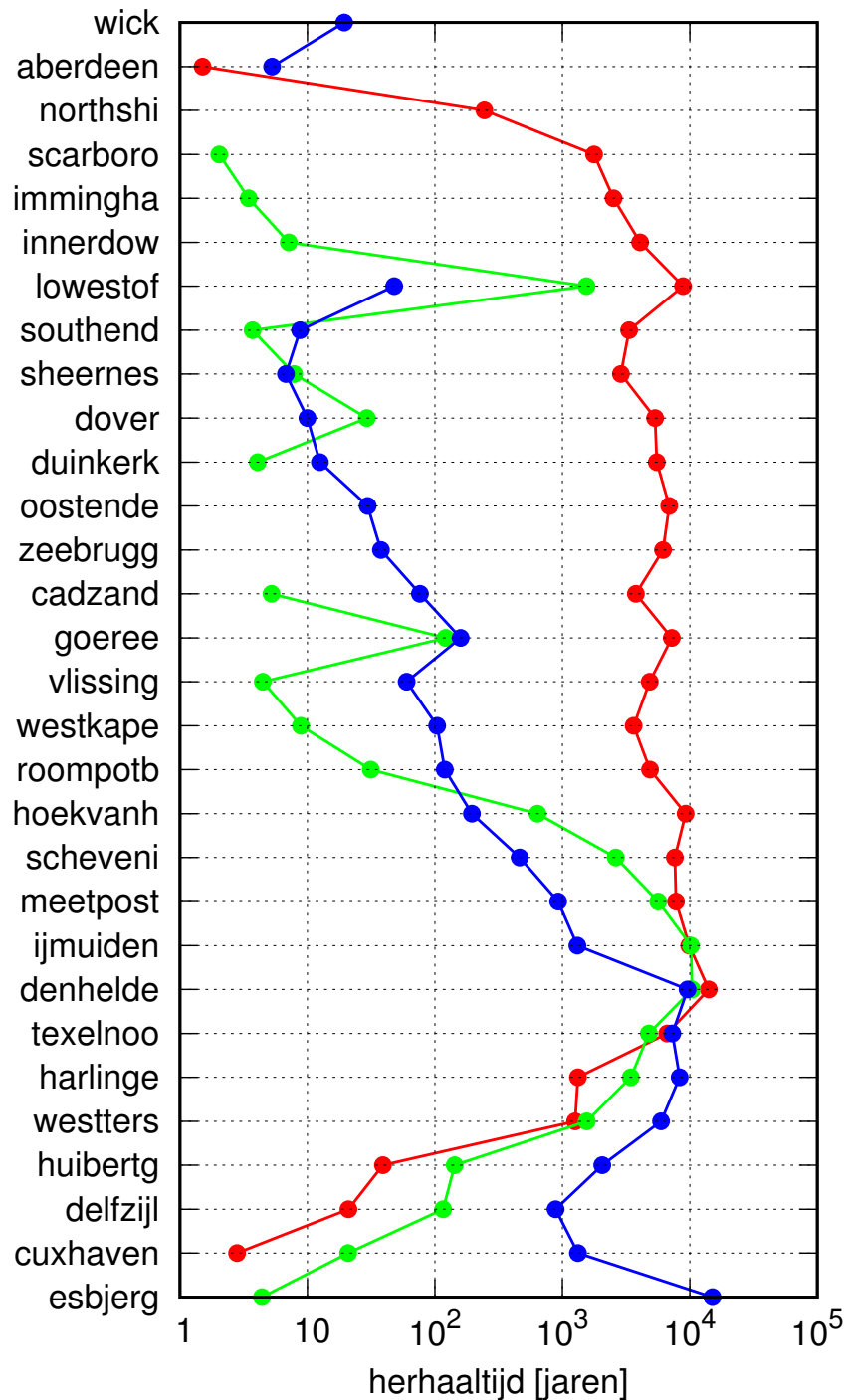
Figuur 21: Locaties langs de Noordzee kust die gebruikt zijn voor de analyse van de extreme waterstanden.



Figuur 22: Aantal stations waarop een extreme gebeurtenis voor een jaarmaximum zorgt langs de Nederlandse kust. De herhaaltijd is het gemiddelde over deze stations. De 13 gebruikte stations zijn weergegeven met nummers 16-28 in Figuur 21. De rechter figuren tonen hoe vaak een gebeurtenis een jaarmaximum geeft voor een gegeven aantal stations. Hier zijn drie categorieën gemaakt op basis van de gemiddelde herhaaltijden. Rood geeft de verdeling aan voor herhaaltijden kleiner dan 10 jaar, groen tussen 10 en 100 jaar, en blauw meer dan 100 jaar. De blauwe pijlen in de rechter figuur geven de 3 meest extreme gemiddelde herhaaltijden aan. De herhaaltijden voor alle individuele stations voor deze 3 meest extreme gebeurtenissen zijn weergegeven in Figuur 23. De meteorologische ontwikkeling van de meest extreme gebeurtenis is weergegeven in Figuur 24.

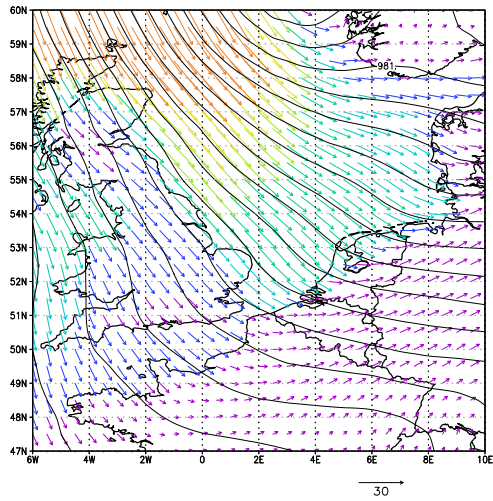
In Figuur 22 is te zien dat gebeurtenissen met lage gemiddelde herhaaltijden (1-10 jaar) in ongeveer 12% van de gevallen op alle 13 stations, dus langs de hele Nederlandse kust, tot jaarmaxima leiden. Voor middelmatige stormvloed (10-100 jaar) stijgt dit percentage naar 43%. Voor extreme stormvloed (>100 jaar) ligt dit percentage op bijna 80%.

De herhaaltijden voor de individuele stations die behoren bij de drie meest extreme stormvloed (aangegeven met de blauwe pijlen in Figuur 22) zijn weergegeven in Figuur 23. Te zien is dat vooral de meest extreme stormvloed (rood, met een gemiddeld herhaaltijd over de 13 Nederlandse stations van 5480 jaar) extreem is met herhaaltijden boven de 1000 jaar vanaf Scarborough (nr. 4 in Figuur 21) tot aan West Terschelling (nr. 26), een kustlijn van zo'n 1000 km.

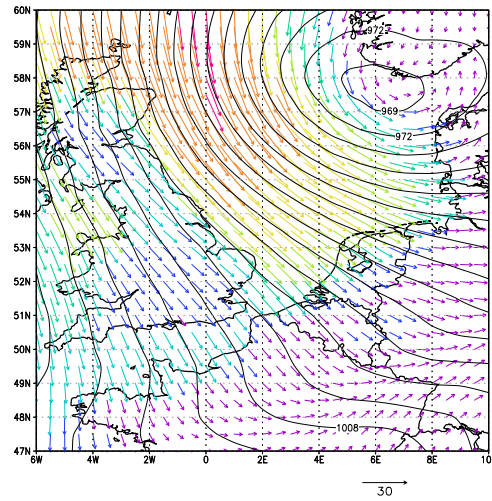


Figuur 23: Herhaaltijden per locatie voor de 3 gebeurtenissen met de hoogste gemiddelde herhaaltijd (aangegeven met de blauwe pijlen in Figuur 22). Gemiddeld over de 13 Nederlandse station is de herhaaltijd van de rode lijn 5106 jaar, van de groene 3045 jaar, en van de blauwe 2862 jaar.

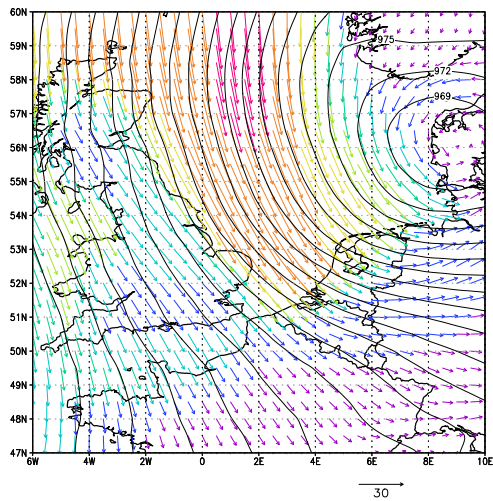
De meteorologische ontwikkeling van deze meest extreme gebeurtenis met een gemiddelde herhaaltijd van 5480 jaar is weergegeven in Figuur 24. Als tijdstip 0 is het moment van maximale waterstand in Hoek van Holland genomen. De storm doet zich voor in ensemble lid 17 van de forecast die startte op 1 Augustus 1987 en vindt plaats op 21 Januari 1988.



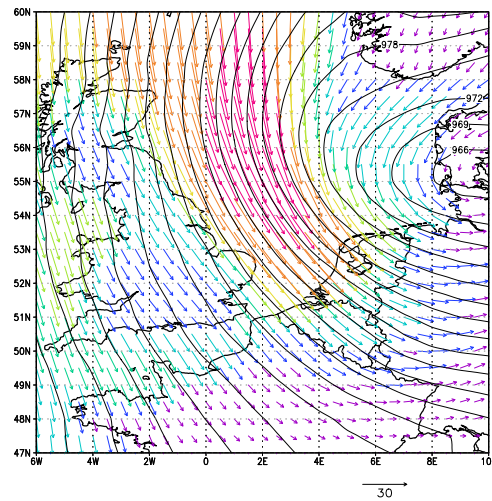
(a) $t=-15$ uur



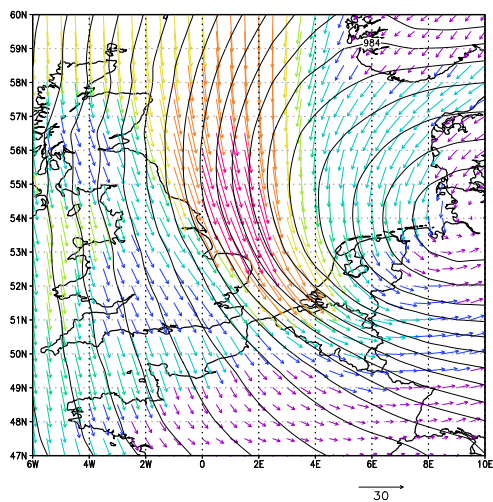
(b) $t=-9$ uur



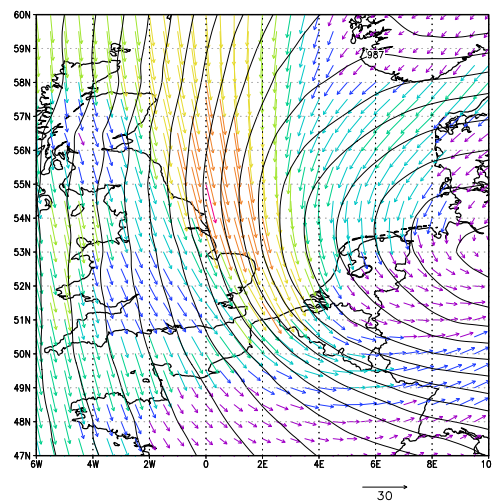
(c) $t=-3$ uur



(d) $t=+3$ uur



(e) $t=+9$ uur



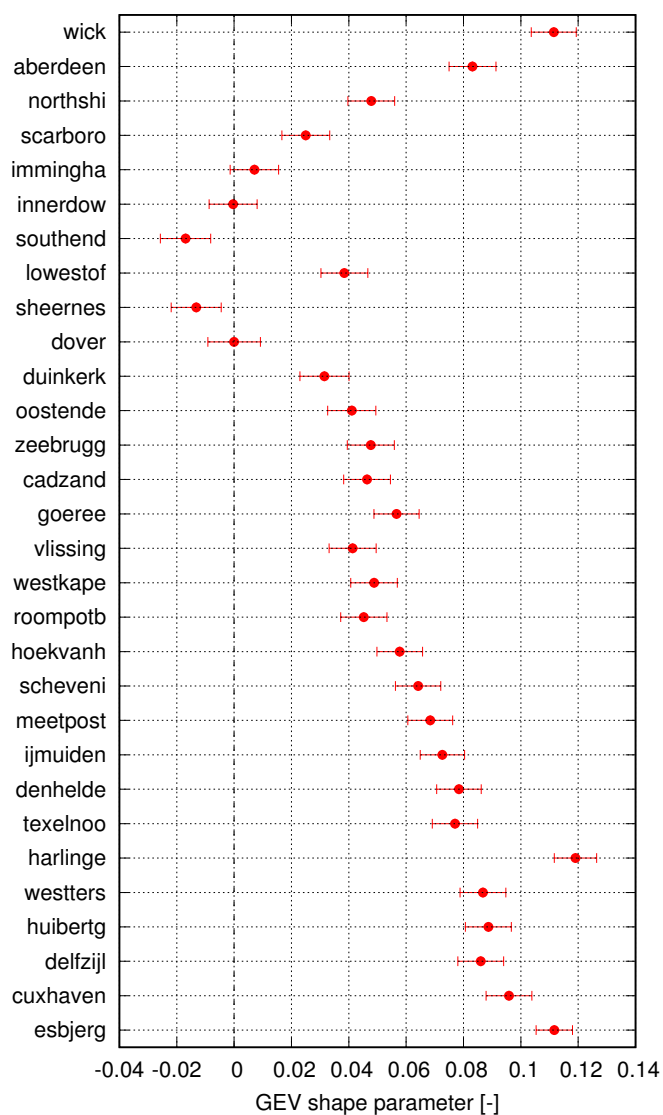
(f) $t=+15$ uur

Figuur 24: Synoptische ontwikkeling van de depressie met de hoogste gemiddelde herhaaltijd voor Nederland in de ECMWF seizoensverwachtingen dataset. De pijlen geven in lengte en kleur de windsterkte en richting aan, de doorgetrokken lijnen de druk op zeeniveau in hPa. Als tijdstip 0 is het moment van maximale waterstand in Hoek van Holland genomen.

6.3 Ruimtelijke variaties in GEV vormparameter

Alle 6282 jaren van de ECMWF seizoensverwachtingen zijn doorgerekend met het waterstandsmodel WAQUA/DCSMv5. Om een betrouwbare extrapolatie te doen is vooral de GEV vormparameter ξ (zie Formule 1) van belang, omdat deze parameter in belangrijke mate de geschatte waterstand bepaalt voor grote herhaaltijden.

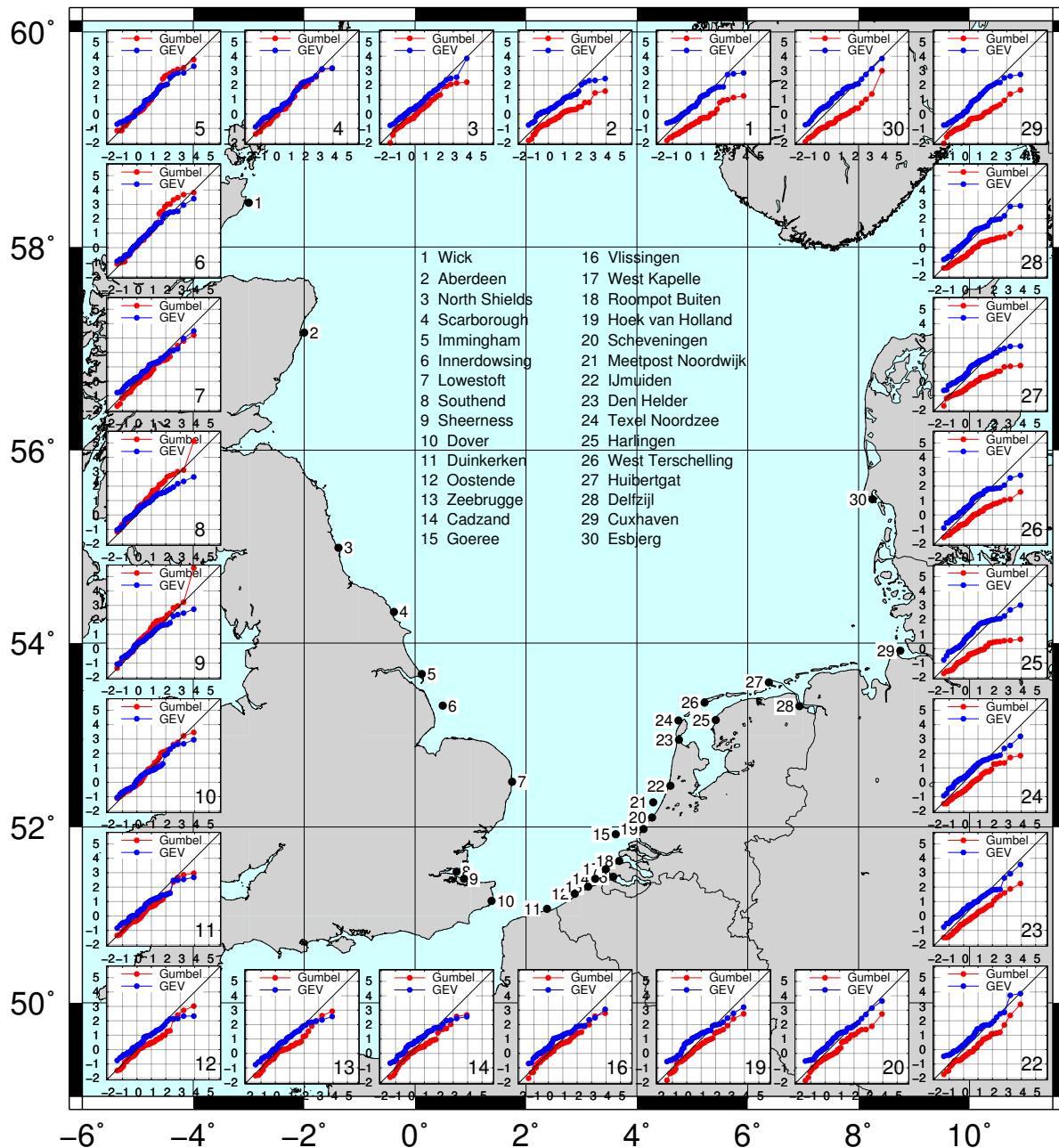
Figuur 25 laat het verloop van de GEV vormparameter ξ langs de Noordzee-kust zien. Er zijn twee belangrijke conclusies te trekken uit Figuur 25. Ten eerste is er een duidelijk patroon te zien: hoge waarden langs de Schotse kust, die afnemen tot licht negatieve waarden in het zuiden van Engeland. Langs de Belgische en Nederlandse kust stijgen de waarden licht; in het Waddengebied is een verdere toename te zien die zich voortzet in de Duitse bocht en Denemarken. De tweede belangrijke constatering is dat alle waarden langs de Belgische/Nederlandse kust positief van teken zijn, wat betekent dat de GEV-schattingen lager zijn dan de schatting op grond van een Gumbelverdeling. De consequentie van deze constatering is dat een Gumbelverdeling een conservatieve schatting geeft van de geëxtrapoleerde waterstand (Chbab, 2017).



Figuur 25: Verloop van de GEV vormparameter ξ (zie Formule 1) langs de Noordzee-kust. Een positieve waarde van ξ betekent dat de verdeling omlaag kromt op een Gumbelverdeling. De stations zijn weergegeven in de richting tegen de klok in.

6.4 Extrapolatie van waterstand

We hebben de 6282-jarige waterstandsreeksen van elk van de 30 stations opgedeeld in 51 deelreeksen van elk 125 jaar. Van elk van de 51 deelreeksen hebben we per station de waarde van ΔX_n bepaald. De verdeling van deze 51 waarden is weergegeven in de Gumbelplots aan de randen van Figuur 26. ΔX_n is bepaald zowel voor het fitten van een Gumbel verdeling (rood) aan de deelreeksen als voor een GEV verdeling (blauw). De diagonaal geeft de theoretische verdeling van ΔX_n aan.



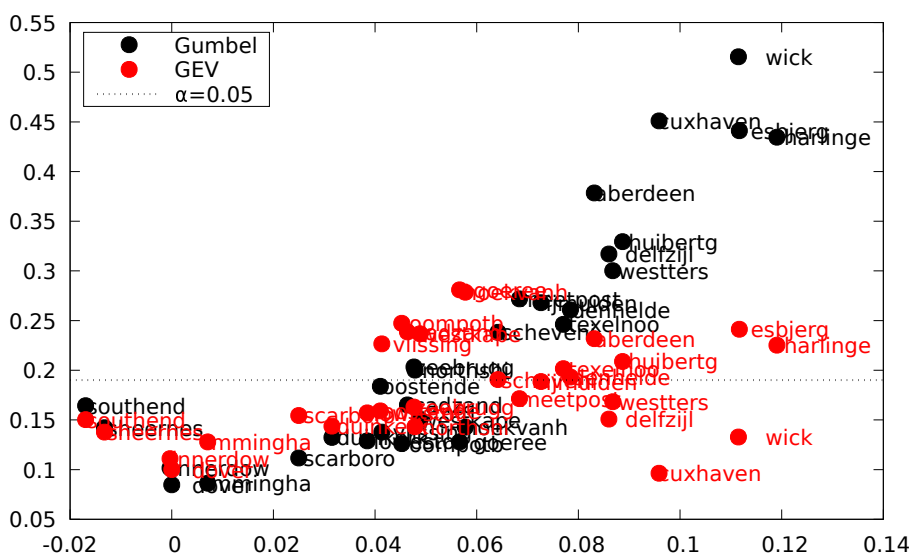
Figuur 26: Locaties langs de Noordzee kust die gebruikt zijn voor de analyse van de extreme waterstanden. De figuren aan de randen geven de Gumbelplots weer van ΔX_n voor de (meeste) kuststations. De nummers in de figuren verwijzen naar de genoemde namen. De blauwe punten geven de verdeling van ΔX_n weer als er een GEV verdeling gefit wordt aan deelreeksen van 125 jaar, de rode punten de verdeling voor het fitten van een Gumbel verdeling.

De Gumbelplots van Figuur 26 laten zien dat het fitten van een GEV verdeling over het algemeen een betere extrapolatie geeft dan een Gumbel verdeling, waarvoor de waarden van ΔX_n vaak te laag zijn.

Om dit verschil te kwantificeren, berekenen we voor elk van de 30 stations de Kolmogorv-Smirnov toetsingsgroottheid D_n (zie Formule 6) voor verdeling van ΔX_n . De waarden van D_n zijn in Figuur 27 uitgezet als functie van de GEV vormparameter ξ zoals bepaald op basis van de 6282-jarige dataset. De rode punten geven de waarde van D_n voor de verdeling van ΔX_n als aan de 125-jarige deelreeksen een Gumbel verdeling wordt gefit, en de blauwe punten als een GEV verdeling wordt gefit. Deze figuur geeft dus aan hoe goed de verdeling van ΔX_n is ten opzichte van de theoretische standaard Gumbel verdeling, zoals weergegeven in de Gumbelplots van Figuur 26. De horizontale lijn met de waarde 0.19 geeft de drempelwaarde voor $\alpha = 0.05$. Waarden van D_n onder dit niveau impliceren dat de verdeling niet van ΔX_n met de Gumbel(0,1) verdeling onderscheiden kan worden, en dat de bijbehorende verdeling die toegepast is op de jaarmaxima dus gebruikt kan worden voor extrapolatie.

De rode punten laten een duidelijk verband met de GEV vormparameter zien: waarden voor D_n zijn minimaal voor $\xi = 0$, en nemen toe als $|\xi|$ toeneemt. Waarden van $|\xi|$ die kleiner zijn dan ongeveer 0.05 à 0.06 kunnen nog met een Gumbel verdeling geëxtrapoleerd worden, voor grotere waarden is de hypothese dat de verdeling van ΔX_n verdeeld is volgens de standaard Gumbel verdeling niet langer houdbaar, wat impliceert dat extrapolatie van de jaarmaxima met een Gumbel verdeling niet goed gaat. We merken op dat de grenswaarde van $|\xi| < 0.06$ waarvoor de vormparameter op 0 gefixeerd mag worden, overeen met de onzekerheid in de waarde van ξ bij de bepaling uit 125-jarige reeksen.

In tegenstelling tot de rode punten laten de blauwe punten in Figuur 27 geen duidelijk verband zien tussen de GEV vormparameter en de waarden van D_n . Dit is in de lijn van de verwachting, omdat de GEV verdeling ook aan de deelreeksen gefit wordt.



Figuur 27: Toetsingsgroottheid D_n van de Kolmogorov-Smirnov toets (zie Formule 6) voor de verdeling van ΔX_n , afgeleid uit de 51 deelreeksen van elk 125 jaar, per station. De nummers corresponderen met de stations zoals aangegeven in Figuur 26. De zwarte punten geven de waarde van D_n als aan de 125-jarige deelreeksen een Gumbel verdeling wordt gefit, de rode punten als een GEV verdeling wordt gefit. De horizontale lijn met de waarde 0.19 geeft het criterium of $\alpha = 0.05$ niveau of de verdeling van ΔX_n met de Gumbel(0,1) verdeling beschreven kan worden.

Op grond van Figuur 27 kan geconcludeerd worden dat het fitten van de GEV verdeling aan jaarmaxima tot betere extrapolaties leidt dan de Gumbel verdeling. Wel dient beseft te worden dat het resultaat sterk afhankelijk is van de lengte van de deelreeksen: bij kortere reeksen zal de verdeling van ΔX_n bij het fitten van een GEV sterker vervormd worden dan van de Gumbel verdeling, omdat deze vanwege de 3^e parameter gevoeliger is over over-fitting (Van den Brink en Können, 2008).

7 Conclusies en discussie

De seizoensverwachtingen van het ECMWF vormen een dataset die beschouwd kan worden als 6282 onafhankelijke jaren die het huidige klimaat beschrijven. Daarmee is deze dataset ongeveer 50-100 keer groter dan de lengte van individuele waargenomen reeksen van wind en waterstand. De statistische onzekerheid die volgt uit extrapolatie vanuit de ECMWF dataset is derhalve 7-10 keer kleiner dan die vanuit waarnemingen. Hiertegenover staat dat nauwkeurig onderzocht dient te worden in hoeverre de data die de ECMWF dataset levert als betrouwbaar beschouwd kan worden. In dit rapport gebeurt dit op verschillende manieren. De verdeling van de jaarmaxima van de wind vanuit de ECMWF dataset wordt vergeleken met waargenomen jaarmaxima vanuit observaties op kust locaties. Hieruit blijkt dat de ECMWF data een goede beschrijving geven van de jaarmaxima - mits de volgende aspecten in het oog gehouden worden.

Ten eerste dient de ECMWF data geïnterpreteerd te worden als een 30minuut-gemiddelde over een gebied van ongeveer 80×80 km, met een temporele uitvoer van eens per 6 uur. In dit rapport tonen we aan dat temporele en ruimtelijke middeling van HARMONIE winden over dezelfde schalen tot jaarmaxima leiden die goed overeenkomen met de ECMWF data.

Het tweede aspect dat van belang is, is dat de meest extreme stormen die het ECMWF model genereert, niet met waarnemingen vergeleken kunnen worden, omdat deze waarnemingen er eenvoudigweg niet zijn. Het beste dat er gedaan kan worden is aannemelijk te maken dat deze meest extreme stormen vanuit meteorologisch perspectief realistisch zijn.

Naast vergelijking met de wind besteden we ook uitgebreid aandacht aan de waterstanden die corresponderen met de windvelden van het ECMWF model. Deze zijn berekend met het waterstandsmodel WAQUA-DCSMv5. De meest extreme waterstanden lijken te lijden aan lichte onderschatting. Uit dit rapport blijkt dat relatief lage ruimtelijke en temporele resolutie van de ECMWF data een grote invloed hebben op de extremen, wat mogelijk de onderschatting verklaart. Daarnaast speelt ook de resolutie van WAQUA-DCSMv5 wellicht een rol.

Hoewel de dataset ruim 6000 jaar omvat, is er voor bepaalde toepassingen toch extrapolatie nodig naar nog grotere herhaaltijden. De vraag dringt zich dan op welke meteorologische parameter het beste geschikt is. Onderzocht zijn de extrapolatie van windsnelheid, druk op zeeniveau, en geostrofe wind. Extrapolatie vanuit de jaarmaxima van geostrofe wind geeft een overschatting van de te verwachten waarden, terwijl jaarmaxima van wind en druk een forse onderschatting geven. Het lijkt aannemelijk dat de stress de beste parameter is.

Extrapolatie vanuit de waargenomen waterstanden geven een conservatieve schatting van de waterstanden. Dit wordt veroorzaakt doordat - zelfs 125-jarige - reeksen nog steeds gevoelig zijn voor sampling effecten die de extrapolatie beïnvloeden.

Naast statistische informatie biedt de dataset een schat aan informatie over de meteorologische eigenschappen van de meest extreme stormen. Zo blijkt dat de lengte van de kuststrook waarop van stormen impact hebben toeneemt met de extremiteit. Zo geeft de meest extreme storm in de dataset eens-in-de-1000-jaar waterstanden over een kuststrooklengte van zo'n 1000 km: van Scarborough tot West-Terschelling. De maatgevende stormen zijn dus groot van omvang. Verwacht mag worden dat de voorspelbaarheid derhalve hoog is.

We concluderen dat de dataset een betrouwbare basis biedt om de hydraulische randvoorwaarden langs de Nederlandse kust te bepalen, mits de invloed van de beperkte ruimtelijke en temporele schalen van de dataset in acht genomen wordt.

7.1 Vooruitblik

Onlangs (September 2017) is de nieuw versie van het ECMWF model voor seizoensverwachtingen (system-5) beschikbaar gekomen. Op verzoek van het KNMI is in system-5 ook de stress

gearchiveerd op 6-uurlijkse resolutie, zodat het verband tussen stress en wind onderzocht kan worden¹⁰. Ook is de resolutie van de update hoger (35km in plaats van 80km). In 2018 zal deze nieuwe dataset uitgebreid onderzocht worden.

Om de dataset toepasbaar te maken voor de estuaria, meren en rivieren zal downscaling (in tijd en ruimte) nodig zijn. Rekentechnische redenen verhinderen om de gehele dataset met een hoge-resolutie-model door te rekenen (bijvoorbeeld HARMONIE), maar mogelijk kunnen specifieke situaties wel doorgerekend worden. Daarbij zal ook rekening gehouden moeten worden met lokale meteorologische fenomenen, zoals squalls. Ook dit zal in 2018 onderzocht worden. Ook kunnen de specifieke situaties doorgerekend worden met WAQUA-DCSMv6, die een hogere ruimtelijke resolutie heeft dan WAQUA-DCSMv5.

Het doel is derhalve om in 2018 alle problemen en oplossingsrichtingen in beeld te krijgen die nodig zijn om de uitkomsten van de lange modelreeksen geschikt te maken voor toepassing in het WBI-instrumentarium.

¹⁰Dit is van belang voor Werkpakket 3.

Referenties

- P. Baas. Final Report of WP1 of the WTI2017-HB Wind Modelling project. Technical Report 2014-02, KNMI, 2014. URL www.knmi.nl/bibliotheek/knmipubWR/WR2014-02.pdf.
- M. Becker, M. Karpytchev, M. Davy, en K. Doekes. Impact of a shift in mean on the sea level rise: Application to the tide gauges in the southern netherlands. *Continental Shelf Research*, 29:741–749, March 2009. doi: 10.1016/j.csr.2008.12.005.
- H. Benschop. Windsnelheidsmetingen op zeestations en kuststations: herleiding waarden windsnelheden naar 10-meter niveau (in Dutch). Technical Report TR188, KNMI, 1996. URL <http://www.knmi.nl/bibliotheek/knmipubTR/TR188.pdf>.
- H. Charnock. Wind stress on a water surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 81(350):639–640, 1955. ISSN 1477-870X. doi: 10.1002/qj.49708135027. URL <http://dx.doi.org/10.1002/qj.49708135027>.
- H. Chbab. Basisstochasten wbi-2017, statistiek en statistische onzekerheid. Technical Report 1209433-012-HYE-0007, Deltares, 2017.
- S. Coles. *An Introduction to Statistical Modelling of Extreme Values*. Springer-Verlag. London, 2001.
- D.P. Dee, S.M Uppala, A.J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M.A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A.C.M. Beljaars, en L van de Berg. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137:553597, 2011. doi: 10.1002/qj.828.
- D. Dillingh, L. de Haan, R. Helmers, G.P. Können, en J. van Malde. De basispeilen langs de Nederlandse kust; statistisch onderzoek. Technical Report DGW-93.023, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, 1993.
- H. Gerritsen, H. de Vries, en M. Philippart. The Dutch Continental Shelf Model. In Daniel Lynch en Alan Davies, editors, *Quantitative Skill Assessment for Coastal Ocean Models*, volume 47 of *Coastal and Estuarine Studies*. American Geophysical Union, 1995.
- H. Hersbach. Sea-surface roughness and drag coefficient as function of neutral wind speed, July 2010.
- Simon J. Holgate, Andrew Matthews, Philip L. Woodworth, Lesley J. Rickards, Mark E. Tamisiea, Elizabeth Bradshaw, Peter R. Foden, Kathleen M. Gordon, Svetlana Jevrejeva, en Jeff Pugh. New data systems and products at the permanent service for mean sea level. *Journal of Coastal Research*, pages 493–504, 2013. doi: 10.2112/JCOASTRES-D-12-00175.1. URL <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-12-00175.1>.
- F.A.P. Hollebrandse. *Temporal development of the tidal range in the southern NorthSea*. PhD thesis, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Hydraulic Engineering, TUDelft, 2005.
- P. Janssen. *The interaction of ocean waves and wind*. Cambridge University Press, Cambridge, 2004. ISBN 0 521 46540 0.
- PSMSL. Permanent service for mean sea level, tide gauge data, retrieved 05 jun 2017, 2017. URL <http://www.psmsl.org/data/obtaining/>.

- Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III. Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III, 2017.
- Y. Seity, P. Brousseau, S. Malardel, G. Hello, P. Bénard, F. Bouttier, C. Lac, en V. Masson. The AROME-France convective-scale operational model. *Mon. Wea. Rev.*, 139:976–991, 2011.
- A. Sterl, H.W. van den Brink, H. de Vries, R. Haarsma, en E. van Meijgaard. An ensemble study of extreme storm surge related water levels in the north sea in a changing climate. *Ocean Sci.*, 5:369–378, 2009. doi: 10.5194/os-5-369-2009.
- H. Timmerman. *Meteorological effects on tidal heights in the North Sea*. Staatsdrukkerij, The Hague, 1977.
- H. W. van den Brink en S. de Goederen. Recurrence intervals for the closure of the dutch maeslant surge barrier. *Ocean Science*, 13(5):691–701, 2017. doi: 10.5194/os-13-691-2017. URL <https://www.ocean-sci.net/13/691/2017/>.
- H. W. Van den Brink en G. P. Können. The statistical distribution of meteorological outliers. *Geophysical Research Letters*, 35(23):n/a–n/a, 2008. ISSN 1944-8007. doi: 10.1029/2008GL035967. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2008GL035967>. L23702.
- H. W. Van den Brink en G. P. Können. Estimating 10000-year return values from short time series. *International Journal of Climatology*, 31(1):115–126, 2011. ISSN 1097-0088. doi: 10.1002/joc.2047. URL <http://dx.doi.org/10.1002/joc.2047>.
- H. W. Van den Brink, G. P. Können, J. D. Opsteegh, G. J. van Oldenborgh, en G. Burgers. Estimating return periods of extreme events from ECMWF seasonal forecast ensembles. *International Journal of Climatology*, 25(10):1345–1354, 2005. ISSN 1097-0088. doi: 10.1002/joc.1155. URL <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1155>.
- J. van Nieuwkoop, P. Baas, S. Caires, en J. Groeneweg. On the consistency of the drag between air and water in meteorological, hydrodynamic and wave models. *Ocean Dynamics*, 65:989–1000, July 2015. doi: 10.1007/s10236-015-0849-3.
- A. Weill, L. Eymard, G. Caniaux, D. Hauser, S. Planton, H. Dupuis, A. Brut, C. Guerin, P. Nacass, A. Butet, S. Cloche, R. Pedreros, P. Durand, D. Bourras, H. Goirdani, G. Lachaud, en G. Bouhours. Toward a better determination of turbulent airsea fluxes from several experiments. *Journal of Climate*, 16:600–618, 2003.
- N. C. Zweers, V. K. Makin, J. W. de Vries, en G. Burgers. A sea drag relation for hurricane wind speeds. *Geophysical Research Letters*, 37(21):n/a–n/a, 2010. ISSN 1944-8007. doi: 10.1029/2010GL045002. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2010GL045002>. L21811.