



Mathijs van Ledden, Royal HaskoningDHV / TU Delft  
 Matthijs de Jong, TU Delft, thans Heerema Marine Contractors  
 Kees den Heijer, TU Delft / Deltares  
 Pieter van Gelder, TU Delft

# Alternatieve benadering voor maatgevende waterstanden Nederlandse kust

**Het stormseizoen is weer begonnen in Nederland. De duinen en dijken langs de Nederlandse kust kunnen in deze periode zwaar belast worden door een combinatie van hoge stormvloed en zware golven. Op dit moment worden deze waterkeringen getoetst en ontworpen met waterstandsgegevens die vooral gebaseerd zijn op statistische extrapolatie van langjarige tijdreeksen. Een parametrisch model, ontwikkeld bij de Technische Universiteit Delft samen met Royal HaskoningDHV, geeft meer inzicht in de achterliggende stormkarakteristieken die horen bij deze maatgevende condities. Ook biedt deze methode perspectief om op termijn de extreme combinaties van waterstand en golven beter te voorspellen.**

**S**tormen op de Noordzee vormen sinds mensenheugenis een bedreiging voor de Nederlandse delta. Na de overstroming van 1953 stelde de Deltacommissie vast dat Centraal-Holland beschermd moest worden tegen een stormvloedwaterstand en bijbehorende golven die eens in de 10.000 jaar zouden kunnen voorkomen<sup>1)</sup>. Voor de andere delen van Nederland ligt die overschrijdingsfrequentie hoger.

Tot nu toe worden de maatgevende stormvloedwaterstanden voor deze extreme gebeurtenissen vastgesteld met behulp van extreme waarde-statistiek op basis van de beschikbare meetreeks van waterstanden sinds omstreeks 1885<sup>2)</sup>.

De huidige benadering voor het vaststellen van deze uitzonderlijke stormvloedwaterstanden kent diverse beperkingen. Een belangrijke beperking is dat de extreme waarde-statistiek weinig inzicht geeft in de fysieke karakteristieken van de achterliggende stormen die deze, gemiddeld eens in de 10.000 jaar voorkomende waterstanden, veroorzaken. We weten dat stormen in Nederland vanuit het noordwesten het meest gevaarlijk zijn, maar hoe deze stormen eruit zien in termen van luchtdruk, omvang en baan van de storm, is niet goed bekend. Daarnaast is de onzekerheid in de huidige extreme waterstanden groot, omdat de

*De gesloten Maeslantkering tijdens een storm in 2008.*

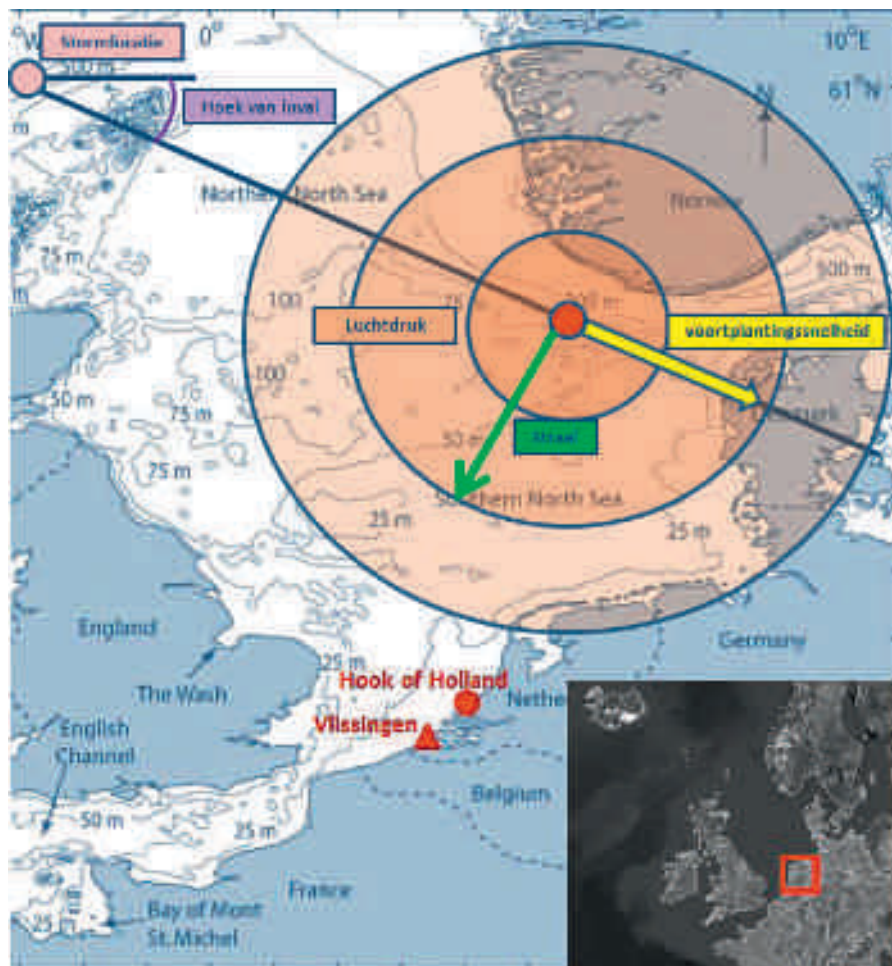


huidige meetreeks slechts circa 125 jaar omvat. De genoemde extreme waterstand langs de Nederlandse kust ligt 5 meter boven NAP, met een 95% betrouwbaarheidsinterval van 3,5 meter (van 3,25 tot 6,75 meter boven NAP).

Meer begrip van de achterliggende fysische mechanismen kan leiden tot betere en meer nauwkeurige schattingen van de extreme omstandigheden. Met meer nauwkeurige schattingen zouden kostenreducties gerealiseerd kunnen worden in het ontwerp van de waterkeringen. In een afstudeeronderzoek van de TU Delft in samenwerking met Royal HaskoningDHV is daarom gekeken naar de mogelijkheid om een model op te zetten om de extreme waterstand bij Hoek van Holland te bepalen op basis van de stormkarakteristieken<sup>3)</sup>.

### Parametrisch model voor de Noordzee

Stormen die extreme waterstanden veroorzaken langs de Nederlandse kust, vertonen een aantal vaste karakteristieken. In de wintermaanden verplaatsen lagedrukgebieden zich meestentijds van west naar oost over de Atlantische Oceaan richting Europa. De wind rondom deze stormen draait tegen de klok in rondom het centrum. Zodra het centrum van de storm Schotland passeert, wordt het zeewater opgestuwd richting Nederlandse kust. Afhankelijk van de precieze baan, maar ook de sterkte en de snelheid van de storm treedt een bepaalde verhoging van de waterstand langs de kust op. Het is



Afb. 1: Parametrisch model voor stormvloed langs de Nederlandse kust.

Afb. 2: Historische stormen in Nederland die in het onderzoek gebruikt zijn. De lijnen tonen de banen die de significante stormen op de Noordzee volgden.



Verdelingen van de stormparameters inclusief de statistische grootheden.

storm parameter	kansverdeling	gemiddelde	standaardafwijking
start locatie	lognormaal	58.61°NB	2.6°NB
voortplantingsnelheid	lognormaal	14.67 m/s	5.25 m/s
hoek van inval	rayleigh	22.46 °	-
Centrale luchtdruk	normaal	975 mbar	15.05 mbar
straal	lognormaal	688 km	236 km

bekend dat stormen die afbuigen richting Denemarken en zich langzaam verplaatsen, gevaarlijk zijn voor Nederland, omdat dan het gebied met hoge windsnelheden langdurig over de Noordzee ligt. Naast het opstuwten van het water worden ook hoge golven opgewekt op de Noordzee. In dit onderzoek is alleen gekeken naar de waterstandsopzet als gevolg van de stormen. Waterstandsverhoging als gevolg van brekende golven nabij de kust en ook de golfkarakteristieken zelf zijn in eerste instantie buiten beschouwing gelaten.

De modelbeschrijving voor de samenhang tussen Noordzeestormen en de waterstand langs de Nederlandse kust is gevisualiseerd in afbeelding 1. Deze modelbeschrijving is in eerste instantie zo eenvoudig mogelijk gehouden om het aantal variabelen in het model beperkt te houden. Een individuele storm is gemodelleerd als lagedrukgebied dat zich vanaf een locatie boven Schotland onder een bepaalde hoek over het Noordzeebekken verplaatst met een constante snelheid. Het lagedrukgebied is cirkelvormig in ons model en heeft een constante (lage) luchtdruk in het centrum. Er is gebruik gemaakt van parametrische beschrijvingen voor de relaties tussen de luchtdruk en windsnelheid en ook tussen windkarakteristieken (snelheid en duur) en de waterstand bij Hoek van Holland. In vervolgonderzoek kunnen deze onderliggende relaties met meer complexe numerieke modellen beschreven worden.



## Historische analyse van Noordzeestormen

Stormgegevens van historische stormen zijn verzameld om enerzijds de modelparameters in statistische termen te beschrijven en anderzijds het model te valideren. De modelparameters zijn de locatie van de baan van de storm boven Schotland, de hoek van de baan, de minimale luchtdruk in het centrum, de omvang van de storm en de 'voortplantingssnelheid' ervan.

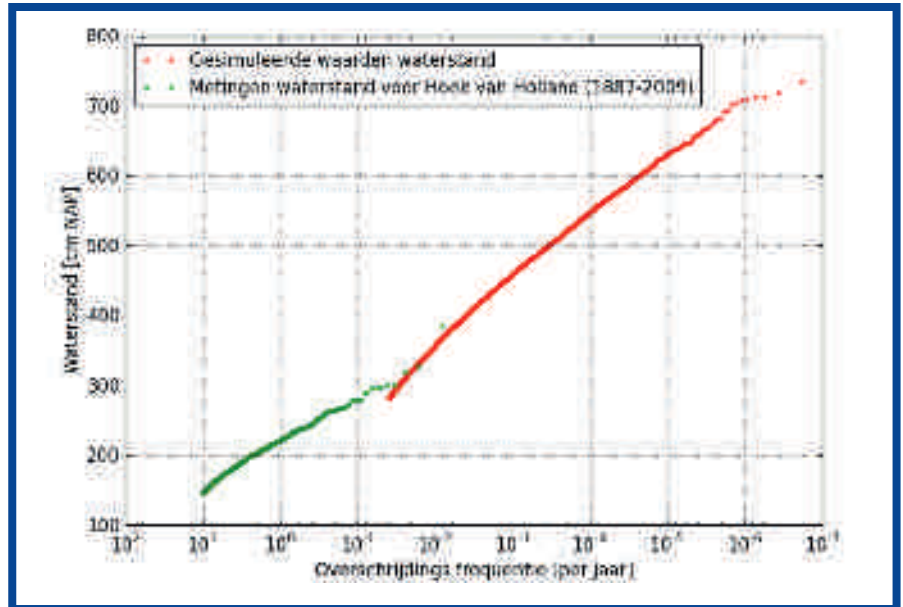
In totaal 21 stormen uit de periode 1889-2008 bleken geschikt om voor dit onderzoek te gebruiken, omdat van deze stormen voldoende informatie beschikbaar was om bovengenoemde parameters te bepalen. Afbeelding 2 geeft een overzicht van deze stormen met de bijbehorende stormbanen. Voor iedere modelparameter is vervolgens een statistische verdeling bepaald. De verdelingen inclusief de statistische grootheden zijn samengevat in de tabel.

Het parametrische model is gevalideerd door voor de historische stormen het windverloop en de waterstandsverhoging bij de Nederlandse kust te bepalen. Het geobserveerde windverloop van 16 stormen ter hoogte van Hoek van Holland is vergeleken met de resultaten van het parametrische model. Ondanks alle vereenvoudigingen in het model blijkt dat de piekwindsnelheid en 9-uur gemiddelde windsnelheid en -richting rondom de piek van de storm vaak goed overeenkomen. Voor sommige stormen (bijvoorbeeld die van 14 februari 1989) blijkt de windrichting niet goed te kloppen. Dit heeft te maken met de vereenvoudiging van een enkelvoudig circulair drukveld in het model, terwijl er in werkelijkheid twee lagedrukgebieden waren die het stormverloop bepaalden.

Ook de waterstandsverhoging van deze historische stormen is vergeleken met de modeluitkomsten. Hieruit blijkt dat er een behoorlijke spreiding is tussen de metingen en de modelresultaten. Logischerwijs spelen de vereenvoudigingen van het huidige model hierin mee. Deels kan de nauwkeurigheid mogelijk vergroot worden door de vertaling van het windveld naar de waterstand met complexe numerieke modellen in plaats van de huidige parametrische benadering.

## Probabilistische analyse van de stormimpact

Het parametrische model is vervolgens toegepast om de waterstanden die gemiddeld eens in de 10.000 jaar zouden kunnen voorkomen, bij Hoek van Holland te berekenen. Hiervoor zijn ongeveer één miljoen probabilistische berekeningen uitgevoerd volgens een Monte Carlo-methode om voldoende nauwkeurige uitkomsten te krijgen. Voor iedere berekening is telkens uit de kansverdelingen een waarde bepaald voor de modelparameters, zoals de locatie van de baan, de hoek van de baan, de luchtdruk en de omvang van de storm. Voor iedere storm is een waterstandsverhoging bij Hoek van Holland berekend. Deze is gecombineerd met de verhoging door het getij. Afbeelding 3 toont



**Afb. 3: Resultaat van de probabilistische analyse.** De groene bolletjes tonen de extreme waterstanden in de afgelopen 125 jaar. Die punten lopen tot een frequentie van 100 jaar (vanwege de lengte van de dataserie). De rode lijn is het resultaat van het gebruikte model. Met de hulp van een Monte Carlo-analyse zijn allerlei extreme stormen te simuleren tot het bereik van 1.000 tot 10.000 jaar (wat overeenkomt met de herhalingsjijd van 10.000 jaar wat weer het ontwerp punt is van de dijken en keringen in Nederland). In de traditionele benadering extrapoleren we de groene punten tot ver buiten het meetbereik.

het resultaat van deze probabilistische berekeningen.

Uit de berekeningen volgt een eens in de 10.000 jaar voorkomende waterstand bij Hoek van Holland van circa 5,5 meter boven NAP. Dit is iets hoger dan de waterstand die volgt uit de extreme waarde-statistiek van de jaarmaxima op basis van de 125-jarige meetreeks. Wel dient vermeld te worden dat de onzekerheid in de berekening vergelijkbaar is met de onzekerheid in de waarde op basis van de extreme waarde-statistiek (95% betrouwbaarheidsinterval circa 3,5 meter). Ondanks deze onzekerheid is het opvallend dat met een dergelijk vereenvoudigd model toch de waterstand die gemiddeld eens in de 10.000 jaar kan voorkomen, goed benaderd wordt. Verder blijkt dat stormen die een extreme waterstand produceren bij Hoek van Holland (meer dan vijf meter boven NAP) relatief traag en klein zijn ten opzichte van de totale stormpopulatie en zich net ten noorden van ons land richting Denemarken verplaatsen.

## Vervolgstappen

In dit artikel is een parametrisch model gepresenteerd waarin de extreme stormvloedwaterstand bij Hoek van Holland berekend kan worden op basis van de kansverdelingen van de stormkarakteristieken, zoals de baan, de luchtdruk en de omvang van de storm. Het model is zowel qua meteorologie als hydrodynamica sterk vereenvoudigd om een indruk te krijgen of een dergelijke aanpak succesvol kan zijn. Ondanks de vereenvoudigingen blijkt dat het probabilistische model een gemiddeld eens in de 10.000 jaar voorkomende waterstand oplevert voor Hoek van Holland die vergelijkbaar is met die op basis van de extrapolatie van de langjarige meetreeks. De nauwkeurigheid van deze schatting is niet kleiner dan de huidige onzekerheid.

Deze modelbenadering biedt belangrijke voordelen ten opzichte van de extreme waarde-statistiek. Een belangrijk voordeel van de hier besproken benadering is dat tijdsafhankelijke en ruimtelijke correlaties van waterstanden (en bijbehorende golven) in principe behouden blijven. Dergelijke relaties zijn van belang, omdat faalmechanismen van waterkeringen vaak niet alleen afhankelijk zijn van de maximale waterstand maar ook van de bijbehorende golven en de tijdsduur van de storm (denk aan bekledingen en golfoverslag).

Nader onderzoek zal moeten uitwijzen of de gepresenteerde modelbenadering geschikt is om te gebruiken voor het vaststellen van de ontwerp- en toetsrandvoorwaarden voor de Nederlandse waterkeringen. De vertaling van de wind naar de waterstanden zou met meer geavanceerde modellen gedaan kunnen worden om detailniveau in deze stap te vergroten. Daarnaast is een belangrijke aanbeveling om te onderzoeken of het verwijderen of juist toevoegen van stormparameters (bijvoorbeeld extra parameters om ook elliptische drukvelden te beschrijven) het huidige resultaat beïnvloedt.

## LITERATUUR

- 1) Maris A., V. de Blocq van Kuffeler, W. Harmsen, P. Jansen, G. Nijhoff, J. Thijsse, R. Verloren van Themaat, J. de Vries en L. van der Wal (1961). Deltarapport. Deel 2 (meteorologische en oceanografische aspecten van stormvloed op de Nederlandse kust) en deel 3 (beschouwingen over stormvloed en getijbeweging). Deltacommissie.
- 2) Dillingh D. (2009). Inzet van klimaatmodellen bij bepaling van hydraulische randvoorwaarden voor primaire waterkeringen. Deltares.
- 3) De Jong M. (2012). Developing a parametric model for storms to determine the extreme surge level at the Dutch coast. Msc thesis TU Delft/Royal HaskoningDHW.