Van Vledder Consulting
Wave Modelling
& Hydraulic Research

Stappenplan aanpassing hydraulische Randvoorwaarden op basis van nieuwe inzichten winddrag

Colofon

Uitgevoerd door:	Gerbrant van Vledder, Van Vledder Consulting
In opdracht van:	RWS-WVL, Robert Slomp en Deon Slagter
Datum:	24 november 2017
Status:	Eindrapport
Document:	vvc55m1r4

Opmerking bij versie 4

Deze herziene eindversie is gebaseerd op de eindversie van december 2015, document vvc55m1r3. Deze versie verschilt op enkele punten met versie r3 zoals correctie van een fout in formule 6 en kleine correcties in interpunctie en spelling.

November 2017

Executive summary

This memo describes the consequences of the application of a new drag formulation on the hydraulic boundary conditions of the primary water defences in the Netherlands. In the new formulation the wind drag increases linearly with wind speed up to 30 m/s, to remain constant for higher wind speeds. This behaviour will lead to a reduction in water setup, wave conditions and required crest heights in extreme conditions.

First, a description is given of the present methodology for the derivation of hydraulic boundary conditions in the Netherlands. Results are presented of a literature survey regarding wind drag formulations. A summary is given of new insights in the behaviour of wind drag in extreme wind conditions, resulting in a recommendation for a drag formulation to be applied in which the drag coefficient is capped for wind speeds higher than 30 m/s.

Hereafter, some methods are presented to apply the new drag formulaton in the model chain for the determination of open-water wind speed, water levels and wave conditions. The concept of pseudo-wind speed is introduced to be able to correct the present databases of water levels and wave conditions or to correct the statistics of wind speed.

The BretPro model was applied to estimate implications of applying the new drag formulation on the derivation of hydraulic boundary conditions for Lake IJssel, Lake Ketel, Lake Marken, Haringvliet, Hollands Diep and the North Sea coast. The effects on the required crest height are estimated using a simple design rule. Hereafter, the results of the BretPro analysis are combined with characteristic design conditions to estimate the possible gain (a lowering) of crest height for the various water systems. It is shown that especially the easterly and south-easterly sides of Lake IJssel, Lake Ketel and Lake Marken may benefit from applying the new drag formulation with reductions in required crest height of about 1 m.

Samenvatting

Dit memo beschrijft de consequenties van het toepassen van een aangepaste winddragformulering op de hydraulische randvoorwaarden voor de Nederlandse primaire waterkeringen. Het nieuwe inzicht is dat de winddragcoëfficiënt een maximum heeft bij windsnelheden van ongeveer 30 m/s om vervolgens af te nemen bij toenemende windsnelheid. Dit kan bij extreme condities leiden tot een reductie in opwaaiing, golfcondities en benodigde kruinhoogten.

Allereerst wordt een overzicht gegeven van de huidige methode van vaststellen van de hydraulische randvoorwaarden in Nederland. Vervolgens worden de resultaten van een literatuurstudie ten aanzien van winddrag gepresenteerd. Er wordt een overzicht gegeven van nieuwe inzichten en parameterisaties, leidend tot een aanbeveling voor het toepassen van een aangepaste winddragformulering waarbij de winddrag coëfficiënt niet verder toeneemt bij windsnelheden groter dan 30 m/s.

Op basis van deze bevindingen worden diverse methodes beschreven om de aanbevolen winddrag formulering toe te passen voor de afleiding van de open-water wind, waterstanden en golfcondities. Het concept van pseudo-wind wordt geïntroduceerd om bestaande databases met waterstanden en golfcondities te corrigeren of om bestaande windstatistiek aan te passen.

Het BretPro programma is toegepast om de effecten van de nieuwe winddragformulering inzichtelijk te maken voor het IJsselmeer en Ketelmeer, Markermeer, Hollands Diep en Haringvliet en Noordzee kust. De consequenties voor de benodigde kruinhoogte zijn met een simpele rekenregel vastgesteld. Tenslotte zijn deze resultaten gecombineerd met de waarden uit illustratiepunten om per watersysteem een eerste schatting te krijgen van de mogelijke winst in benodigde kruinhoogte. De resultaten van deze analyse geven aan dat met name voor oost- en zuidoostzijde van het IJsselmeer, Ketelmeer en Markermeer benodigde kruinhoogten met orde 1 m lager zijn.

1 Inleiding

Recente inzichten in de koppeling van atmosfeer en wateroppervlak suggereren dat de weerstandcoëfficiënt (drag) een maximum heeft bij ongeveer 30 m/s en dat de drag afneemt bij toenemende windsnelheid (Powell et al., 2003, Zweers et al., 2010, Hwang, 2011, Holthuijsen et al., 2012, Zijlema et al. 2012). De Zijlema et al. (2012) parameterisatie is recent in het SWAN golvenmodel ingebouwd en als default optie gekozen in samenhang met een reductie van de JONSWAP bodemwrijvingcoëfficiënt van 0.068 m^2s^{-3} naar 0.038 m^2s^{-3} voor windzee condities.

Deze nieuwe dragformulering wijkt significant af van de veelal gebruikte parameterisatie van Wu (1984), waarbij de winddragcoëfficiënt lineair toeneemt met windsnelheid. In de Zijlema et al. (2012) parameterisatie heeft de drag coëfficient een maximum bij een windsnelheid van ongeveer 30 m/s om bij toenemende windsnelheid langzaam af te nemen.

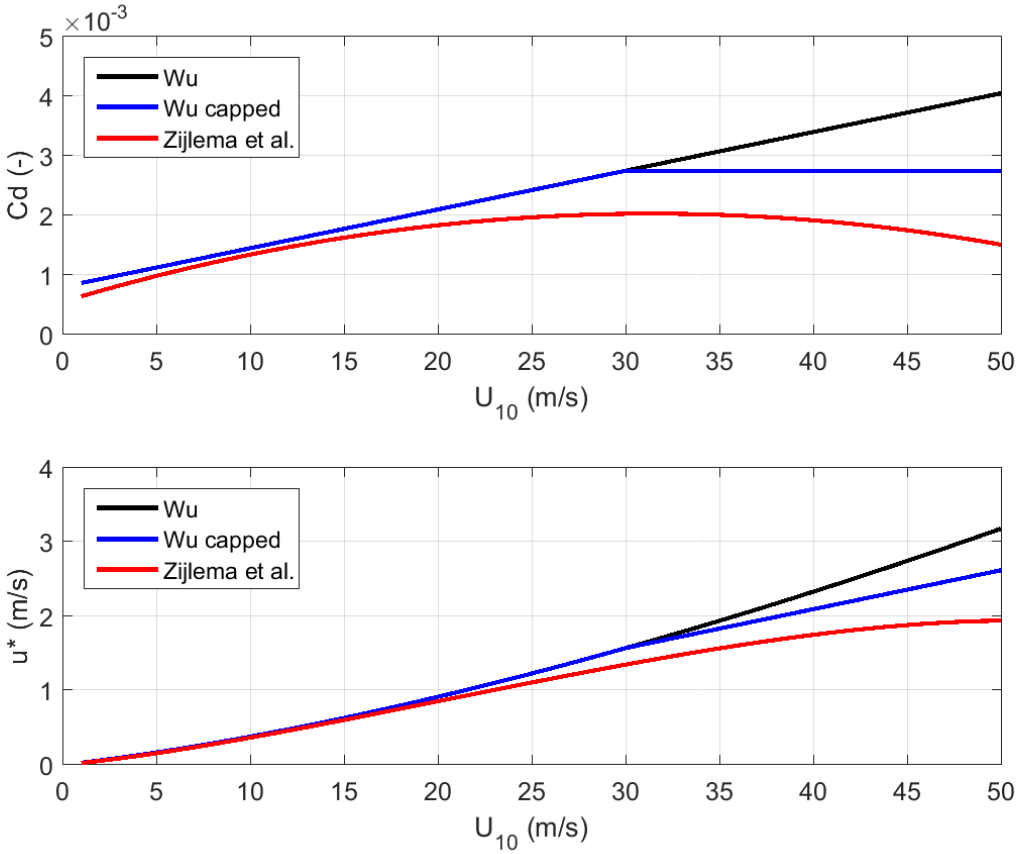
Figuur 1 toont de dragcoëfficiënten C_d volgens Wu (1985) en Zijlema et al. (2012) als functie van windsnelheid U_{10} en de daarbij behorende schuifspanningssnelheid u_*. De schuifspanningssnelheid is een maat voor de mate van energieoverdracht van de atmosfeer naar het wateroppervlak,

De winddragcoëfficiënt is als volgt gerelateerd aan de windsnelheden U_{10} en u_*:

$$C_d = \left(\frac{u_*}{U_{10}} \right)^2 \tag{1}$$

Het besef dat de winddragcoëfficiënt een bovengrens heeft, is al langer bekend in de waterstand- en golfmodelleringswereld, en vaak wordt de toename van de winddragcoëfficiënt gestopt bij windsnelheden groter dan ongeveer 30 m/s. Deze begrenzing wordt ook wel ‘capping’ genoemd. Figuur 1 toont tevens wordt de Wu-relatie met capping bij U_{10}=30 m/s getoond. Tot en met een windsnelheid van 20 m/s zijn de verschillen in u_* praktisch verwaarloosbaar. Bij hogere windsnelheden neemt de reductie in u_* snel toe. Ook is duidelijk dat de u_* blijft toenemen met windsnelheid U_{10}.

Naar verwachting kan voor extreme windsnelheden de nieuwe dragformulering tot significant lagere windopzet en golfcondities leiden. Omdat de huidige hydraulische randvoorwaarden binnen WTI veelal gebaseerd zijn op de Wu (1984) parameterisatie of varianten daarvan, kan het meenemen van, bijv., de Zijlema et al. (2012) parameterisatie, tot significant lagere waterstanden en golfcondities leiden, en daarmee tot lagere kruinhoogten van waterkeringen. Mogelijk zijn hier grote besparingen te halen. In hoeverre deze verwachting reëel is èn op korte termijn uitvoerbaar is, wordt in dit memo besproken.



Figuur 1: Dragcoefficient C_d en schuifspanningssnelheid u_* als functie van windsnelheid U_{10} op basis van Wu (1982) (zwarte lijn), op basis van Zijlema et al. (2012) (rode lijn), en Wu relatie met capping (blauwe lijn).

Op basis van deze verwachting heeft RWS/WVL opdracht gegeven aan Van Vledder Consulting om een pragmatische aanpak voor te stellen om resultaten van bestaande berekeningen te corrigeren als ware een nieuwe winddragformulering gebruikt, zonder nieuwe berekeningen uit te voeren. Dit memo geeft een beschrijving van de problematiek, een pragmatische aanpak en een eerste schatting van de consequenties voor een aantal watersystemen.

De opbouw van dit memo is als volgt. In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de methode voor de afleiding van hydraulische randvoorwaarden van primaire waterkeringen in Nederland. De rol van wind in modellering van wind, waterstanden en golven staat beschreven in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 gaat in op recente inzichten in winddrag onder extreme omstandigheden. Aanbevelingen uit dit hoofdstuk vormen een belangrijk uitgangspunt voor het kwantificeren van mogelijke reducties in belastingniveau. Hoofdstuk 5 beschrijft een pragmatische aanpak om de database of de windstatistiek aan te passen. De potentiële impact van een aangepaste dragrelatie wordt in hoofdstuk 6 uitgewerkt. Eerst voor een geïdealiseerde situatie en vervolgens voor 4 watersystemen; IJsselmeer met Ketelmeer, Markermeer, Hollands Diep met Haringvliet en de Noordzeekust. Tenslotte wordt in hoofdstuk 6 een eerste schatting gegeven van de mogelijke consequenties voor de primaire waterkeringen aan de hand van illustratiepunten. Een discussie van de verkregen resultaten staat in hoofdstuk 7. Conclusies en aanbevelingen zijn opgenomen in de hoofdstukken 8 en 9.

2 Bepaling hydraulische randvoorwaarden

Dit hoofdstuk geeft een beknopte beschrijving van de wijze waarop de hydraulische randvoorwaarden worden afgeleid.

Voor de Nederlandse binnen- en buitenwateren bestaan de hydraulische randvoorwaarden voor de primaire waterkeringen uit waterstanden en golfcondities (H_s, Tp, T_{m-10} en golfrichting), afhankelijk van de te beschouwen faalmechanismen. Deze wateren kunnen in vijf watersystemen worden onderverdeeld:

1. Kust (Waddenzee, Noordzee kust, Oosterschelde en Westerschelde);
2. IJsselmeer en Markermeer;
3. Benedenrivieren;
4. Bovenrivieren;
5. Vecht- en Ijsseldelta.

Deze indeling reflecteert de wijze waarop de randvoorwaarden voor deze wateren tot stand zijn gekomen. De randvoorwaarden voor vrijwel alle watersystemen zijn opgenomen in WTI2011. Voor de gebieden die zijn beïnvloed door rivierverruimingsmaatregelen zijn in het kader van WTI2017 nieuwe productiesommen uitgevoerd. Elders zijn de productiesommen van WTI2011 (bij Markermeer, Oosterschelde, Duinen en Hollandse Kust) of nóg oudere productiesommen hergebruikt; afhankelijk van de normfrequenite kunnen de daaruit resulterende WTI2017–randvoorwaarden wel veranderen ten opzicht van eerdere WTI-edities.

Voor de Waddenzee en Westerschelde zijn er in 2009 en 2010 stationaire SWAN berekeningen uitgevoerd voor een bereik aan windsnelheden, windrichtingen en waterstanden; de wind is hierbij als een constant veld in ruimte en tijd opgelegd en ruimtelijk variërende waterstands- en stromingsvelden uit WAQUA vormden de invoer. De SWAN resultaten zijn opgeslagen in databases. Resultaten voor de Noordzee kust en de Oosterschelde dateren van voor 2006. Stroming is niet verdisconteerd in die berekeningen, en de waterstand is als een uniform veld met constante hoogte verdisconteerd. Voor het Ijsselmeer zijn hydraulische randvoorwaarden beschikbaar op basis van de modellen WAQUA (waterstanden) en SWAN. Voor de golfconditites op het Markermeer zelfs grotendeels op basis van HISWA en Bretschneider. Deze gegevens zijn eveneens opgeslagen in databases. Voor het rivierengebied zijn in 2013 t/m 2015 waterstands- en golfberekeningen uitgevoerd met de modellen WAQUA, SWAN (brede wateren als Haringvliet, Hollands Diep, Biesbosch, Ketelmeer, Vossemeer en Zwarte Meer). Ook deze rekenresultaten zijn opgeslagen in databases.

De **databases** met rekenresultaten van waterstand en golfcondities (voor groot aantal combinaties van de basisstochasten wind, zeewaterstand/meerpeil, afvoer) en de bij deze vertalingsmatrix behorende modelonzekerheden (bias en spreiding) vormen samen met de **statistiek** van deze basisstochasten, onderlinge correlaties tussen basisstochasten en bijbehorende statistische onzekerheden het belastingmodel voor het betreffende watersysteem. Dit is de de basis voor de afleiding van hydraulische randvoorwaarden.

De belastingmodellen liggen ten grondslag aan de instrumentaria voor toetsing en ontwerp:

1. Het OntwerpInstrumentarium (OI), en
2. WTI-Hydra-Ring.

Het OI wordt al ingezet in lopende verbetertrajecten en maakt thans gebruik van bestaande rekenmodules, zoals Hydra-Zoet en Hydra-K, met onderliggende WTI2011 databases. De onderliggende benadering is gebaseerd op overschrijdingskansen waarbij per traject en per faalmechanisme wordt getoetst of aan een zekere faalkanseis wordt voldaan.

Het WTI instrumentarium met Hydra-Ring is nog in ontwikkeling en is gebaseerd op een overstromingsbenadering waarin faalkansen over alle faalmechanismen voor alle doorsnedes in een dijkvak worden gecombineerd tot een faalkans van een dijkvak. Bovengeschetst belastingmodel vormt een belangrijk onderdeel van de Hydra modellen. Omdat voor WTI 2017 de statistiek van een aantal basisstochasten en de databases voor het rivierengebied zijn aangepast, ontstaan er verschillen tussen OI en WTI resultaten. Daarbij worden verschillen als gevolg van andere keuzes in Hydra-Zoet/K enezijds en Hydra-Ring anderzijds nog even buiten beschouwing. Het is de bedoeling dat op termijn (2018) OI weer aansluiting vindt bij WTI 2017, zodat beide weer consistent zijn.

Voor het doel van dit memo is het van belang om te weten hoe de databases met wind, waterstand en golfcondities tot stand zijn gekomen. Bij de beschrijving daarvan wordt eerst een algemene aanpak gevolgd. In hoofdstuk 6 van dit memo wordt ingegaan op mogelijke consequenties voor verschillende watersystemen. De algemene aanpak bestaat uit de volgende stappen:

1. Op basis van een statistische analyse van waargenomen wind op KNMI landstations is gekomen tot een windklimaat van potentiële windsnelheden per windrichtingssector. Deze winden worden vervolgens omgezet tot een **open-water wind** met behulp van een meso-wind transformatie waarbij de landruwheid de waarde 0.03 m heeft en de ruwheid van het wateroppervlak op basis van een Charnock relatie wordt bepaald. Voor het doel van dit memo wordt de hierbij gebruikte dragformulering aangeduid met het acronym "C_{d1}".

2. Voor de bepaling van de waterstanden wordt gebruik gemaakt van **afgeregelde** WAQUA modellen (voor de Oosterschelde IMPLIC). Hierin is gebruik gemaakt van een bepaalde drag-relatie "C_{d2}". Vervolgens zijn op systematische wijze berekeningen uitgevoerd om te komen tot een database met waterstandsvelden als functie van windcondities. De afhankelijkheid van rivierafvoer laten we hier buiten beschouwing.

3. Voor de bepaling van de golfcondities is gebruik gemaakt van (deels) **afgeregelde** golfmodellen (HISWA en SWAN) en Bretschneider methoden. Opgemerkt wordt dat er onvoldoende informatie beschikbaar is over de wijze waarop het HISWA model is afgeregeld. Voor die watersystemen waar de Bretschneider methode is toegepast, is geen informatie nodig over afregeling, omdat de golfgroeicurve van Bretschneider gebaseerd is op metingen en niet expliciet een dragrelatie wordt gebruikt. Het SWAN model is gecalibreerd aan de hand van een algemene set van metingen die voornamelijk in de Waddenzee zijn uitgevoerd en deels in het IJsselmeer. Ten behoeve van WTI is in een later stadium een calibratie uitgevoerd, gericht op ondiep water situaties aan de hand van metingen in met name de Wadden, en in het IJsselmeer, Slotermeer, zie bijlage B van Delteres (2010a) voor een compleet overzicht. In het model is gebruik gemaakt van de Wu-parameterisatie voor de drag. Resultaten uit de stappen 1 en 2 (wind- en waterstanden) zijn hierbij gebruikt als invoer. De gebruikte dragrelaties worden hier schematisch aangegeven als de "C_{d3}" formulering.

4. Ten behoeve van de probabilistische beschouwingen is de **betrouwbaarheid** (bias en spreiding) van de vertalingsmatrix (als gevolg van onzekerheden in modelinvoer, modelaannames, ect.) in termen van waterstand en golfcondities bepaald aan de hand van diverse analyses. Voor SWAN rekenresultaten is de betrouwbaarheid vastgesteld aan de

hand van statistische analyses van berekende en gemeten condities. Voor WAQUA door de belangrijkste bronnen te identificeren en de bijdrage aan de totale onzekerheid te kwantificeren.

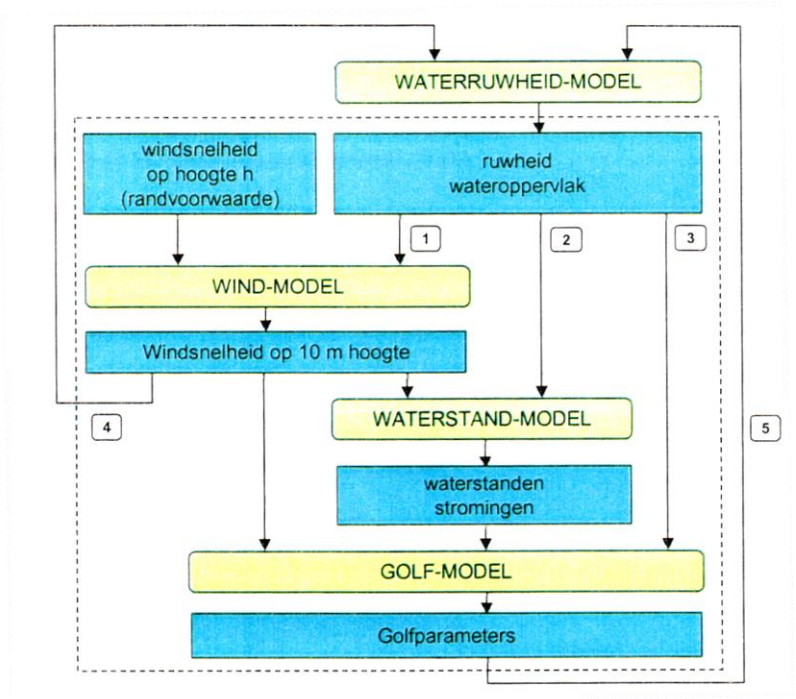
5. De resultaten van de waterstand- en golfberekeningen zijn opgeslagen in databases. Deze databases vormen samen met de bijbehorende modelonzekerheden enerzijds en de statistiek van basisstochasten, correlaties tussen basisstochasten en de statistische onzekerheden anderzijds, het belastingmodel in probabilistisch hart van WTI.

Het is van belang te stellen dat de afregeling en betrouwbaarheid is uitgevoerd voor condities waarbij de windsnelheid lager was dan 30 m/s. Hierdoor zijn er geen consequenties voor de afregeling en betrouwbaarheid van golfmodelresultaten, deze kunnen nog steeds ongewijzigd worden toegepast.

3 De rol van wind in de modellering van waterstanden en golfcondities

De hydraulische randvoorwaarden in de Nederlandse kust- en binnenwateren zijn voor een groot deel bepaald door wind. Voor de boven- en een deel van de aangrenzende gebieden is rivierafvoer dominant. Wind heeft zowel invloed op de waterstanden en golfcondities. Langs de kust draagt wind bij aan de stormvloedwaterstanden. In de gesloten watersystemen zorgt wind voor scheefstand en mogelijk zelfs aan droogval. Voor de bepaling van wind, waterstanden en golfcondities worden numerieke modellen gebruikt. Voor een consistente benadering zouden al deze modellen tweezijdig met elkaar gekoppeld moeten worden. In de praktijk worden echter vaak eenzijdige koppelingen gebruikt vanwege de complexiteit van gekoppelde systemen.

De samenhang tussen wind, waterstanden en golfcondities is door De Waal (2003) uitstekend in kaart gebracht. Figuur 2 geeft een overzicht van de afhankelijkheden tussen de verschillende modellen en bijbehorende parameters (windsnelheid, windrichting, waterstand, golfhoogte, golfperiode en golfrichting).



Figuur 2: Gekoppeld modellensysteem voor de bepaling van hydraulische randvoorwaarden. Bron: Figuur 5.2, De Waal (2003).

Uitgangspunt voor de modellering is potentiële windsnelheid U_{pot} op basis van KNMI landstations. Deze wind wordt op basis van de ruwheid van het wateroppervlak via een meso-wind omgezet naar een open-water windsnelheid U_{opw}. Deze wind wekt golven op die weer bijdragen aan de ruwheid van het wateroppervlak. De wind drijft stromingen aan die resulteren in waterstandsveranderingen die weer invloed hebben op de ontwikkeling van het golfveld. Ook kunnen golven weer invloed hebben op de stromingen en de ruwheid van het wateroppervlak. Voor stationaire situaties worden stromingseffecten verwaarloosd omdat er dan (in een diepte-gemiddelde benadering) een evenwichtssituatie ontstaat waarbij er geen stromingen optreden.

Uit figuur 2 kan worden afgeleid dat de ruwheid van het wateroppervlak een belangrijke rol speelt bij de bepaling van de open-water wind, de waterbeweging en de golven. In de praktijk blijken de verschillende modellen ieder een eigen ruwheidsmodel toe te passen. Uniformering van deze ruwheidsmodellen is een vereiste voor een consistente benadering.

4 Winddrag

De winddrag is een maat voor de ruwheid van het wateroppervlak. Deze ruwheid wordt voor een groot deel gedragen door windgolven. Bij toenemende windsnelheid worden de golven hoger en daarmee ook de ruwheid. Wu (1982) was een van de eersten die deze relatie parameteriseerde met een linear verband. De relatie van Wu (1982) is weergegeven in figuur 1 en kan wiskundig beschreven worden als

$$C_d = \left(0.8 + 0.065 U_{10}\right) \times 10^{-3} \tag{2}$$

In de negentiger jaren van de vorige eeuw kwamen diverse onderzoekers tot de bevinding dat de dragcoëfficiënt niet linear meegroeit met windsnelheid, maar dat er een bovengrens moet zijn (Frank, 1984) Het fysisch mechanisme dat hieraan ten grondslag ligt, is dat de wind onder extreme omstandigheden minder grip krijgt op de golven door het afwaaiien van de golftoppen waardoor de dalen tussen individuele golven gevuld worden met schuim en waterdruppels. Deze effecten leiden tot een verzadiging en mogelijk zelfs een afname van de winddrag.

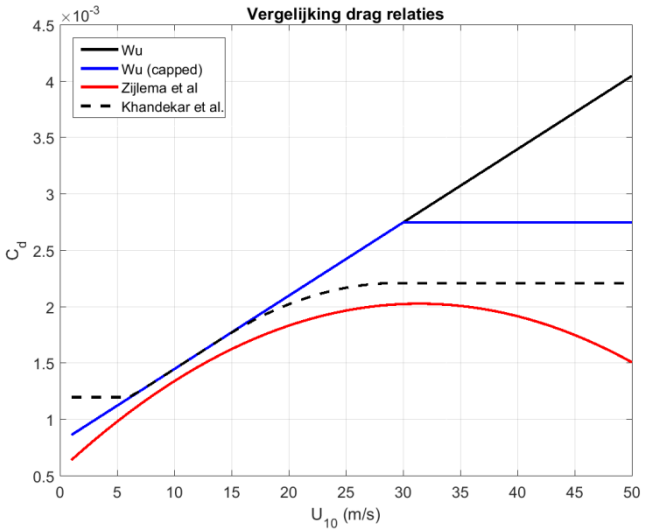
Een eerste parameterisatie van dit effect bestond uit het maximaliseren van de dragcoëfficiënt, het zogenaamde 'capping'. Een veelgebruikte methode is om het Wu (1982) model te begrenzen bij de drag horend bij een windsnelheid van U_{cap}=30 m/s.

$$C_{d,cap} = \left(0.8 + 0.065 \times \min\left(U_{10}, U_{cap}\right)\right) \times 10^{-3} \tag{3}$$

Khandekar et al. (1993) stelden een aanpassing voor van de Wu relatie waarin de dragcoëfficiënt niet verder groeit bij windsnelheden boven de 29.5 m. Zij pasten een kwadratisch verband toe voor het bereik 14 m/s < U10 < 29.5 m/s om een geleidelijke overgang naar de limiterende waarde te krijgen. Met deze aanpassing bereikten zij betere resultaten in stormen en hurricanes (persoonlijke communicatie Andrew Cox, Oceanweather, 2015). Hun aanpassing werd later bevestigd door het werk van Powell (2003), en Donelan et al. (2007). Hun model kan beschreven worden met de vergelijking

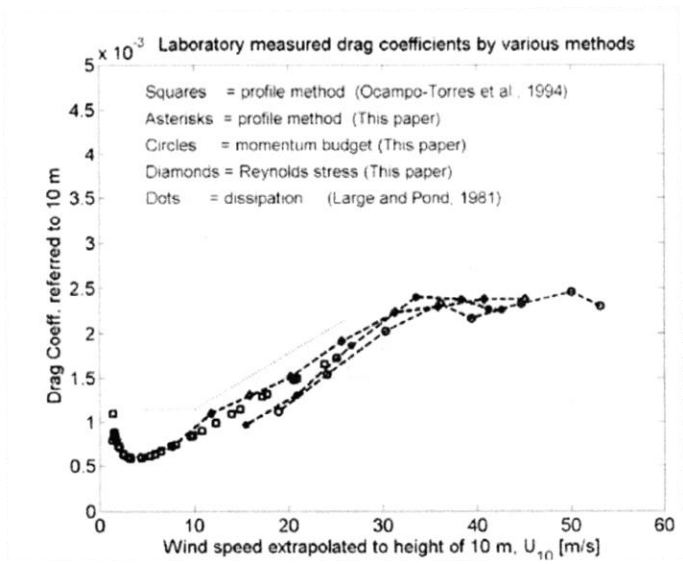
$$C_d = \begin{cases} 1.2 \times 10^{-3} & U_{10} \le 6.2 \quad \text{m/s} \\ \left(0.8 + 0.065 U_{10}\right) \times 10^{-3} & 6.2 < U_{10} \le 14 \quad \text{m/s} \\ \left[\left(0.8 + 0.065 U_{10}\right) - 0.0021\left(U_{10} - 14\right)^2\right] & 14 < U_{10} \le 29/5 \quad \text{m/s} \\ \left[\left(0.8 + 0.065 U_{10}\right) - 0.0021\left(U_{10} - 14\right)^2 - \left(U_{10} - 29.5\right)^2\right] & U_{10} \ge 29.5 \quad \text{m/s} \end{cases} \tag{4}$$

Figuur 3 geeft een vergelijking van de verschillende dragrelaties op basis van de Wu parameterisatie en die van Zijlema et al. (2012). Opvallend is dat de bovengrens van deze formulering ruim 20% lager is dan de afgekapte Wu, en 10% hoger dan de maximale waarde van de Zijlema et al. (2012) parameterisatie.



Figuur 3: Vergelijking dragrelaties op basis van Wu (zwarte lijn), afgekapte Wu bij 30 m/s (blauwe lijn), de Zijlema et al. (2012) formulering (rode lijn) en de aanpassing van Khandehar et al. (1993) (zwart gestreepte lijn).

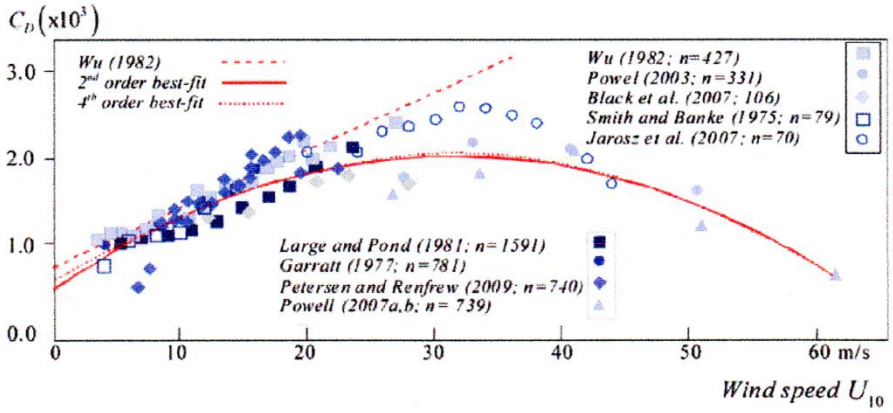
Na de eeuwwisseling kwamen steeds meer metingen beschikbaar van winddrag tijdens extreme windsnelheden. Powell et al. (2003) realiseerden zich dat de dragcoëfficiënt in extreme windsnelheden een bovengrens heeft. Latere analyses door Donelan et al. (2003), Powell et al. (2007a,b), Zweers et al. (2010, 2012, 2015), Hwang (2011) en Holthuijsen et al. (2012) kwamen eveneens tot de bevinding dat de dragcoëfficiënt een maximum heeft bij ongeveer 30 m/s. Figuur 4 toont de bevindingen van Donelan et al. (2007). Deze figuur geeft tevens aan dat bij windsnelheden groter dan ongeveer 30 m/s de dragcoëfficiënt min of meer constant blijft.



Figuur 4: Drag coefficient als functie van windsnelheid U_{10} op basis van laboratorium experimenten. Bron: figuur 2 van Donelan et al. (2007).

De metingen van Powell et al. (2003) suggereren dat de dragcoëfficiënt zelfs afneemt bij verder toenemende windsnelheid. Opmerkelijk is dat Yokota et al. (2012) op basis van inverse modellering van tropische stormen nabij Japan tot een vergelijkbare conclusie kwamen. Holthuijsen et al. (2012)

maakte een inventarisatie van gemeten dragcoëfficiënten over een ruim bereik van windsnelheden. Het resultaat van hun analyse is weergegeven in figuur 5.



Figuur 5: Winddrag parameterisatie en waargenomen C_d waarden als functie van windsnelheid (bron: figuur 3 van Zijlema et al., 2012).

Op basis van deze resultaten stelden Zijlema et al. (2012) een parabolische parameterisatie voor en implementeerden deze in SWAN:

$$C_d = \left(0.55 + 2.97\left(U_{10}/31.5\right) - 1.49\left(U_{10}/31.5\right)^2\right) \times 10^{-3} \qquad (5)$$

Op basis van gesprekken met Hans de Vries en Ad Stoffelen van het KNMI blijkt dat er in wetenschapelijke kringen geen consensus is over het gedrag van de dragcoëfficiënt bij windsnelheden groter dan, zeg, 30 m/s. Er is zelfs discussie of de metingen wel goed geïnterpreteerd zijn, maar ook of de huidige meetmethoden wel uitspraken kunnen doen over de dragcoëfficiënt bij extreem hoge windsnelheden. Wel is er consensus dat er een bovengrens voor de dragcoëfficiënt moet zijn, zie bijv. Donelan et al. (2007). Kudryavtsev en Makin (2007) komen tot een bovengrens van 30 m/s.

In de literatuur wordt de drag coëfficiënt vaak uitgezet tegen windsnelheid U_{10}. Een andere aanpak is om de dragcoëfficiënt uit te zetten tegen de inverse golfleeftijd c_p/U_{10}, die sterk gecorreleerd is met golfsteilheid (zie bijv. Drennan et al., 2003). Naar aanleiding van de februari 2010 Xanthia storm die noordwest Frankrijk trof, hebben Bertin et al. (2015) een analyse uitgevoerd waaruit een mogelijke rol van (steile) korte golven naar voren komt. In hoeverre dat effect voor Nederlandse superstorm condities een rol speelt is niet duidelijk.

Op basis van de literatuur en veldmetingen (zie figuur 5) lijkt een veilige keuze om de Wu parameterisatie af te kappen bij een windsnelheid van 30 m/s. Met deze benadering liggen alle meetpunten in figuur 5 onder de afgekapte lijn. Bovendien is dit conservatief ten opzichte van de parameterisatie van Khandekar et al. (1993). De consequentie van het toepassen van een afgekapte Wu dragformulering in plaats van de orginele Wu formulering is dat voor windsnelheden boven de 30 m/s, de effectiviteit van de energieoverdracht van de atmosfeer naar het watersysteem afneemt.

5 Pragmatische correctie hydraulische randvoorwaarden

5.1 Inleiding

Het doorvoeren van de consequenties van een nieuwe dragformulering op de hydraulische randvoorwaarden kan op verschillende wijzen gebeuren. Hiervoor bestaan ruwweg drie mogelijkheden.

1. De meest consistente en robuuste aanpak is het opnieuw uitvoeren van alle modelberekeningen. Dit is echter een exercitie die op korte termijn niet haalbaar is. Het is wel een overweging voor de lange termijn, zeg WTI2023, waarbij dan de komende jaren nieuwe inzichten in de fysica van wind, waterstanden, golven en hun onderlinge interacties kunnen uitkristalliseren om te komen tot een consistente en wetenschappelijk onderbouwde aanpak.
2. Het aanpassen van de getallen in de database. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het concept pseudo-wind om parameters (waterstand, golfhoogte, golperiode en golfrichting) horend bij een bepaalde windconditie aan te passen. Een wezenlijk kenmerk van deze methode is dat de windstatistiek niet verandert.
3. Het aanpassen van de windstatistiek. Ook hierbij wordt gebruikt gemaakt van het concept van een pseudowind om de windsnelheid met een bepaalde kans van vóórkomen aan te passen. In deze aanpak wordt de database met waarden van waterstanden en golfcondities niet aangepast.

De methoden 2 en 3 maken gebruik van correcties in windsnelheid aan de hand van het concept pseudowind, dit concept wordt in paragraaf 5.2 beschreven. Vervolgens wordt in paragraaf 5.3 de keten van de afleiding van hydraulische randvoorwaarden beschreven en wordt aangegeven welke correcties in principe nodig zouden zijn voor een consistente aanpak. Tenslotte worden in de paragrafen 5.4 en 5.5 pragmatische methoden beschreven om eenvoudig de gegevens in de databases met waterstanden en golfcondities of in de tabellen met windstatistiek om te zetten in hydraulische randvoorwaarden.

5.2 Het concept pseudo wind

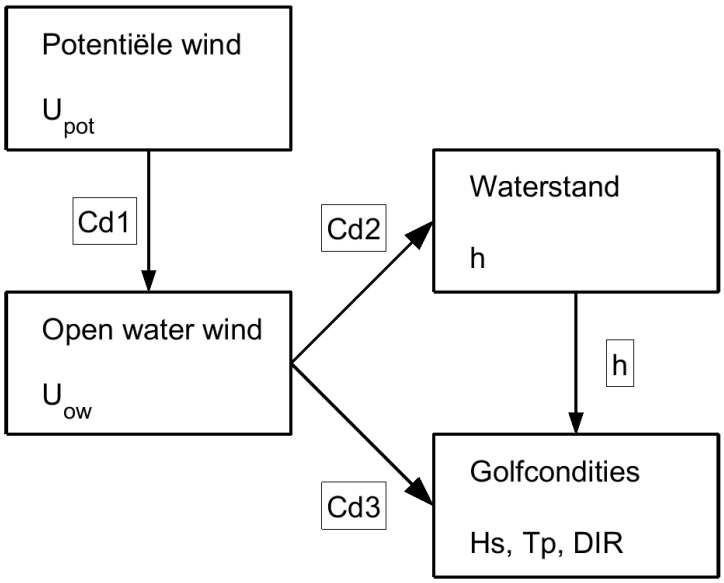
Eén van de doelen van dit memo is om een pragmatische methode te ontwikkelen om gegevens in reeds gevulde databases op een eenvoudig wijze aan te passen, dan wel uit te lezen via een aangepaste windstatistiek, zodanig dat hiermee het toepassen van de nieuwe dragrelatie wordt gesimuleerd. Het belangrijkste kenmerk van deze nieuwe dragrelatie is dat boven een bepaalde windsnelheid de winddragcoëfficiënt niet meer toeneemt.

De nieuwe winddrag relatie wordt aangegeven met het acronym "C_{dn}", en deze vervangt de afzonderlijke dragrelaties C_{d1}, C_{d2} en C_{d3}, zodat er een consistente aanpak gerealiseerd kan worden. Opgemerkt wordt dat in het algemene geval de dragrelaties C_{d1}, C_{d2} en C_{d3} niet aan elkaar gelijk hoeven te zijn. Tevens wordt aangenomen dat deze nieuwe dragrelatie voor een windsnelheid groter dan 30 m/s een lagere dragcoëfficiënt geeft dan de oude benadering. De (oude) Wu (1982); de afgekapte en de nieuwe (bijv. Zijlema et al. 2012) parameterisatie voldoen aan deze eis.

In elke stap wordt gebruik gemaakt van een winddragrelatie om een link te leggen tussen

1. Potentiële wind en open-water wind (C_{d1})
2. Open-water wind en waterstand (C_{d2})
3. Open-water wind en golfconditie (C_{d3})

Schematisch is deze keten in figuur 6 weergegeven. Hierbij wordt voor de bepaling van de golfcondities gebruikt gemaakt van resultaten van het waterstandsmodel.



Figuur 6: Schematisch overzicht van de toepassing van dragformuleringen om te komen tot waterstanden en golfcondities.

De eerste stap bestaat uit de transformatie van U_{pot} op basis van metingen van KNMI landstations naar de open-water wind U_{opw} op basis van de meso-wind transformatie.

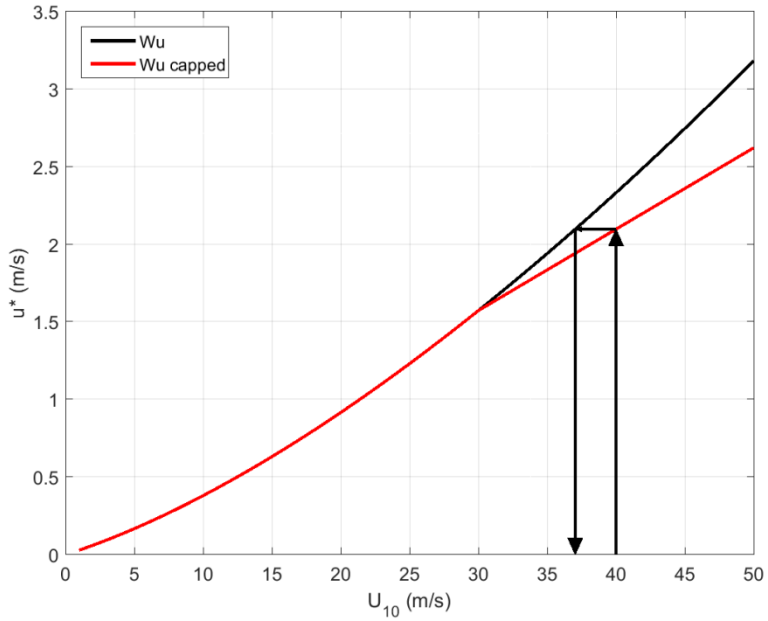
$$U_{opw} = U_{pot}\left[\frac{\ln(10/z_0)}{\ln(60/z_0)}\right]\times\left[\frac{\ln(60/0.03)}{\ln(10/0.03)}\right] \tag{6}$$

met

$$z_0 = \left[10e^{-\kappa/\sqrt{C_d}}\right] \tag{7}$$

waarin κ=0.4 de von Karman-coëfficiënt en waarin C_d wordt uitgerekend met de afgekapte Wu formulering. Toepassing van de afgekapte Wu formulering leidt tot open-water windsnelheden die ongeveer 2% hoger liggen dan bij toepassing van de originele Wu formulering. Deze bevinding is consistent met De Waal (2003) die tot een zelfde conclusie kwam, zie bijv. Figuur 10.8 in zijn rapport.

Een belangrijke stap in de correctiemethode is de bepaling van een pseudowind. Deze wind kan als volgt gedefiniëerd worden: welke windsnelheid zou bij toepassing van de oude dragformulering dezelfde wrijvingssnelheid u* geven als bij toepassing van de nieuwe dragformulering. De bepaling van de pseudowind is grafisch weergegeven in figuur 7 op basis van de originele en de afgekapte Wu formulering.

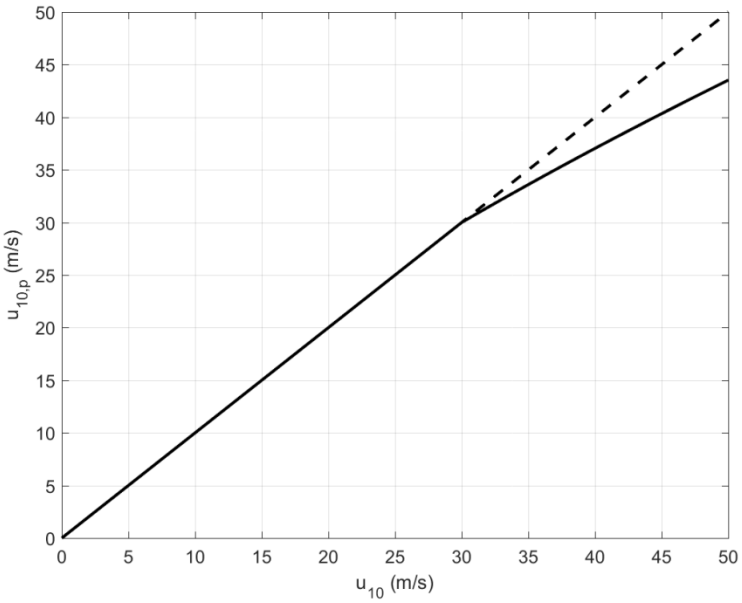


Figuur 7: Methode om pseudowind te bepalen op basis van een oude Wu (1982) formulering en de afgekapte Wu formulering met U_{cap}=30 m/s.

Voor de bepaling van de pseudowind worden drie stappen uitgevoerd (zie figuur 7).

1. Op basis van een windsnelheid van bijv. U_{10}=40 m/s wordt de bijbehorende schuifspanningssnelheid u_* bepaalde volgens de nieuwe dragrelatie (vergelijking 3). Voor de afgekapte Wu (1982) parameterisatie geeft dit u_*= 2.10 m/s.
2. Vervolgens wordt op basis van de vergelijkingen (1) en (2), de windsnelheid bepaald die een u_*=2.10 m/s geeft op basis van de originele Wu formulering. Hiertoe moet de impliciete vergelijking $U_{10}=u_*/[Cd(U_{10})]^{1/2}$ iteratief worden opgelost, met $C_d(U_{10})=(0.8+0.065U_{10})/1000$. Dit geeft een pseudowind van U_{10p}=37.04 m/s.

Figuur 8 geeft de relatie tussen de windsnelheid U_{10} en de pseudowindsnelheid U_{10p} op basis van de afgekapte Wu drag formulering. Uit deze figuur blijkt dat een oorspronkelijke windsnelheid van U_{10}=45.0 m/s leidt tot een pseudowind van U_{10p}=40.3 m/s.

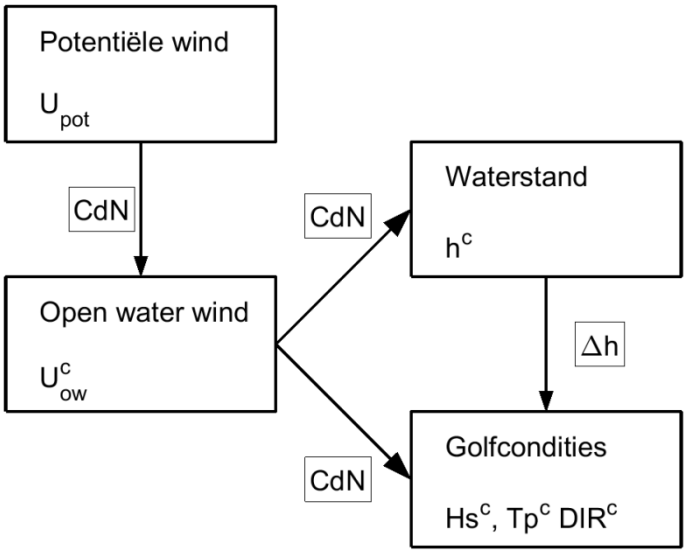


Figuur 8: Relatie tussen de windsnelheid U_{10} en de pseudowindsnelheid U_{10p} op basis van de afgekapte Wu formulering met U_{cap}=30 m/s. De gestreepte lijn geeft de 1 op 1 relatie aan.

Bovenstaande methode moet in principe voor alle onderdelen in de keten (zie figuur 6) worden toegepast. Het effect van elk van deze toepassingen is als volgt:

Toepassing van nieuwe dragcoëfficiënt C_{dn} voor de bepaling van de open-water wind, leidt tot een iets hogere open-water windsnelheid U_{ow}^{c} (waarbij het superscript c aangeeft dat het een correctie betreft) van orde 2%. Deze lichte verhoging wordt veroorzaakt doordat het golfveld minder ruw is bij extreme windsnelheden, zie ook figuur 10.8 in De Waal (2003).

Voor de bepaling van het effect van de nieuwe dragformulering op de waterstanden, moet de pseudowind bepaald worden op basis van de gecorrigeerde potentiële windsnelheid U_{ow}^{c} , de oude en de nieuwe dragformuleringen (respectievelijk C_{d2} en C_{dN}). Het principe van deze correcties wordt aangegeven in figuur 9. De Waal (2003) heeft aangetoond dat dit leidt tot minder scheefstand in een meer, zie figuur 10.11 in de Waal (2003). Minder scheefstand vertaalt zich in een kleinere windopzet benedenwinds. Voor het bovenrivierengebied zal dit weinig effect hebben omdat daar de waterstanden afvoer gedomineerd zijn. Voor deze pseudowind kan vervolgens de aangepaste waterstand worden afgelezen dan wel geïnterpoleerd. Het verschil in waterstand wordt aangegeven met het symbool Δh. Het verschil in waterstand kan ook doorwerken op de golfcondities in relatief ondiepe watersystemen en bij ondiepe voorlanden.



Figuur 9: Toepassing correctiemethode op basis van nieuwe dragformulering.

Voor de bepaling van het directe effect van de nieuwe dragformulering op de golfcondities, moet de pseudowind bepaald worden op basis van de gecorrigeerde potentiële windsnelheid U_{ow}^c , de oude en nieuwe dragformuleringen (respectievelijk C_{d3} en C_{dN}) en de methode zoals aangegeven in figuur 9. Toepassing van deze correcties kan leiden tot mildere golfcondities

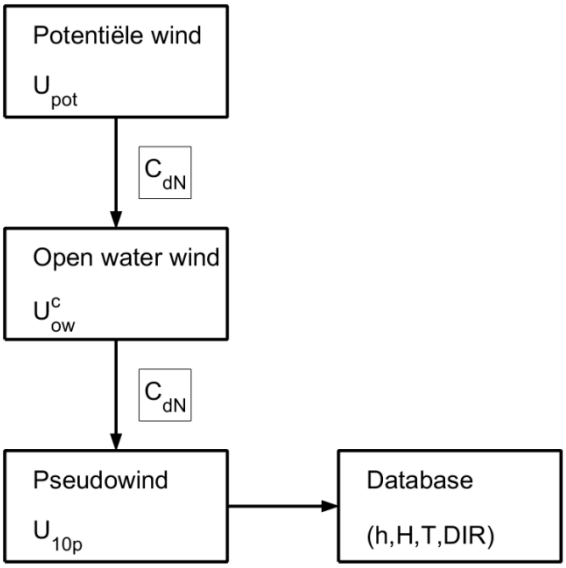
Figuur 9 geeft aan dat het verschil in waterstand Δh ook van invloed is op de golfcondities. Dit effect is grotendeels al verdisconteert in de éénzijdige koppeling van het stromings- en golvenmodel; het golfmodel maakt gebruik van de eerder berekende waterstanden. Een lagere waterstand zal alleen voor locaties waar de golven diepte-beperkt zijn, leiden tot een nagenoeg evenredige reductie van de significante golfhoogte. Het effect op de golfperioden is niet eenduidig aan te geven, omdat de golfperiode vooral bepaald wordt door cumulatieve bovenwindse effecten. Voor diepere voorlanden zal een lagere waterstand waarschijnlijk zwak of niet doorwerken op de golfcondities. Een lagere waterstand zal bij ondiepe voorlanden leiden tot kleine aanpassingen in invallende golfrichtingen waarbij de golven meer loodrecht invallen. Dit is echter een marginaal bijeffect omdat dit vooral doorwerkt op strijkgolven die nauwelijks bijdragen aan de golfbelasting.

Voor het toepassen van bovenstaande correcties zijn dan de volgende activiteiten nodig:

1. Inventarisatie van de gebruikte waterstands- en golfmodellen per watersysteem;
2. Inventarisatie van de dragformuleringen in elk van deze modeltoepassingen;
3. Keuze nieuwe dragformulering (indien gekozen wordt voor een bestaande parameterisatie, is deze actie een simpele formaliteit);
4. Ontwikkeling van programmatuur om de databases te corrigeren;
5. Toepassen programmatuur om databases te corrigeren.

Bovenstaande methode is gebaseerd op de generieke aanname dat de winddragformuleringen C_{d1}, C_{d2} en C_{d3} onderling verschillen. Omdat de toegepaste dragformuleringen onderling weinig verschillen, kan het aanpassen van de database vereenvoudigd worden door aan te nemen dat alle dragformuleringen gebaseerd zijn op de originele Wu formulering. Hierdoor kunnen waterstanden en golfcondities simultaan gecorrigeerd worden. In andere woorden, het uitlezen van de database gebeurt alleen via de windsnelheid (en windrichting). Dit wordt schematisch weergegeven in figuur

10, waarin het acronym C_{dN} betrekking heeft op de nieuwe dragformulering. Voor de eenvoud zijn in deze figuur alle golfhoogte- en golfperiodematen weergegeven met de symbolen H en T.



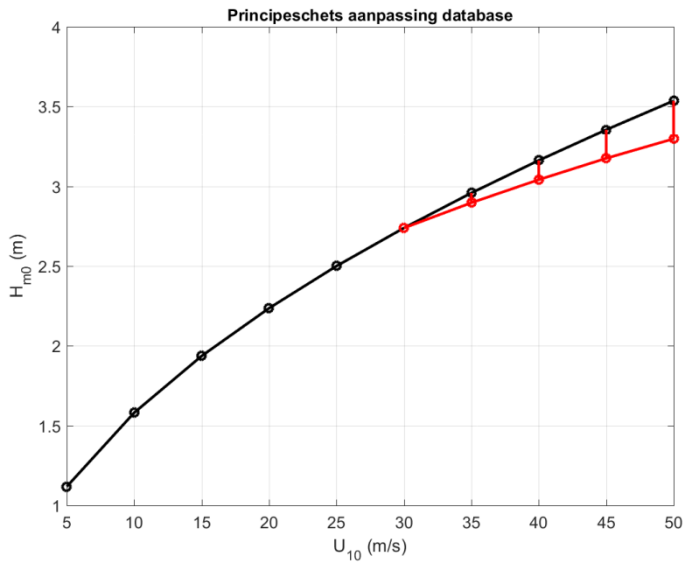
Figuur 10: Toepassing correctiemethode op basis van nieuwe dragformulering op getallen in de database.

Voor het bepalen van hydraulische randvoorwaarden bestaan nu twee eenvoudige methoden. Enerzijds door de getallen in de database aan te passen en anderzijds door de database te benaderen met een andere windsnelheid. Beide methoden worden in de volgende paragrafen schematisch toegelicht.

5.4 Aanpassen waarden in de database

Bij het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden wordt gebruik gemaakt van databases waarin voor een groot aantal windcondities (windsnelheid U_{10} en windrichting Udir) waarden voor de waterstand en golfparameters zijn opgeslagen. Om het effect van de nieuwe winddrag te verdisconteren in de database, moet per windsnelheid U_{10} eerst de pseudowind U_{10p} bepaald worden. Vervolgens moet met lineaire interpolatie de bijbehorende waarde van de parameter in de database bepaald worden.

Het principe van deze aanpassing wordt geïllustreerd in figuur 11. Hierin is een hypothetisch verband (H_{m0}=0.5 $U_{10}^{1/2}$) tussen de significante golfhoogte H_{m0} en windsnelheid U_{10} aangenomen. Verder is aangenomen dat de windsnelheid in stappen van 5 m/s wordt gegeven. De zwarte lijn geeft het originele verband aan, en de rode lijn geeft de aanpassingen weer in significante golfhoogte H_{m0}. Voor de bepaling van de pseudowind wordt verwezen naar figuur 7 van dit memo.

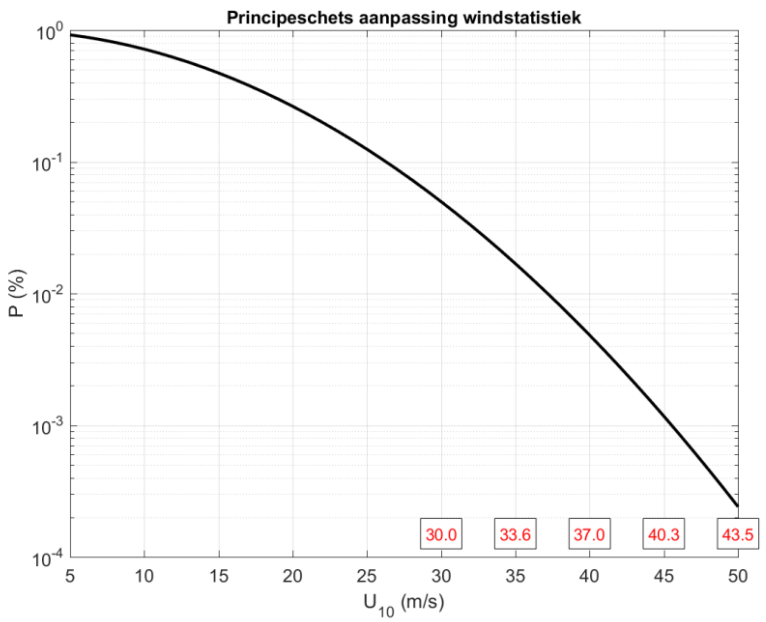


Figuur 11: Principeschets van aanpassing significante golfhoogte H_{m0} in de database.

Bovenstaande methode moet dan ook worden toegepast op alle andere parameters in de databases voor de verschillende watersystemen. In deze methode worden geen aanpassingen gedaan aan de windstatistiek en de database wordt met dezelfde windcondities benaderd als in de huidige aanpak.

5.5 Aanpassen windstatistiek

Een andere eenvoudige methode om de hydraulische randvoorwaarden aan te passen bij toepassing van de nieuwe dragformulering, is het aanpassen van de windsnelheid die hoort bij een bepaalde kans van vóórkomen. Hierbij wordt eveneens gebruik gemaakt van het concept pseudowind. Deze methode wordt schematisch toegelicht in figuur 12 waarin een hypothetisch verband is aangenomen tussen een kans van overschrijding P van een windsnelheid U_{10}. De in rood aangegeven getallen zijn de pseudo windsnelheden horend bij de in zwart aangegeven windsnelheden.



Figuur 12: Principeschets van toepassing pseudowindsnelheid in windstatistiek op basis van het afgekapte Wu drag model. De rode waarden geven de pseudo windsnelheid aan.

Een voordeel van deze methode is dat de getallen in de database met waterstanden en golfparameters niet hoeven te worden aangepast. Naar verwachting is het aanpassen van de windstatistiek minder ingrijpend dan het aanpassen van de getallen in de databases.

5.6 Toepassing pseudo-windfactoren

Bij het toepassen van windcorrecties moet rekening worden gehouden met twee tegengestelde pseudowindeffecten. Enerzijds moet er een correctie plaatsvinden van de vertaling van potentiële wind naar open-water wind. Bij toepassing van de nieuwe dragformulering leidt dit tot een lichte verhoging van de open-water wind (zie o.a. De Waal, 2003). Anderzijds geeft correctie van de open-water windsnelheid bij toepassing van de nieuwe drag-formerling een verlaging van de effectieve open-water windsnelheid. Beide effecten moeten zorgvuldig in rekening gebracht worden. De benodigde formules staan hierboven uitgewerkt.

Voor de praktische uitwerking van de correcties moet daarom ook worden vastgesteld of de database benaderd wordt met de potentiële windsnelheid of met de open-water windsnelheid.

6 Impactanalyse

6.1 Inleiding

In hoofdstuk 5 zijn diverse methoden beschreven om de effecten van toepassing van de nieuwe winddragformulering op de hydraulische randvoorwaarden te verdisconteren. Enerzijds door aanpassing van de waarden in de database en anderzijds door aanpassing van de windstatistiek. Hieruit wordt echter niet duidelijk hoe deze aanpassingen in de praktijk doorwerken op de hydraulische randvoorwaarden. Om die reden is een eenvoudige impactanalyse toegepast om het effect van een andere dragformulering nader te kwantificeren en om te onderzoeken of er nog onverwachte zaken opvallen.

Voor deze impact analyse is gebruik gemaakt van het BretPro (2012) programma om een eerste schatting te krijgen van het waterstandsveld en het golfveld. De invoer van het BretPro programma bestaat uit een omtrek van het watersysteem, een representatieve constante waterdiepte, een potentiële windsnelheid U_{pot} bij een KNMI landstation en de parameters van het Wu model, met a=0.8 en b=0.065 (s/m), conform vergelijking (2). De open-water wind wordt bepaald volgens voor WTI vaak gebruikte meso-wind transformatie. Voor de bepaling van de impact op de waterstanden en golfhoogten is gebruik gemaakt van de afgekapte Wu formulering met U_{cap}=30 m/s conform vergelijking (3).

De opwaaiing wordt uitgerekend op basis van het model zoals beschreven in Bijlage E van De Waal (2003). In 1-dimensionale vorm wordt daarbij de volgende vergelijking opgelost:

$$h\frac{dh}{dx} = \frac{\rho_a}{\rho_w}\frac{\delta}{g}C_{10}U_{10}^2 \qquad (8)$$

waarin h de waterstand in meters, x de afstand in meters, ρ_a en ρ_w de dichtheden van lucht en water in kg/m^3, δ een coëfficiënt gelijk aan 1.2, C_{10} de dragcoëfficiënt volgens formule (1) en U_{10} de open-water windsnelheid in m/s. Bij het oplossen van vergelijking (8) moet gewaarborgd worden dat de totale hoeveelheid water in het systeem constant blijft. In BretPro wordt hiervoor een quasi-2D benadering toegepast waarbij rekening gehouden wordt met de mogelijk variabele breedte van het watersysteem dwars op de richting van de wind.

De impact van de dragrelatie wordt in paragraaf 6.2 toegelicht aan de hand van een gesimplificeerd watersysteem bestaande uit een rechte bak van 50 km bij 20 km met een constante diepte. In deze paragraaf worden de belangrijkste stappen beschreven hoe de impact gekwantificeerd kan worden. Vervolgens wordt in de paragrafen 6.2 tot en met 6.4 de correctiemethode toegepast op het IJsselmeer-Ketelmeer, Markermeer en Hollands Diep-Haringvliet. Tenslotte wordt in paragraaf 6.5 de impact geanalyseerd voor de Noordzee kust. Hiervoor is geen gebruik gemaakt van BretPro maar van een SWAN-1d-model met WTI instellingen. Paragraaf 6.6 beschrijft een consistentiecontrole met het WTI SWAN model voor het IJsselmeer met Ketelmeer. Tenslotte wordt aan de hand van illustratiepunten een eerste inschatting van het totale effect voor de Nederlandse watersystemen gegeven in paragraaf 6.7.

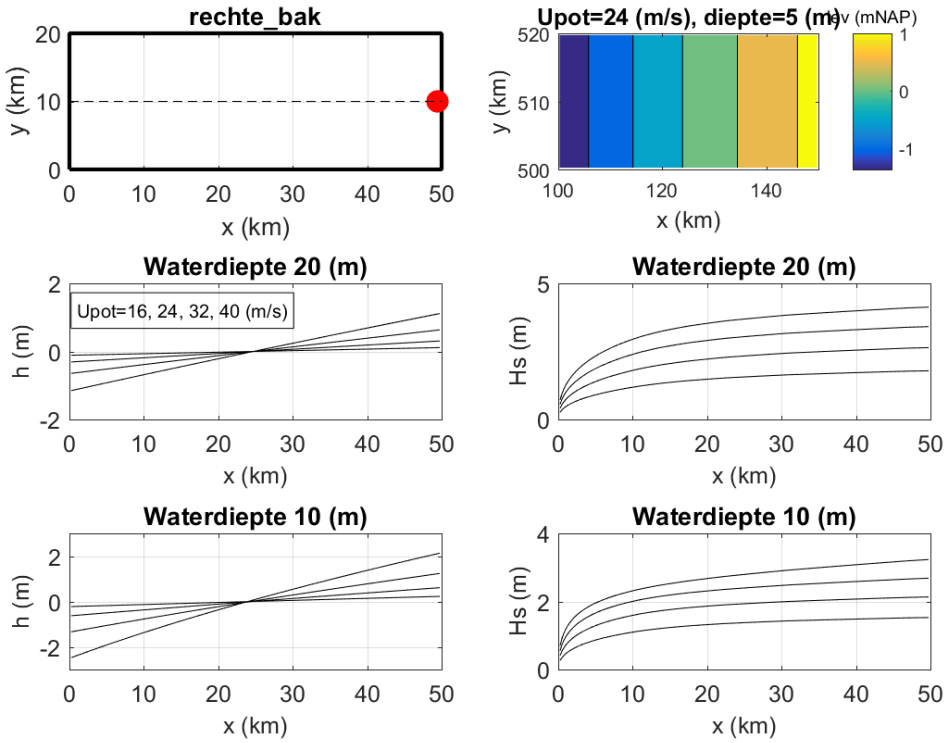
6.2 Rechte bak

Het principe van het de dragcorrectie op de benodigde (hypothetische) kruinhoogte wordt in deze paragraaf uitgelegd aan de hand van een gesimplificeerd watersysteem van 50 km bij 20 km met een constante waterdiepte. Voor deze bak zijn BretPro berekeningen gemaakt voor windsnelheden van 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44 en 48 m/s. De bodemligging van deze rechte bak is NAP -5 m. Vervolgens zijn waterstandsverhogingen van 0 m, 5 m en 10 m toegepast om het effect van toenemende waterdiepte te simuleren. De golven zijn uitgerekend op basis van het ondiep water Bretschneider model, zie bijlage F van De Waal (2003). Bij toepassing van deze methode wordt de waterdiepte (inclusief waterstand) ter plaatse van de uitvoerlocatie als equivalente waterdiepte gekozen (BretPro, 2012).

Voor een eerste inschatting van het effect op de benodigde kruinhoogte KH wordt deze geschat met de eenvoudige formule op basis van een $z_{2\%}$-overslag norm en een standaardtalud van 1:3.

$$KH = h + 2.5H_s \tag{9}$$

Figuur 13 geeft een schematisch beeld van de opwaaiing en de significante golfhoogte H_s in een rechte bak voor windsnelheden van 16, 24, 32 en 40 m/s voor waterdieptes van 10 m en 20 m. De zwarte lijnen geven de berekende waarden voor waterstand en significante golfhoogte aan, waarbij een toenemende windsnelheid resulteert in meer scheefstand en hogere golfhoogten. Uit deze figuren blijkt dat de opwaaiing sterker wordt naarmate de windsnelheid toeneemt, en naarmate de waterdiepte afneemt. Ten aanzien van de golfcondities blijkt dat deze toenemen met windsnelheid en afnemen met afnemende waterdiepte. Deze trends zijn conform de verwachting.

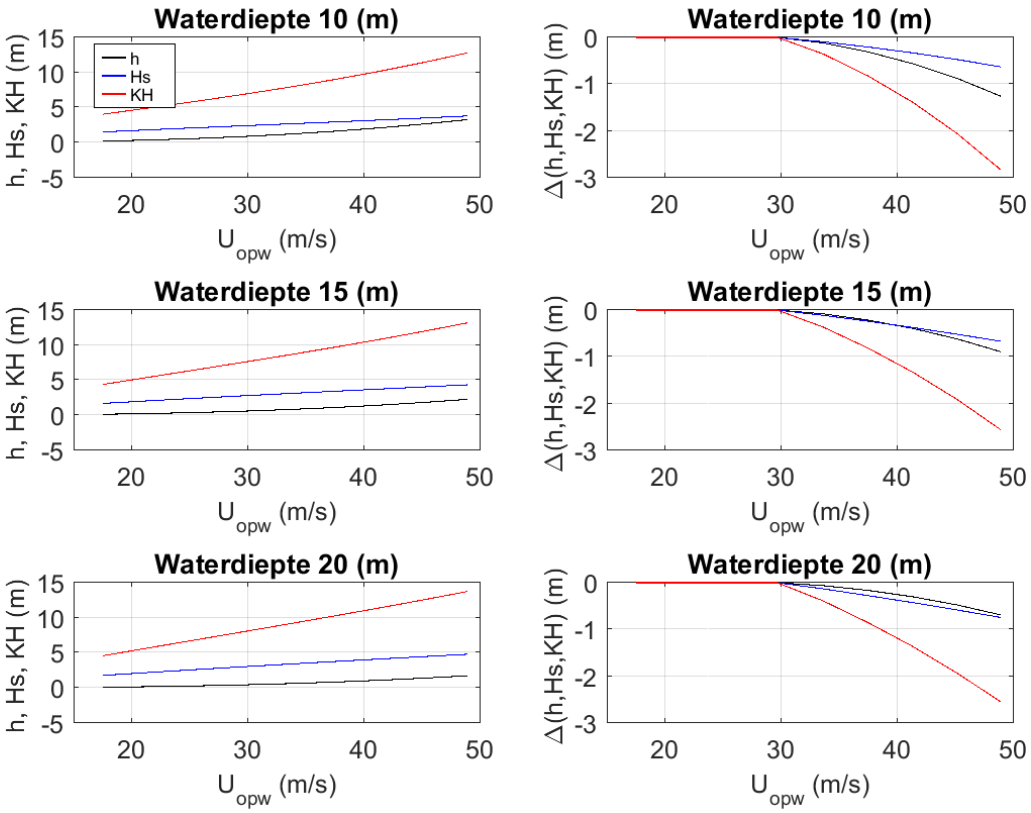


Figuur 13: Definitieschets van rechte bak met uitvoerlocatie (rode cirkel) en uitvoerlijn (gestippeld). Ruimtelijke variatie waterstand bij een windsnelheid van 24 m/s en een waterdiepte van 5 m. Variatie waterstand bij waterdieptes van 20 m en 10 m, en windsnelheden van 18, 24, 32 en 40 m/s (panelen linksonder) en bijbehorende significante golfhoogte (panelen rechtsonder).

De impact van het toepassen van een andere dragformulering (hier de afgekapte Wu formulering met u_{cap}= 30 m/s) op de waterstand, golfhoogte en benodigde kruinhoogte is uitgezet in figuur 14. De impact is gekwantiiceerd door voor elke open-water windsnelheid U_{opw} de corresponderende pseudowind snelheid U_{10p} te bepalen om vervolgens de bijbehorende gecorrigeerde waterstand h_c, significante golfhoogte H_{sc} en kruinhoogte KH_c te bepalen. Tenslotte wordt de impact bepaald door de ongecorrigeerde en de gecorrigeerde waarden van elkaar af te trekken. Opgemerkt wordt dat er geen correctie op de open-water windsnelheid is toegepast, zoals beschreven in paragraaf 5.6. Het weglaten van deze correctie heeft echter nauwelijks effect op de hier getoonde resultaten.

Het resultaat van deze analyse wordt getoond in figuur 14 voor een drietal waterdieptes; 10 m, 15 m en 20. In deze figuur geven in de linkerpanelen de zwarte lijnen de berekende waterstand weer als functie van open-water windsnelheid U_{opw}, de blauwe lijnen de berekende significante golfhoogte H_s en de rode lijnen de benodigde kruinhoogte KH op basis van vergelijking (9). In de rechterpanelen staat de impact van het toepassen van de nieuwe dragformulering op de reductie Δ in waterstand h, significante golfhoogte H_s en kruinhoogte KH.

Uit deze figuur blijkt dat de impact merkbaar is bij windsnelheden groter dan 30 m/s. De impact op de kruinhoogte neemt iets af bij toenemende waterdiepte. Opgemerkt wordt dat in deze analyse eventuele dieptebeperkende effecten op golfhoogte niet zijn meegenomen.

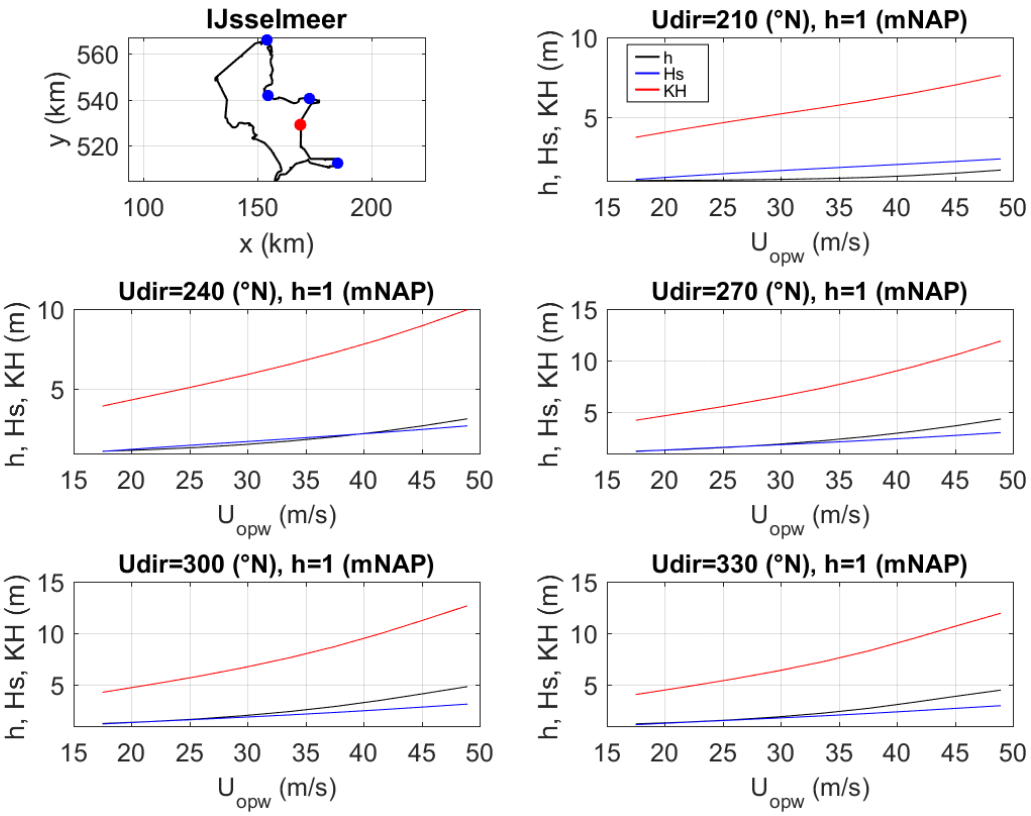


Figuur 14: Variatie van waterstand h (zwarte lijnen), significante golfhoogte H_s (blauwe lijnen) en benodigde kruinhoogte KH (rode lijnen) als functie van windsnelheid en gemiddelde waterstand (linker panelen). Reductie in waterstand Δh, significante golfhoogte ΔH_s en kruinhoogte ΔKH als functie van windsnelheid en gemiddelde waterstand (rechter panelen).

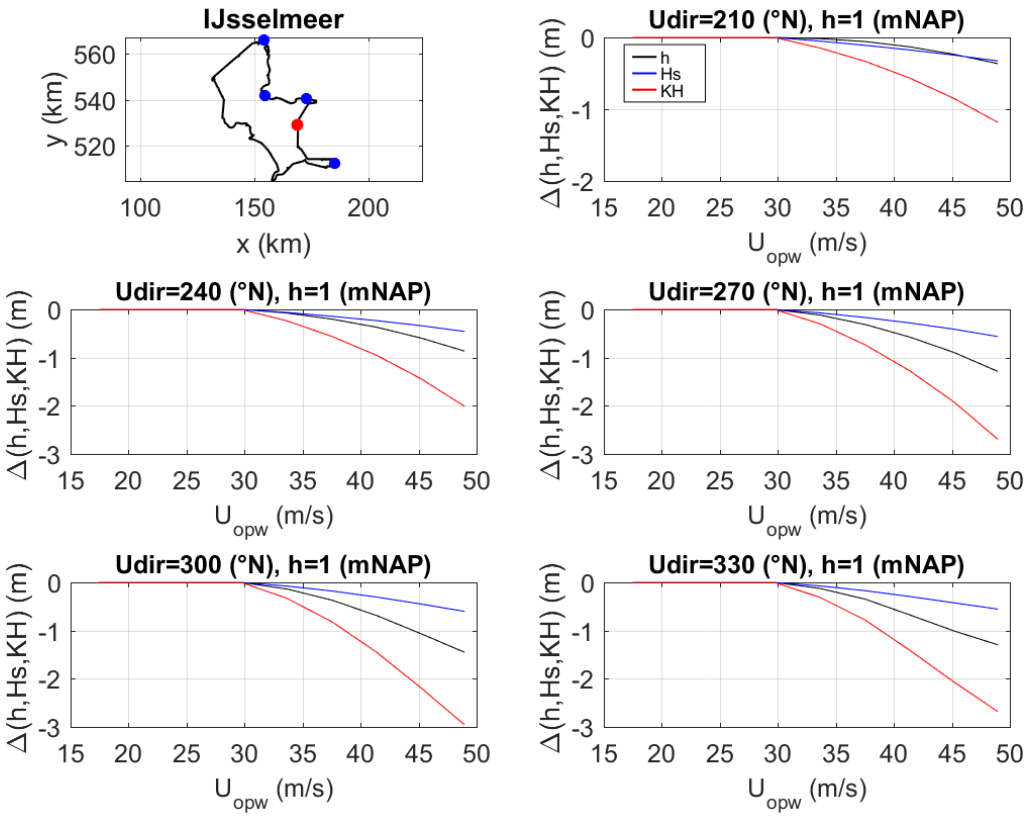
6.3 IJsselmeer-Ketelmeer

Voor het IJsselmeer met Ketelmeer is het BretPro model toegepast voor de windrichtingen 210°, 240°, 270°, 300° en 330°, windsnelheden van 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44 en 48 m/s, en meerpeilen van NAP +0, +0.5, +1.0, +1.5 en +2 m. Vervolgens is een impactanalyse uitgevoerd op een aantal uitvoerlocaties langs de randen van het IJsselmeer en Ketelmeer. In deze paragraaf wordt een selectie getoond van rekenresultaten voor een beperkt aantal uitvoerlocaties en waterstanden. Alle figuren zijn ook digitaal beschikbaar.

Het paneel linksboven in figuur 15 toont het IJsselmeer met een beperkt aantal uitvoerlocaties. Voor de rode locatie nabij Rotterdamse Hoek tonen de andere panelen het verloop van de waterstand (zwarte lijnen), de significante golfhoogte (blauwe lijnen) en kruinhoogte (rode lijnen) als functie van de open-water windsnelheid U_{opw}. Het aangenomen meerpeil bedraagt NAP +1 m. Figuur 16 toont de corresponderende reductie in waterstand, significante golfhoogte en hypothetische kruinhoogte voor dezelfde uitvoerlocatie als functie van de open-water windsnelheid.



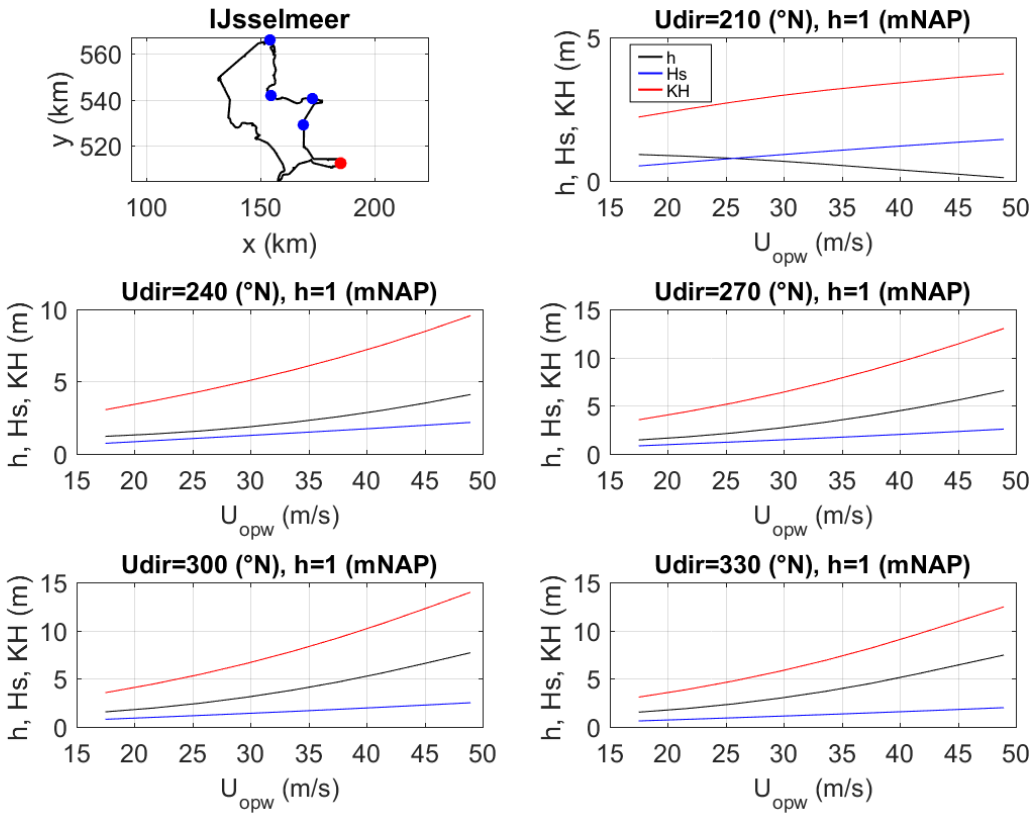
Figuur 15: Situatieschets uitvoerpunten IJsselmeer (paneel linksboven). Variatie waterstand h (zwarte lijnen) en significante golfhoogte H_s (blauwe lijnen) en hypothetische kruinhoogte KH bij locatie 4 nabij Rotterdamse Hoek als functie van open-water windsnelheid U_{opw} en windrichting op basis van nieuwe winddragformulering.



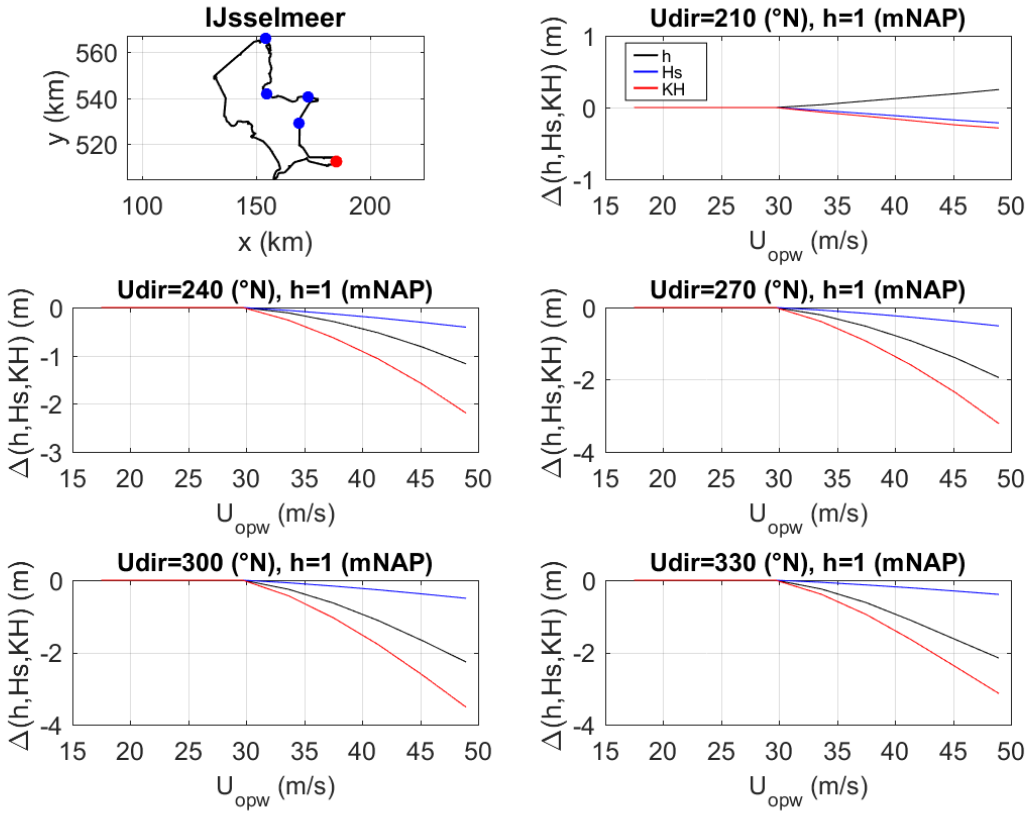
Figuur 16: Situatieschets IJsselmeer met uitvoerlocaties (paneel linksboven). Effect andere dragformulering op waterstand h (zwarte lijnen), significante golfhoogte H_s (blauwe lijnen) en hypothetische kruinhoogte KH (rode lijnen) als functie van open-water windsnelheid U_{opw} en windrichting.

Figuur 17 geeft de variatie van waterstand, golfhoogten en hypothetische kruinhoogten voor een locatie in het Ketelmeer. Figuur 18 toont de corresponderende reductie in waterstand, significante golfhoogte en hypothetische kruinhoogte voor dezelfde uitvoerlocatie.

Uit deze resultaten blijkt dat een mogelijk reductie in kruinhoogte afhankelijk is van locatie en windrichting. Zo blijken voor het Ketelmeer zuid-westelijke windrichtingen nauwelijks te leiden tot een reductie van de benodigde kruinhoogte.



Figuur 17: Situatieschets uitvoerpunten IJsselmeer (paneel linksboven). Variatie waterstand h (zwarte lijnen) en significante golfhoogte H_s (blauwe lijnen) en hypothetische kruinhoogte KH bij locatie 5 in het Ketelmeer als functie van open-water windsnelheid U_{opw} en windrichting door toepassing van nieuwe winddragformulering.



Figuur 18: Situatieschets IJsselmeer met uitvoerlocaties (paneel linksboven). Effect andere dragformulering op waterstand h (zwarte lijnen), significante golfhoogte H_s (blauwe lijnen) en hypothetische kruinhoogte KH (rode lijnen) als functie van open-water windsnelheid U_{opw} en windrichting door toepassing nieuwe winddragformulering.

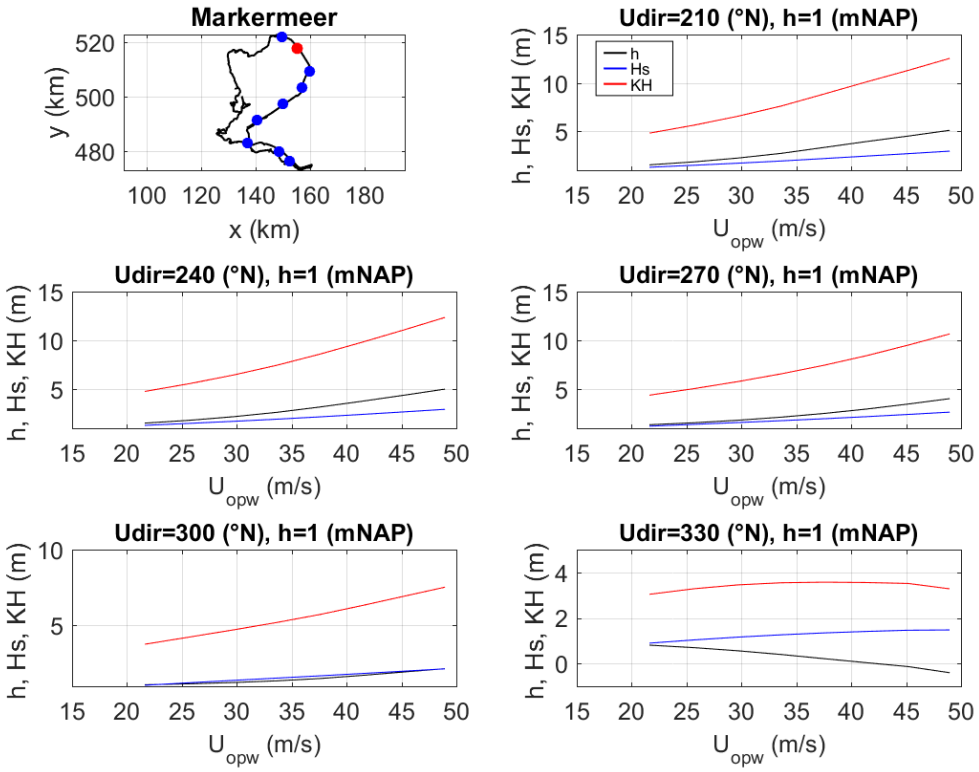
6.4 Markermeer

Voor het Markermeer is het BretPro model toegepast voor de windrichtingen 210°, 240°, 270°, 300° en 330°, windsnelheden van 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44 en 48 m/s, en meerpeilen van NAP +0, +0.5, +1.0, +1.5 en +2 m. Vervolgens is een impact analyse uitgevoerd op een aantal uitvoerlocaties langs de randen van het Markermeer. In deze paragraaf wordt een selectie getoond van rekenresultaten voor een beperkt aantal uitvoerlocaties en waterstanden. Alle figuren zijn ook digitaal beschikbaar.

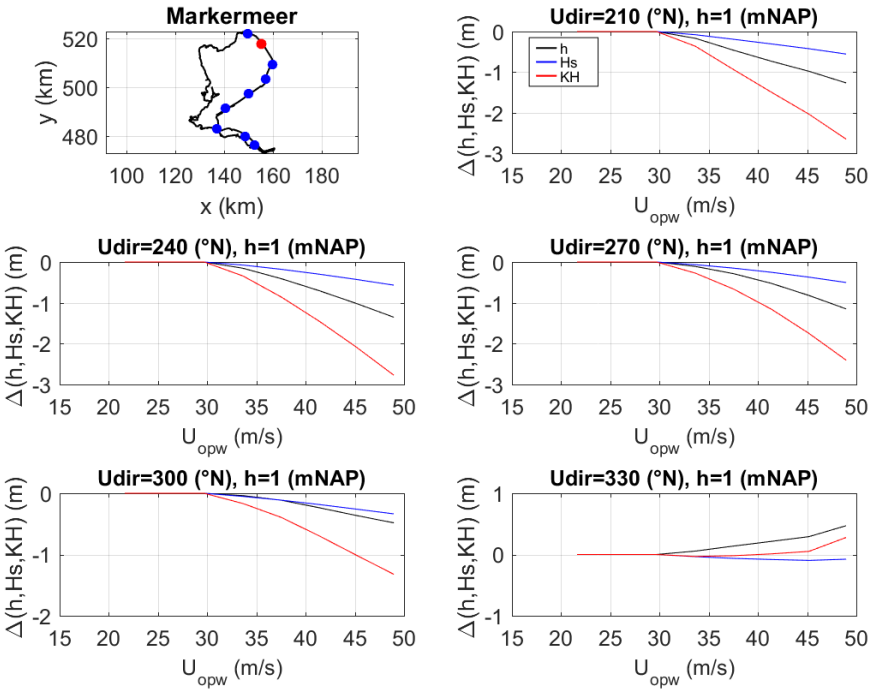
Figuur 19 geeft de variatie van de golfparameters als functie van de open-water windsnelheid U_{opw} en windrichting voor een waterstand van NAP +1 m bij locatie 2 nabij Enkhuizen. De impact op deze golfparameters is gegeven in figuur 20. De figuren 21 en 22 geven deze informatie voor een locatie bij de Oostvaardersdijk.

Uit deze resultaten blijkt dat de noordelijke locatie in het Markermeer nabij Enkhuizen alleen baat hebben bij een andere dragformuleringen voor sterke zuidwestelijke winden. Voor de in het algemeen sterkere noordwestelijk windrichtingen is er geen winst te halen omdat er dan afwaaiing optreedt. Bij de Oostvaardersdijk kunnen voor alle westelijke winden reducties in benodigde kruinhoogte bereikt worden.

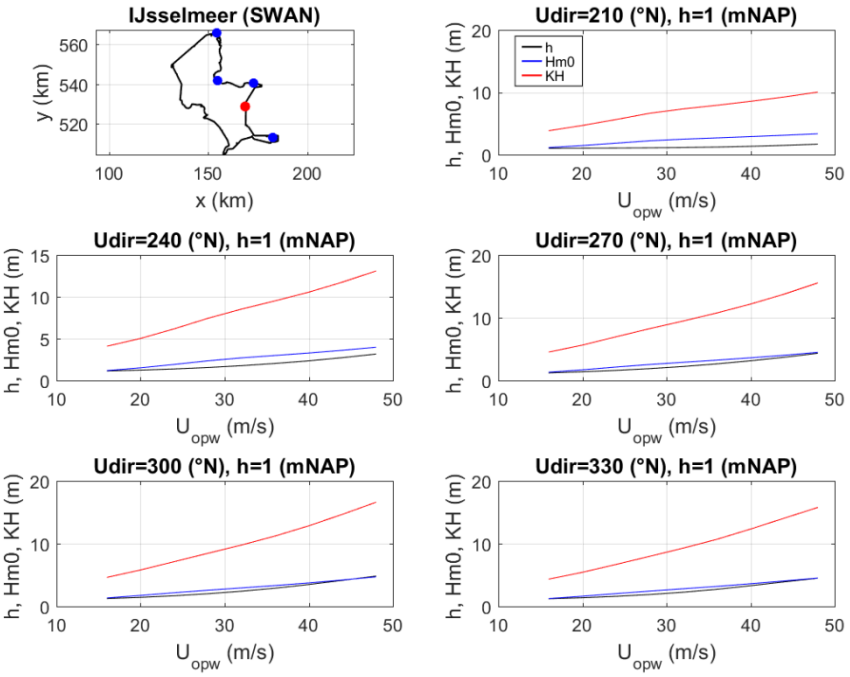
Omdat het BretPro model inherente beperkingen heeft om waterstanden te berekenen voor aftakkingen, zijn er geen betrouwbare resultaten beschikbaar voor de randmeren. Desondanks wordt voor deze locaties een vergelijkbare reductie in waterstand, golfcondities en kruinhoogten verwacht als bij Muiderberg.



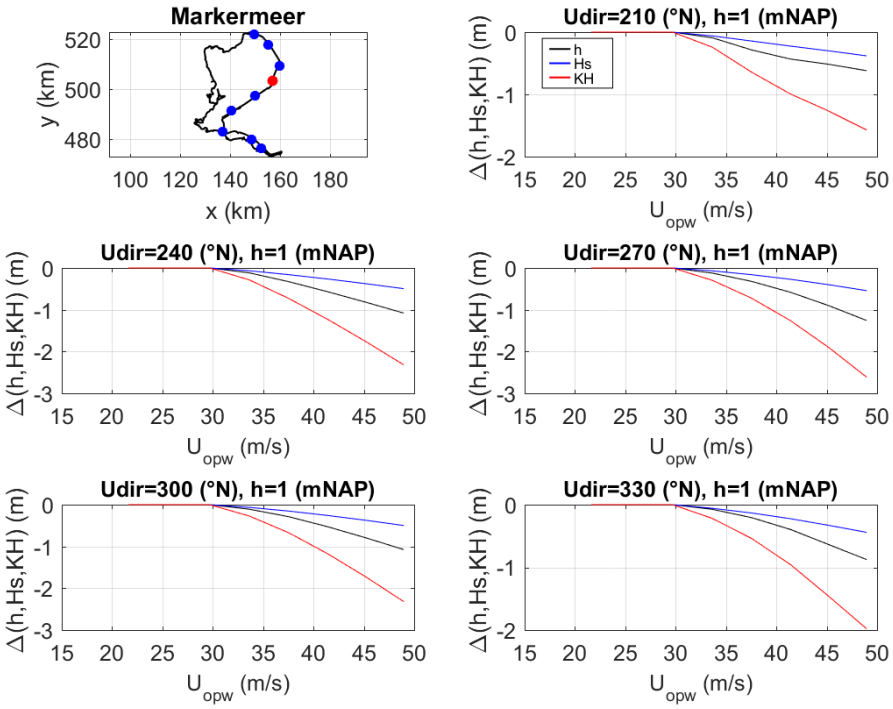
Figuur 19: Situatieschets uitvoerpunten Markermeer (paneel linksboven). Variatie waterstand h (zwarte lijnen) en significante golfhoogte H_s (blauwe lijnen) en hypothetische kruinhoogte KH bij locatie 2 in het Markermeer als functie van open-water windsnelheid U_{opw} en windrichting door toepassing nieuwe winddragformulering.



Figuur 20: Situatieschets Markermeer met uitvoerlocaties (paneel linksboven). Effect andere dragformulering op waterstand h (zwarte lijnen), significante golfhoogte Hs (blauwe lijnen) en hypothetische kruinhoogte KH (rode lijnen) als functie van open-water windsnelheid U_{opw} en windrichting. Locatie 2 in Markermeer door toepassing nieuwe dragformulering.



Figuur 21: Situatieschets uitvoerpunten Markermeer (paneel linksboven). Variatie waterstand h (zwarte lijnen) en significante golfhoogte H_s (blauwe lijnen) en hypothetische kruinhoogte KH bij locatie 7 in het Markermeer als functie van open-water windsnelheid U_{opw} en windrichting door toepassing nieuwe winddragformulering.



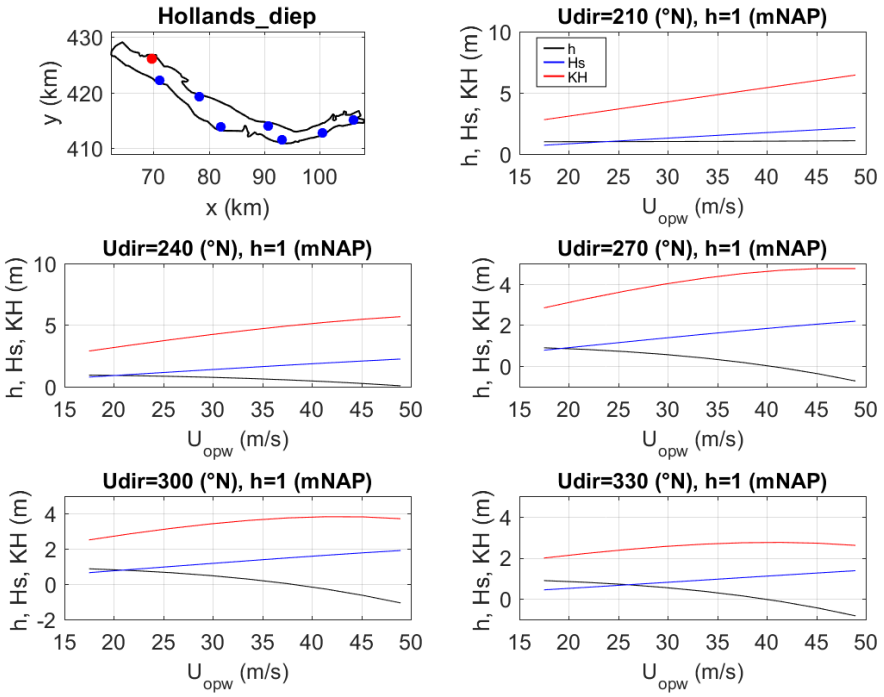
Figuur 22: Situatieschets Markermeer met uitvoerlocaties (paneel linksboven). Effect andere dragformulering op waterstand h (zwarte lijnen), significante golfhoogte H_s (blauwe lijnen) en hypothetische kruinhoogte KH (rode lijnen) als functie van open-water windsnelheid U_{opw} en windrichting. Locatie 7 in Markermeer.

6.5 Hollands Diep en Haringvliet

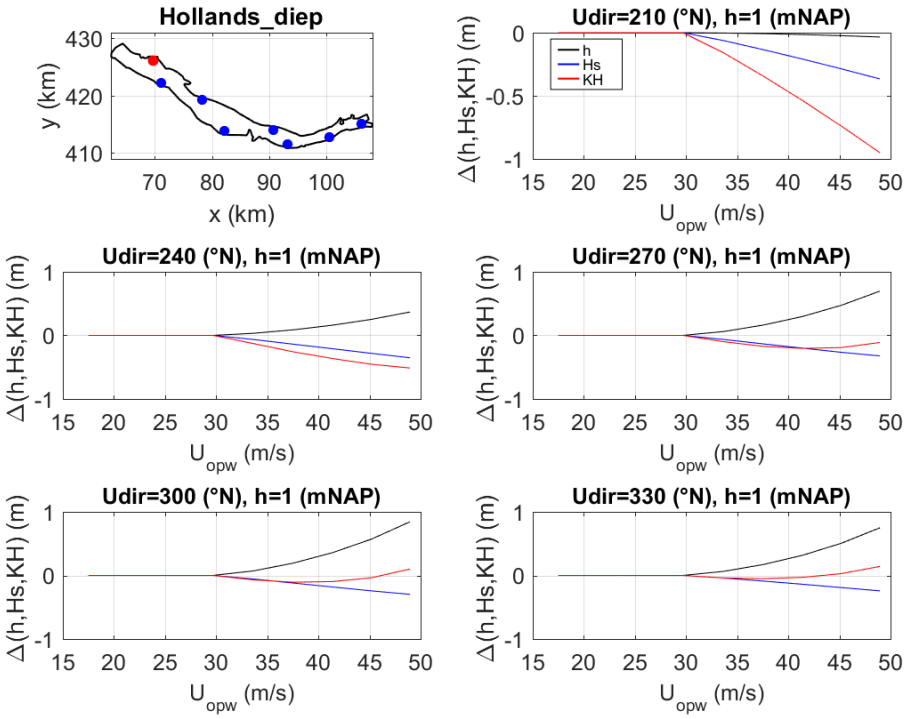
Voor het Hollands Diep en Haringvliet is het BretPro model toegepast voor de windrichtingen 210°, 240°, 270°, 300° en 330°, windsnelheden van 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44 en 48 m/s, en meerpeilen van NAP +0, +0.5, +1.0, +1.5 en +2 m. Vervolgens is een impactanalyse uitgevoerd op een aantal uitvoerlocaties langs de randen van het Holland Diep en Haringvliet. In deze paragraaf wordt een selectie getoond van rekenresultaten voor een beperkt aantal uitvoerlocaties en waterstanden. Alle figuren zijn ook digitaal beschikbaar.

Omdat er voor dit watersysteem geen kustlijnenbestand (*.bln) beschikbaar was, is een bestand gemaakt op basis van het handmatig aanmaken van een kustlijn in Google Earth en deze vervolgens te transformeren naar een kustlijn in RD-coördinaten.

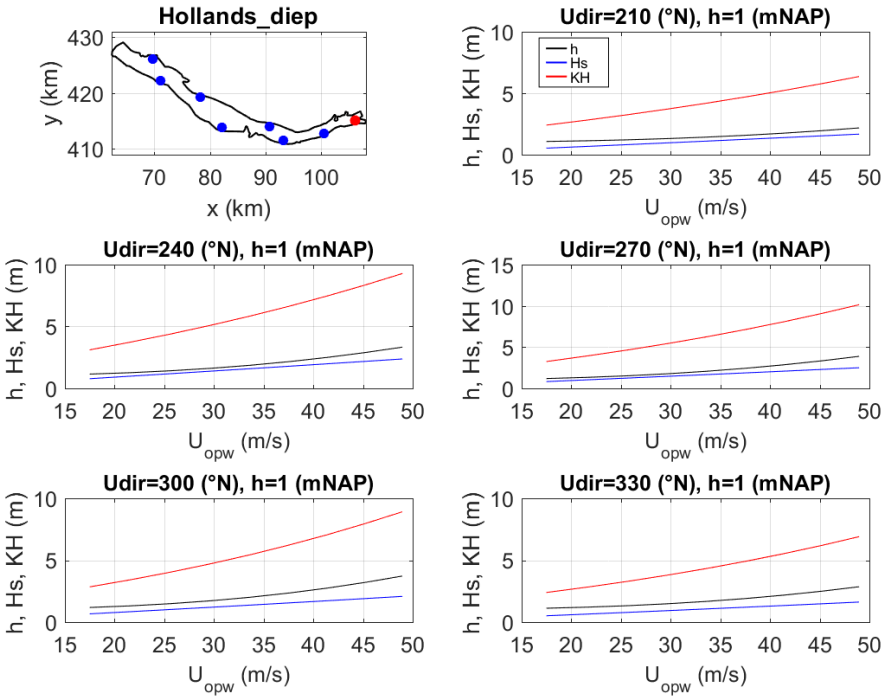
Figuur 23 geeft de variatie van de golfparameters als functie van de open-water windsnelheid U_{opw} en windrichting voor een waterstand van NAP + 1 m bij locatie 1 nabij de Haringvlietsluizen. De impact op deze golfparameters is gegeven in figuur 24. De figuren 25 en 26 geven deze informatie voor een locatie aan de oostzijde van het Hollands Diep nabij de Biesbosch.



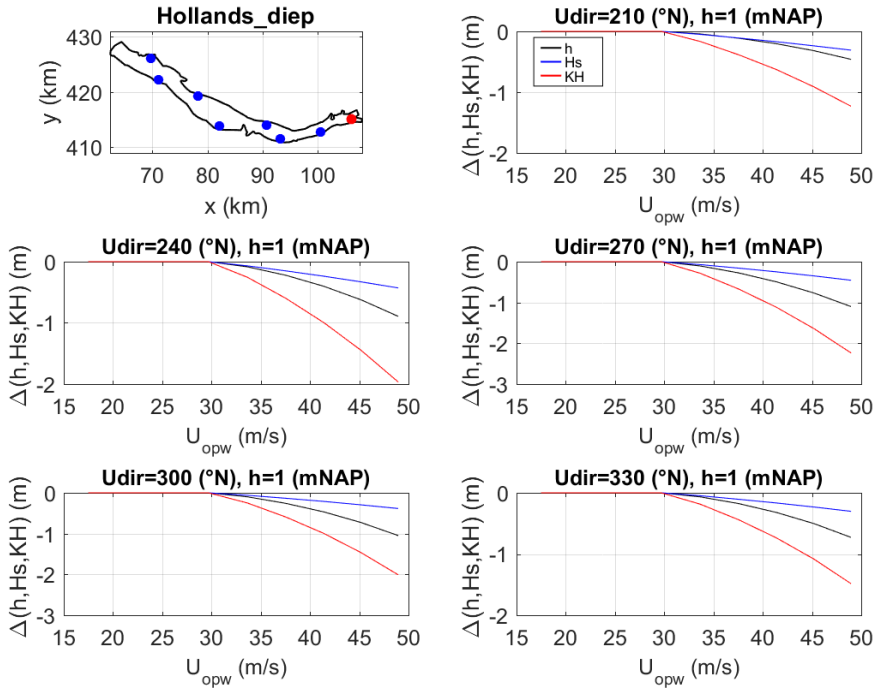
Figuur 23: Situatieschets uitvoerpunten Hollands Diep en Haringvliet (paneel linksboven). Variatie waterstand h (zwarte lijnen) en significante golfhoogte H_s (blauwe lijnen) en hypothetische kruinhoogte KH bij locatie 1 in het Haringvliet als functie van open-water windsnelheid U_{opw} en windrichting.



Figuur 24: Situatieschets Hollands Diep en Haringvliet met uitvoerlocaties (paneel linksboven). Effect andere dragformulering op waterstand h (zwarte lijnen), significante golfhoogte H_s (blauwe lijnen) en hypothetische kruinhoogte KH (rode lijnen) als functie van open-water windsnelheid U_{opw} en windrichting bij toepassing van nieuwe winddragformulering. Locatie 1 in het Haringvliet.



Figuur 25: Situatieschets uitvoerpunten Hollands Diep en Haringvliet (paneel linksboven). Variatie waterstand h (zwarte lijnen) en significante golfhoogte H_s (blauwe lijnen) en hypothetische kruinhoogte KH bij locatie 4 in het Hollands Diep als functie van open-water windsnelheid U_{opw} en windrichting.



Figuur 26: Situatieschets Hollands Diep en Haringvliet met uitvoerlocaties (paneel linksboven). Effect andere dragformulering op waterstand h (zwarte lijnen), significante golfhoogte Hs (blauwe lijnen) en hypothetische kruinhoogte KH (rode lijnen) als functie van open-water windsnelheid U_{opw} en windrichting. Locatie 4 in het Hollands Diep.

De resultaten voor het Hollands Diep en Haringvliet laten een sterke afhankelijkheid zien in windrichting en locatie. De grootste effecten op benodigde hypothetische kruinhoogte zijn vooral te vinden in het oostelijk deel van dit watersysteem omdat dan (noord- en zuid-)westelijke winden tot opwaaiing kunnen leiden.

6.6 Noordzee

Voor de Noordzee is gebruik gemaakt van een SWAN 1d model om het effect van een andere dragformulering op de significante golfhoogte en hypothetische kruinhoogte te bepalen. Hiervoor is een schematisch bodemprofiel aangenomen met een lengte van 250 km. Op open zee is de waterdiepte 30 m, nabij de kust loopt de bodem langzaam op, om bij de kustlijn op 0 m uit te komen. Dit profiel wordt getoond in de bovenste panelen van figuur 27, waarbij het rechterpaneel het verloop in de laatste 10 km toont.

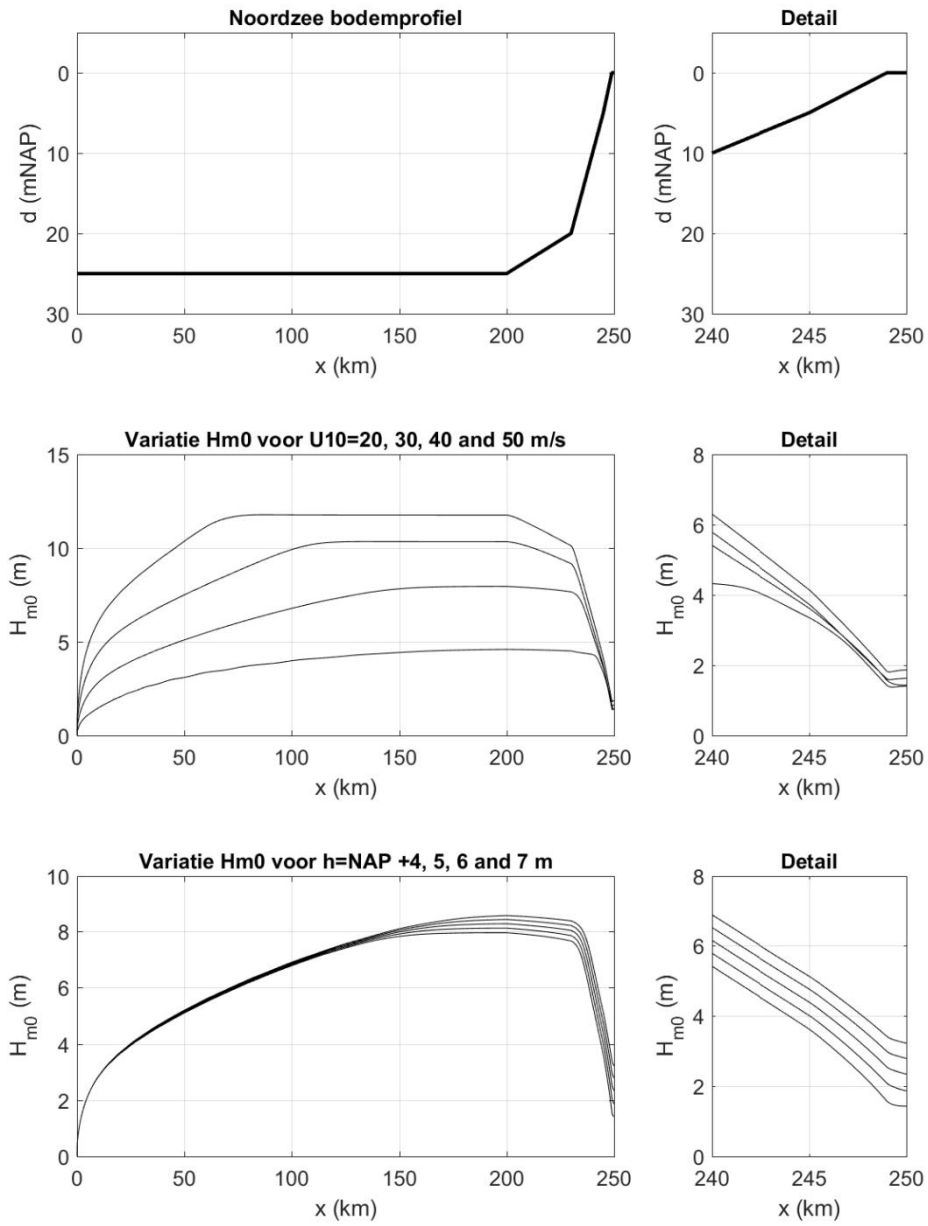
Het SWAN 40.81 model is gedraaid met de WTI instellingen voor de fysische processen. Hiervoor zijn de volgende commando's opgenomen in de SWAN invoerbestanden.

```
GEN3 WESTH
WCAP WESTH cds2=5.0e-05 br=0.00175 p0=4.0 powst=0.0 powk=0.0 &
  nldisp=0.0 cds3=0.8 powfsh=1.0
BREA WESTH alpha=0.96 pown=2.5 bref=-1.39630 shfac=500.0
```

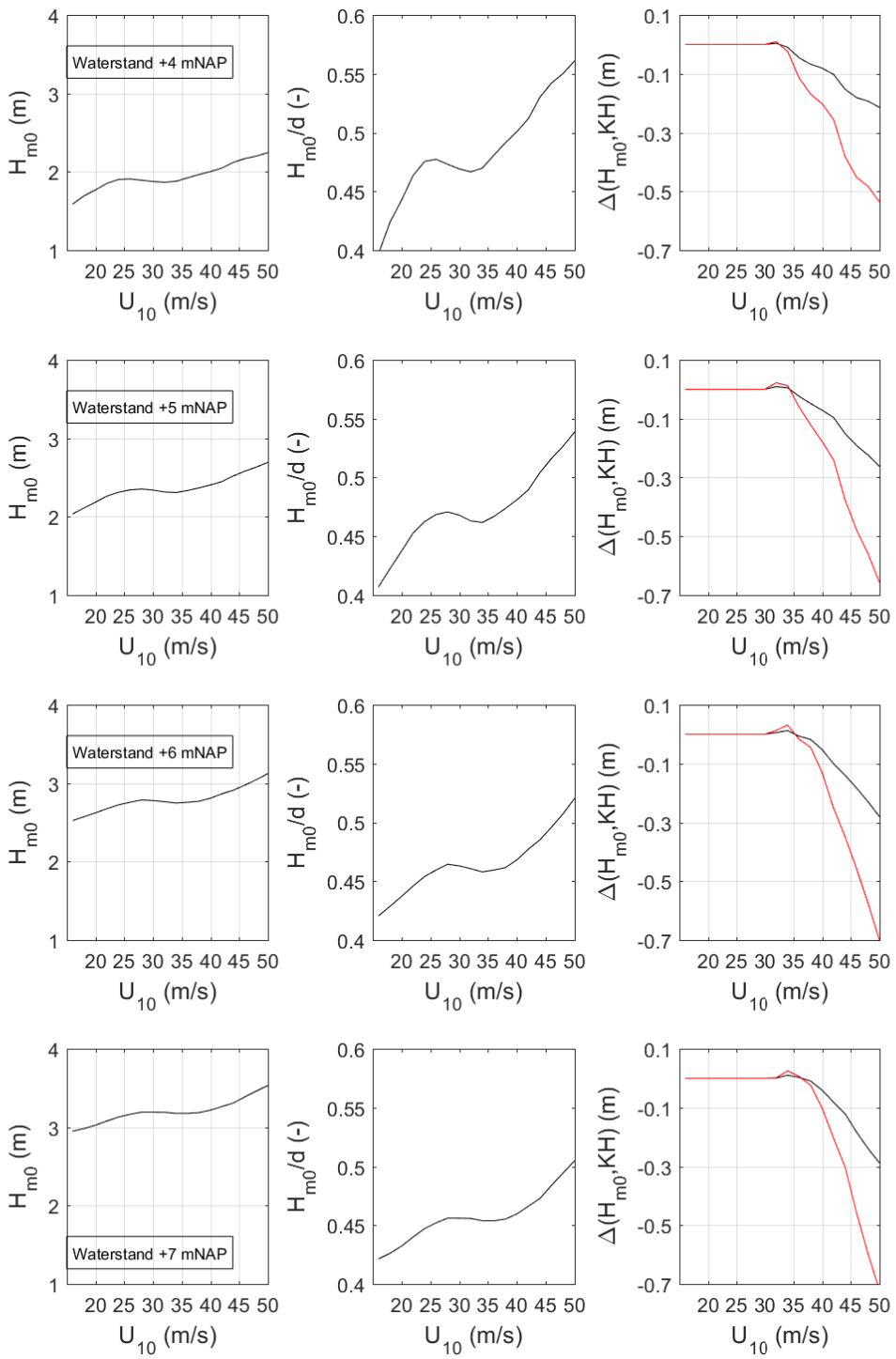
SWAN 1d berekeningen zijn uitgevoerd voor de windsnelheden 16, 18,.., 48, en 50 m/s, en de waterstanden NAP +1, 2, .., 6 en 7 m. In de berekeningen is geen golfrandvoorwaarde opgelegd om golfgroei vanaf de Engelse kust te simuleren. (Opgemerkt wordt dat berekeningen waarin wel een constante golfrandvoorwaarde van H_{m0}=5 m en T_p=10 s was opgelegd bij de Engelse kust dezelfde resultaten gaf). De subscript m0 in H_{m0} geeft aan dat de significante golfhoogte op basis van het spectrum is bepaald.

Ter illustratie tonen de middelste panelen de ruimtelijke variatie van de significante golfhoogte H_{m0} als functie van windsnelheid en een waterstand van NAP +3 m. Hieruit blijkt dat de significante golfhoogte H_{m0} op open zee groter is bij hogere windsnelheden, terwijl deze bij de kustlijn allemaal op nagenoeg de zelfde waarde uitkomen als gevolg van diepte-beperkende effecten. De onderste panelen tonen het verloop van de significante golfhoogte voor verschillende waterstanden en een windsnelheid van 30 m/s. Uit deze figuur blijkt dat op open zee de significante golfhoogte H_{m0} enigszins toeneemt bij hogere waterstanden. Nabij de kustlijn is het effect van de waterstand duidelijk merkbaar op de significante golfhoogte.

De impact van het toepassen van de afgekapte Wu formulering op de significante golfhoogte en hypothetische kruinhoogte wordt getoond in figuur 28. De linker panelen in deze figuur geven het verloop van de significante golfhoogte H_{m0} als functie van windsnelheid U_{10} voor de waterstanden NAP +4, +5, +6 en +7 m. Hieruit blijkt dat de golfhoogte licht toeneemt bij toenemende windsnelheid en sterk toeneemt bij toenemende waterstand. De middelste panelen geven aan dat de golven in alle gevallen diepte-beperkt zijn. De rechterpanelen geven aan dat de reductie in hypothetische kruinhoogte kan oplopen tot ruim 0.5 m bij windsnelheden van 50 m/s. Deze impact is een direct gevolg van de lagere significante golfhoogte H_{m0}, ondanks het feit dat de golven sterk door diepteeffecten beïnvloed worden.



Figuur 27: Bodemprofiel van Noordzee raai (bovenste panelen). Variatie significante golfhoogte H_{m0} als functie van windsnelheid U_{10} bij een constante waterstand van NAP +3 m (middelste panelen). Variatie van significante golfhoogte H_{m0} als functie van waterstand bij een windsnelheid van 30 m/s (onderste panelen). De rechte panelen tonen een detail van het verloop van de parameters getoond in de linkerpanelen.



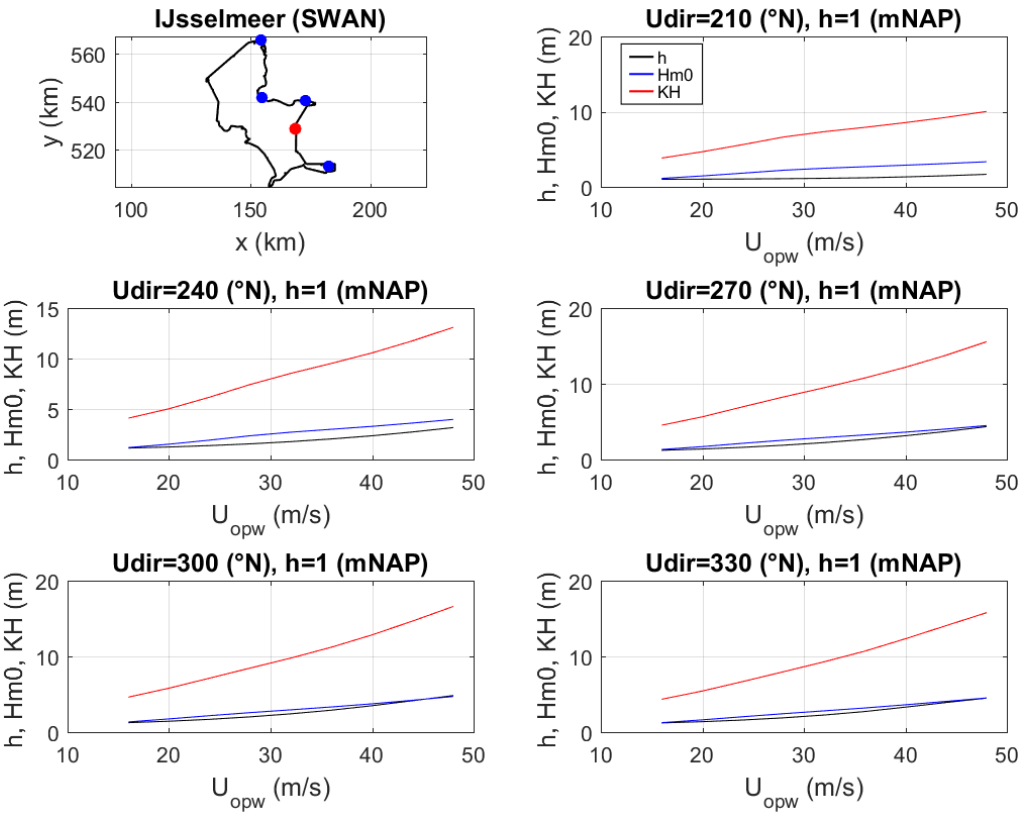
Figuur 28: Variatie van significante golfhoogte H_{m0} (linker panelen), golfhoogte over diepte verhouding H_{m0}/d (middelste panelen) en in de rechterpanelen de reductie in significante golfhoogte ΔH_{m0} (zwarte lijnen) en hypothetische kruinhoogte ΔKH (rode lijnen).

6.7 Verificatie met SWAN

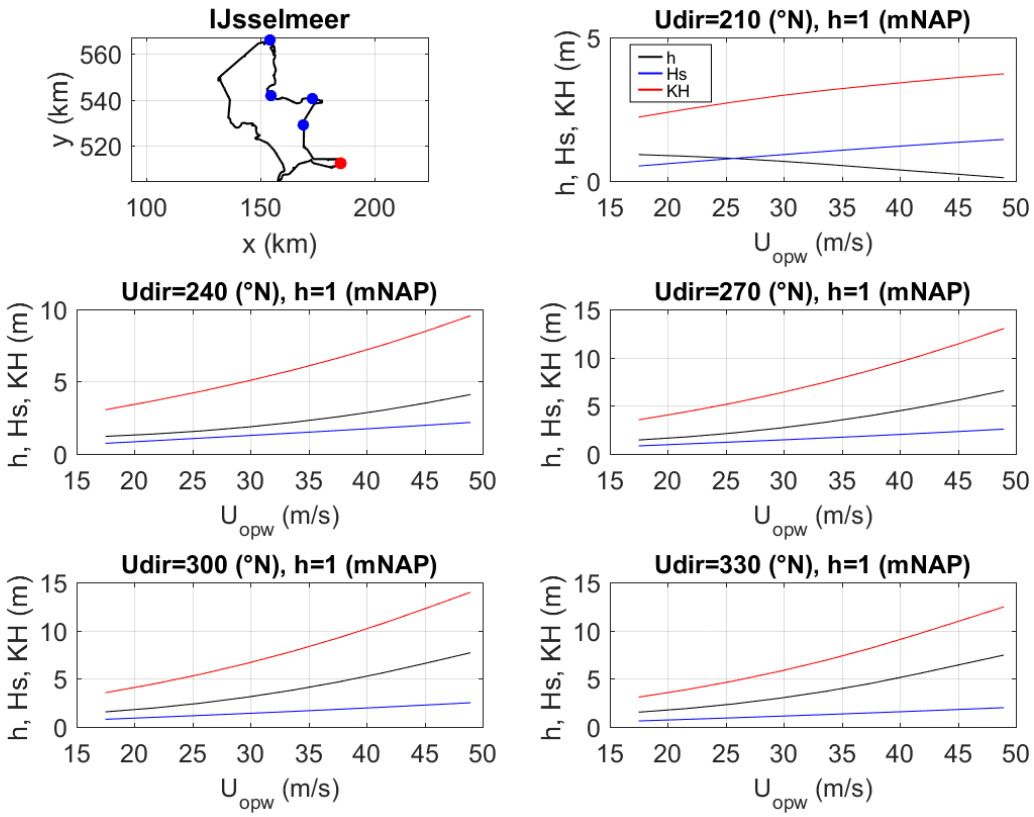
De berekeningen voor het IJsselmeer, Ketelmeer, Markermeer, Hollands Diep en Haringvliet zijn uitgevoerd met het BretPro model voor waterstanden en golfcondities. Ten aanzien van de bepaling van de opwaaiing is de verwachting dat het BretPro een redelijke schatting geeft van de waterstandsvariatie zolang het waterbekken geen grillige vormen heeft. Om die reden zijn er in dit memo geen rekenresultaten gegeven van de randmeren. Ten aanzien van de golven is gebruik gemaakt van het Bretschneider ondiep water model in combinatie met de effectieve strijklengtemethode en het gebruik van een constante waterdiepte. Deze aannames maken de BretPro resultaten tot een eerste orde benadering van de impact van de aangepaste winddragformulering op de hydraulische randvoorwaarden.

Om een idee van nauwkeurigheid van deze resultaten te krijgen, is voor het IJsselmeer een verificatieslag gemaakt met het WTI SWAN 40.81 model voor het IJsselmeer en Ketelmeer. De invoer van dit model bestond uit de open-water windsnelheid U_{opw} en de waterstand zoals berekend met het BretPro model.

Figuur 29 toont de variatie van golfparameters voor locatie 4 langs de dijk van de Noordoostpolder voor een waterstand van NAP + 1 m. De resultaten van deze controleberekening dienen vergeleken te worden met de resultaten van de BretPro berekening zoals getoond in figuur 15. Figuur 30 toont de SWAN resultaten voor locatie 5 in het oostelijk deel van het Ketelmeer. De resultaten van deze controleberekening dienen vergeleken te worden met de resultaten van de overeenkomstige BretPro berekening zoals getoond in figuur 17. Een vergelijking van de resultaten toont overeenkomstige trends aan in golfhoogte en hypothetische kruinhoogte. Opmerkelijk is dat de SWAN resultaten iets hoger uitvallen dan de resultaten van BretPro. Hieruit kan voorzichtig worden geconcludeerd dat de BretPro berekeningen de impact (reductie van kruinhoogte) van de nieuwe winddragformulering onderschatten.



Figuur 29: Situatieschets uitvoerpunten IJsselmeer (paneel linksboven). Variatie waterstand h (zwarte lijnen) en significante golfhoogte H_{m0} (blauwe lijnen) en hypothetische kruinhoogte KH bij locatie 4 nabij Rotterdamse Hoek als functie van open-water windsnelheid U_{opw} en windrichting. Berekend met het WTI SWAN 40.81 model voor het IJsselmeer en Ketelmeer.



Figuur 30: Situatieschets uitvoerpunten IJsselmeer (paneel linksboven). Variatie waterstand h (zwarte lijnen) en significante golfhoogte H_{m0} (blauwe lijnen) en hypothetische kruinhoogte KH bij locatie 5 in het oostelijk deel van het Ketelmeer als functie van open-water windsnelheid U_{opw} en windrichting. Berekend met het WTI SWAN 40.81 model voor het IJsselmeer en Ketelmeer.

6.8 Impact voor ontwerpomstandigheden

De bovenstaande resultaten geven een beeld van de potentiële impact van het vervangen van de Wu (1982) dragformulering met die van de afgekapte Wu formulering bij 30 m/s voor 4 watersystemen (IJsselmeer+Ketelmeer, Markermeer, Hollands Diep en Haringvliet, en de Noordzee Kust).

Om een eerste inschatting te krijgen van de impact dienen bovenstaande resultaten gecombineerd te worden met de statistiek van wind en waterstanden, en met faalmechanismen van de betreffende waterkeringen. Voor het IJsselmeer, Ketelmeer, Markermeer en Randmeren is gebruik gemaakt van illustratiepunten uit de Hydra-Zoet database, gebaseerd op de ontwerpfrequentie inclusief de doorsnedeeis (P_{eis}=0.24xP_{norm}/N, met N=2). Deze gegevens zijn toegeleverd door Matthijs Duits van HKV Lijn in Water.

De hieruit verkregen gegevens zijn vervolgens gecombineerd met de resultaten van de BretPro berekeningen voor het IJsselmeer met Ketelmeer en Markermeer. Voor het Haringvliet en Hollands Diep blijken de windsnelheden allemaal lager te zijn dan 30 m/s. Om die reden is er geen reductie te verwachten. De resultaten zijn opgenomen in tabel 1, de laatste kolom bevat de mogelijke verlaging van HBN.

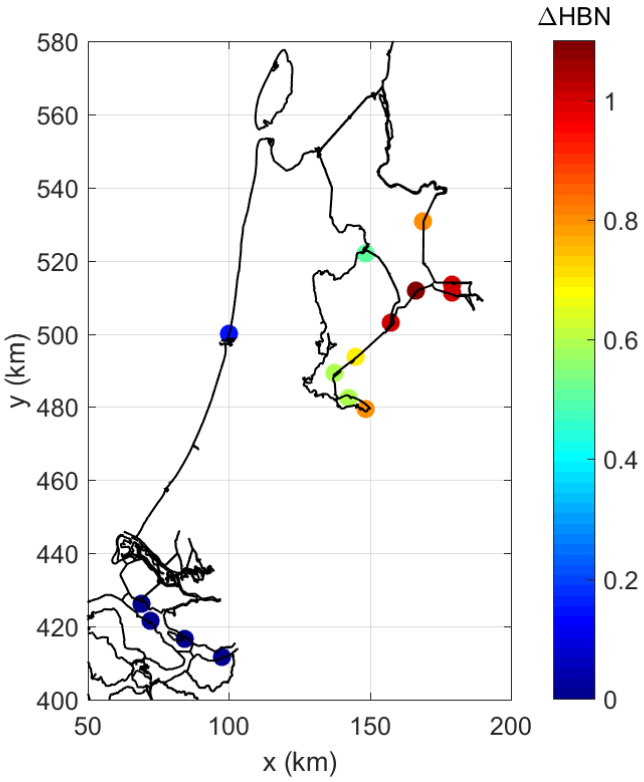
Watersysteem	Locatie	Ontwerp frequentie (1/jaar)	Windsnelheid U_{10} (m/s)	Windrichting (°N)	ΔHBN (m)
IJsselmeer	Rotterdamse Hoek	1/25,000	37.4	W	0.8
IJsselmeer	Maxima centrale	1/250,000	38.3	NW	1.1
Ketelmeer	Zuidoever NOP	1/25,000	38.6	W	1.0
	Ketelhaven	1/250,000	38.5	NW	1.0
Markermeer	Lelystadhaven	1/250,000	41.1	W	1.0
	Oostvaardersplassen	1/250,000	38.1	NW	0.7
	Almere Poort	1/250,000	38.4	NW	0.6
	Enkhuizen	1/25,000	35.1	ZW	0.5
Gooimeer	Almere haven	1/250,000	38.4	NW	0.6
Eemmeer	Flevodijk Nijkerk	1/250,000	38.0	NW	0.8
Haringvliet	Hellevoetsluis	1/8,333	27.0	W	0
	Middelharnis	1/8,333	25.2	NW	0
Hollands Diep	Moerdijk	1/8,333	23.0	WNW	0
	Numansdorp	1/8,333	24.8	NW	0

Tabel 1: Hydraulische randvoorwaarden bij Hydra-Zoet illustratiepunten in het IJsselmeergebied op basis van 1/10,000 jaar norm en eerste schatting van de mogelijke verlaging van benodigde kruinhoogte (bron: M. Duits, HKV, 2015).

Voor de Noordzee wordt hierbij uitgegaan van de richtingsafhankelijk statistiek van windsnelheden (bron Deltares, 2010b). Voor een windrichting van 270° bedraagt de 1/10,000 jaar windsnelheid 36.9 m/s en de bijbehorende waterstand NAP +3.89 m. Op basis van de resultaten in figuur 28 bedraagt de mogelijk reductie in kruinhoogte orde 0.15 m. Deze relatief kleine waarde is een direct gevolg van diepte beperkt breken aan de kust. Opschaling naar extremere omstandigheden wordt niet aanbevolen vanwege diverse onzekerheden in extreme windstatistiek en het effect daarvan op de waterstanden.

.

Het resultaat van bovenstaande beschouwingen is samengevat in figuur 31. Het algemene beeld is dat met name aan de oostzijde van het IJsselmeer, Ketelmeer, Markermeer en Randmeren er significante reducties in kruinhoogten mogelijk zijn.



Figuur 31: Potentiële reductie in kruinhoogte door toepassing van de aangepaste Wu dragformulering.

Opgemerkt wordt dat voor elke watersysteem er locaties zijn die voor andere windrichtingen gevoelig zijn voor de keuze van een aangepaste dragformulering. Een verdere verfijning bestaat uit het opzetten van een tabel waarbij per uitvoerlocatie de maatgevende waterstand, windsnelheid en windrichting wordt geschat op basis van de bestaande rekenmethoden. Vervolgens kan vrij eenvoudig een verdere invulling worden gegeven.

7 Discussie

Het opstellen van het huidige memo is ingegeven door recente inzichten in winddragformuleringen die suggeren dat de winddragcoëfficiënt een maximum heeft bij een windsnelheid van ongeveer 30 m/s. Dit inzicht kan met name voor extreme windsnelheden leiden tot mildere hydraulische randvoorwaarden. Dit leidt potentiëel tot grote financiele besparingen.

Om op zeer korte termijn winst te halen, zijn een aantal pragmatische methodes uitgewerkt om te komen tot correcties van de waarden in de onderliggende databases met waterstanden en golfcondities, of tot aanpassingen in de windstatistiek waarmee de databases worden uitgelezen. Voor de bepaling van de open-water wind dient de ruwheidslengte z_0 te worden bepaald met de aangepaste dragformulering. Voor de bepaling van waterstands- en golfcondities is daarbij de pseudowind methode toepasbaar.

Bij het eventueel aanpassen van de databases of bij de uitlezing daarvan hoeven geen aanpassingen in afregeling of in onzekerheden gedaan te worden, omdat die alle bepaald zijn op basis van condities met windsnelheden lager dan 30 m/s. In de voorgestelde aanpak wordt aangenomen dat dezelfde (oude) dragrelatie is toegepast voor alle stappen in de keten voor het afleiden van de hydraulische randvoorwaarden. Hierdoor kunnen kleine inconsistenties ontstaan in de correctie.

Een mogelijke foutenbron kan ontstaan bij het uitlezen van de database bij een andere windsnelheid waarbij een interpolatie moet worden toegepast. Naar verwachting zijn deze fouten gering. Niet-verwaarloosbare fouten kunnen ontstaan voor situaties waarbij het HBN slechts beperkt en niet-eenduidig samenhangt met de wind, bijvoorbeeld als het HBN vooral wordt bepaald door deining die net wel of net niet om een scherpe kaap heen refracteert, en sterker refracteert naarmate het water ondieper wordt. Echter, de hieraan gerelateerde fouten wegen niet op tegen de 'winst' die gehaald kan worden door toepassing van een lagere winddragcoëfficiënt bij extreme windsnelheden.

Bij het toepassen van windcorrecties moet rekening gehouden worden met twee tegengestelde pseudowindeffecten. Enerzijds moet er een correctie plaatsvinden van de vertaling van potentiële wind naar open-water wind. Bij toepassing van de nieuwe dragformulering leidt dit tot een lichte verhoging van de open-water wind (zie o.a. De Waal, 2003). Anderzijds geeft correctie van de open-water wind bij toepassing van de nieuwe dragformerling een verlaging van de effectieve open-water windsnelheid. Beide effecten moet zorgvuldig in rekening gebracht worden. De benodigde formules staan hierboven uitgewerkt. Voor de praktische uitwerking van de correcties moet daarom ook worden vastgesteld of de database benaderd wordt met de potentiële wind snelheid of met de open-water windsnelheid.

Voor de Noordzee en Benedenrivieren komt de stormopzet niet uit een waterstandsmodel met een aanpasbare winddragformulering, maar rechtstreeks uit extreme waardenstatistiek toegepast op de basisstochast gemeten zeewaterstanden. Om deze reden heeft een correctie van de winddragformulering weinig effect op de benodigde kruinhoogte in deze gebieden. Het effect van een dragrelatie op extreme windstatistiek is niet eenvoudig te implementeren en vereist een nadere studie.

Veruit de belangrijkste keuze is welke dragformulering moet worden toegepast. Op basis van de literatuur en gesprekken met deskundigen van het KNMI blijkt dat er nog geen consensus is over het

gedrag van de dragcoëfficiënt bij extreem hoge windsnelheden. Een veilige keuze is om de Wu parameterisatie af te kappen bij een windsnelheid van 30 m/s.

Voor de lange termijn (WTI 2023) wordt aanbevolen om nieuwe ontwikkelingen ten aanzien van drag onder extreme omstandigheden te volgen. Er zijn veelbelovende ontwikkelingen om steeds nauwkeuriger windsnelheden tot en met 60 m/s te meten met behulp van scatterometer technieken, waarbij een link gelegd wordt tussen ruwheid van het zeeoppervlak en de windsnelheid. Een goede bron van informatie is de website van het International Ocean Vector Wind Science Team (IOVWST) https://coaps.fsu.edu/scatterometry/. Momenteel worden nieuwe remote-sensing technieken ontwikkeld die zowel kenmerken van het golfveld als van het windveld nauwkeurige meten. Analyse van deze metingen in combinatie met numerieke modellering kan leiden tot beter inzicht in het gedrag van de dragcoëfficiënt bij hoge windsnelheden. Dit zijn ontwikkelingen die mogelijk van belang zijn voor WTI 2023.

8 Conclusies

Op basis van de resultaten van bovenstaande analyse en verkregen informatie kunnen de volgende conclusies worden geformuleerd:

1. In de wetenschappelijke wereld is consensus dat de dragcoëfficiënt niet verder toeneemt bij windsnelheden boven de 30 m/s. Een 'capping' van de winddrag is een algemeen aanvaarde techniek.
2. Er is (nog) geen consensus over het gedrag van de winddrag voor windsnelheden hoger dan 30 m/s.
3. Het is mogelijk om op pragmatische wijze de database met waterstand en golfgegevens aan te passen met gebruik making van pseudowindsnelheden.
4. De simpelste methode om effecten van de nieuwe dragformulering te verdisconteren is door aanpassing van windstatistiek, eveneens met gebruik van pseudowindsnelheden.
5. De hierbij geintroduceerde fouten zijn verwaarloosbaar en wegen niet op tegen de 'winst' die gehaald kan worden door toepassing van de nieuwe dragformulering.
6. Omdat de correcties alleen effect hebben voor windsnelheden groter dan 30 m/s is het niet nodig om de onderliggende modellen te hercalibreren of om de betrouwbaarheid op nieuwe vast te stellen.
7. Reducties in kruinhoogten zijn mogelijk voor de primaire waterkeringen aan de oostzijde van het IJsselmeer, Ketelmeer, Markermeer en Randmeren.
8. Voor de Benedenrivieren (Haringvliet en Hollands Diep) zijn eventuele reducties verwaarloosbaar omdat de ontwerpwindsnelheid lager is dan 30 m/s.
9. Voor de Noordzeekust is reducties gering (orde 0.1 m) en omgeven met diverse onzekerheden in de windstatistiek.
10. Het effect van de nieuwe dragrelatie op de reductie in HBN kan in het IJsselmeer, Ketelmeer, Markermeer en Randmeren oplopen tot tegen de meter of meer.

9 Aanbevelingen

Op basis van de bevindingen zoals beschreven in dit memo worden de volgende aanbevelingen gedaan:

1. Onderzoek het gedrag van de drag bij extreem hoge windsnelheden en de effecten daarvan op golfgroei. Dit vereist samenwerking met instituten zoals KNMI, en NOAA/NCEP.
2. Bepaal de rol van golfleeftijd op de ruwheid van de golven bij extreem hoge windsnelheden en verwerk dat in winddrag parameterisaties.
3. Introduceer onderling consistente winddragformuleringen in de waterbewegings- en golfmodellen voor alle watersystemen.
4. Calibreer de waterbewegings- en golfmodellen met de nieuwe dragformuleren, en zo mogelijk ook met nieuwe ontwikkelingen in de fysica. Voor SWAN heeft dat o.a. betrekking op de nieuwe brontermen voor wind, whitecapping, triad and quadruplets en diepte-gelimiteerd golfbreken.
5. Onderzoek het effect van aangepaste winddragformuleringen op de extreme windstatistiek.

Dankzegging

Dit memo is tot stand gekomen met medewerking en bijdragen van Jacco Groeneweg (Deltares), Joost Beckers (Deltares), Hans de Waal (Deltares), Hans de Vries (KNMI), en Ad Stoffelen (KNMI), Marcel Bottema (RWS-WVL), Deon Slagter (RWS-WVL), Robert Vos (RWS-WVL) en Robert Slomp (RWS-WVL), Matthijs Duits (HKV Lijn in Water).

Literatuur

Babanin, A.V., and V.K. Makin, 2008: Effects of wind trend and gustiness on the sea drag: Lake George study. Journal of Geophys. Research, 113, C02015, doi:10.1029/2007JC004233.

Bertin, X., K. Li, A. Roland, and J-R. Bidlot, 2015: The contribution of short-waves in storm surges: Two case studies in the Bay of Biscay. Continental Shelf Research, 96, 1-15.

BretView, 2012: Programma voor de bepaling waterstanden en golfcondities. Versie 1.7.3, BretPro versie 0.0.0.

De Waal, J.P., 2003: Windmodellering voor bepaling waterstanden en golven. Een analyse van de bouwstenen. RIZA werkdocument 2003.118x.

Deltares, 2010a: SWAN Calibration and Validation for HBC2011, WTI- HR Zout. Rapport 1200103-020-HYE-0002, Auteur: C. Gautier.

Deltares, 2010b: Toets- en rekenpeilen Kust en Estuaria ten behoeve van de HR 2011, WTI – HR zout. Rapport 1201341-002, D. Dillingh en J. de Lima Rego.

Deltares, 2015: Basisstochasten WTI-2017. Statistiek en statistische onzekerheid. Rapport 1209433-012-HYE-0007 (concept).

Donelan, M.A., B.K. Haus, N. Reul, W.J. Plant, M. Stiassnie, H.C. Graber, O.B. Brown, and E.S. Saltzman, 2004: On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds. Geophys. Res. Letters, 41, L18306, doi:10.1029/2004GL019460.

Drennan, W.M., H.C. Graber, D. Hauser, and C. Quentin, 2003: On the wave age dependence of wind stress over pure wind sea. Journal of Geophys. Res., 108, C3, 8062, doi:10.1029/2000JC000715.

Frank, W.M., 1984: A composite analysis of the core of a mature hurricane. Mon. Weather Rev., 112, 2401-2420.

Holthuijsen, L.H., M.D. Powell, and J.D. Pietrzak, 2012: Wind and waves in extreme hurricanes. Journal of Geophys. Res., 117, C09003, doi:10.1029/2012JC007983.

Hwang, P.A., 2011: A Note on the Ocean Surface Roughness Spectrum. J of Atmospheric and Oceanic Techn., Vol. 28, 436-443.

Khandekar, M.L., R. Lalbeharry, and V.J, Cardone, 1993: The performance of the Canadaian Spectral Ocean Wave Model (CSOWM) during the Grand Banks ERS-1 SAR wave spectra validation Experiment. Atmosphere-Ocean, 32, 31-60.

Kudryavtsev, V.N., and V.K. Makin, 2007: Aerodynamic roughness of the sea surface at high wind speed. Boundary-Layer Meteorol., 125, 289-303.

Powell, M.D., Vickery, P.J., and Reinhold, T.A., 2003: Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones. Nature 422, 279–283.

Wu, J., 1982: Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane. Journal of Geophysical Research, 87 (C12), 9704–9706.

Yokota, M., N. Hashimoto, K. Kawaguchi, en H. Kawai, 2010. Development of an inverse estimation method of sea surface drag coefficient under strong wind conditions. Proc. 32nd Int. Conf. Coastal Eng. ASCE. Paper 32. 10 pp.

Zweers, N. C., V. K. Makin, J. W. De Vries, en G. Burgers, 2010: A sea drag relation for hurricane wind speeds, Geophys. Res. Lett., 37, L21811, doi:10.1029/2010GL045002.

Zweers, N.C., V.K. Makin, J.W. de Vries, and G. Burgers, 2012: On the influence of changes in the drag relation on surface wind speeds and storm surge forecasts. Natural Hazards, 62 (2), 207--219, doi:10.1007/s11069-011-9989-z.

Zweers, N.C., V.K. Makin, J.W. de Vries, en V. N. Kudryavtsev, 2015: The impact of spray-mediated enhanced enthalpy and reduced drag coefficients in the modelling of tropical cyclones. Boundary-Layer Meteorology, 155 (3), 501--514, doi:10.1007/s10546-014-9996-1.

Zijlema, M., G.Ph. van Vledder, and L.H. Holthuijsen, 2012: Bottom friction and wind drag for wave models, Coastal Engineering, 65, 19-26.