

NAUWKEURIGHEID VAN FORMULES VOOR WINDOPZET AAN DE HAND VAN MEETGEGEVENS VAN HET IJSSELMEER

CTB3000 – BACHELOR EINDPROJECT



Voorwoord

Dit rapport van mijn onderzoek naar de nauwkeurigheid van formules van windopzet, a.d.h.v. meetgegevens op en rond het IJsselmeer, is onderdeel van mijn bachelor eindproject, voor de afronding van de bachelor fase civiele techniek aan de TU Delft. Voor de totstandkoming van dit rapport zou ik hierbij graag ir. H.J. Verhagen en ing. M.Z. Voorendt, mijn begeleiders, willen bedanken voor hun hulp.

Ik wens u veel plezier bij het lezen van dit rapport.

Christiaan Feij,
Delft, 10 april 2015

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	1
Inhoudsopgave.....	2
Abstract	4
Inleiding en leeswijzer	5
1 Model voor windopzet	6
1.1 Windschuifspanning op het wateroppervlak	6
1.2 Formule voor windopzet.....	6
2 Meetgegevens	8
2.1 Inleiding	8
2.2 Windmetingen	8
2.3 Waterstandmetingen	8
2.4 Matchen van wind- en waterstandsmetingen.....	8
2.5 Onderzochte gebieden.....	10
3 Onderzoeksresultaten	11
3.1 Gebruikte waarden.....	11
3.2 Eerste conclusies onderzoeksgebied I	11
3.3 Opwaaiing voorspellen met U_w^3	12
3.4 Verklaring voor het gebruik van U_w^3 en invloed van de temperatuur.....	13
3.5 Resultaten deelgebieden II en III	14
4 Vergelijking van de deelgebieden en parameteranalyse	15
4.1 Vergelijking van de deelgebieden	15
4.2 Gevoeligheid van de waterdiepte h	15
4.3 Gevoeligheid van de strijklengte F en invloed van de windrichting	16
4.4 Invloed windsnelheid.....	17
4.5 Conclusie.....	17
5 Standaardafwijking	18
5.1 Inleiding	18
5.2 Standaardafwijking van κ / K	18
5.3 Standaardafwijking van de voorspelde windopzet	19
5.4 Dimensiloze windopzet	21
5.5 Conclusie voor de standaardafwijking van de voorspelde opzet	22
6 Conclusies en aanbevelingen	23
6.1 Formule met U_w^3	23
6.2 Formule met U_w^3	23
6.3 Vergelijking tussen de beide formules	23
6.4 Ontwerpformule.....	24
Literatuurlijst.....	25

Bijlage A: Meetstations voor wind en waterstanden	26
Bijlage B: Windsnelheid januari 2005 IJsselmeerstations	27
Bijlage C: Windsnelheid januari 2005 Vlieland, Stavoren en Lelystad	28
Bijlage D: Middelen van de waterstand.....	29
Bijlage E: Metingen windopzet deelgebied I, U_w^2	30
Bijlage F: Metingen windopzet deelgebied I, U_w^3	31
Bijlage G: Metingen windopzet deelgebieden II en III, U_w^3	32
Bijlage H: Berekeningen standaardafwijking voor U_w^3 (deelgebied I).....	33
Bijlage I: Berekeningen standaardafwijking voor U_w^2 (deelgebied I)	35
Bijlage J: Berekeningen standaardafwijking voor U_w^3 (deelgebied II).....	37

ABSTRACT

Voor meren is het gebruikelijk de windopzet te voorspellen met een formule die als parameters de strijklengte, de waterdiepte, de invalshoek van de wind en de windsnelheid in het kwadraat heeft. In deze formule zit een constante verwerkt die in de literatuur verschillende waarden heeft. In dit onderzoek wordt er gekeken naar de gemiddelde waarde en de standaardafwijking van deze constante a.d.h.v. meetgegevens rondom het IJsselmeer.

Hieruit zal blijken dat deze formule met de windsnelheid in het kwadraat een erg slechte benadering is om de windopzet te voorspellen. De berekeningen komen echter veel dichter bij de realiteit wanneer de windsnelheid niet tot de tweede, maar tot de derde macht genomen wordt. Een verklaring hiervoor is een evenredigheid tussen de wrijvingscoëfficiënt tussen lucht en water en de windsnelheid.

Voor het bepalen van de nauwkeurigheid van de formule wordt in eerste instantie gekeken naar een standaardafwijking van de constante in de formule. Met deze methode worden de resultaten voor grotere windopzetten echter erg onnauwkeurig. Een manier om dit op te lossen is door bij de voorspelde windopzet een constante op te tellen die een standaardafwijking heeft, en bij een waarde van nul de gemiddelde windopzet geeft. Deze standaardafwijking heeft een dimensie, en is afhankelijk van het beschouwde gebied.

Het uiteindelijke resultaat is een nauwkeurige ontwerpformule waarin een standaardafwijking zit, die echter niet constant is voor elk gebied.

INLEIDING EN LEESWIJZER

De waterstanden langs kusten en meren kunnen aanzienlijk verhoogd worden door opwaaiing. Dit is het verschijnsel waarbij het water opgestuwd wordt ten gevolge van de wrijving tussen het wateroppervlak en de wind. Deze waterstandsverhoging noemen we de windopzet. Om deze windopzet te voorspellen kan voor een gesloten meer de volgende formule gebruikt worden:

$$W = 0,5 \kappa \frac{U_w^2}{gh} F \cos(\phi)$$

Hierin is:

W	Windopzet (m)
κ	Constante
U_w	Windsnelheid, 10 meter boven het wateroppervlak (m/s)
h	Waterdiepte (m)
F	Strijklengte (m)
ϕ	Hoek van de kust t.o.v. de wind

De 'constante' κ is hierin een empirisch te bepalen waarde die geldt als een wrijvingscoëfficiënt tussen de wind en het wateroppervlak. In de literatuur worden verschillende waarden geadviseerd, echter is er geen goede informatie beschikbaar over de standaardafwijking van deze coëfficiënt. Het doel van dit onderzoek is om a.d.h.v. meetgegevens rondom het IJsselmeer de gemiddelde waarde en vooral de standaardafwijking van κ te bepalen.

In hoofdstuk 1 zal eerst kort beschreven welke modellering gebruikt gaat worden en welke vereenvoudigingen hierbij gemaakt zijn. Vervolgens wordt in hoofdstuk 2 een beschrijving gegeven van de meetgegevens, de verantwoording voor hoe de gegevens gebruikt zijn en de deelgebieden die onderzocht worden. In hoofdstuk 3 zijn dan de resultaten te vinden van het onderzoek voor elke deelgebieden en zal gekeken worden of een aanpassing van de formule tot een nauwkeuriger resultaat leidt. Hoofdstuk 4 geeft een analyse van de verschillende parameters die voorkomen in de formule en hun gevoeligheid wordt hierin besproken. De standaardafwijking van κ wordt bepaald in hoofdstuk 5 en hieruit worden verschillende conclusies getrokken, welke in hoofdstuk 6 nog eens kort zijn samengevat.

1 MODEL VOOR WINDOPZET

1.1 WINDSCHUIFSPANNING OP HET WATEROPPERVLAK

De drijvende kracht voor opwaaiing volgt uit een schuifspanning die de wind uitoefent op het wateroppervlak. Deze schuifspanning kan weergegeven worden met de volgende formule:

$$\tau_w = C U_w^2 \quad (1.1)$$

Hierbij is τ_w de schuifspanning en U_w de windsnelheid. De coëfficiënt C in deze formule is afhankelijk van verschillende factoren, o.a. de hoogte van de golven, de gelaagdheid van lucht en water en de dichtheid van de lucht. In de literatuur bestaan er verschillende vormen om deze coëfficiënt uit te drukken. Voor dit model zal in eerste instantie aangenomen worden dat deze C constant is.

1.2 FORMULE VOOR WINDOPZET

De opwaaiing die ontstaat heeft het karakter van een lange golf: de golflengte is erg groot t.o.v. de diepte. Hieruit kan de continuïteitsvergelijking opgesteld worden voor een controlevolume. Bij deze laatste vergelijking worden in deze analyse de advectieve versnellingen verwaarloosd. Dit geeft de volgende vergelijking (Saathof, 1976):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g A_c \frac{\partial h}{\partial s} + C_f \frac{|Q|Q}{A_c R} = C_w \frac{\tau_w \cos(\phi) A_c}{h \rho_{water}} \quad (1.2)$$

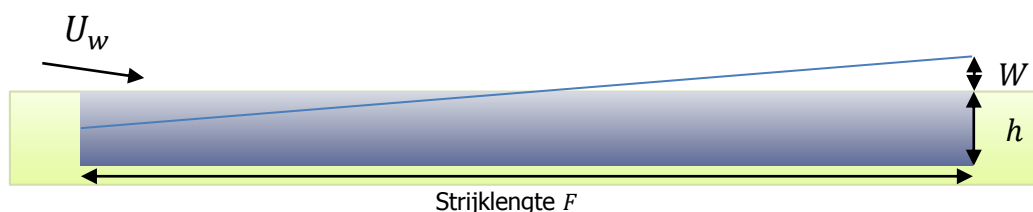
Voor de modellering wordt uitgegaan van een rechthoekig meer met een constante rechthoekige doorsnede. Er is geen instroom of uitstroom in het gebied. Verder wordt voor de opwaaiing de situatie als stationair beschouwd. Dit wil zeggen dat de windrichting en -snelheid over een lange duur constant zijn waardoor het water in een evenwichtssituatie terecht komt. In dit geval vallen de lokale versnellingsterm en de wrijvingsterm weg uit de vergelijking vanwege het stationaire karakter (ondanks een circulatiestroom die ontstaat in verticale richting).

Fysisch betekent dit dat de drijvende kracht van de wind evenwicht maakt met het effect van de zwaartekracht op het verhang van het water. Wat dan nog overblijft van de vergelijking kan herschreven worden naar de volgende vorm (zie ook figuur 1.1):

$$W = 0,5\kappa \frac{U_w^2}{gh} F \cos(\phi) \quad (1.3)$$

Hierin is:

- W Windopzet (m)
- κ Constante
- U_w Windsnelheid, 10 meter boven het wateroppervlak (m/s)
- h Waterdiepte (m)
- F Strijklengte (m)
- ϕ Hoek van de kust t.o.v. de wind



Figuur 1.1 Schematisering formule van windopzet

De κ in de formule is een empirisch te bepalen constante. Uit metingen van de windsnelheid en de waterstanden kan met de bekende geometrie van het IJsselmeer deze constante bepaald worden. Binnen Nederland wordt de constante aangenomen als $3,4 \cdot 10^{-6}$ (Deltacommissie, 1961). Er is echter geen informatie beschikbaar over de standaardafwijking van deze waarde.

2 MEETGEGEVENS

2.1 INLEIDING

Om de constante te bepalen wordt gebruik gemaakt van de meetgegevens van de wind en de waterstanden. Er moet echter vaak een keuze gemaakt worden tussen gegevens om de werkelijkheid zo goed mogelijk te modelleren. In de volgende paragrafen worden de verschillende parameters van vergelijking (1.3) besproken, alsmede de aannames die gedaan worden verantwoord. In bijlage A is een kaart bijgevoegd met de locaties van de verschillende meetstations.

2.2 WINDMETINGEN

Het KNMI doet windmetingen op verschillende meetstations binnen Nederland. Om een zo goed mogelijk beeld te krijgen van de heersende wind op het IJsselmeer worden verschillende weerstations in de buurt van het IJsselmeer met elkaar vergeleken. De relevante windstations zijn: Stavoren, De Kooy (Den Helder), Lelystad, Leeuwarden en Marknesse. Voor dit onderzoek zullen de windmetingen van Stavoren gebruikt worden. Het meetstation van Stavoren ligt in een open landschap en zeer dicht bij het IJsselmeer, en wordt bij een noord- en zuidwestelijke wind dus nauwelijks beïnvloed door het land. Het huidige windstation heeft geen wijzigingen ondergaan sinds januari 2000.

In dit onderzoek worden alleen de noord- en zuidwestelijke richtingen gebruikt. De geschiedenis leert dat de windsnelheid in deze richtingen het hoogst is en het meest frequent voorkomt, waardoor deze richtingen uitermate geschikt zijn voor het onderzoek.

Bij een vergelijking van met andere windstations rond het IJsselmeer voor windrichtingen tussen de 310° en 10° graden blijkt dat de metingen van Stavoren boven die van de rest uitkomen (zie Bijlage B: Windsnelheid januari 2005 IJsselmeerstations), met name voor hogere windsnelheden. Bij een vergelijking met enkele kuststations blijkt dat de metingen van Stavoren hier weer onder liggen (zie Bijlage C: Windsnelheid januari 2005 Vlieland, Stavoren en Lelystad). Dit is ook logisch, gezien deze laatste nagenoeg de wind boven zee meten, en de overige stations rond het IJsselmeer de landwind meten. Over het IJsselmeer waait dus een wind die tussen de zee- en de landwind in ligt.

2.3 WATERSTANDMETINGEN

Rijkswaterstaat doet op verschillende plekken rond het IJsselmeer metingen van de waterstand. De relevante locaties zijn Den Oever (binnen), Kornwerderzand (binnen), Lemmer en de Houtribsluizen (noord). Gezien de sterke schommelingen in de waterstanden (zie Bijlage D: Middelen van de waterstand), met name wanneer het winterpeil wordt gehandhaafd, is het nodig om bij elke meting de gemiddelde waterstand in het IJsselmeer te bepalen t.o.v. NAP, dit wordt gedaan door de waterstanden te middelen.

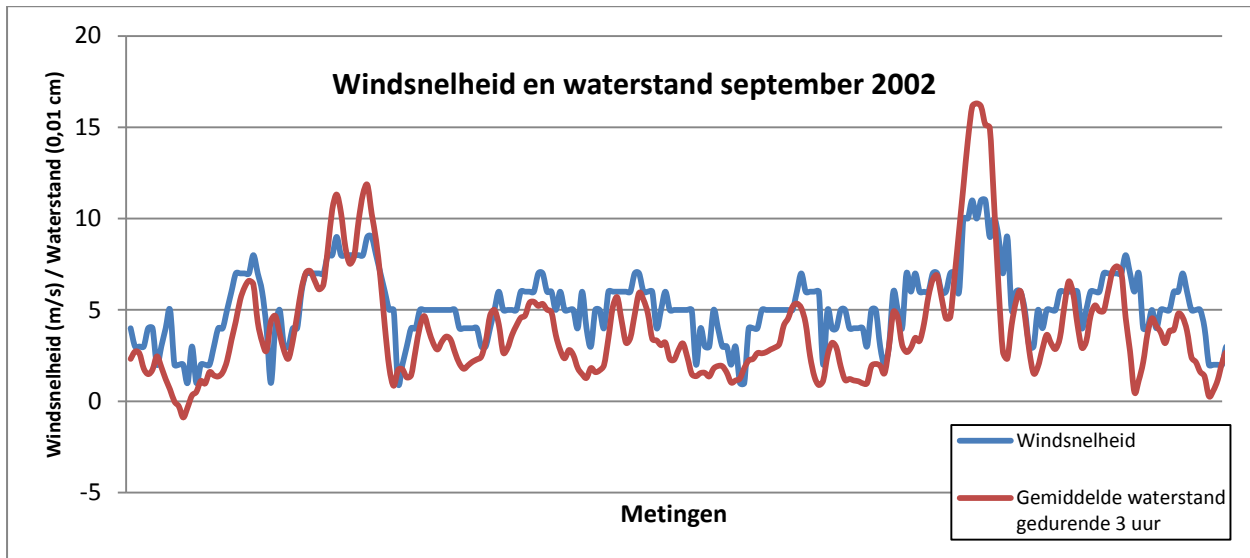
Voor de waterdiepte wordt de gemiddelde diepte van het relevante gebied bepaald a.d.h.v. de waterkaart van het IJsselmeer. Samen met de hoogte van het winterpeil (NAP-0,4m) kan dan de waterstand t.o.v. de bodem bepaald worden (de h in vergelijking (1.3)).

2.4 MATCHEN VAN WIND- EN WATERSTANDSMETINGEN

De metingen voor de windsnelheid bestaan uit uurgemiddelden, waar elke meting van de waterstand een gemiddelde is van de afgelopen 10 minuten. Tevens moet er gekeken worden naar wat de vertraging van de waterstand is t.o.v. de gemeten wind. Opwaaiing treedt immers niet op het moment dat de windsnelheid omhoog gaat, maar een bepaalde tijd hierna.

Bij het beschouwen van de waterstandsmetingen blijkt dat de waterstand een sterk periodiek karakter heeft met een zeer korte periode. Als voorbeeld is in Bijlage D: Middelen van de waterstand de waterstand op 28 oktober 2002 opgenomen. Er wordt ervoor gekozen om voor de waterstand uurgemiddelden te nemen. Dit middelt de waterstanden waardoor deze per uur constanter zijn. Dit maakt het ook mogelijk om de waterstanden eenvoudig te matchen met de windsnelheden.

De opwaaiing t.g.v. de wind op een bepaald tijdsinterval wordt bepaald met het gemiddelde van de waterstand over de volgende drie uur na dit tijdsinterval. In Grafiek 2.1 is deze gemiddelde waterstand bij de Houtribsluizen (vermenigvuldigd met 100 om dit te kunnen vergelijken met de windsnelheden) voor september 2002 vergeleken met de windsnelheid. In deze grafiek is op te merken dat vooral de pieken, waar de resultaten het nauwkeurigst zullen zijn, overeenkomen.



Grafiek 2.1 Matchen van windsnelheden en waterstanden

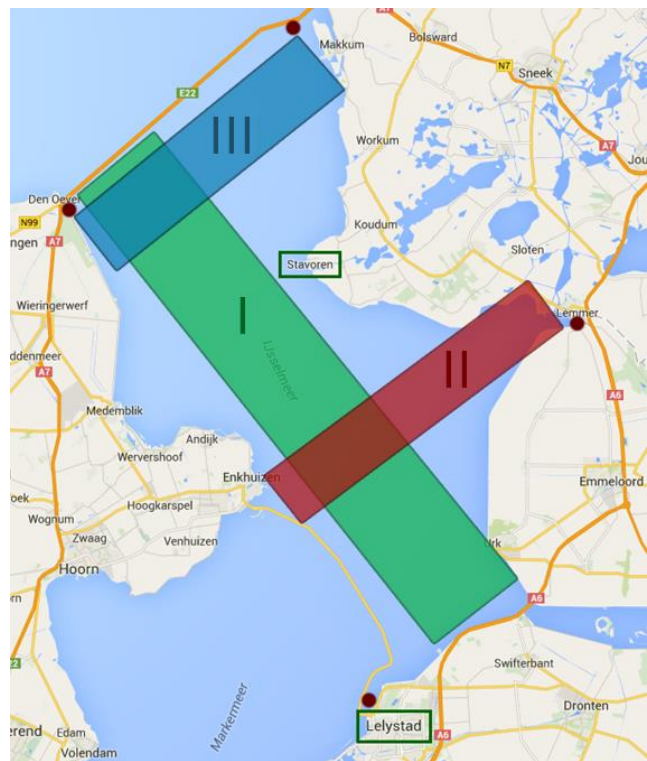
2.5 ONDERZOCHE GEBIEDEN

Het IJsselmeer is geen perfect rechthoekig meer met een constante doorsnede. Voor de meeste richtingen is het dus lastig om het gebied te modelleren. Er worden meerdere deelgebieden onderzocht. Figuur 2.1 markeert de deelgebieden op de kaart van het IJsselmeer.

Het eerste deelgebied ligt in de noordwestelijke richting. Dit betekent dat zowel de waterstanden bij Den Oever, Kornwerderzand en de Houtribsluizen gebruikt kunnen worden om de windopzet te bepalen. Dit gebied wordt gezien als het betrouwbaarste gebied voor het bepalen van κ . De reden hiervoor wordt verder toegelicht in hoofdstuk 4.

Het tweede gebied ligt in de zuidwestelijke richting tussen Enkhuizen en Lemmer, waarbij de waterstanden van alle vier de meetlocaties gebruikt kunnen worden om de waterstand te bepalen. De waterstand in Lemmer zal dan maatgevend zijn voor de windopzet. Het gebied is echter niet ideaal door de onregelmatige geografie in de buurt van Lemmer en de strijklengte is een stuk korter dan die van het eerste deelgebied.

Het derde deelgebied ligt ook in de zuidwestelijke richting, tussen Den Oever en Makkum. Voor het bepalen van de windopzet zal de waterstand van Kornwerderzand worden gebruikt. Dit zorgt ervoor dat in deze richtingen twee sets resultaten zullen zodat deze met elkaar vergeleken kunnen worden.



Figuur 2.1 Deelgebieden op het IJsselmeer (Google Maps)

3 ONDERZOEKSRISULTATEN

3.1 GEBRUIKTE WAARDEN

De in het vorige hoofdstuk beschreven meetgegevens tussen 2000 en 2013 worden gebruikt om het verband te onderzoeken tussen de gemeten en de voorspelde windopzet. De gemiddelde diepte wordt per gebied geschat m.b.v. de waterkaart van het gebied. In de noordwestelijke richting wordt de gemiddelde waterstand t.o.v. NAP bepaald door:

$$h_{gem} = 0,25 h_{Den Oever} + 0,25 h_{Kornwerderzand} + 0,5 h_{Houtribsluizen} \quad (3.1)$$

Hierbij is de gemiddelde waterhoogte aan de hogerwal gemiddeld met die aan de lagerwal. Voor de zuidwestelijke richting is het gemiddelde genomen van Den Oever, Kornwerderzand, Lemmer en de Houtribsluizen. De strijklengte is de maximale afstand in de richting van het gebied, respectievelijk 50 km, 30 km en 25 km voor de drie deelgebieden. De hoek die de wind maakt met de kust wordt gelijk gesteld aan nul, gezien het vlakke landschap. De windopzet wordt berekend als het verschil tussen de gemeten waterstand aan de lagerwal en de gemiddelde waterstand over het hele IJsselmeer. Alleen windrichtingen die maximaal 5° afwijken van de relevante windrichting worden gebruikt, met een minimale windsnelheid van 10 m/s. De waterdiepten voor de drie deelgebieden zijn geschat op respectievelijk 5,4 m, 4,2 m en 4,0 m t.o.v. NAP.

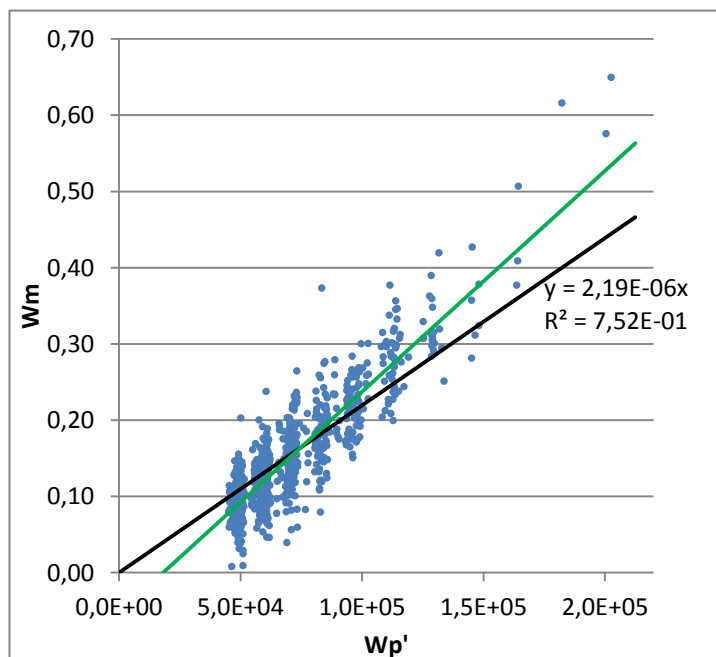
In de volgende paragrafen wordt gewerkt met de gemeten windopzet (W_m), de voorspelde windopzetting (W_p), de constante κ en de voorspelde windopzetting waarbij κ niet is meegenomen (W_p'). Deze laatste waarde wordt berekend uit:

$$W_p' = 0,5 \frac{U_w^2}{gh} F \quad (3.2)$$

3.2 EERSTE CONCLUSIES ONDERZOEKSGBIED I

In grafiek 3.1 (zie Bijlage E: voor een uitvergroting) zijn de resultaten voor de gemeten opzet en de voorspelde opzet (W_p') tegen elkaar uitgezet en is een regressielijn bepaald met de kleinste-kwadratenmethode. In het ideale geval zouden alle punten op een rechte lijn moeten liggen. De richtingscoëfficiënt van die lijn is κ . Deze rechte lijn zou in principe door het snijpunt van de assen moeten gaan. De zwarte lijn in de grafiek is de trendlijn van de puntenwolk, deze geeft een correlatiecoëfficiënt van 0,87.

Uit de grafiek is duidelijk te zien dat alle waarden zich binnen een bepaalde marge van de trendlijn bevinden. Waarden die buiten dit bereik zitten zijn te verklaren uit meetfouten of doordat de gebruikte modellering en verwerking niet geschikt zijn voor die specifieke situatie.



Grafiek 3.1 Verband tussen W_p en W_p' volgens vergelijking (1.3) voor deelgebied I

Voor de hogere waarden is echter te zien dat deze voornamelijk boven de trendlijn uitkomen. Deze hoge waarden zijn wel het nauwkeurigst en het voorspellen van hoge waarden is de voornaamste toepassing. Op deze manier zou er bij het voorspellen van waterstanden altijd een onderschatting gemaakt worden.

Het is mogelijk te veronderstellen dat deze lijn niet door het snijpunt van de assen gaat (groene lijn in grafiek 3.1), Dit zou betekenen dat er voor de voorspelde windopzet niet alleen met κ gewerkt kan worden, maar dat bij het resultaat nog een zekere waarde opgeteld moet worden.

Een andere manier om naar de grafiek te kijken is door te onderzoeken of een lineaire benadering voor de puntenwolk wel een goede methode is. Wanneer er bijvoorbeeld een polynoom wordt gebruikt als benadering lijkt dit op het eerste gezicht een beter resultaat te geven. Hier wordt in de volgende paragraaf op ingegaan.

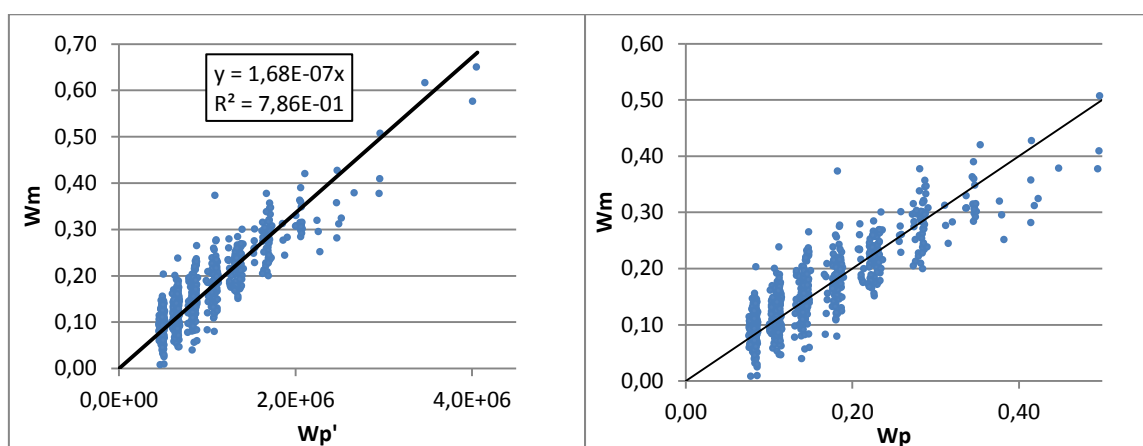
In grafiek 3.1 blijkt verder dat de meetpunten zich ophopen op bepaalde waarden voor W_p' . De verklaring hiervoor is te vinden in de formule. Voor de meetgegevens zijn alleen de diepte en de windsnelheid variabel. De windsnelheid heeft hier de grootste invloed door ten eerste het kwadraat dat gebruikt wordt, en ten tweede de grote variatie in windsnelheden. De metingen van de wind komen voor in intervallen van 1 m/s. Dit wordt verder nog gekwadrateerd, waardoor de waarden verder uit elkaar komen te liggen. De invloed van de variabele diepte is echter gering en hebben dus een kleine invloed. Dit samen verklaart waarom de punten in horizontale zin geconcentreerd liggen.

3.3 OPWAAIING VOORSPELLEN MET U_w^3

In paragraaf 3.2 is dus geconcludeerd dat een lineair verband tussen de windsnelheid in het kwadraat en de gemeten windopzet niet toereikend is. De windsnelheid is de enige variabele in vergelijking (1.3) en zal dus aangepast moeten worden. Hiervoor zal de volgende formule gebruikt worden:

$$W_p = 0,5 K \frac{U_w^3}{gh} F \cos(\phi) \quad (3.3)$$

In deze formule is nu K gebruikt i.p.v. κ om duidelijk te maken dat het in dit geval om een andere constante gaat. Grafiek 3.2 en grafiek 3.3 geven nu het verband tussen de nieuwe W_m en W_p' respectievelijk W_p (zie bijlage F voor een uitvergroting).



Grafiek 3.2 Verband tussen W_m en W_p' volgens vergelijking (3.3) voor deelgebied I

Grafiek 3.3 Verband tussen W_m en W_p volgens vergelijking (3.3) voor deelgebied I

In deze nieuwe benadering is te zien dat nu ook bij hogere windsnelheden de voorspelde waterstanden in de buurt liggen van de trendlijn.

3.4 VERKLARING VOOR HET GEBRUIK VAN U_w^3 EN INVLOED VAN DE TEMPERAATUUR

Bij het bepalen van de windschuifspanning is in vergelijking (1.1) ervanuit gegaan dat deze recht evenredig is met de windsnelheid in het kwadraat. Hierin is een "constante" C opgenomen die afhankelijk is van verschillende factoren. Uit een onderzoek van Smith (1988) naar C_D -waarden voor oceanen voor windschuifspanningen, blijkt dat de C_D -waarde varieert met de windsnelheid en de temperatuur (zie Figuur 3.1).

Deze wrijvingscoëfficiënten gelden echter voor oceanen. De wrijving wordt mede bepaald door het karakter van de golven (welke weer een verband heeft met de windsnelheid). Het IJsselmeer wordt in tegenstelling tot een oceaan gekenmerkt door lage golfhoogten met een korte golflengte. Deze wrijvingscoëfficiënten kunnen dus niet zonder verder onderzoek gebruikt worden voor het IJsselmeer.

Er kan echter wel gekeken worden naar de tendens van de wrijvingscoëfficiënt. Hieruit worden twee conclusies getrokken. Ten eerste is in figuur 3.2 duidelijk te zien dat de temperatuur, met name nabij en onder het vriespunt, een grote invloed heeft op de wrijvingscoëfficiënt, met name voor temperaturen onder de 5°C voor lage windsnelheden. Het uitsluiten van meetresultaten waarbij de temperatuur laag is blijkt geen invloed te hebben op de onderzoeksresultaten, wat logisch is gezien de geringe invloed bij hogere windsnelheden. Een tweede conclusie die getrokken kan worden is dat voor een constante temperatuur de wrijvingscoëfficiënt ongeveer lineair toeneemt met de windsnelheid. Dit is dus de verklaring waarom de windsnelheid in de vorige paragraaf tot de derde macht wordt genomen. Dit geeft een andere definitie voor κ in vergelijking (1.3):

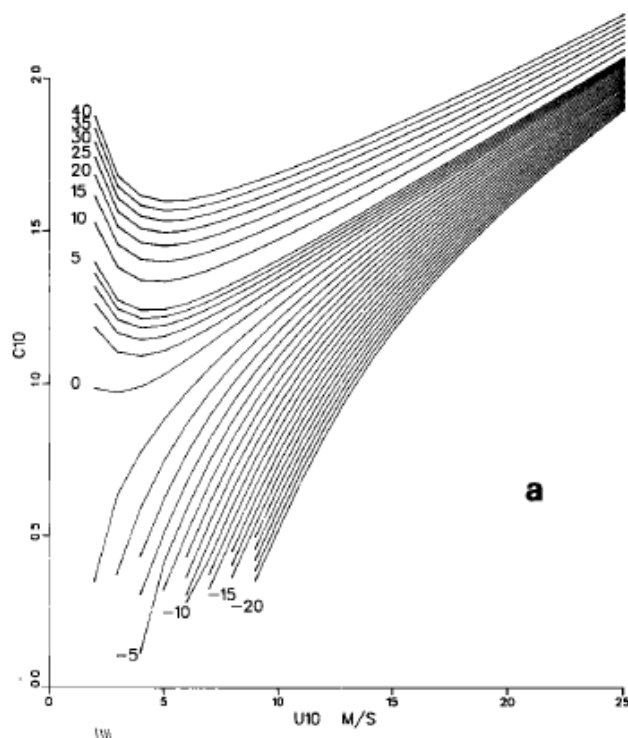
$$\kappa = C U_w \quad (3.4)$$

Waarin C een wrijvingsconstante is.

TABLE 1. Drag Coefficient at 10 m, $10^3 C_{10}$ (Equation (1)), for Estimating Wind Stress in Typical Open Ocean Conditions From Winds and Temperatures Measured at or Adjusted to 10-m Height

$T_{surf} - \theta_{v10}, ^\circ\text{C}$	$U_{10}, \text{m s}^{-1}$					
	2	5	10	15	20	25
-20			0.52	1.17	1.58	1.90
-15			0.79	1.27	1.64	1.94
-10			0.89	1.37	1.69	1.97
-5		0.41	1.09	1.46	1.75	2.01
-4		0.51	1.13	1.48	1.76	2.01
-3		0.62	1.17	1.50	1.77	2.02
-2		0.74	1.21	1.52	1.78	2.03
-1	0.35	0.88	1.26	1.54	1.79	2.04
0	0.98	1.03	1.30	1.56	1.80	2.04
1	1.18	1.11	1.33	1.57	1.81	2.05
2	1.26	1.16	1.35	1.59	1.82	2.05
3	1.32	1.19	1.37	1.60	1.83	2.06
4	1.36	1.22	1.39	1.61	1.84	2.07
5	1.40	1.24	1.41	1.62	1.84	2.07
10	1.53	1.33	1.47	1.67	1.88	2.09
15	1.61	1.40	1.52	1.71	1.91	2.12
20	1.68	1.45	1.57	1.74	1.93	2.14

Figuur 3.1 C_D waarden voor variërende temperaturen en windsnelheden op oceanen (Smith, 1988:15469)

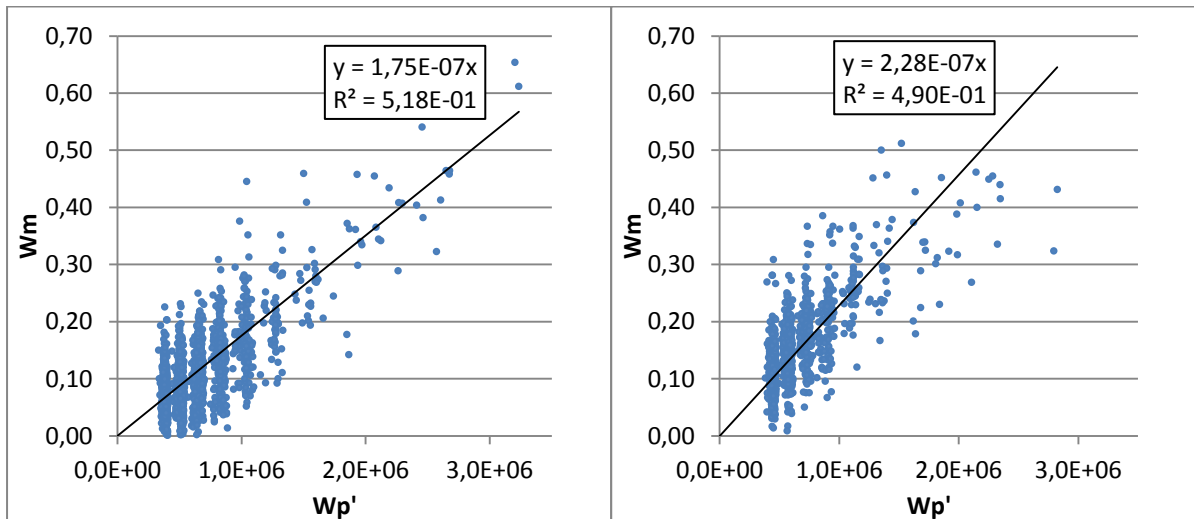


Figuur 3.2 C_D waarden uitgezet tegenover de windsnelheid voor verschillende temperaturen (Smith, 1988:15469)

3.5 RESULTATEN DEELGEBIEDEN II EN III

In grafiek 3.4 staan de resultaten voor deelgebied II. De methode is dezelfde als in (3.3) is gebruikt (dus met een derde macht voor de windsnelheid), met als enige verschil dat de gemiddelde diepte geschat is op 4,2 m t.o.v. NAP. De vorm van de grafiek is gelijkaardig aan die van grafiek 3.2, met als grote verschil dat de verticale spreiding van de metingen groter is geworden.

Grafiek 3.5 weergeeft de resultaten van deelgebied III. De methode is opnieuw equivalent aan die van de andere deelgebieden. Een vergelijking tussen de verschillende deelgebieden en de conclusies die hieruit getrokken kunnen worden, zullen besproken worden in het volgende hoofdstuk. Uitvergrotingen van de grafieken zijn terug te vinden in Bijlage G: Metingen windopzet deelgebieden II en III, U_w^3 .



Grafiek 3.4 (links) Verband tussen W_p en W_p' volgens vergelijking (3.3) voor deelgebied II

Grafiek 3.5 (rechts) Verband tussen W_p en W_p' volgens vergelijking (3.3) voor deelgebied III

4 VERGELIJKING VAN DE DEELGEBIEDEN EN PARAMETERANALYSE

4.1 VERGELIJKING VAN DE DEELGEBIEDEN

Worden de grafieken die het verband tussen W_m en W_p' geven voor de verschillende deelgebieden met elkaar vergeleken dan zijn er duidelijke overeenkomsten en verschillen te zien. De vormen van de puntenwolken van de verschillende deelgebieden zijn erg gelijkaardig: er is een rechte lijn door de oorsprong te trekken, waarrond de punten gefocust zijn. De verticale spreiding van de punten is echter verschillend. In de noordwestelijke richting is deze duidelijk een stuk kleiner dan in de zuidwestelijke richtingen. Dit is ook te zien aan de correlatiecoëfficiënt die voor deelgebied I gelijk is aan 0,9 waar die voor de andere twee deelgebieden gelijk is aan 0,7. Een eenvoudige verklaring hiervoor is dat de noordwestelijke richting beter overeenkomt met het model en dat de strijklengte een stuk langer is. Dit maakt dat de resultaten een stuk nauwkeuriger zijn.

Door de resultaten voor de verschillende deelgebieden te vergelijken is het mogelijk om een analyse maken van de verschillende parameters in formule (3.3), voor het leesgemak nogmaals gegeven:

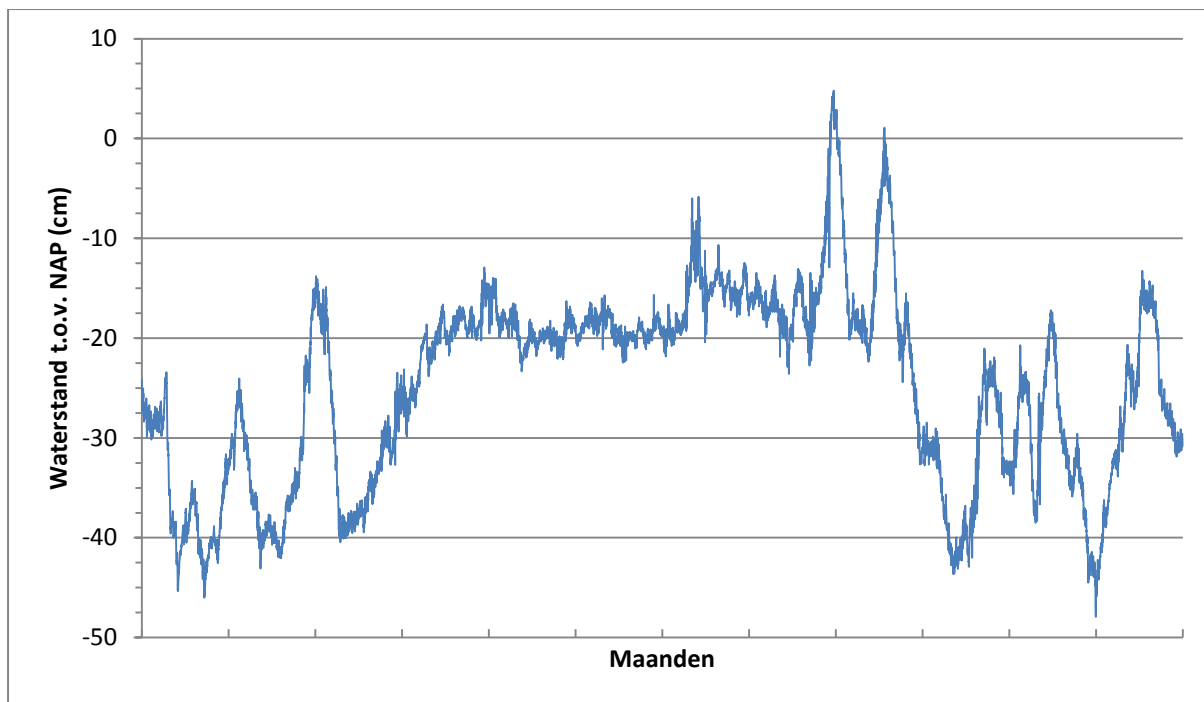
$$W_p = 0,5 K \frac{U_w^3}{gh} F \cos(\phi) \quad (4.1)$$

De gebieden hebben een verschillende geometrie, maar in principe zouden de resultaten (K dus) hetzelfde moeten zijn. Aan de hand hiervan kan er gekeken worden naar de gevoeligheid van de waterdiepte, de strijklengte en de windrichting.

4.2 GEVOELIGHEID VAN DE WATERDIEPTE h

De waterdiepte h blijkt een hele gevoelige parameter te zijn die heel nauwkeurig bepaald moet worden. De bodemdiepte van een meer varieert sterk en een gemiddelde bepalen is erg lastig. Wordt bijvoorbeeld bij deelgebied II de gemiddelde diepte van het IJsselmeer genomen ($\pm 5,9$ m t.o.v. NAP) dan komt de waarde voor de voorspelde windopzet tot een factor 1,4 lager uit dan wanneer de diepte van het deelgebied zelf wordt bekeken.

De waterdiepte wordt bepaald door bij de bodemdiepte de momentele waterstand op te tellen. Deze waterstand zorgt voor kleine fluctuaties in de waterdiepte. De waterstand voor 2010 is te zien in grafiek 4.1. Wanneer het zomerpeil van het IJsselmeer gehandhaafd wordt blijkt dat deze verschillen verwaarloosbaar zijn (de verschillen in de waterdiepte zijn kleiner dan 2% t.o.v. het gemiddelde zomerpeil). Wanneer het winterpeil wordt gehandhaafd blijkt dat de verschillen groter zijn, echter niet meer dan 5% t.o.v. het gemiddelde winterpeil. Onnauwkeurigheden in het meten of bepalen van de waterstand hebben dus een kleine invloed op het voorspellen van de waterstand. Het zomer- of winterpeil gebruiken voor het bepalen van de waterdiepte is dus een gerechtvaardigde vereenvoudiging, gezien de verschillen klein zijn. In het algemeen geldt dat dit alleen kan als de schommelingen in de waterstand klein zijn t.o.v. de gemiddelde waterdiepte.



Grafiek 4.1 Gemiddelde waterstand in 2010 (gemiddelde van de vier meetstations)

De waterdiepte is dus een hele belangrijke parameter in de formule, waar vooral de bodemdiepte van het gebied zo nauwkeurig mogelijk bepaald moet worden en de invloed van de waterstand gering is.

4.3 GEVOELIGHEID VAN DE STRIJKLENGTE F EN INVLOED VAN DE WINDRICHTING

Wanneer het werkelijke meer goed aansluit bij het model dan is de strijklengte eenvoudigweg te bepalen door de maximale afstand te nemen tussen de hoger- en lagerwal. De strijklengte is doorgaans een grote waarde (bij deelgebied I 50 km) waardoor een kleine onnauwkeurigheid weinig invloed zal hebben. Als het meer echter minder goed aansluit bij het model, zoals deelgebied III bij een west-zuidwestelijke wind, dan is de strijklengte een stuk lastiger te bepalen. In dit voorbeeld zal de strijklengte ergens tussen de 30 km en de 50 km liggen, en dit maakt natuurlijk wel een groot verschil. Hieruit blijkt dat een goede modellering essentieel is.

Bij het gebruik van de resultaten zijn windrichtingen is er bewust voor gekozen om alleen windrichtingen te nemen die een maximale afwijking hebben van 5° hebben met de lengterichting van het gebied (door de nauwkeurigheid van de metingen is een afwijking kleiner dan 5° niet mogelijk). Wanneer de windrichting meer afwijkt kan het zijn dat de modellering niet meer klopt, zoals bij deelgebied III.

Voor dit gebied zijn de windrichtingen 220° en 230° gebruikt. Wordt bijvoorbeeld windrichting 210° bekeken, dan gaat de gemiddelde waarde van K van $2,3 \cdot 10^{-7}$ naar $3,2 \cdot 10^{-7}$. Dit is ook logisch, want bij een kleine verandering van de richting, wordt Kornwerderzand opeens het afvoerputje van het hele IJsselmeer, en is de exacte strijklengte op het eerste gezicht niet duidelijk te bepalen. Het verschil is zelfs al te merken wanneer de richtingen 220° en 230° worden vergeleken: een K van respectievelijk $2,7 \cdot 10^{-7}$ tegenover $2,1 \cdot 10^{-7}$. Een klein verschil in de windrichting geeft dus een heel ander resultaat. Bij deelgebied I gebeurt hetzelfde bij een kleine schifting in noordelijke richting, gezien de strijklengte toeneemt.

Hieruit valt te concluderen dat alleen de meest exacte windrichtingen die bij een gebied passen gebruikt kunnen worden. Dit model is sterk afhankelijk van de geometrie en de windrichting. In dit on-

derzoek zal verder geen aandacht besteed worden aan hoe de parameters aangepast moeten worden om aan de modellering te voldoen.

4.4 INVLOED WINDSNELHEID

De windsnelheid is met de tweede dan wel derde macht een zeer invloedrijke variabele in de formule. Voor het bepalen van de maximale windopzet moet de maximaal voorkomende windsnelheid bepaald worden. In tabel 4.1 zijn enkele voorspelde windopzetten bepaald voor een waterdiepte van 5 m, een strijklengte van 50 km en een κ en K van respectievelijk $3,4 \cdot 10^{-6}$ en $1,7 \cdot 10^{-7}$.¹

Tabel 4.1 Berekende windopzetten voor verschillende windsnelheden

U_w	W_p (vgl. 1.3)	W_p (vgl. 3.3)
15	0,39	0,29
16	0,44	0,35
17	0,50	0,43
18	0,56	0,51
19	0,63	0,59
20	0,69	0,69
21	0,76	0,80
22	0,84	0,92
23	0,92	1,05
24	1,00	1,20
25	1,08	1,35

Hieruit blijkt de grote invloed van de windsnelheid. Bij een windsnelheid van 25 m/s is de verwachte opwaaiing bij het gebruik van de derde macht ongeveer dubbel zo groot dan bij 20 m/s. Bij een vergelijking van de derde en de tweede macht blijkt dat hoe hoger de windsnelheid boven de 20 m/s, hoe groter het verschil tussen de twee methoden.

De metingen op het IJsselmeer voor de gebruikte windrichtingen gaan slechts tot de 20 m/s. Dit betekent dat er voor hogere windsnelheden geen bevestiging is voor welke methode het nauwkeurigst is. Wanneer de maatgevende windsnelheid probabilistisch bepaald wordt moet er dus rekening mee gehouden worden dat de keuze hiervan een hele sterke invloed heeft op de verwachten waterstand. Als voorbeeld voor deelgebied I: de hoogst gemeten windsnelheid is 22 m/s, terwijl op het IJsselmeer de hoogste windsnelheid 24 m/s is gemeten (13 januari 1993 en 28 oktober 2013), dit zou kunnen betekenen dat een 30% hogere opwaaiing mogelijk is.

4.5 CONCLUSIE

De verschillende parameters van de formule blijken een grote invloed te hebben op het gebruik van de formule. Veruit het belangrijkste is het model dat gebruikt wordt voor de berekening. Het onderzochte gebied moet voldoende aansluiten bij het rechthoekige model voor nauwkeurige voorspellingen van de waterstand. Wanneer hieraan voldaan wordt, is kennis van de bodemdiepte en de maatgevende windsnelheid een vereiste om de windopzet nauwkeurig te kunnen voorspellen.

¹ $1,7 \cdot 10^{-7}$ is het gemiddelde berekend in hoofdstuk 3 voor de formule met U_w^3 , $3,4 \cdot 10^{-6}$ is de waarde die door Rijkswaterstaat wordt gehanteerd voor de formule met U_w^2 .

5 STANDAARDAFWIJKING

5.1 INLEIDING

Het is duidelijk te zien uit de grafieken 3.1 t/m 3.4 dat er een onzekerheid zit bij het voorspellen van de windopzet. In dit hoofdstuk zal geprobeerd worden een algemene standaardafwijking voor κ en K te vinden. Hiervoor zal eerst gekeken worden of het relevant is deze in de κ of K te vinden (dus evenredig is met de windsnelheid in het kwadraat dan wel tot de derde macht). Hierna zal gekeken worden of er een constante afwijking is, onafhankelijk van de windsnelheid.

5.2 STANDAARDAFWIJKING VAN κ / K

Eerst wordt de standaardafwijking verwerkt in de waarde voor K . Dit betekent dus dat de standaardafwijking recht evenredig is met de windsnelheid tot de derde macht:

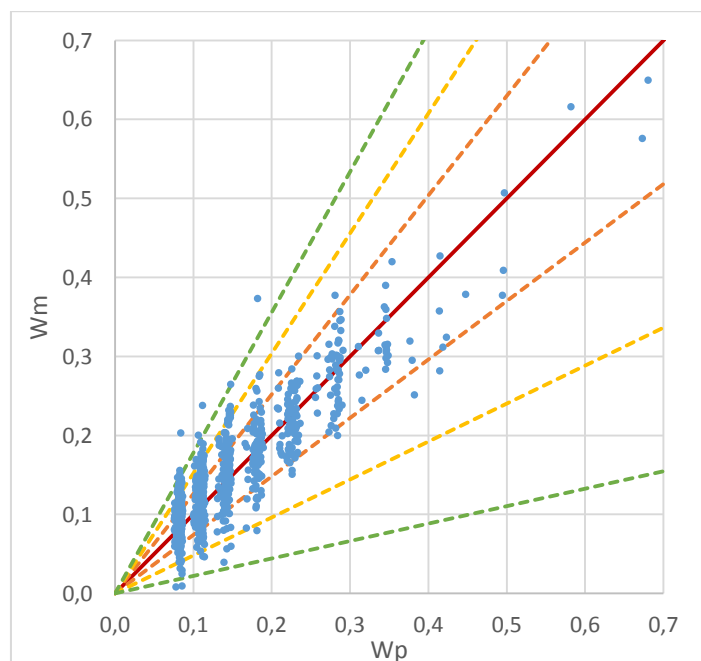
$$W = 0,5 (K \pm n\sigma_K) \frac{U_w^3}{gh} F \cos(\phi) \quad (5.1)$$

Hierin is n het aantal keer dat de standaardafwijking genomen wordt, en σ_K de standaardafwijking zelf. Deze formule kan herschreven worden zodat deze een rechte lijn voorstelt in het een W_m, W_p -grafiek:

$$W_m = (1 + n\sigma) \cdot K \cdot W_p' \quad (5.2)$$

$$W_m = (1 + n\sigma) \cdot W_p \quad (5.3)$$

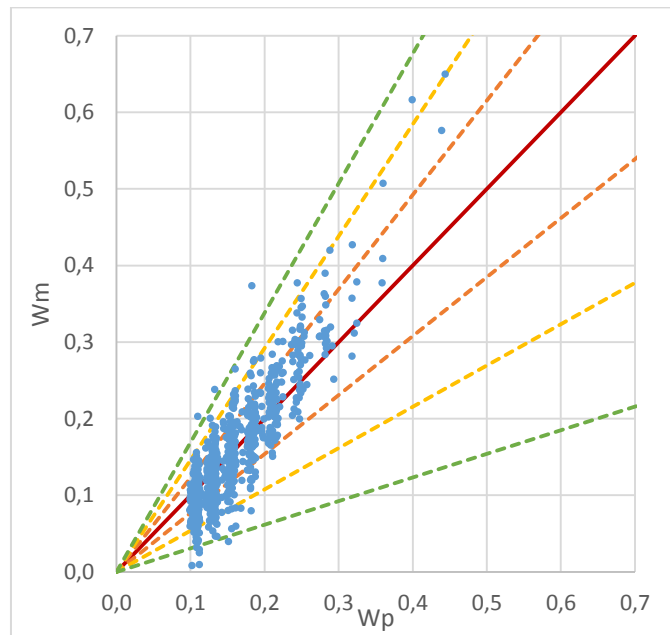
In grafiek 5.1 (uitvergroting en aanvullende details in Bijlage H: Berekeningen standaardafwijking voor U_w^3 (deelgebied I)) zijn de resultaten hiervan weergegeven. Voor K is een waarde van $1,7 \cdot 10^{-7}$ gebruikt, de gemiddelde waarde zoals bepaald in hoofdstuk 4. De oranje, gele en groene lijn geven respectievelijk een keer, twee keer en drie keer de standaardafwijking.



Grafiek 5.1 Gemeten windopzet uitgezet tegenover de voorspelde windopzet (deelgebied I, U_w^3)

De standaardafwijking σ is hier gelijk aan 0,26. Uit deze grafiek is direct te zien dat dit geen goede methode is om de standaardafwijking te bepalen. De afwijking wordt alsmaar groter naarmate W_p groter wordt, terwijl de metingen overall dicht bij de gemiddelde waarde uitkomen. De waarden die hieruit volgen zijn ook niet relevant: wordt bijvoorbeeld een windopzet van 0,5 m voorspeld, dan zou bij drie keer de standaardafwijking betekenen dat er ook mogelijk een windopzet van 0,9 m kan optreden, die een heel stuk groter is en ook niet voorkomt.

Op dezelfde manier wordt de standaardafwijking bepaald voor κ (zie ook Bijlage I: Berekeningen standaardafwijking voor U_w^2 (deelgebied I)).



Grafiek 5.2 Gemeten windopzet uitgezet tegenover de voorspelde windopzet (deelgebied I, U_w^2)

De standaardafwijking σ is hier gelijk aan 0,23. In dit geval blijkt dat ook deze benadering niet goed aansluit bij de puntenwolk. Anders dan bij de derde macht voor U_w is dat de hogere waarden alleen maar boven het gemiddelde liggen.

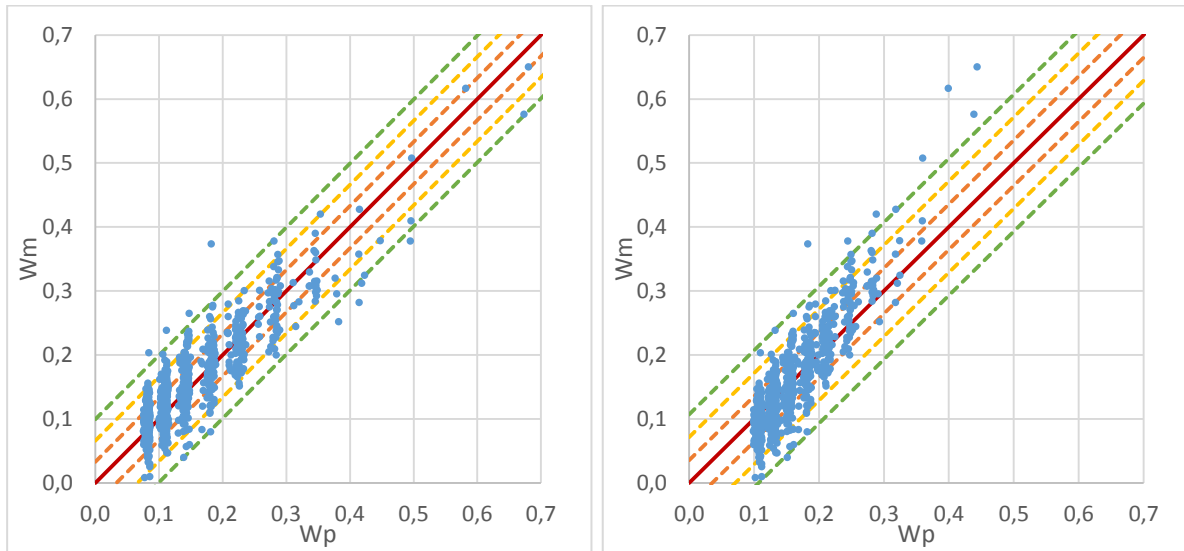
Bij deze methode moet er opgemerkt worden dat de standaardafwijking wel afhankelijk is van de meetgegevens die gebruikt worden. Worden alleen metingen van hogere windsnelheden gebruikt dan valt de standaardafwijking lager uit, omgekeerd valt bij het gebruik van metingen van lagere windsnelheden de standaardafwijking lager uit.

5.3 STANDAARDAFWIJKING VAN DE VOORSPELDE WINDOPZET

Uit grafieken 5.1 en 5.2 blijkt dat de waarden altijd op ongeveer dezelfde afstand van het gemiddelde blijven. Daarom wordt er nu naar de standaardafwijking van de voorspelde windopzet gekeken. Deze standaardafwijking is dus constant voor elke voorspelde windopzet en heeft dus ook een dimensie: een lengte. De standaardafwijking wordt in de volgende formule gegeven:

$$W_m = W_p \pm n\sigma \quad (5.4)$$

Dit geeft het volgende resultaat voor zowel U_w^3 en U_w^2 in grafieken 5.3 (zie ook bijlage Bijlage H: Berekeningen standaardafwijking voor U_w^3 (deelgebied I) en Bijlage I: Berekeningen standaardafwijking voor U_w^2 (deelgebied I)):



Grafiek 5.3 Gemeten windopzet uitgezet tegenover de voorspelde windopzet (deelgebied I, U_w^3)

Grafiek 5.4 Gemeten windopzet uitgezet tegenover de voorspelde windopzet (deelgebied I, U_w^2)

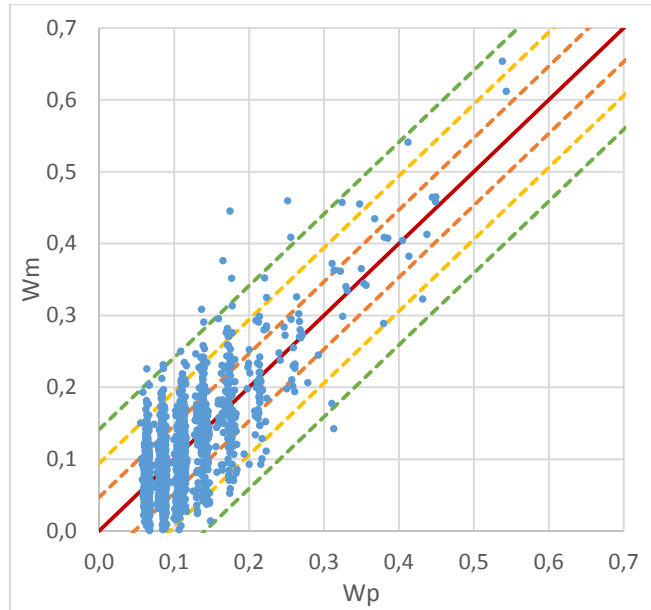
De standaardafwijkingen zijn respectievelijk voor U_w^3 en U_w^2 gelijk aan 0,033 m en 0,036 m. Voor grafiek 5.3 geldt dat deze methode om de standaardafwijking te bepalen veel meer overeenstemt met de puntenwolk. Ook voor hogere waarden blijkt dat vrijwel alle punten binnen drie keer de standaardafwijking liggen. Wordt de standaardafwijking voor een voorspelde opzet van bijvoorbeeld 0,5 m vergeleken met die van paragraaf 5.2 dan blijkt dat deze veel lager uitvalt, namelijk 0,6 m. Deze methode blijkt dus een stuk nauwkeurig te zijn.

In grafiek 5.4 is het echter anders. Hoewel de standaardafwijking goed aan lijkt te sluiten bij de puntenwolk is duidelijk te zien dat voor hogere waarden de gemeten windopzetten een stuk hoger liggen. De hoogste waarden komen regelmatig boven drie keer de standaardafwijking uit, wat voor het voorspellen van de maximale windopzet erg ongunstig is en er zal hiervoor dus een veel grotere marge gebruikt moeten worden.

Gezien deze methode in ieder geval voor U_w^3 goed aansluit, wordt formule (5.4) herschreven naar de algemene vorm:

$$W = 0,5 K \frac{U_w^3}{gh} F \cos(\phi) \pm a \quad (5.5)$$

De waarde a in de formule heeft hierbij een standaardafwijking. Een groot probleem is dat a geen constante is, maar afhankelijk is. Dit komt doordat deze een dimensie heeft en dit geval, en wordt geïllustreerd door de resultaten van deelgebied II, zoals te zien is in grafiek 5.5 (zie ook Bijlage J: Berekeningen standaardafwijking voor U_w^3 (deelgebied II)).



Grafiek 5.5 Gemeten windopzet uitgezet tegenover de voorspelde windopzet (deelgebied II, U_w^3)

De standaardafwijking is in dit geval 0,047 m en is dus significant hoger dan in deelgebied I. De resultaten van deelgebied I zijn dus een stuk nauwkeuriger. Verder heeft de grafiek een gelijkaardige vorm aan die van deelgebied I.

Deelgebied III wordt niet meer gebruikt. De reden hiervoor is dat deze waarden hoger uitkomen, en dit gebied te gevoelig blijkt te zijn voor een veranderende windrichting (zoals eerder beschreven in hoofdstuk 4), waardoor de resultaten niet representatief genoeg zijn.

5.4 DIMENSILOZE WINDOPZET

Om te kijken of er een standaardafwijking bepaald kan worden die onafhankelijk is wordt er gekeken of de windopzet dimensieloos gemaakt kan worden zodat deze altijd geldig is. De standaardafwijking blijkt, zoals beschreven in paragraaf 5.3, afhankelijk te zijn. De enige parameters die verschillen tussen deelgebieden I en II zijn de waterdiepte h en de strijklengte F . De standaardafwijking zou dus afhankelijk moeten zijn van deze parameters, en dus de geometrie van het meer. Gezien de verschillen in de waterdiepte tussen de twee gebieden veel kleiner zijn dan tussen de strijklengtes zal de formule voor windopzet dimensieloos gemaakt worden door te delen door de strijklengte. Dit geeft dan:

$$W^* = 0,5 K \frac{U_w^3}{gh} \cos(\phi) \pm a^* \quad (5.6)$$

Hierin is W^* de dimensieloze windopzet, gelijk aan W/F en heeft a^* een dimensieloze standaardafwijking. In dit geval zou echter de standaardafwijking (in meter) evenredig zijn met de strijklengte: hoe groter de strijklengte, hoe onnauwkeuriger de voorspelling. Dit spreekt echter de resultaten van deelgebieden I en II tegen: gezien de voorspelde windopzet juist nauwkeuriger blijkt te zijn voor een grotere strijklengte.

Een dimensieloze windopzet zou de beste manier zijn om een standaardafwijking voor de windopzet te geven. In dit onderzoek al er hier niet verder op in gegaan worden, gezien er te weinig gegevens hiervoor zijn (meerdere standaardafwijkingen van andere gebieden zijn hiervoor nodig).

5.5 CONCLUSIE VOOR DE STANDAARDAFWIJKING VAN DE VOORSPELDE OPZET

In grafiek 5.3 is duidelijk te zien dat deze methode het meest nauwkeurig is. Echter levert dit het probleem op dat de standaardafwijking een dimensie heeft en afhankelijk is van de geometrie van het meer. Dit onderzoek geeft met de twee deelgebieden I en II onvoldoende resultaten om hier iets zinnigs over te zeggen, behalve dat het erop lijkt dat de standaardafwijking omgekeerd evenredig is met de strijklengte. Welk verband er precies bestaat is niet te bepalen, gezien er slechts twee waarden van de standaardafwijking bekend zijn.

6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1 FORMULE MET U_w^2

$$W = 0,5\kappa \frac{U_w^2}{gh} F \cos(\phi) \quad (1.3)$$

Wordt deze formule gebruikt dan komt hier een gemiddelde waarde uit voor κ van $2,2 \cdot 10^{-6}$. Echter blijkt dat de berekende windopzet voor hogere windsnelheden een stuk hoger ligt dan de berekende opzet gebruik makende van deze constante.

Het gebruik van een standaardafwijking van κ is een slechte optie. In paragraaf 5.2 is beschreven hoe de resultaten voor hogere windopzetten steeds onnauwkeuriger worden.

Het gebruik van een standaardafwijking voor de voorspelde windopzet wordt ook niet aangeraden. Deze lijkt op het eerste zicht nauwkeuriger te zijn, maar voor hogere windsnelheden blijken de gemeten windopzetten regelmatig boven de voorspelde opzetten uit te komen.

Wordt naar de meetpunten zelf gekeken dan blijkt dat deze niet goed overeenkomen met de formule.

6.2 FORMULE MET U_w^3

$$W = 0,5K \frac{U_w^3}{gh} F \cos(\phi) \quad (3.1)$$

Wordt de waarde van κ gelijk gesteld als een constante vermenigvuldigd met de windsnelheid dan is de windopzet evenredig met U_w^3 en de meetpunten sluiten een stuk beter aan bij het gebruik van deze formule. Deze formule geeft een gemiddelde waarde voor K van $1,7 \cdot 10^{-7}$. Ook hier geldt dat bij het gebruik van een standaardafwijking voor K erg onnauwkeurig wordt.

Een methode die beter aansluit bij de meetresultaten is het gebruik van een standaardafwijking van de berekende windopzet. Deze methode blijkt een stuk nauwkeuriger te zijn en in deelgebied I lijdt dit tot een standaardafwijking van slechts 0,033 m. Echter is deze standaardafwijking niet dimensieloos, en is dus niet toe te passen op andere gebieden.

Deze standaardafwijking lijkt een omgekeerd evenredig verband te hebben met de strijklengte, maar op basis van dit onderzoek kunnen hier geen conclusies uit getrokken worden. Voor het bepalen van dit verband zal een onderzoek zijn in meerdere gebieden met een verschillende geometrie.

6.3 VERGELIJKING TUSSEN DE BEIDE FORMULES

Tot slot worden beide formules met elkaar vergeleken. De voorspelde windopzet van deze formules zullen (ongeveer) aan elkaar gelijk zijn voor een windsnelheid tussen de 10 m/s en 15 m/s. Voor kleinere waarden is de windopzet niet relevant. Voor hogere waarden zal de windopzet berekend met de derde macht hoger uitvallen dan die met de tweede macht. De derde macht geeft een windopzet die beter overeenkomt met de meetresultaten dan een tweede macht, die bij hogere windsnelheden de windopzet onderschat.

De standaardafwijking van beide formules voor de κ is bepaald, maar is onnauwkeurig, en geeft vooral voor de derde macht een zware overschatting voor hogere windsnelheden. Een standaardafwijking van de windopzet bij de derde macht is een benadering die zeer geschikt is, alleen is deze afhankelijk van de geometrie van het gebied en is dus met dit onderzoek niet exact te bepalen. Dit onderzoek kan echter wel een orde van grootte van de standaardafwijking geven: voor deelgebied II

met een strijklengte van 30 km en een diepte van 4,2 m ligt is deze ongeveer 0,05 m en neemt af als de strijklengte groter wordt.

Samengevat: de formule met de derde macht is veel nauwkeuriger met een kleine maar onbekende marge; de formule met de tweede macht is een stuk onnauwkeuriger.

6.4 ONTWERPFORMULE

Tot slot wordt een ontwerpformule gegeven voor het berekenen van de windopzet. Dit onderzoek is alleen gericht op het IJsselmeer, dus geldt deze formule ook alleen hiervoor. Om te kunnen bepalen of deze formule algemeen geldt is meer onderzoek nodig.

$$W = 0,5K \frac{U_w^3}{gh} F \cos(\phi) + a \quad (6.1)$$

Hierin is:

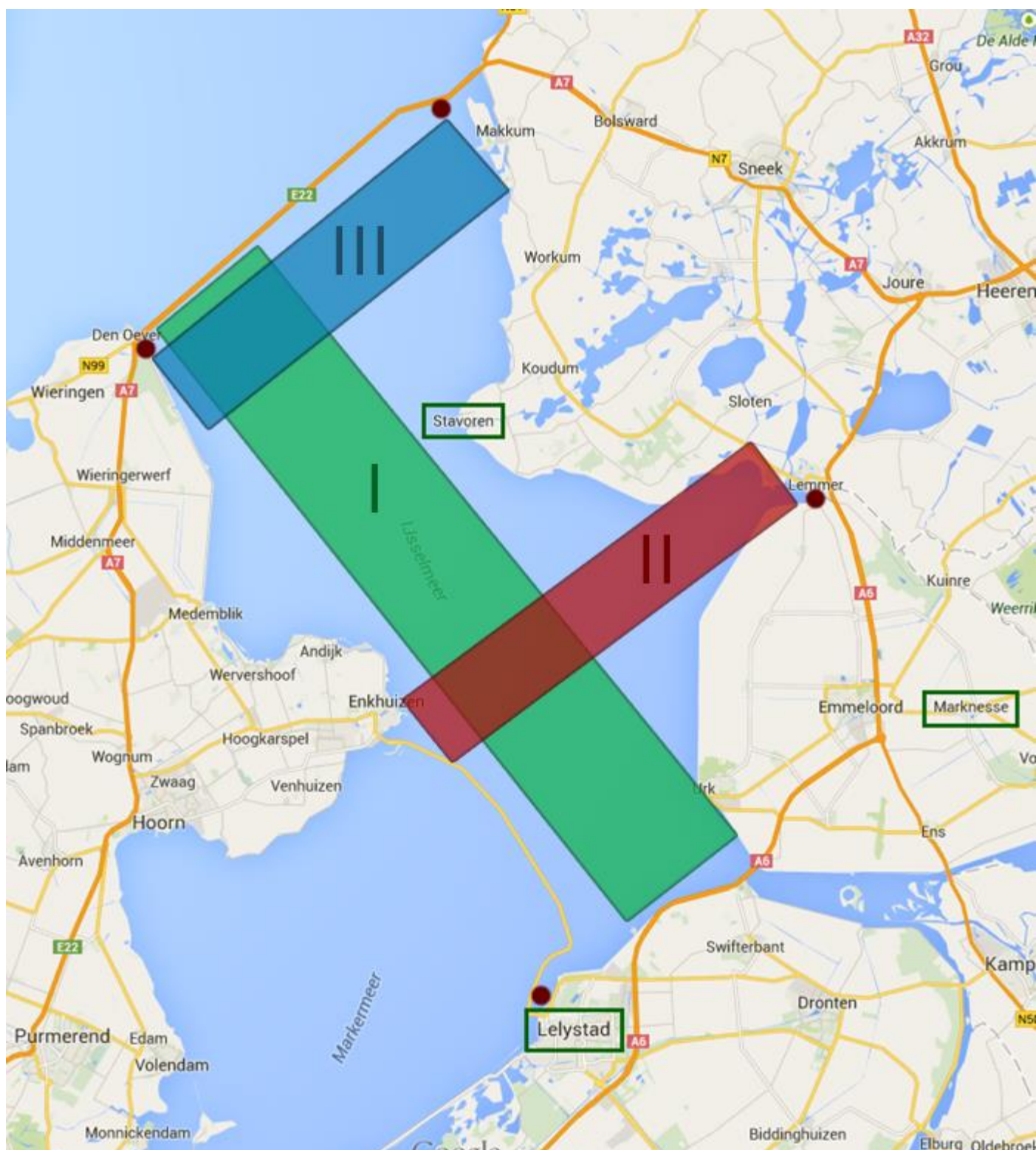
W	Windopzet (m)
K	Constante gelijk aan $1,7 \cdot 10^{-7}$
U_w	Windsnelheid, 10 meter boven het wateroppervlak (m/s)
h	Waterdiepte (m)
F	Strijklengte (m)
ϕ	Hoek van de kust t.o.v. de wind
a	Constante

De gemiddelde windopzet kan bepaald worden door de waarde van a gelijk te stellen aan nul. De waarde van a is afhankelijk van het gebied. Bij het IJsselmeer geldt dat bij een waarde van a van respectievelijk 0,10 m en 0,15 m voor de noord- en zuidwestelijke richting 99% van alle metingen de voorspelde windopzet onderschrijden.

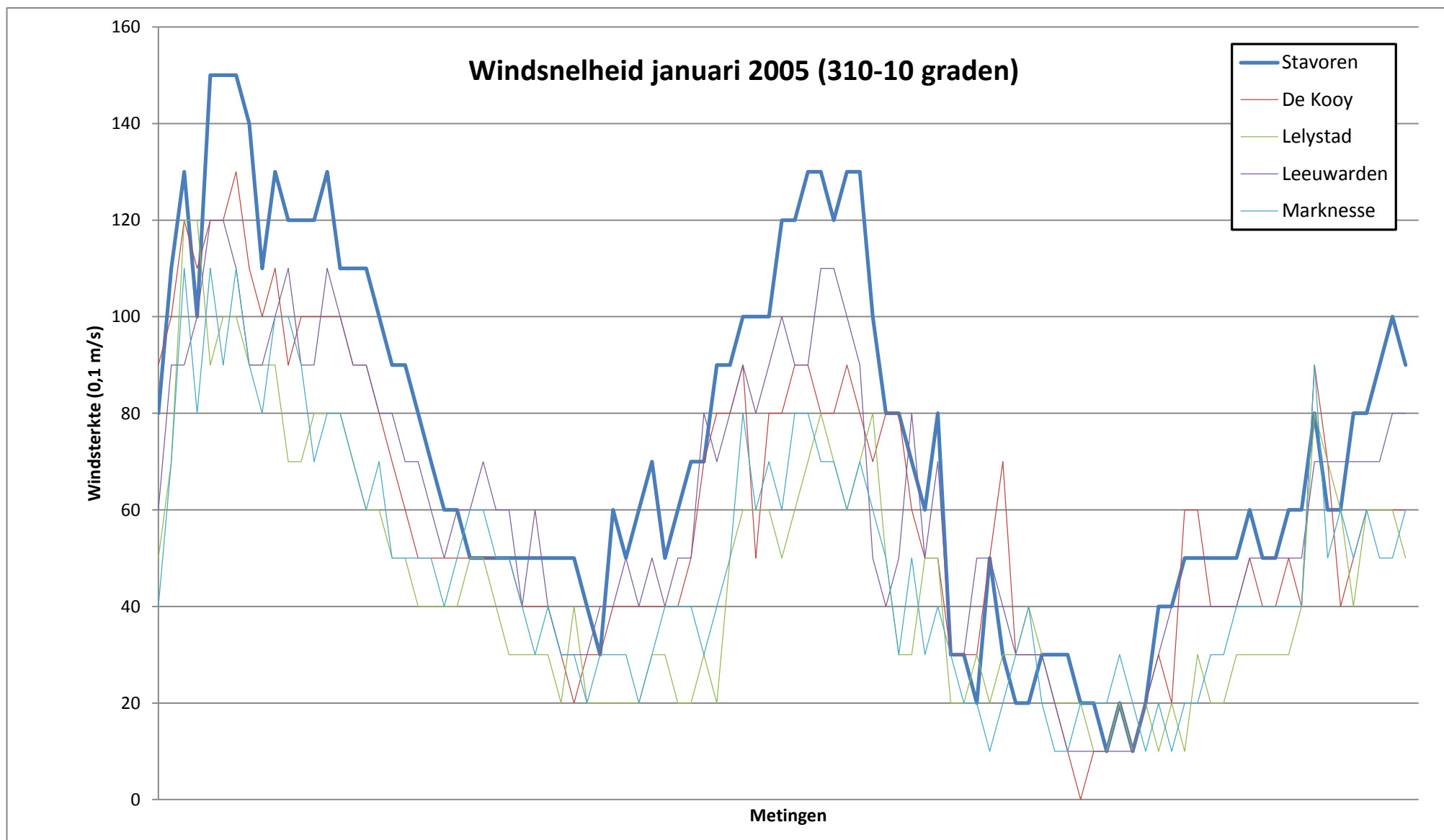
LITERATUURLIJST

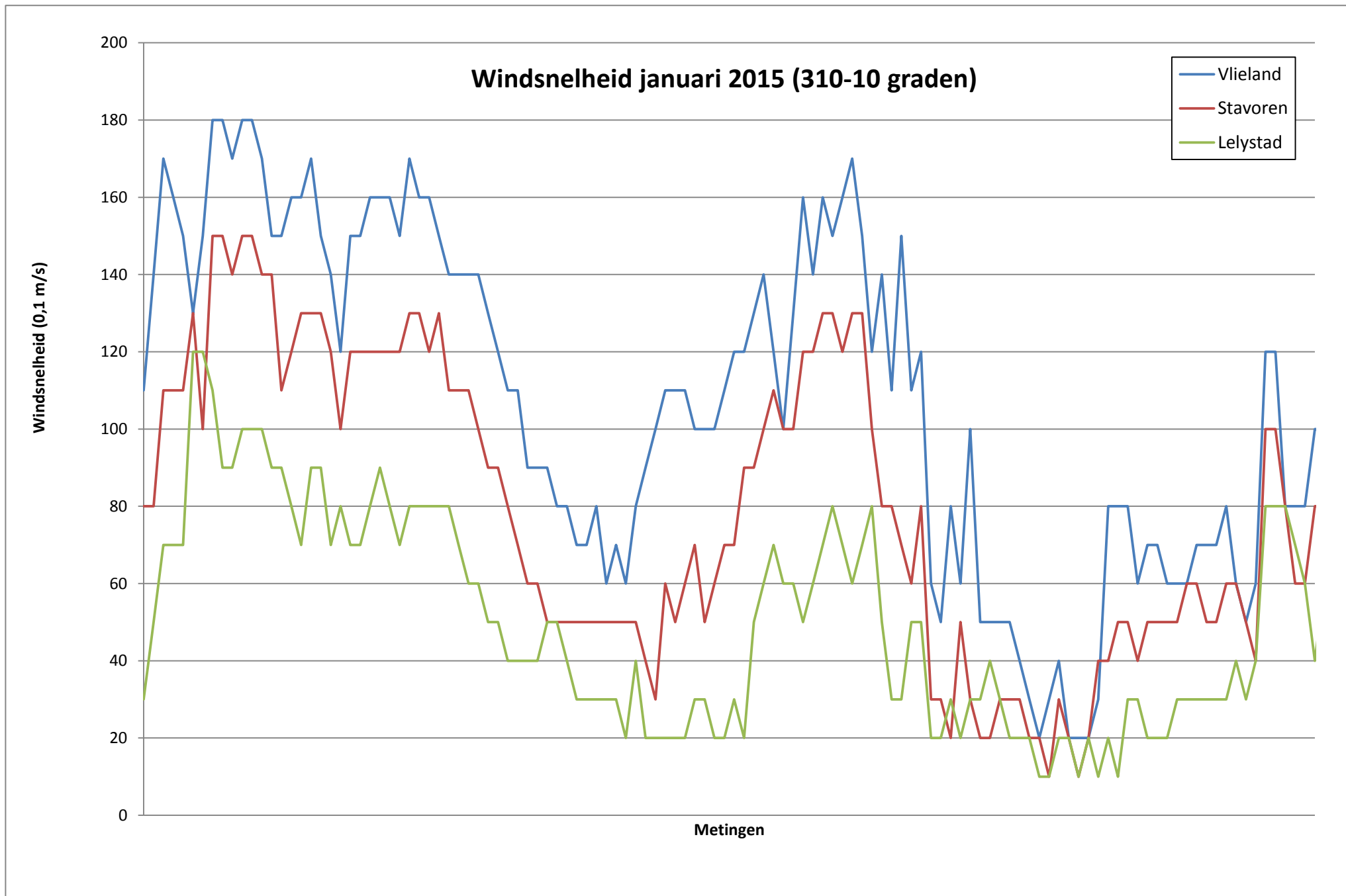
- ANWB, 2014. IJsselmeer en Markermeer 2015-2016. *Waterkaart*, 1:50000. Den Haag: ANWB BV.
- Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, 2015. *Extremen van KNMI-stations* [online] Beschikbaar via: <http://www.knmi.nl/klimatologie/kis/servlet/selection/Extremes> (geraadpleegd op 11 maart 2015).
- Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, 2015. *Uurgegevens van het weer in Nederland* [online] Beschikbaar via: http://www.knmi.nl/klimatologie/uurgegevens/select_uur.cgi (geraadpleegd op 4 maart 2015).
- Rijkswaterstaat, 2015. *Waterhoogte in cm t.o.v. NAP in oppervlaktewater* [online] Beschikbaar via: http://live.waterbase.nl/waterbase_wns.cfm (geraadpleegd op 24 februari 2015).
- Rijkswaterstaat Deltacommissie (1953), 1961. *Beschouwingen over stormvloed en getijbeweging* [pdf] Beschikbaar via: <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3Ae32906b8-a248-412a-9611-aa28d8a08231/> (geraadpleegd op 4 maart 2014).
- Saathof, L.E.P. en Verbeek, L.B., 1976. *Dynamische waterbeweging op het IJsselmeer* [pdf] Beschikbaar via: <http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:4739eae1-0642-4ba9-8b60-c72101485c88/Saathof1976a.pdf> (geraadpleegd op 4 maart 2014).
- Smith, S.D., 1988. Coefficients for sea surface wind stress, heat flux, and wind profiles as a function of wind speed and temperature. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 93, 15467-15472.

BIJLAGE A: MEETSTATIONS VOOR WIND EN WATERSTANDEN

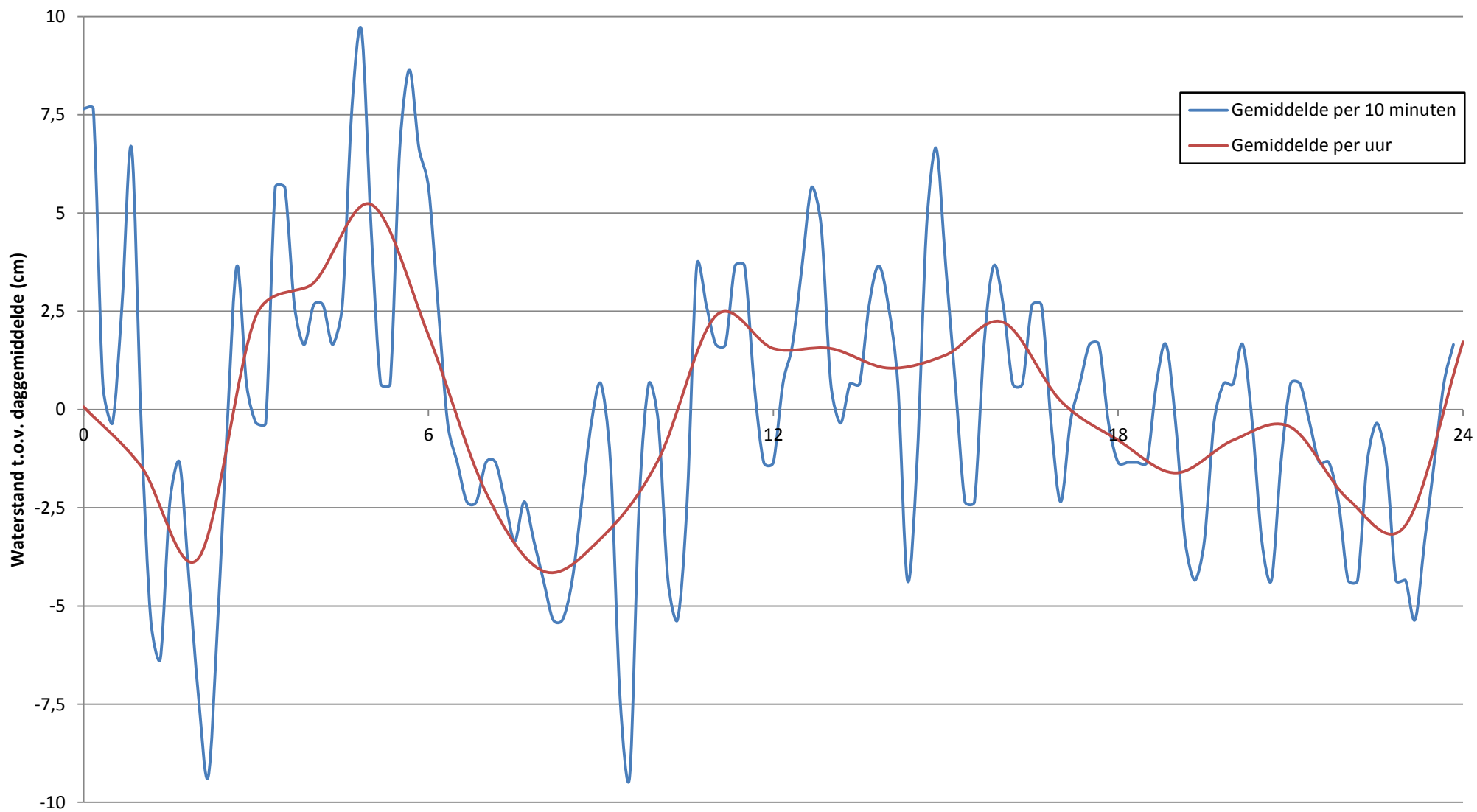


De in groen omkaderde locaties hebben een wind station. Het station van De Kooy ontbreekt op deze kaart. De locaties waar de waterstanden gemeten worden zijn in het rood gemarkeerd. Alleen de relevante meetstations zijn hierin meegenomen. De drie deelgebieden staan in kaders gemarkeerd. Bron: Google Maps.

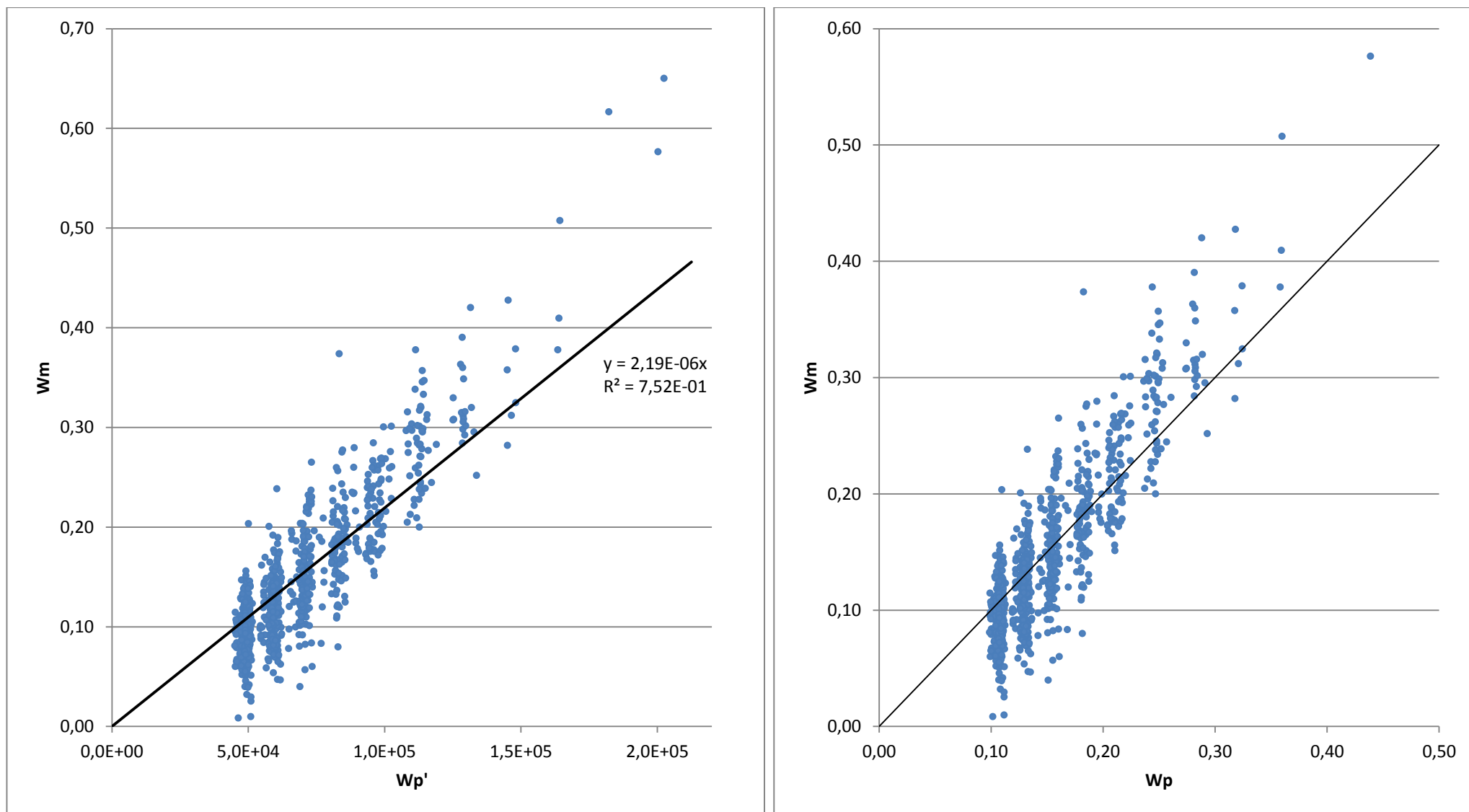




Waterstand 28 oktober 2002



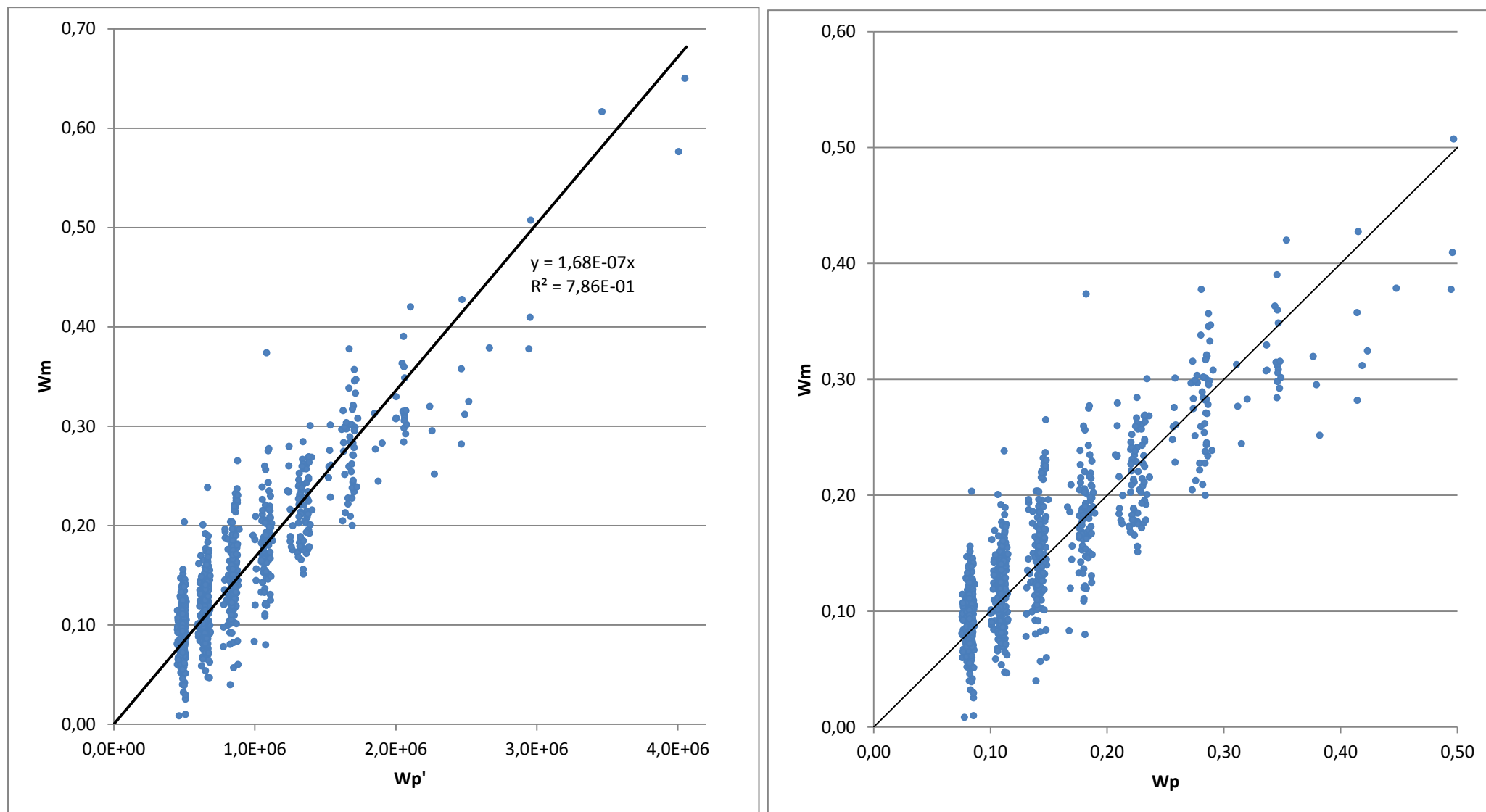
BIJLAGE E: METINGEN WINDOPZET DEELGEBIED I, U_w^2



De linker grafiek geeft het verband tussen de windopzet W_p en de voorspelde windopzet W_p' zonder κ .

In de rechter grafiek is κ wel meegenomen en gelijkgesteld aan $2,2 \cdot 10^{-6}$. De zwarte rechte lijn in de rechtergrafiek is de lijn voor perfecte voorspellingen.

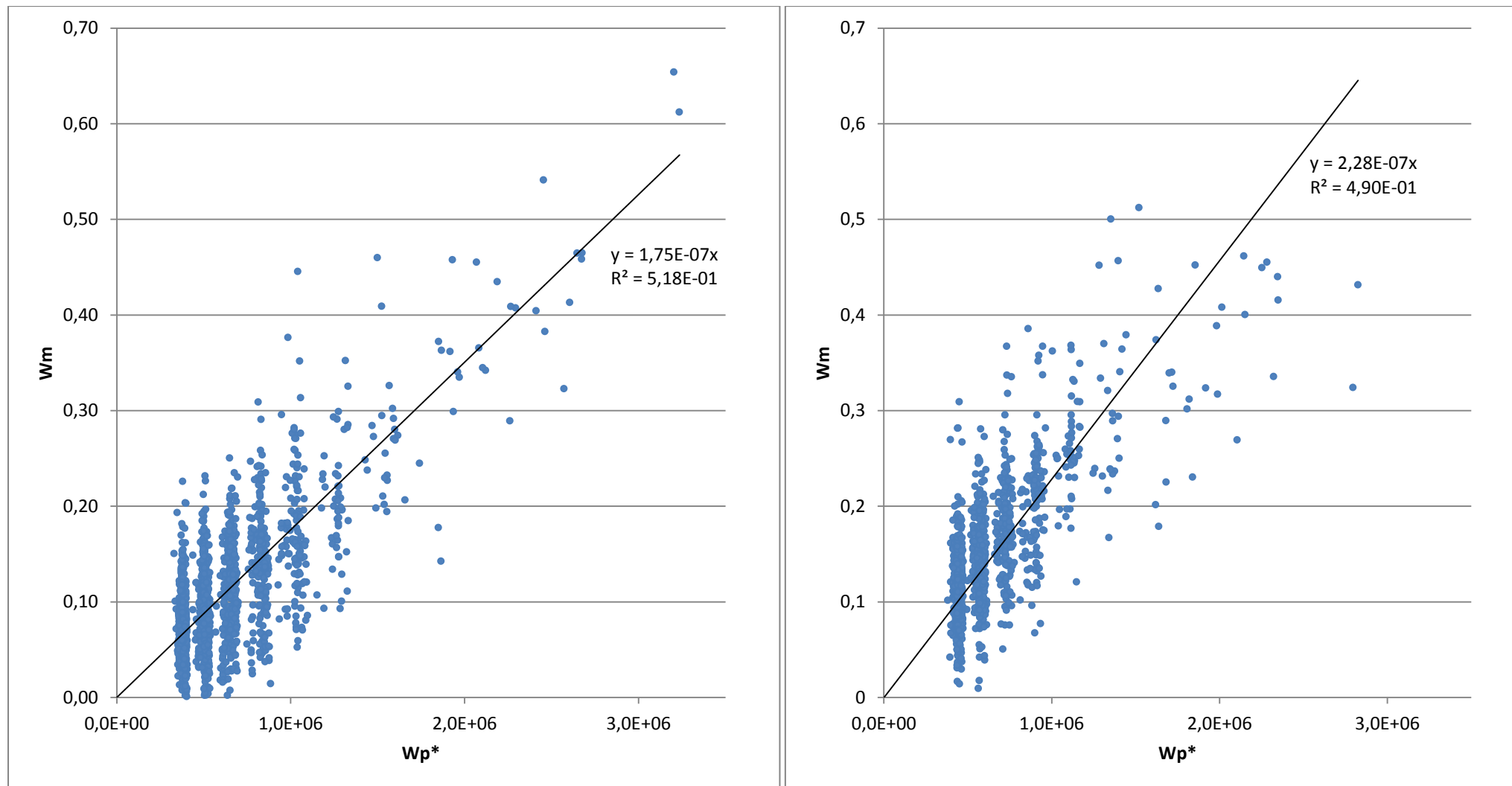
BIJLAGE F: METINGEN WINDOPZET DEELGEBIED I, U_w^3



De linker grafiek geeft het verband tussen de windopzet W_p en de voorspelde windopzet W_p' zonder κ .

In de rechter grafiek is κ wel meegenomen en gelijkgesteld aan $1,7 \cdot 10^{-7}$. De zwarte rechte lijn in de rechtergrafiek is de lijn voor perfecte voorspellingen.

BIJLAGE G: METINGEN WINDOPZET DEELGEBIEDEN II EN III, U_w^3



De linker en rechter grafiek geven het verband tussen de windopzet W_p en de voorspelde windopzet W_p^* zonder κ voor respectievelijk deelgebieden II en III.

BIJLAGE H: BEREKENINGEN STANDAARDAFWIJKING VOOR U_w^3 (DEELGEBIED I)

Richtingscoëfficiënt opgeteld

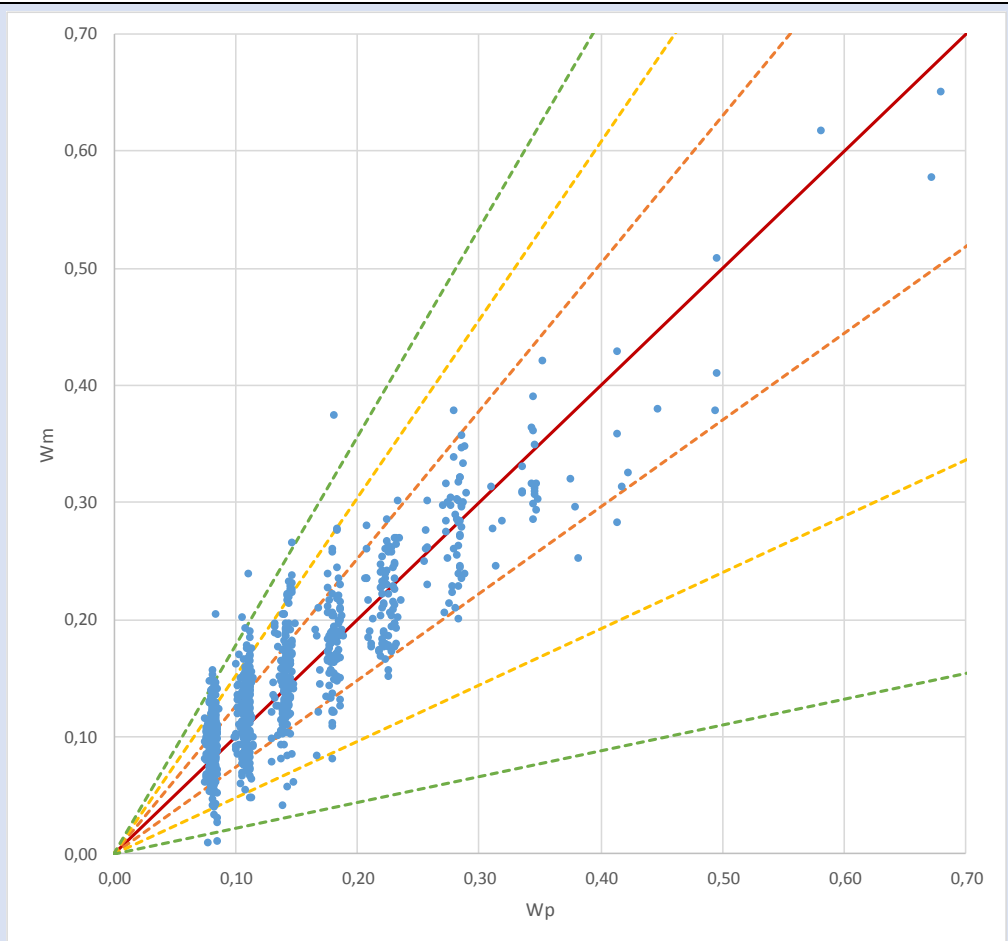
Standaardafwijking σ	0,260	26,0%
-----------------------------	-------	-------

			(0,0)	(1,1+ σ)	(0,0)	(1,1- σ)
Totaal aantal metingen	1062		0,00	1,00	0,00	1,00
Aantal metingen binnen σ	757	71,3%	0,00	1,26	0,00	0,74
Aantal metingen binnen 2σ	1002	94,4%	0,00	1,52	0,00	0,48
Aantal metingen binnen 3σ	1052	99,1%	0,00	1,78	0,00	0,22

$$W_m = (1 \pm n\sigma) \cdot W_p$$

$$W_m = (1 \pm n\sigma) \cdot K \cdot W_p'$$

$$W = ((1 \pm n\sigma) \cdot K) \cdot \left(0,5 \frac{U_w^3 F \cos(\phi)}{gh}\right)$$



De standaardafwijking is berekend uit de richtingscoëfficiënten van alle individuele meetgegevens. Daaronder is het percentage van het aantal metingen dat binnen n keer de standaardafwijking ligt gegeven. De lichtgrijze tabel bevat alleen hulpgetallen voor de lijnen in de grafiek. In de grafiek is de gemeten windopzet uitgezet tegenover de voorspelde windopzet. De rode lijn geeft de gemiddelde waarde (in dit geval is de voorspelde windopzet gelijk aan de gemeten windopzet) en de oranje, gele en groene lijnen geven respectievelijk één keer, twee keer en drie keer de standaardafwijking weer. In het kader staan de formules die gebruikt worden voor de standaardafwijking.

BIJLAGE H: BEREKENINGEN STANDAARDAFWIJKING VOOR U_w^3 (DEELGEBIED I) (VERVOLG)

Constance opgeteld

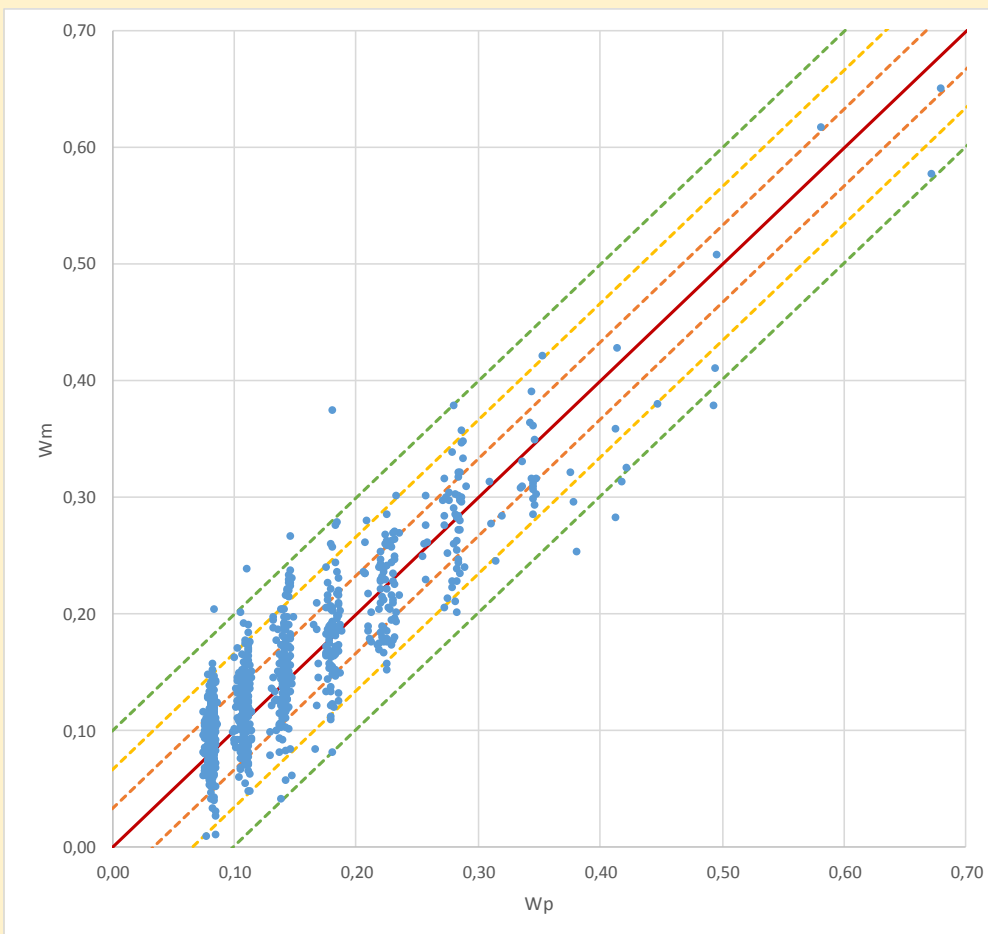
Standaardafwijking σ 0,033

			$(0, n\sigma)$	$(1, 1+n\sigma)$	$(0, -n\sigma)$	$(1, 1-n\sigma)$
Totaal aantal metingen	1062		0,00	1,00	0,00	1,00
Aantal metingen binnen σ	776	73,1%	0,03	1,03	-0,03	0,97
Aantal metingen binnen 2σ	1005	94,6%	0,07	1,07	-0,07	0,93
Aantal metingen binnen 3σ	1052	99,1%	0,10	1,10	-0,10	0,90

$$W_m = W_p \pm n\sigma$$

$$W_m = K \cdot W_p' \pm n\sigma$$

$$W = K \cdot \left(0,5 \frac{U_w^3 F \cos(\phi)}{gh} \right) \pm n\sigma(?)$$



De standaardafwijking is berekend uit de verticale afwijking van alle individuele meetgegevens t.o.v. de gemiddelde waarde. Daaronder is het percentage van het aantal metingen dat binnen n keer de standaardafwijking ligt gegeven. De lichtgrijze tabel bevat alleen hulpgetallen voor de lijnen in de grafiek. In de grafiek is de gemeten windopzet uitgezet tegenover de voorspelde windopzet. De rode lijn geeft de gemiddelde waarde (in dit geval is de voorspelde windopzet gelijk aan de gemeten windopzet) en de oranje, gele en groene lijnen geven respectievelijk één keer, twee keer en drie keer de standaardafwijking weer. In het kader staan de formules die gebruikt worden voor de standaardafwijking.

BIJLAGE I: BEREKENINGEN STANDAARDAFWIJKING VOOR U_w^2 (DEELGEBIED I)

Richtingscoëfficiënt opgeteld

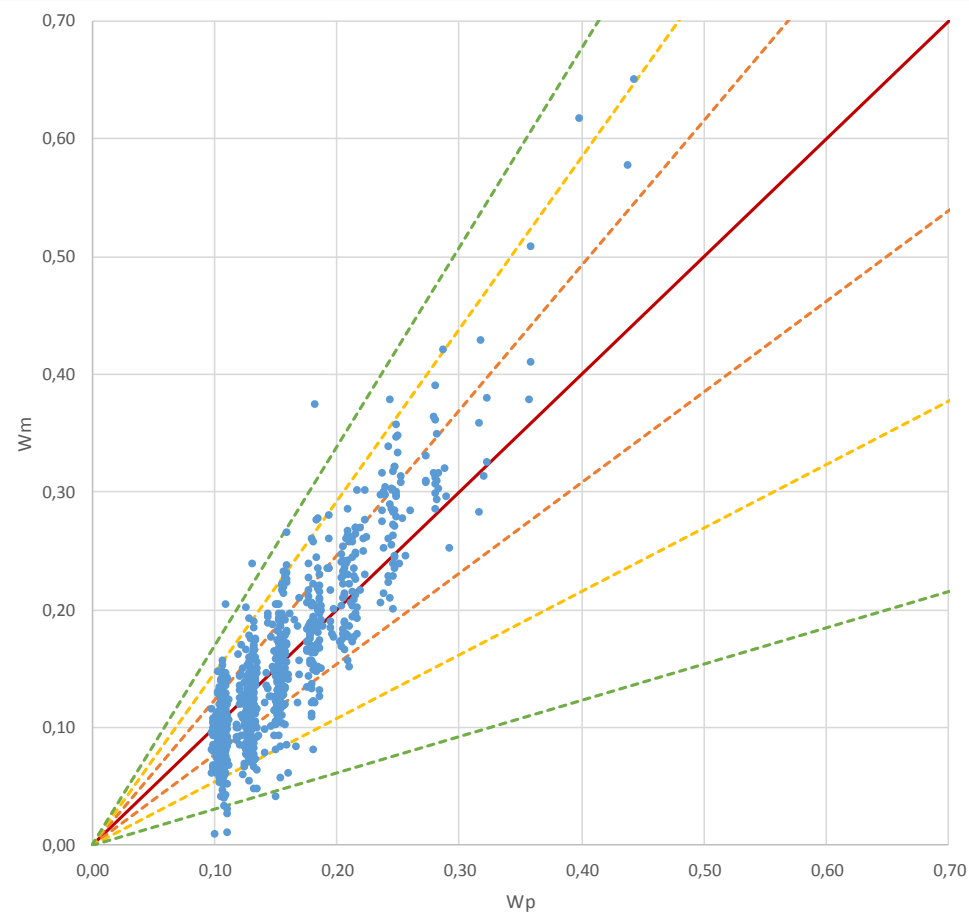
Standaardafwijking σ	0,231	23,1%
-----------------------------	--------------	-------

			(0,0)	(1,1+ σ)	(0,0)	(1,1- σ)
Totaal aantal metingen	1062		0,00	1,00	0,00	1,00
Aantal metingen binnen σ	727	68,5%	0,00	1,23	0,00	0,77
Aantal metingen binnen 2σ	1009	95,0%	0,00	1,46	0,00	0,54
Aantal metingen binnen 3σ	1053	99,2%	0,00	1,69	0,00	0,31

$$W_m = (1 \pm n\sigma) \cdot W_p$$

$$W_m = (1 \pm n\sigma) \cdot \kappa \cdot W_p'$$

$$W = ((1 \pm n\sigma) \cdot \kappa) \cdot \left(0,5 \frac{U_w^2 F \cos(\phi)}{gh}\right)$$



De standaardafwijking is berekend uit de richtingscoëfficiënten van alle individuele meetgegevens. Daaronder is het percentage van het aantal metingen dat binnen n keer de standaardafwijking ligt gegeven. De lichtgrijze tabel bevat alleen hulpgetallen voor de lijnen in de grafiek. In de grafiek is de gemeten windopzet uitgezet tegenover de voorspelde windopzet. De rode lijn geeft de gemiddelde waarde (in dit geval is de voorspelde windopzet gelijk aan de gemeten windopzet) en de oranje, gele en groene lijnen geven respectievelijk één keer, twee keer en drie keer de standaardafwijking weer. In het kader staan de formules die gebruikt worden voor de standaardafwijking.

BIJLAGE I: BEREKENINGEN STANDAARDAFWIJKING VOOR U_w^2 (DEELGEBIED I) (VERVOLG)

Constance opgeteld

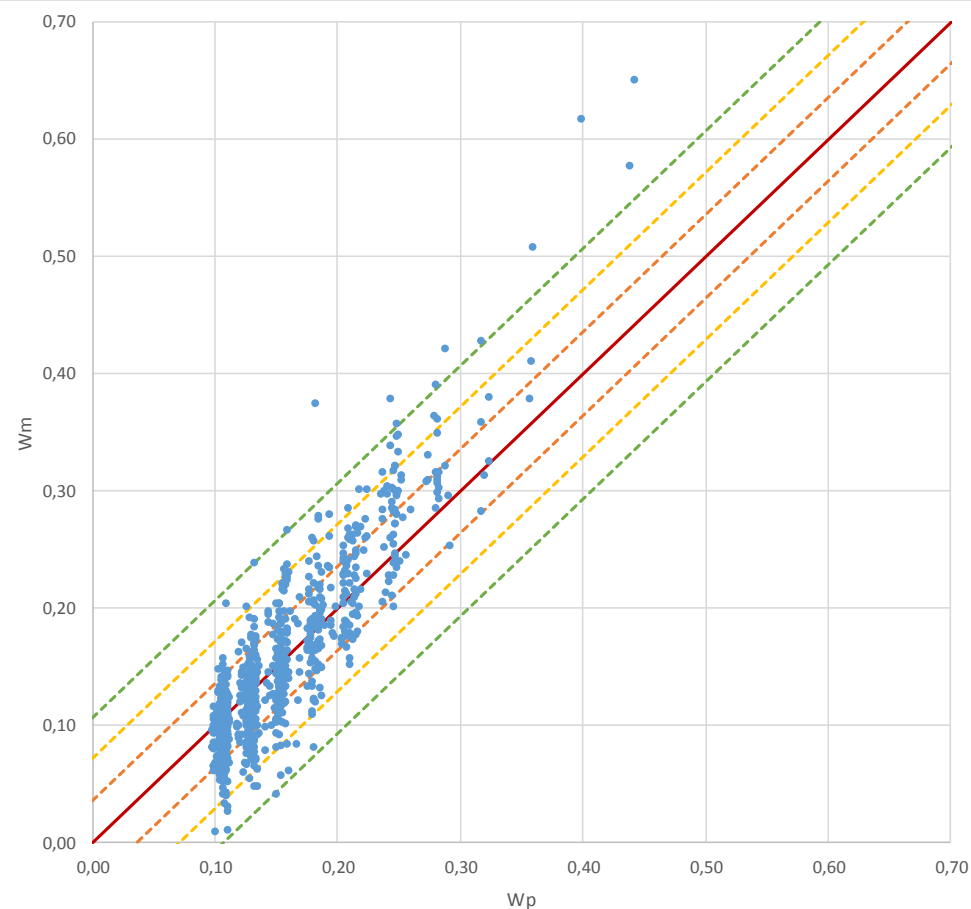
Standaardafwijking σ 0,036

		$(0,n\sigma)$	$(1,1+n\sigma)$	$(0,-n\sigma)$	$(1,1-n\sigma)$
Totaal aantal metingen	1062	0,00	1,00	0,00	1,00
Aantal metingen binnen σ	773 72,8%	0,04	1,04	-0,04	0,96
Aantal metingen binnen 2σ	1012 95,3%	0,07	1,07	-0,07	0,93
Aantal metingen binnen 3σ	1051 99,0%	0,11	1,11	-0,11	0,89

$$W_m = W_p \pm n\sigma$$

$$W_m = \kappa \cdot W_p^* \pm n\sigma$$

$$W = \kappa \cdot \left(0,5 \frac{U_w^2 F \cos(\phi)}{gh} \right) \pm n\sigma(?)$$



De standaardafwijking is berekend uit de verticale afwijking van alle individuele meetgegevens t.o.v. de gemiddelde waarde. Daaronder is het percentage van het aantal metingen dat binnen n keer de standaardafwijking ligt gegeven. De lichtgrijze tabel bevat alleen hulpgetallen voor de lijnen in de grafiek. In de grafiek is de gemeten windopzet uitgezet tegenover de voorspelde windopzet. De rode lijn geeft de gemiddelde waarde (in dit geval is de voorspelde windopzet gelijk aan de gemeten windopzet) en de oranje, gele en groene lijnen geven respectievelijk één keer, twee keer en drie keer de standaardafwijking weer. In het kader staan de formules die gebruikt worden voor de standaardafwijking.

BIJLAGE J: BEREKENINGEN STANDAARDAFWIJKING VOOR U_w^3 (DEELGEBIED II)

Constance opgeteld

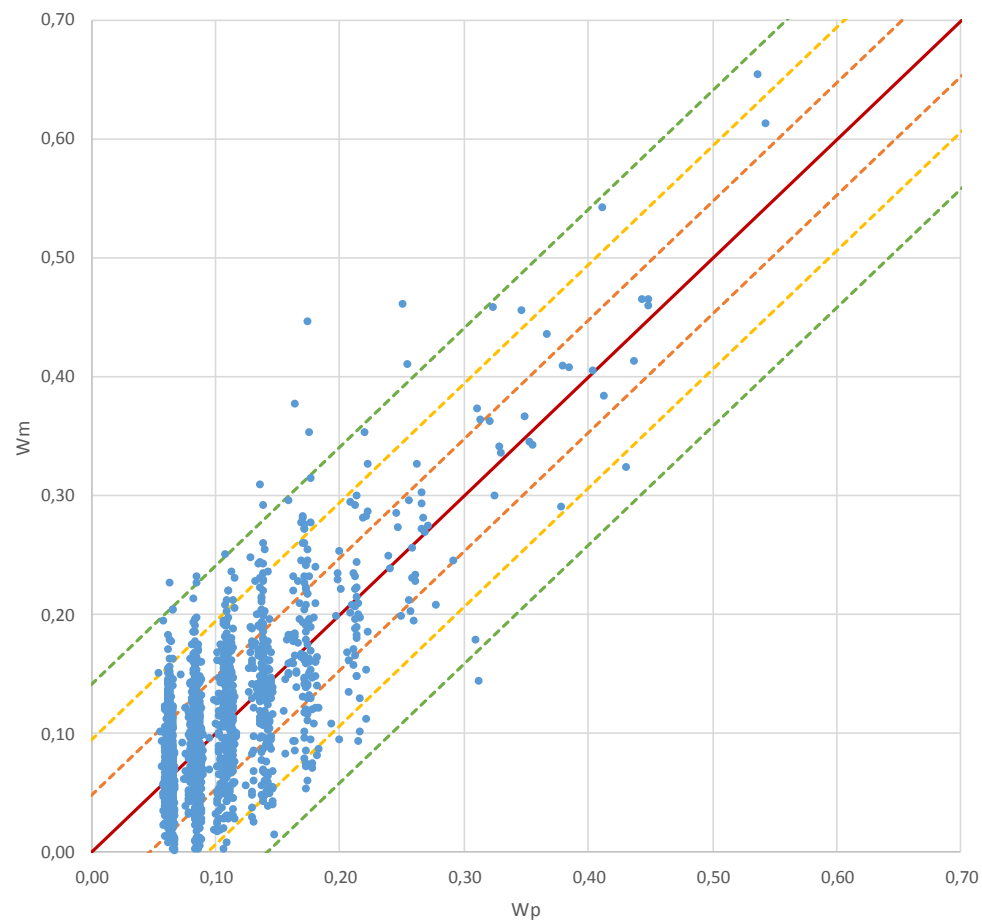
Standaardafwijking σ **0,047**

			(0,n σ)	(1,1+n σ)	(0,-n σ)	(1,1-n σ)
Totaal aantal metingen	1808		0,00	1,00	0,00	1,00
Aantal metingen binnen σ	1235	68,3%	0,05	1,05	-0,05	0,95
Aantal metingen binnen 2σ	1718	95,0%	0,09	1,09	-0,09	0,91
Aantal metingen binnen 3σ	1798	99,4%	0,14	1,14	-0,14	0,86

$$W_m = W_p \pm n\sigma$$

$$W_m = K \cdot W_p' \pm n\sigma$$

$$W = K \cdot \left(0,5 \frac{U_w^3 F \cos(\phi)}{gh} \right) \pm n\sigma(?)$$



De standaardafwijking is berekend uit de verticale afwijking van alle individuele meetgegevens t.o.v. de gemiddelde waarde. Daaronder is het percentage van het aantal metingen dat binnen n keer de standaardafwijking ligt gegeven. De lichtgrijze tabel bevat alleen hulpgetallen voor de lijnen in de grafiek. In de grafiek is de gemeten windopzet uitgezet tegenover de voorspelde windopzet. De rode lijn geeft de gemiddelde waarde (in dit geval is de voorspelde windopzet gelijk aan de gemeten windopzet) en de oranje, gele en groene lijnen geven respectievelijk één keer, twee keer en drie keer de standaardafwijking weer. In het kader staan de formules die gebruikt worden voor de standaardafwijking.