Opdrachtgever: **Stowa**

Bureaustudie ter validatie van golfgroeiformules voor gelimiteerde strijklengte

Voor veiligheidstoetsing van regionale keringen

HKV LIJN IN WATER

PR2160.20 januari 2015

Opdrachtgever: **Stowa**

Bureaustudie ter validatie van golfgroeiformules voor gelimiteerde strijklengte

Voor veiligheidstoetsing van regionale keringen

Auteurs:
A.C. Nederpel
W. van Balen

PR2160.20 januari 2015

Inhoud

Lijst van tabellen i

Lijst van figuren iii

1 Inleiding 1
1.1 Aanleiding 1
1.2 Doelstelling 2
1.3 Totstandkoming 2
1.4 Leeswijzer 2

2 Toepassingsgebied 3
2.1 Hoogtetoets 3
2.1.1 Faalmechanisme 3
2.1.2 Beoordelingswijze 4
2.2 Gebiedskenmerken 6
2.2.1 Kenmerken keringen 6
2.2.2 Windsnelheden 7
2.2.3 Strijklengte 8
2.2.4 Waterdiepte 8

3 Golfgroeikrommes 9
3.1 Beschrijving 9
3.2 Visualisatie van de formules 11

4 Golfmetingen 15
4.1 Beschrijving golfmetingen 15
4.1.1 IJsselmeer en Slotermeer 15
4.1.2 Lake George 17
4.2 Geschikte datasets 18
4.2.1 IJsselmeer en Slotermeer 18
4.2.2 Lake George 18
4.3 Karakterisering van de gebruikte golfdata 19
4.4 Consequenties voor de analyse 21

5 Validatie golfgroeiformules 23
5.1 Golfhoogte 23
5.1.1 Beschouwing van alle beschikbare metingen 23
5.1.2 Filtering op basis van dimensieloze strijklengtes 28
5.1.3 Filtering op basis van diep/ondiep water 29
5.1.4 Filtering op basis van kenmerken van het regionale systeem 30
5.1.5 De rol van verschillen in ruwheid 31
5.1.6 Evaluatie golfhoogte 32
5.2 Piekperiode 32
5.2.1 Beschouwing van alle beschikbare metingen 32
5.2.2 Filtering op basis van dimensieloze strijklengte 36
5.2.3 Filtering op basis van diep/ondiep water 38
5.2.4 Filtering op basis van kenmerken van het regionale systeem 39

5.2.5 Evaluatie piekperiode 40
5.3 Conclusies 40

6 Nadere analyse 43
6.1 Onzekerheden in de metingen 43
6.1.1 Meetonzekerheden 43
6.1.2 Windsnelheid 43
6.1.3 Strijklengte 44
6.2 Onzekerheden in de formuleparameters 45
6.3 Het nut van nieuwe meetcampagnes 49

7 Conclusies en aanbevelingen 51
7.1 Terugblik 51
7.2 Conclusies 51
7.3 Aanbevelingen 54
7.4 Slotsom 54

8 Referenties 55

Bijlage A: Memo opmerkingen klankbordgroep op concept-rapportage 59

Lijst van tabellen

Tabel 1: Parameters golfoverslaggrafieken uit [Stowa, 2007]. 5
Tabel 2: Gemiddelde en standaardafwijking van de afwijkingen tussen de gemeten en berekende dimensieloze golfhoogte voor de beschutte locatie FL25 en de niet-beschutte locatie FL37. 32
Tabel 3: Gemiddelde en standaardafwijking van de afwijkingen tussen de gemeten en berekende dimensieloze golfhoogte. 41
Tabel 4: Gemiddelde en standaardafwijking van de afwijkingen tussen de gemeten en berekende dimensieloze piekperiode. 41
Tabel 5: Parameters p_1 t/m p_6 voor de formules voor de golfhoogtes en parameters q_1 t/m q_6 voor de formules voor de piekperiode. 46

Lijst van figuren

Figuur 1-1: Storm in januari 2007 bij Westeinderplassen. 1
Figuur 2-1: Schematisatie van de dijkhoogte in relatie tot de relevante belasting. 3
Figuur 2-2: Golfoverslagformule met beschrijving van de parameters, overgenomen uit [TAW, 2002]. 4
Figuur 2-3: Beoordelingsschema voor golfoverslag, overgenomen uit [Stowa, 2007]. 5
Figuur 3-1: Curven voor de relatie tussen de dimensieloze golfhoogte en de dimensieloze strijklengte, bij een willekeurige windsnelheid. In blauw: curven volgens Breugem & Holthuijsen, in rood: curven volgens Young & Verhagen, in grijs: curven volgens Bretschneider, in zwart: lijn volgens Kahma & Calkoen. De getallen aan de rechterzijde geven dimensieloze dieptes aan. 12
Figuur 3-2: Curven voor de relatie tussen de dimensieloze golfperiode en de dimensieloze strijklengte, bij een willekeurige windsnelheid. In blauw: curven volgens Breugem & Holthuijsen, in rood: curven volgens Young & Verhagen, in grijs: curven volgens Bretschneider, in zwart: lijn volgens Kahma & Calkoen. De getallen aan de rechterzijde geven dimensieloze dieptes aan. 13
Figuur 4-1: Meetlocaties IJsselmeer en Slotermeer uit [RIZA, 2007]. 16
Figuur 4-2: Meetstations Lake George uit [Verhagen, 1999]. 17
Figuur 4-3: Golfsteilheid voor alle gebruikte meetdata. De zwarte lijn geeft de parameterisatie volgens Kahma en Calkoen [Kahma en Calkoen, 1992]. 20
Figuur 4-4: Relatie tussen de golfsteilheid en de dimensieloze golfhoogte, voor alle gebruikte meetdata. 20
Figuur 4-5: Relatie tussen de dimensieloze golfhoogte tegen de dimensieloze waterdiepte, voor alle gebruikte meetdata. 21
Figuur 5-1: Dimensieloze golfhoogte uitgezet tegen de dimensieloze strijklengte, geordend naar dimensieloze diepte. De doorgetrokken lijnen representeren de formule van Bretschneider bij de gegeven waarde van de dimensieloze diepte. De punten representeren alle geanalyseerde meetdata. 23
Figuur 5-2: Dimensieloze golfhoogte uitgezet tegen de dimensieloze strijklengte, geordend naar dimensieloze diepte. De doorgetrokken lijnen representeren de formule van Young & Verhagen bij de gegeven waarde van de dimensieloze diepte. De punten representeren alle geanalyseerde meetdata. 24
Figuur 5-3: Dimensieloze golfhoogte uitgezet tegen de dimensieloze strijklengte, geordend naar dimensieloze diepte. De doorgetrokken lijnen representeren de formule van Breugem & Holthuijsen bij de gegeven waarde van de dimensieloze diepte. De punten representeren alle geanalyseerde meetdata. 24
Figuur 5-4: Relatieve afwijking in dimensieloze golfhoogte tussen formules en meetdata, uitgezet tegen de strijklengte. Links: ordening naar dimensieloze diepte, rechts: ordening naar locatie. 25
Figuur 5-5: Illustratie van het principe waarmee de gemeten waarden met de berekende waarden kunnen worden vergeleken. 26
Figuur 5-6: Linker figuren: gemeten golfhoogtes uitgezet tegen de berekende golfhoogtes, volgens de drie golfgroeiformules. Rechter figuren: verdeling van de afwijkingen tussen gemeten en berekende waarden, inclusief de gemiddelde afwijking en de standaardafwijking. 27
Figuur 5-7: Afwijkingen tussen gemeten golfhoogtes en formules, waarbij een selectie is toegepast op basis van dimensieloze strijklengte (kleiner dan 200, dimensieloos). 28
Figuur 5-8: Afwijkingen tussen gemeten golfhoogtes en formules, waarbij een selectie is toegepast op basis van dimensieloze diepte (links diep: $H_s/d < 0.2$, rechts ondiep: $H_s/d > 0.3$). 29

Figuur 5-9: Meetdata die voldoen aan de criteria U_{10} > 17 m/s, d < 3 m èn F < 5000 m, vergeleken met de drie golfgroeiformules, bij een dimensieloze diepte van 0.04 (ter illustratie). 30
Figuur 5-10: Links: gemeten golfhoogte versus de berekende golfhoogte, voor de drie golfgroeiformules. Rechts: histogram waarin de percentuele afwijking van de berekening ten opzichte van de meting is weergegeven voor de formule van Breugem & Holthuijsen. 31
Figuur 5-11: Schematische voorstelling van het verschil in omstandigheden tussen FL25 en FL37. Bij FL25 is er sprake van een land/water overgang, bij FL37 is er sprake van een water/water overgang, gescheiden door een dijk. 31
Figuur 5-12: Dimensieloze piekperiode uitgezet tegen de dimensieloze strijklengte, geordend naar dimensieloze diepte. De doorgetrokken lijnen representeren de formule van Bretschneider bij de gegeven waarde van de dimensieloze diepte. De punten representeren alle geanalyseerde meetdata. 33
Figuur 5-13: Dimensieloze piekperiode uitgezet tegen de dimensieloze strijklengte, geordend naar dimensieloze diepte. De doorgetrokken lijnen representeren de formule van Young & Verhagen bij de gegeven waarde van de dimensieloze diepte. De punten representeren alle geanalyseerde meetdata. 33
Figuur 5-14: Dimensieloze piekperiode uitgezet tegen de dimensieloze strijklengte, geordend naar dimensieloze diepte. De doorgetrokken lijnen representeren de formule van Breugem & Holthuijsen bij de gegeven waarde van de dimensieloze diepte. De punten representeren alle geanalyseerde meetdata. 34
Figuur 5-15: Relatieve afwijking in dimensieloze piekperiode tussen formules en meetdata, uitgezet tegen de strijklengte. Links: ordening naar dimensieloze diepte, rechts: ordening naar locatie. 35
Figuur 5-16: Linker figuren: gemeten piekperiodes uitgezet tegen de berekende golfhoogtes, volgens de drie golfgroeiformules. Rechter figuren: verdeling van de afwijkingen tussen gemeten en berekende waarden, inclusief de gemiddelde afwijking en de standaardafwijking. 36
Figuur 5-17: Afwijkingen tussen gemeten piekperiodes en formules, waarbij een selectie is toegepast op basis van dimensieloze strijklengte (kleiner dan 200). 37
Figuur 5-18: Afwijkingen tussen gemeten piekperiodes en formules, waarbij een selectie is toegepast op basis van dimensieloze diepte (links diep: H_s/d < 0.2, rechts ondiep: H_s/d > 0.3). 38
Figuur 5-19: Meetdata die voldoen aan de criteria U_{10} > 17 m/s, d < 3 m èn F < 5000 m, vergeleken met de drie golfgroeiformules, bij een dimensieloze diepte van 0.04 (ter illustratie). 39
Figuur 5-20: Links: gemeten piekperiode versus de berekende piekperiode, voor de drie golfgroeiformules. Rechts: histogram waarin de percentuele afwijking van de berekening ten opzichte van de meting is weergegeven voor de formule van Bretschneider. 40
Figuur 6-1: Bepaling van de effectieve strijklengte op basis van een waaier rondom de beschouwde windrichting. 44
Figuur 6-2: Selectie van de gemeten golfhoogtes (bij een dimensieloze diepte tussen 0.3 en 0.4), uitgezet tegen de dimensieloze strijklengte. De blauwe lijn representeert de formule volgens Breugem & Holthuijsen met de daarbij horende waarde van p_3. De grijze lijnen representeren de formule van Breugem & Holthuijsen met een alternatieve waarde voor p_3. 47
Figuur 6-3: Golfoverslaggegevens uit metingen met een gemiddelde en 5% onder- en overschrijdingslijnen en met een aanduiding van het toepassingsgebied; brekende golven (overgenomen uit: [TAW, 2002], figuur 27). 48
Figuur 6-4: Golfoverslagdebiet bij brekende golven (overgenomen uit: [TAW, 2002], figuur 19)..... 49

1 Inleiding

In dit eerste hoofdstuk wordt het kader geschetst waarin de studie naar golfgroeiformules is geplaatst.

1.1 Aanleiding

In het Ontwikkelingsprogramma Regionale Waterkeringen is de Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale waterkeringen [Stowa, 2007] ontwikkeld. Met deze leidraad kan de veiligheid van regionale keringen door de verschillende beheerders op uniforme wijze worden beoordeeld aan de gestelde veiligheidsnorm. De leidraad beschrijft onder andere de systematiek voor het toetsen op veiligheid van de hoogte van keringen.



Figuur 1-1: Storm in januari 2007 bij Westeinderplassen.

Bij het beoordelen van de hoogte van een kering zijn onder andere golfrandvoorwaarden onder extreme windcondities nodig. Golven die over de kering slaan kunnen de kruin en het binnentalud aantasten. Dit kan leiden tot afname van de stabiliteit van de kering. In de toetsing wordt beoordeeld of de hoogte van de kering voldoende veiligheid biedt tegen overslaande golven. De in rekening te brengen golfrandvoorwaarden onder maatgevende omstandigheden verschillen per locatie en kunnen worden bepaald met een golfgroeiformule.

Het is gebruikelijk om bij de toetsing van regionale kering gebruik te maken van de golfgroeiformule van Bretschneider [CERC, 1973]. De leidraad introduceert de formule van Young & Verhagen [Verhagen, 1999] als alternatief voor het bepalen van de golfparameters. In de leidraad is het voornemen opgenomen om voor de ontwikkeling van een definitieve versie van de leidraad nader onderzoek te doen naar de toepasbaarheid van de te gebruiken golfgroeiformules. Uit het oogpunt van betrouwbaarheid is het nodig om de formule aan de hand van metingen te verifiëren. Deze studie beschrijft deze verificatie. Naast Bretschneider en

Young & Verhagen zijn ook de krommes van Breugem & Holthuijsen [Breugem en Holthuijsen, 2007] in dit onderzoek opgenomen.

De golfgroeiformules van Kahma & Calkoen [Kahma en Calkoen, 1992], [Kahma en Calkoen, 1994] komen in dit onderzoek slechts zijdelings ter sprake. Er is namelijk in overleg met de klankbordgroep besloten om deze niet nadrukkelijk te beschouwen. De reden hiervoor is het feit dat de formule bedoeld is voor dimensieloze strijklengtes groter dan 10^2. Hiermee valt de formule relatief snel buiten het toepassingsbereik voor golfgroei in het regionale systeem. Bovendien kent de formule geen diepteafhankelijkheid en is daarmee niet geschikt voor toepassing op relatief ondiep water. De formule voldoet niet aan de algemene toepasbaarheid in het regionale systeem.

1.2 Doelstelling

Het doel van de studie is om de golfgroeiformules te valideren voor gelimiteerde strijklengte voor toepassing in de hoogtetoets voor regionale waterkeringen.

1.3 Totstandkoming

Deze studie is uitgevoerd door HKV LIJN IN WATER voor de STOWA. Uitgangspunten, analyses en resultaten zijn afgestemd met een klankbordgroep bestaande uit de volgende experts op het gebied van golven:

- J. Groeneweg (Deltares);
- M. Bottema (RWS Waterdienst);
- G.Ph. van Vledder (TU Delft);
- L.A. Verhagen (Qolor).

De conceptversie van deze rapportage is verschenen in augustus 2014. Afronding van de studie is kort daarna uitgesteld, gezien de destijds lopende discussie als gevolg van nieuwe inzichten rondom golfoverslag. Uiteindelijk is besloten om de rapportage als achtergronddocument uit te brengen. Gezien de veranderde relevantie en noodzaak waaronder de studie gestart is, zijn de opmerkingen van de klankbordgroep niet verwerkt door de gehele rapportage aan te passen, maar is er voor gekozen om deze opmerkingen als afzonderlijke memo in de bijlage op te nemen.

1.4 Leeswijzer

De volgende aspecten komen aan bod:

- Hoofdstuk 2 beschrijft het toepassingsgebied van de golfgroeiformule.
- Hoofdstuk 3 beschrijft de verschillende golfgroeiformules die in dit onderzoek beschouwd worden.
- Hoofdstuk 4 geeft een toelichting op de beschikbare golfmetingen en gaat in op de geschikte datasets voor deze studie.
- Hoofdstuk 5 beschrijft of de golfgroeiformules te relateren zijn aan de gemeten data.
- Hoofdstuk 6 gaat in op de onzekerheden in metingen en de golfgroeiformules.
- Hoofdstuk 7 sluit af met conclusies en aanbevelingen.
- In de bijlage is tot slot nog een memo toegevoegd met daarin opmerkingen van de klankbordgroep op de conceptversie van deze rapportage.

2 Toepassingsgebied

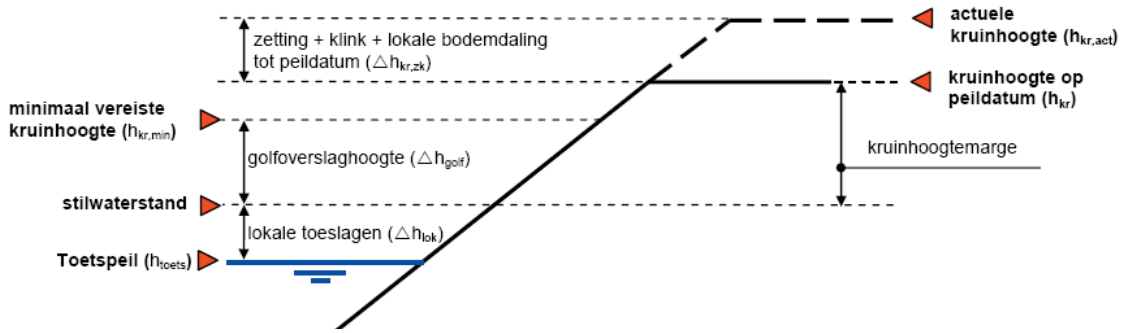
Dit hoofdstuk beschrijft het toepassingsgebied van de golfgroeiformule. In eerste instantie beschrijft paragraaf 2.1 de hoogtetoets uit de leidraad. Vervolgens gaat paragraaf 2.2 in op verschillende kenmerken in het regionale systeem in relatie tot de parameters die bij golfgroei van belang zijn, zoals windsnelheid, waterdiepte en strijklengte.

2.1 Hoogtetoets

In deze paragraaf wordt ingegaan op het beschouwde faalmechanisme bij de hoogtetoets en de beoordelingswijze ervan.

2.1.1 Faalmechanisme

De hoogtetoets bekijkt of de kans op het bezwijken van de waterkering door het optreden van overlopen en overslag voldoende klein is. Voor de beoordeling van de kruinhoogte van een dijk wordt een maatgevende waterstand, een verwachte kruinhoogtedaling (door zetting, klink of bodemdaling), lokale toeslagen als dwarsopwaaiing en de golfoverslaghoogte in rekening gebracht (zie Figuur 2-1 voor een schematische weergave).



Figuur 2-1: Schematisatie van de dijkhoogte in relatie tot de relevante belasting.

De golfoverslaghoogte is gebaseerd op windgolven. Het is een hoogte die in rekening moet worden gebracht om te beoordelen of de kruin hoog genoeg is. Deze golfoverslaghoogte is afhankelijk van het toelaatbare overslagdebiet van de kering. Voor het toelaatbaar overslagdebiet wordt veelal een waarde tussen 0.1 l/m/s en 10 l/m/s genomen, afhankelijk van de sterkte van de dijkbekleding op de kruin en binnentalud en het toelaatbaar waterbezwaar in het achterland.

Het toelaatbare overslagdebiet wordt bij de toetsing vervolgens gekoppeld aan het optredend overslagdebiet. Dit optredend overslagdebiet wordt berekend aan de hand van de formule van Van der Meer, zoals is weergegeven in Figuur 2-2. Het optredend overslagdebiet is een functie van de geometrie van de dijk en de hydraulische belasting (waterstand en golven).

De golfoverslaghoogte hangt dus af van de golfhoogte onder maatgevende omstandigheden. Bovendien hangt de golfoverslaghoogte af van de eigenschappen van het buitentalud van de kering, met name de ruwheid van de bekleding (bekleding van gras, steen, asfalt ect.) en de helling van het buitentalud.

$$\frac{q}{\sqrt{g H_{m0}^3}} = \frac{0{,}067}{\sqrt{\tan\alpha}}\ \gamma_b \cdot \xi_0 \cdot \exp\left(-4{,}3\ \frac{h_k}{H_{m0}}\ \frac{1}{\xi_0 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v}\right) \quad (22)$$

met als maximum: $$\frac{q}{\sqrt{g H_{m0}^3}} = 0{,}2 \cdot \exp\left(-2{,}3\ \frac{h_k}{H_{m0}}\ \frac{1}{\gamma_f \cdot \gamma_\beta}\right) \quad (23)$$

waarin:

q	=	gemiddeld golfoverslagdebiet	[m^3/m per s]
g	=	versnelling van de zwaartekracht	[m/s^2]
H_{m0}	=	significante golfhoogte bij de teen van de dijk	[m]
ξ_0	=	brekerparameter = $\tan\alpha / \sqrt{s_0}$	[-]
s_0	=	golfsteilheid = $2.\pi.H_{m0}/(g.T^2_{m-1,0})$	[-]
$T_{m-1,0}$	=	spectrale golfperiode bij de teen van de dijk	[s]
$\tan\alpha$	=	taludhelling, zie figuur 7	[-]
h_k	=	vrije kruinhoogte boven de stilwaterlijn	[m]
γ	=	invloedsfactoren voor invloed van een berm, ruwheid, hoek van golfaanval, en een verticale wand op het talud, zie paragraaf 2.	[-]

Figuur 2-2: Golfoverslagformule met beschrijving van de parameters, overgenomen uit [TAW, 2002].

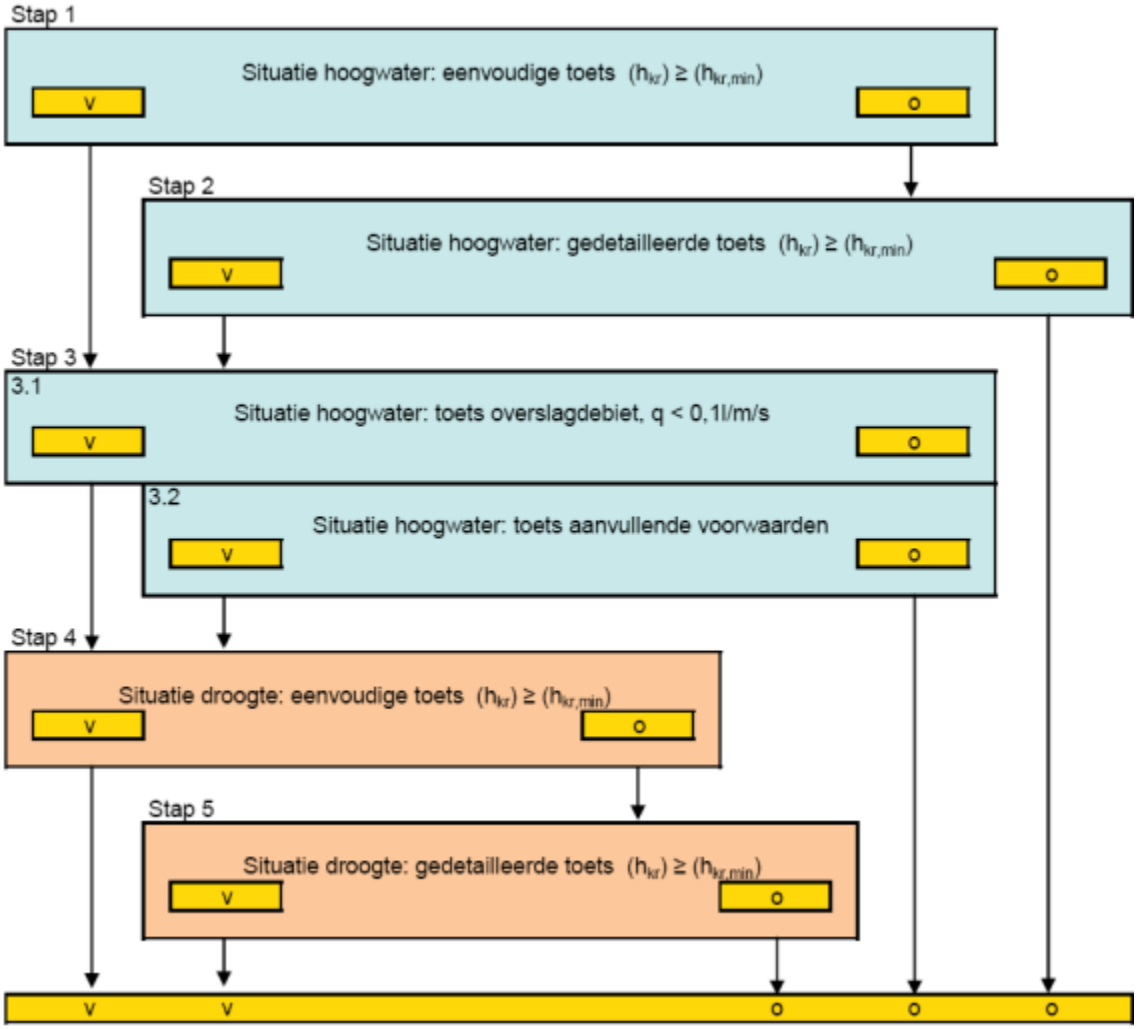
De golfhoogte die in de overslagformule gebruikt wordt, is de inkomende golfhoogte die te verwachten is bij de teen van de dijk. Deze golf wordt nog niet beïnvloed door de geometrie van de dijk. De leidraad doet de suggestie om in een gedetailleerde beoordelingswijze (zie paragraaf 2.1.2) rekening te houden met de ligging van de kade ten opzichte van de windrichting en de verdeling van de wind over de verschillende richtingen.

2.1.2 Beoordelingswijze

De wijze van beoordeling in de leidraad is dusdanig dat zo eenvoudig als redelijkerwijs mogelijk een oordeel over de veiligheid over het beschouwde faalmechanisme kan worden toegekend. De beoordelingswijze is opgedeeld in drie uitwerkingsniveaus:

- niveau 1: eenvoudige beoordeling;
- niveau 2: gedetailleerde beoordeling;
- niveau 3: geavanceerde beoordeling.

Het traject, aan de hand waarvan getoetst wordt, is schematisch weergegeven in Figuur 2-3. Dit traject bevat de diverse handelingssporen aan de hand van criteria op basis van de kruinhoogte h_{kr} en het optredend overslagdebiet q.



Figuur 2-3: Beoordelingsschema voor golfoverslag, overgenomen uit [Stowa, 2007].

Om de inspanning van de eenvoudige toetsing te beperken heeft de leidraad een aantal grafieken ontwikkeld waarmee de in rekening te brengen golfoverslaghoogte eenvoudig kan worden afgeleid. Deze grafieken zijn gebaseerd op de golfgroeiformules van Bretschneider. De grafieken zijn samengesteld voor een aantal combinaties van de relevante kenmerken. Deze combinaties zijn weergegeven in Tabel 1.

Variabele	Aanduiding	Beschouwde variatie
het overslagdebiet	Q	0,1 en 1,0 l/m/s
de maatgevende windsnelheid	u	16, 22, 24, 26, 28, 30 en 32 m/s
de waterdiepte	D	2, 3, 4, 5 7,5 en 10 m
de helling van het buitentalud	T	helling 1:2 en 1:3 (V:H);
de breedte van de boezem	B	variërend van 10 tot 5000 m

Tabel 1: Parameters golfoverslaggrafieken uit [Stowa, 2007].

Bij het gebruik van de grafieken geldt een aantal uitgangspunten. Eén van de meest essentiële uitgangspunten is dat de grafieken geen rekening houden met de ligging van de kade ten opzichte van de windrichtingen.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor een maatgevende windsnelheid voor alle windrichtingen. Er is niet beschreven op welke wijze de gebruikte maatgevende windsnelheden geïnterpreteerd dienen te worden. De strijklengte is gebaseerd op verschillende invalshoeken. Hierbij is uitgegaan van een rechtlijnig water, waarbij de keringen evenwijdig aan elkaar lopen.

Indien de eenvoudige methode niet leidt tot voldoende veiligheid, dan wordt vervolgd met een gedetailleerde toetsing. In dit niveau kan nauwkeuriger gerekend worden en kan rekening gehouden worden met specifieke kenmerken van de locatie. De leidraad doet enkele suggesties voor het bepalen van een nauwkeurigere golfoverslaghoogte, zoals:

- het beschouwen van de verdeling van de windsnelheid over de verschillende windrichtingen, in combinatie met de ligging van de kade ten opzichte van de windrichting;
- het beschouwen van eventueel aanwezige golfdempende aspecten, zoals riet, een vooroever of een ruwe bekleding van het buitentalud;
- het gedetailleerd vaststellen van de maatgevende windsnelheid, door rekening te houden met de lokale ruwheid van het landschap.

De leidraad geeft geen uitgewerkt stappenplan om deze suggesties te verwerken. Indien de toetser ook in de gedetailleerde beoordeling niet komt tot een “goed” of “voldoende”, dan kan vervolgd worden met een geavanceerde beoordeling (tenzij het voldoende duidelijk is dat de kering niet voldoet). De geavanceerde beoordelingswijze is niet beschreven, maar kan bijvoorbeeld een nadere uitwerking van de gedetailleerde beoordeling zijn, bijvoorbeeld na verzameling van aanvullende gegevens en met toepassing van bijzondere rekenmethodes. Hierbij kan gedacht worden aan simulaties met behulp van 2D-SWAN.

2.2 Gebiedskenmerken

In deze paragraaf wordt ingegaan op specifieke kenmerken van het gebied, waarin de kering gelegen is, die relevant zijn wat betreft het goed inschatten van de golfbelasting. Als meest relevante kenmerken worden de windsnelheid, de strijklengte en de waterdiepte belicht.

2.2.1 Kenmerken keringen

In Nederland ligt er circa 14.000 km aan regionale keringen. Deze zijn gelegen langs boezemsystemen en langs regionale rivieren. Onder de regionale keringen vallen ook compartimenteringskeringen. Onder normale omstandigheden worden deze keringen niet belast door water. Deze keringen vervullen echter pas hun waterkerende functie bij een doorbraak van een primaire kering.

Keringen langs smalle wateren

De meeste regionale keringen zijn gelegen langs smalle wateren met een breedte variërend van ca. 10 m tot enkele honderden meters. Over het algemeen blijkt dat de golfoverslaghoogte ten opzichte van andere aspecten slechts marginaal bijdraagt aan de minimaal benodigde kruinhoogte van de kering. Vaak is een peilstijging als gevolg van extreme neerslag in het systeem of de scheefstand de dominante factor die de minimale kruinhoogte bepaalt. Een nadere analyse om meer nauwkeurig (of minder conservatief) de golfrandvoorwaarden te bepalen zal dan in de regel niet tot significante verschillen in het beoordelingsresultaat van de kering leiden. Het nut om voor keringen langs smalle wateren meer nauwkeurig golfrandvoorwaarden af te leiden is minder aanwezig, dan voor keringen gelegen langs brede wateren of meren.

Keringen langs meren

Regionale keringen langs meren zijn voornamelijk in het westen van Nederland (Noord- en Zuid-Holland) en in Friesland gelegen. Langs deze keringen bevinden zich wateroppervlakken van enkele honderden meters tot enkele kilometers breed. Een nadere analyse van golfrandvoorwaarden kan voor deze keringen winst opleveren. Een eenvoudige beschouwing, welke mede aanleiding was tot deze studie, liet zien dat toepassing van Bretschneider of Young & Verhagen kan leiden tot significante verschillen in kruinhoogte. De golfoverslaghoogte vormt voor keringen langs meren vaak een dominante bijdrage in de hoogtetoets. Het is dan ook zinvol om voor deze keringen nauwkeurige golfrandvoorwaarden te hebben.

2.2.2 Windsnelheden

Ten behoeve van de berekening van de golfrandvoorwaarden zijn, onder andere, gegevens van windsnelheden benodigd. De leidraad geeft aan dat de provincies verantwoordelijk zijn om de windsnelheid voor maatgevende condities (normafhankelijk) vast te stellen. Voor het afleiden van deze windsnelheden geeft de leidraad handreikingen.

Voor de beschikbaarheid van statistiek van extreem hoge windsnelheden wordt verwezen naar "Windklimaat van Nederland" van [Wieringa en Rijkoort, 1983].

Als veilige benadering geeft de leidraad aan om in de toetsing uit te gaan van een maatgevende windsnelheid met een overschrijdingsfrequentie gelijk aan de veiligheidsnormfrequentie van de kering. Deze benadering is veilig, aangezien over het algemeen een maatgevende windsnelheid niet volledig is gecorreleerd aan het optreden van een hoge waterstand. Regionale keringen kennen in het algemeen een minimale veiligheidsnorm van 1/10 jaar. Windsnelheden met dergelijke terugkeertijden komen overeen met circa Beaufort 8 en hoger. Dit zijn stormachtige condities met windsnelheden vanaf 17 m/s.

Voor het bepalen van de maatgevende windsnelheid doet de leidraad twee suggesties:
1. het hanteren van één maatgevende windsnelheid zonder onderscheid naar windrichting;
2. het hanteren van één maatgevende windsnelheid per windrichting.

In de opgenomen voorbeelden en de standaardgrafieken voor de overslaghoogte wordt uitgegaan van windsnelheden tussen 12 m/s tot en met 32 m/s. De leidraad stelt beperkingen in het gebruik van deze grafieken. Voor directe aflezing is de methode dat één maatgevende windsnelheid wordt gebruikt zonder rekening te houden met windrichting. De leidraad geeft voorbeelden van de uitwerking van deze suggesties.

De leidraad doet tevens suggesties voor het gedetailleerder vaststellen van de maatgevende windsnelheid. Het is aan de toetser om nut en noodzaak van een nadere analyse van de windsnelheden aan te tonen. De volgende suggesties worden gedaan voor het gedetailleerder bepalen van de maatgevende windsnelheid:

- Het rekening houden met windsnelheid en -richting in relatie tot de oriëntatie van de kering op deze windrichting.
- De relatie tussen de windsnelheid en de rol van de wind als de oorzaak van het hoogwater (het hoogwater kan bijvoorbeeld ook door heftige regenval zijn veroorzaakt).
- De maatgevende windsnelheid op gebiedsniveau te onderzoeken. Hierbij kan gedacht worden aan eventuele reductie van de windsnelheid door ruwheid van het landschap (aanwezigheid van bomen en hoge bebouwing) of eventuele verhoging in open gebied (open water).

2.2.3 Strijklengte

In de leidraad is strijklengte gedefinieerd als de lengte waarover de wind over het wateroppervlak strijkt. Bij de hoogtetoets gaat het om de lengte van het wateroppervlak voor de kering.

Wanneer de toetser gebruik maakt van de standaard grafieken voor het bepalen van de golfoverslaghoogte wordt de maatgevende breedte gehanteerd. Hierbij moet de bijbehorende strijklengte vanuit verschillende invalshoeken berekend zijn op basis van het uitgangspunt van een rechtlijnige water waarbij de keringen evenwijdig aan elkaar lopen.

Bij grote breedtevariatie over de keringlengte wordt de kering ingedeeld in kleinere subvakken. Om van deze grafieken ook gebruik te maken bij sterk onregelmatige vorm van de breedte (en dus strijklengte) geeft de leidraad een methode om een equivalente breedte te bepalen. Hierbij dient voor de verschillende hoeken van inval de strijklengte te worden bepaald, welke vervolgens omgerekend moet worden naar een equivalente breedte van het water. Uit de verschillende resulterende breedten dient vervolgens de grootste of maatgevende breedte te worden geselecteerd.

Hiernaast verwijst de leidraad naar een te hanteren excelsheet van Wetterskip Fryslân voor het bepalen van de golfoverslaghoogte. Voor de in rekening te brengen strijklengte wordt de effectieve strijklengte gehanteerd die is afgestemd op de configuratie van het vóór de waterkering gelegen wateroppervlak [Holthuijsen, 1980]. Bij het toepassen van golfgroeikrommen in het regionale systeem, kan de strijklengte variëren van 10 meter in smalle wateren tot orde grootte 5 km bij meren.

2.2.4 Waterdiepte

De leidraad definieert de waterdiepte als de totale waterdiepte, zoals die tijdens de extreme (toets)situatie optreedt. Dit is het verschil tussen de bodemhoogte en de maatgevende waterstand. In een eenvoudige benadering wordt de golfoverslaghoogte bepaald op basis van de maximale waterdiepte. De leidraad beschrijft dat indien deze waterdiepte slechts op een zeer gering gedeelte over de totale strijklengte voorkomt, overwogen kan worden een geringere waterdiepte te hanteren. Deze optimalisatie van waterdiepte moet dan in voldoende mate worden onderbouwd. De leidraad doet geen suggesties voor deze onderbouwing.

In het regionale systeem variëren waterdieptes veelal van een meter tot enkele meters (orde 3 m). Lokaal komen veel grotere waterdieptes voor van meer dan 10 m, bijvoorbeeld als gevolg van zandwinning. Bij de teen kan sprake zijn van nog kleinere waterdieptes door bijvoorbeeld de ligging van een voorland of een ondiepe vooroever.

3 Golfgroeikrommes

Dit hoofdstuk geeft in paragraaf 3.1 een korte beschrijving van de golfgroeikrommes die in deze studie worden beschouwd. In paragraaf 3.2 zijn de golfgroeiformules gevisualiseerd en onderling vergeleken.

3.1 Beschrijving

Om een schatting te maken van golfrandvoorwaarden zijn diverse empirische golfgroeikrommes beschikbaar. De formules zijn doorgaans gebaseerd op jarenlange metingen in het veld. Naast empirische formules kunnen ook geavanceerde modellen, zoals SWAN, worden gebruikt om golfrandvoorwaarden af te leiden.

In de voorliggende studie passeren de volgende formules de revue: de formules volgens Bretschneider, volgens Young & Verhagen, volgens Breugem & Holthuijsen en volgens Kahma & Calkoen. De volgende variabelen komen in de formules voor:

- *F*, de (effectieve) strijklengte in [m];
- *U*, de windsnelheid op 10 m hoogte in [m/s];
- *d*, de waterdiepte in [m];
- *g*, de gravitatieversnelling in [m/s^2].

F, *U* en *d* zijn representatieve waarden waarvan de bepaling kan verschillen van bron tot bron. Met deze variabelen worden de significante golfhoogte H_s [m] en de piekperiode T_p [s] berekend. Per formule zullen enige achtergronden worden gegeven in onderstaande subparagrafen.

Bretschneider

De Bretschneider formules zijn (cf. [CERC, 1973]):

$$H_s = \frac{0.283 \cdot U^2 a_1}{g} \tanh\left(\frac{0.0125}{a_1} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.42} \right) \quad \text{en}$$

$$T_p = \frac{1.08 \cdot 2.4\pi \cdot U a_2}{g} \tanh\left(\frac{0.077}{a_2} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.25} \right),$$

waarbij:

$$a_1 = \tanh\left(0.530 \left(\frac{gd}{U^2} \right)^{0.75} \right) \quad \text{en} \quad a_2 = \tanh\left(0.833 \left(\frac{gd}{U^2} \right)^{0.375} \right).$$

De semi-empirische formules van Bretschneider zijn een uitwerking van de grafische relaties die zijn afgeleid door [Sverdrup en Munk, 1947]. Bretschneider heeft zich hierbij gebaseerd op meetdata voor Lake Okeechobee (Florida, USA) en de Golf van Mexico. Voor de windsnelheid *U* is hierbij uitgegaan van de windsnelheid op 10 meter hoogte boven de waterspiegel. Verder is aangenomen dat de wind lang genoeg in één richting gewaaid heeft om te zorgen dat het

golfveld volgroeid is. Bovendien is aangenomen dat de windsnelheid en de waterdiepte uniform zijn over de strijklengte.

Merk op dat bij de formule voor T_p een factor 1.08 is ingebracht. Deze factor is afkomstig uit de betrekking tussen de piekperiode T_p en de significante golfperiode T_s volgens $T_p = 1.08 \cdot T_s$. De hieronder genoemde formules voorzien standaard in de uitdrukking voor de piekperiode T_p.

Young & Verhagen

De Young & Verhagen formules zijn (cf. [Verhagen, 1999]):

$$H_s = \frac{0.241 \cdot U^2 b_1^{0.87}}{g} \tanh\left(\frac{3.133 \cdot 10^{-3}}{b_1} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.575} \right)^{0.87} \quad \text{en}$$

$$T_p = \frac{7.519 \cdot U b_2^{0.37}}{g} \tanh\left(\frac{5.215 \cdot 10^{-4}}{b_2} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.73} \right)^{0.37} ,$$

waarbij:

$$b_1 = \tanh\left(0.493 \left(\frac{gd}{U^2} \right)^{0.747} \right) \quad \text{en} \quad b_2 = \tanh\left(0.331 \left(\frac{gd}{U^2} \right)^{1.014} \right).$$

De golfgroeiformules zijn afgeleid voor data die gemeten zijn op Lake George (nabij Canberra, Australië) bij windrichtingen over de as van noord naar zuid *en* van zuid naar noord. Daar waar de formules van Bretschneider zijn afgeleid op basis van *single-point* metingen, zijn de formules van Young & Verhagen afgeleid voor een set van 8 meetpunten met als doel het verder toespitsen van golfgroeiformules voor toepassing in ondiep water (cf. [Verhagen, 1999]).

Bij het afleiden van de golfgroeiformule is door Young & Verhagen [Verhagen, 1999] uitgegaan van de geometrische schattingen voor de strijklengte. Hierbij is de golfgroeiformule van Bretschneider gebruikt om de strijklengte af te leiden tot het meetpunt dat het meest nabij de oever gelegen. De strijklengtes voor verder gelegen meetlocaties worden gedefinieerd als de strijklengte bij het eerste meetpunt, vermeerderd met de afstand van het eerste meetpunt tot het beschouwde, verder gelegen meetpunt. De windsnelheid is ter hoogte van één locatie op het meer gemeten op 10 meter hoogte van de waterspiegel. Ook zijn langs het meer op verschillende locaties windsnelheidsmetingen verricht.

Breugem & Holthuijsen

De Breugem & Holthuijsen formules zijn:

$$H_s = \frac{0.240 \cdot U^2 c_1^{0.572}}{g} \tanh\left(\frac{4.410 \cdot 10^{-4}}{c_1} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.790} \right)^{0.572} \quad \text{en}$$

$$T_p = \frac{7.690 \cdot U c_2^{0.187}}{g} \tanh\left(\frac{2.770 \cdot 10^{-7}}{c_2} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1.450} \right)^{0.187} ,$$

waarbij:

$$c_1 = \tanh\left(0.343\left(\frac{gd}{U^2}\right)^{1.14}\right) \quad \text{en} \quad c_2 = \tanh\left(0.100\left(\frac{gd}{U^2}\right)^{2.01}\right).$$

Deze formules van Breugem & Holthuijsen vormen een variant op de formules van Young & Verhagen. De basis voor de formules van Breugem & Holthuijsen wordt gevormd door data die verkregen zijn bij metingen op Lake George bij windrichting *alleen* over de as van noord naar zuid. Deze nadere specificatie ten opzichte van Young & Verhagen is ingegeven door de waarneming van Breugem & Holthuijsen dat de kenmerken van de golven bij noord-zuid-windrichtingen fundamenteel anders van aard waren dan de kenmerken van de golven bij zuid-noord windrichtingen. Dit verschillende type golven is verklaard aan de hand van de geometrie van Lake George en de verschillen in opwekkend windveld. Golfgroei bij zuidelijke windrichtingen wordt beperkt door de relatief smalle breedte van het meer op die locaties.

Bij grote dimensieloze strijklengtes komen de formules van Breugem & Holthuijsen overeen met de formules van Young & Verhagen.

Kahma & Calkoen

De Kahma & Calkoen formules zijn:

$$H_s = \frac{2.884\cdot 10^{-3}\cdot U^2}{g}\left(\frac{gF}{U^2}\right)^{0.45} \quad \text{en}$$

$$T_p = \frac{7.3\cdot 10^{-2}\cdot 2\pi\cdot U}{g}\left(\frac{gF}{U^2}\right)^{0.27},$$

De formules zijn voornamelijk gebaseerd op een compilatie van meerdere datasets en geldig voor dimensieloze strijklengte groter dan 100. Opgemerkt kan worden dat in de formule van Kahma & Calkoen geen diepte zit. Kahma & Calkoen beschouwen alleen diep water. De afgeleide golfgroeikromme is dus niet toepasbaar op relatief ondiep water.

Merk op dat voor kleine dimensieloze strijklengtes, de formules van Breugem & Holthuijsen overeenkomen met de formules van Kahma & Calkoen. De formules van Breugem & Holthuijsen bevatten echter een diepte-afhankelijke term als toevoeging. In die zin kunnen de formules van Breugem & Holthuijsen worden beschouwd als een uitbreiding van de formules van Kahma & Calkoen.

3.2 Visualisatie van de formules

In visualisaties en verdere analyses wordt gebruikt gemaakt van de volgende dimensieloze parameters:

- Dimensieloze golfhoogte: $\frac{H_s}{d}$ of $\frac{gH_s}{U_{10}^2}$ [-]
- Dimensieloze strijklengte: $\frac{Fg}{U_{10}^2}$ [-]
- Dimensieloze diepte δ: $\frac{dg}{U_{10}^2}$ [-]

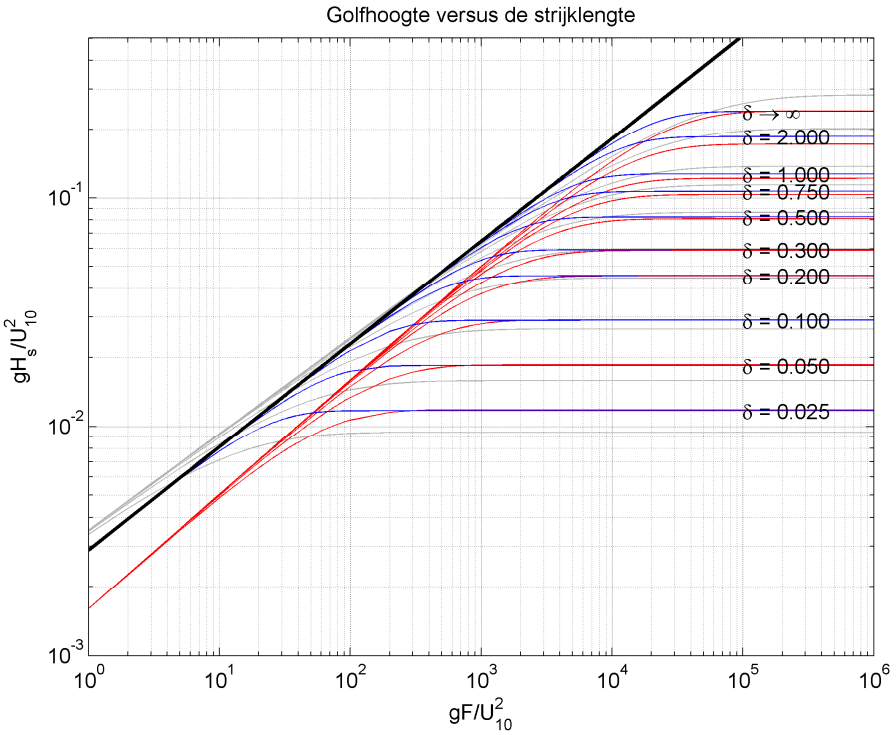
- Dimensieloze golfperiode: $\frac{T_p g}{U_{10}}$ [-]

Hierbij is voor de *waterdiepte d* het verschil genomen tussen het waterniveau (in m +NAP) en de bodemligging (in m +NAP). Voor de *windsnelheid U* wordt dikwijls uitgegaan van de windsnelheid op 10 meter hoogte van het wateroppervlak: U_{10}. Het correct bepalen en interpreteren van de waarde van deze windsnelheid is een ingewikkelde zaak, waarbij de volgende zaken een rol spelen:

- verschillen tussen ruwheid van land en water: correctie kan nodig zijn om te compenseren voor het verschil in ruwheid tussen land en water;
- verschillen tussen de temperatuur van lucht en water: deze verschillen beïnvloeden de (ontwikkeling van de) grenslaag;
- de beperkte tijdsduur waarin de wind gemeten is: indien de meetreeks te kort is, dient de waarde van U_{10} te worden gecorrigeerd aan de hand van empirische formules;
- de niet-lineaire interactie tussen de gemeten windsnelheid en de schuifspanning op het wateroppervlak.

In plaats van U_{10} wordt regelmatig de schuifspanningssnelheid u_* gebruikt. Hiertoe wordt een logaritmisch snelheidsprofiel in verticale richting aangenomen. Wij gebruiken echter U_{10}.

Om de kenmerken van de golfgroeiformules te tonen, zijn in Figuur 3-1 en Figuur 3-2 de dimensieloze golfhoogte c.q. piekperiode uitgezet tegen de dimensieloze strijklengte.



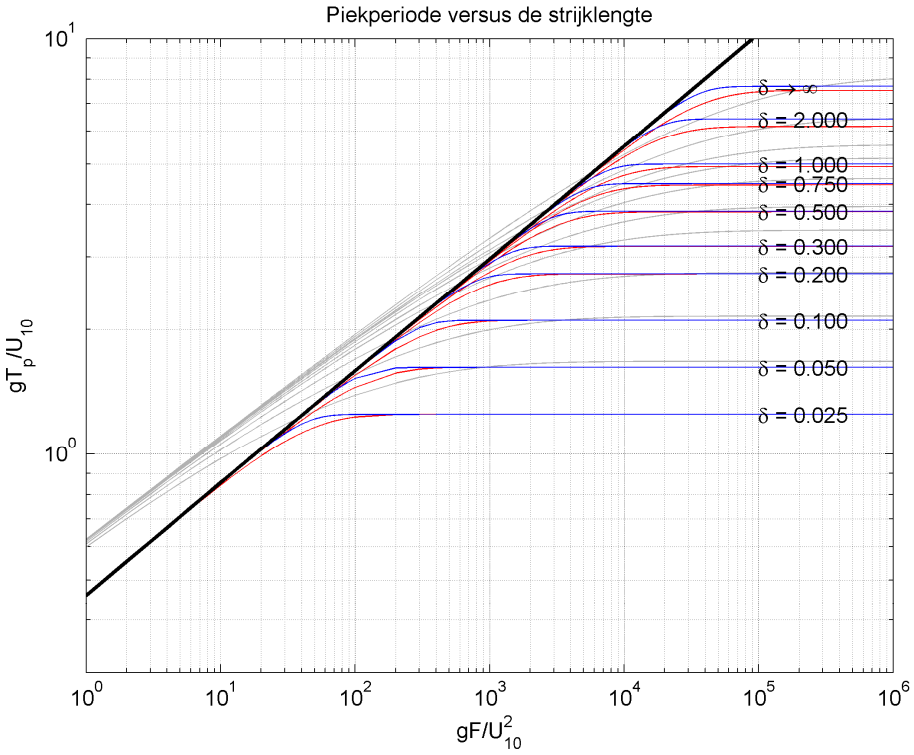
Figuur 3-1: Curven voor de relatie tussen de dimensieloze golfhoogte en de dimensieloze strijklengte, bij een willekeurige windsnelheid. In blauw: curven volgens Breugem & Holthuijsen, in rood: curven volgens Young & Verhagen, in grijs: curven volgens Bretschneider, in zwart: lijn volgens Kahma & Calkoen. De getallen aan de rechterzijde geven dimensieloze dieptes aan.

In Figuur 3-1 en Figuur 3-2 is uitgegaan van een windsnelheid van 3.2 m/s. Deze waarde is afgeleid uit de figuren zoals getoond in [Breugem & Holthuijsen, 2007]. Figuur 3-1 en Figuur 3-2 zijn derhalve direct te vergelijken met de figuren uit [Breugem & Holthuijsen, 2007].

In Figuur 3-1 zijn de golfhoogte-formules van Bretschneider, Young & Verhagen, Breugem & Holthuijsen en Kahma & Calkoen getoond met respectievelijk de kleuren grijs, rood, blauw en zwart. De figuur is een uitbreiding van figuur 16 uit [Breugem & Holthuijsen, 2007]. De volgende zaken vallen op:

- Breugem & Holthuijsen komt overeen met Kahma & Calkoen voor relatief kleine dimensieloze strijklengtes en nagenoeg overeen met Young & Verhagen voor relatief grote dimensieloze strijklengtes.
- In vergelijking met de andere krommes berekent Bretschneider hogere golfhoogtes bij relatief kleine dimensieloze strijklengtes. En in vergelijking met de andere krommes berekent Bretschneider de laagste golfhoogtes bij ondiep water en relatief hoge dimensieloze strijklengtes.

Merk op dat de grafieken in een dimensieloze weergave gepresenteerd zijn. Een kleine dimensieloze strijklengte hangt samen met een kleine absolute strijklengte en/of een hoge windsnelheid. De formules voor de piekperiode zijn getoond in Figuur 3-2, op analoge wijze als in Figuur 3-1.



Figuur 3-2: Curven voor de relatie tussen de dimensieloze golfperiode en de dimensieloze strijklengte, bij een willekeurige windsnelheid. In blauw: curven volgens Breugem & Holthuijsen, in rood: curven volgens Young & Verhagen, in grijs: curven volgens Bretschneider, in zwart: lijn volgens Kahma & Calkoen. De getallen aan de rechterzijde geven dimensieloze dieptes aan.

In Figuur 3-2 vallen de volgende zaken op:

- In vergelijking met de andere krommes berekent Bretschneider bij relatief kleine dimensieloze strijklengtes de grootste piekperiodes.

- Bij relatief hoge dimensieloze strijklengtes komen Bretschneider, Young & Verhagen en Breugem & Holthuijsen nagenoeg overeen.
- Bij relatief kleine dimensieloze strijklengtes komen Young & Verhagen en Breugem & Holthuijsen overeen met Kahma & Calkoen.

De prestaties van de bovengenoemde formules zullen nu vergeleken worden met gemeten waarden in het veld. In het volgende hoofdstuk zullen we aangeven welke metingen we gebruiken en wat de achtergronden daarbij zijn.

4 Golfmetingen

Om golfgroeiformules te valideren is het van belang om een betrouwbare set aan gegevens over golven, wind, strijklengte en waterdiepte samen te stellen. In dit hoofdstuk volgt in eerste instantie een beschrijving van verschillende golfmetingen. Uit deze golfmetingen zijn datasets geselecteerd die in dit onderzoek gebruikt worden, mede gebaseerd op de toepassing zoals beschreven in hoofdstuk 2.

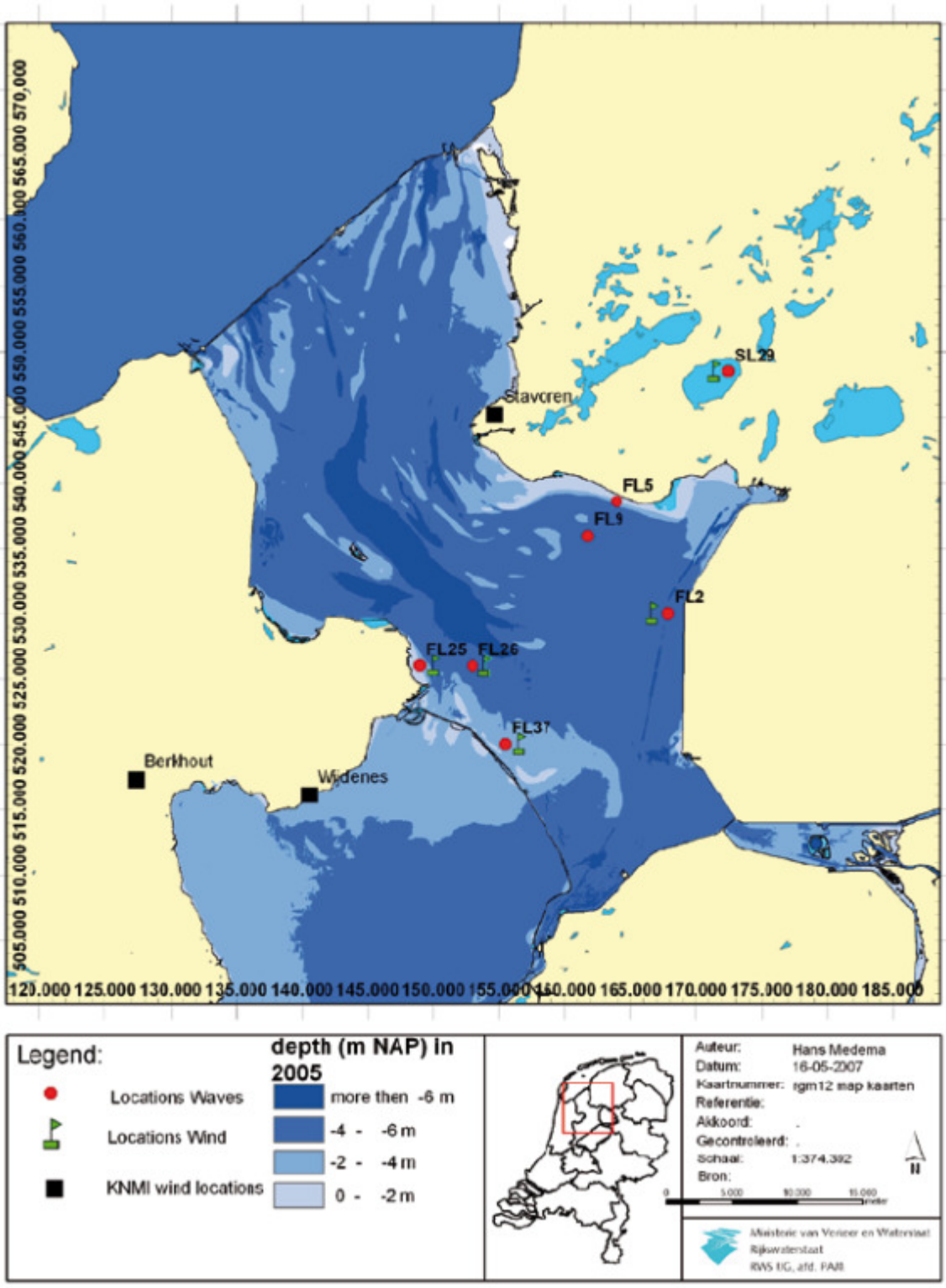
4.1 Beschrijving golfmetingen

Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van metingen op het IJsselmeer en Slotermeer en Lake George in Australië. De gebiedskenmerken voor deze drie locaties zijn in behoorlijke mate vergelijkbaar met de toepassingsomstandigheden voor de Nederlandse binnenwateren. Voor dit onderzoek waren meetresultaten beschikbaar gesteld voor alleen deze locaties. Andere metingen uit het verleden, bij vergelijkbare omstandigheden, waren voor dit onderzoek niet direct beschikbaar. Daarom is voor dit onderzoek uitgegaan van alleen de metingen op het IJsselmeer, het Slotermeer en Lake George. Deze paragraaf geeft een korte beschrijving van de achtergronden van de golfmetingen.

4.1.1 IJsselmeer en Slotermeer

In het IJsselmeer en het Slotermeer zijn sinds 1997 golfmetingen verricht. Doel van deze meetcampagne was het verkrijgen van goed gedocumenteerde wind- en golfmetingen voor een breed bereik aan strijklengte- en harde windcondities met hoogwaterbescherming als primaire toepassing. De meetperiode vanaf 1997 tot begin 2007 is vastgelegd in [RIZA, 2007]. Momenteel worden door RWS IJsselmeergebied nog steeds metingen verricht, ook op andere locaties (bijvoorbeeld nabij de Wieringemeerdijk). Die resultaten zijn in dit onderzoek niet meegenomen.

In totaal waren er 7 meetlocaties, waarvan één op het Slotermeer, zie onderstaande figuur. Meetlocatie FL25 is begin 2006 verplaatst en hernoemd naar FL37. Om golfmetingen te interpreteren is wind (snelheid en richting) gemeten op de locaties FL2, FL26 en SL29. Windsnelheidsmetingen zijn ook beschikbaar op meetlocatie FL37 en deels op meetlocatie FL25. Gedurende de meetcampagne zijn hoge windsnelheden tot maximaal circa 24 m/s gemeten.

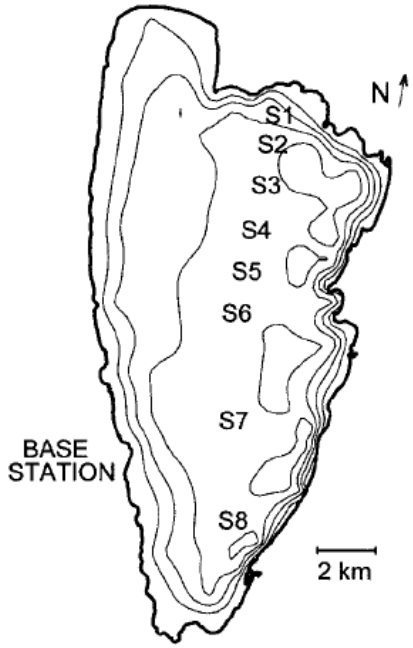


Figuur 4-1: Meetlocaties IJsselmeer en Slotermeer uit [RIZA, 2007].

Kenmerkende waterdieptes zijn circa 1.7 m voor het Slotermeer en circa 4.5 m voor het IJsselmeer. Strijklengtes zijn gebaseerd op de lengte tussen kustlijn en meetlocatie vanuit de gemeten windrichting en waren circa 1 km tot maximaal 30 km. In publicaties zijn veelal *effectieve* strijklengtes op basis van [Holthuijsen, 1980] gebruikt in plaats van *absolute* strijklengtes. Bij effectieve strijklengtes worden de absolute strijklengtes (de afstand waarover de wind een schuifspanning uitoefent op het water) voor meerdere windrichtingen beschouwd en gewogen. Voor een volledige beschrijving van de golf- en windmetingen en achtergronden wordt verwezen naar [RIZA, 2007].

4.1.2 Lake George

Om beter inzicht te verkrijgen in golfgroei in beperkte waterdiepte zijn door Young en Verhagen golfmetingen verricht op het meer Lake George nabij Canberra in Australië. Dit meer is ongeveer 24 kilometer lang en 12 kilometer breed. Tijdens een periode van 3 jaar zijn meer dan 60.000 metingen verricht.



Figuur 4-2: Meetstations Lake George uit [Verhagen, 1999].

In noord-zuid richting zijn acht meetstations (S1 t/m S8) gelegen (zie Figuur 4-2). Op deze wijze is golfontwikkeling vanuit noordzuidelijke windrichtingen en vice-versa goed inzichtelijk geworden. Bij oostelijk en westelijk georiënteerde winden vormen deze metingen dus slechts enkele puntmetingen.

Voor de strijklengte is de lengte tussen de meetstations gehanteerd vanuit de gemeten (noordelijke of zuidelijke) windrichting. Voor het eerste meetstation (S8 voor zuidelijke winden en S1 voor noordelijke winden) is de strijklengte berekend vanuit de gemeten golfhoogte, gebaseerd op de golfgroeiformule van Bretschneider.

Bij meetstation S6 werd de wind gemeten op 10m hoogte. Tijdens het onderzoek zijn windsnelheden gemeten tussen 4 en 15.2 m/s. De waterdiepte was tijdens deze metingen ongeveer constant 2 meter.

In 2006 zijn door Young and Babanin [Young en Babanin, 2006] op meetlocatie S6 metingen verricht. Tijdens de gehele meetperiode varieerde de waterdiepte tussen 0.4 en 1.15 m.

4.2 Geschikte datasets

Uit de in paragraaf 4.1 beschreven golfmetingen zijn datasets geselecteerd die gebruikt worden bij de validatie van de golfgroeikrommes. Datasets zijn (optimaal) geschikt in het onderzoek als ze voldoen aan de volgende criteria:

1. De data zijn vrij van onrealistische observaties: data met onrealistische golfhoogte/waterdiepte verhoudingen en golfsteilheden zijn verwijderd.
2. De data zijn vrij van meetfouten: onbetrouwbare meetdata, zoals pieken, gaten, dummy-waarden of andere vreemde waarden zijn verwijderd.
3. Windmetingen zijn op nagenoeg dezelfde locatie uitgevoerd als de golfmeting. Ook is sprake van stationaire windsnelheid en windrichting (beperkte afwijkingen) en zijn er zo mogelijk ongewijzigde windcondities bij de overgang van land naar water.
4. De data liggen binnen het toepassingsgebied, zoals beschreven in hoofdstuk 2 en vertonen voldoende diversiteit (zo mogelijk zijn er binnen de gehele bandbreedte van relevante parameters metingen beschikbaar).

4.2.1 IJsselmeer en Slotermeer

Voordeel van het gebruik van IJsselmeer en Slotermeer-data is dat de betrouwbaarheid van de metingen en apparatuur reeds is geanalyseerd en de data is gevalideerd. Hiermee voldoet de data in vrijwel alle gevallen al aan de criteria 1 en 2. Het rapport [RIZA, 2007] geeft een windafhankelijke golfklimatologie op basis van de gevalideerde data in Hoofdstuk 6 dat rapport en beschrijft in hoofdstuk 7 van dat rapport welke stormen geschikt zijn als test- of calibratiecase voor modellen. Dit zijn 9 stormen op het Slotermeer en 12 stormen op het IJsselmeer.

Van het Slotermeer zijn alle 9 datasets van stormen geschikt voor dit onderzoek. Van het IJsselmeer worden enkele datasets niet voor deze studie gebruikt vanwege criteria 3 en 4. Dit zijn de metingen van locatie FL5 omdat dit een locatie op een vooroever met slechts lokaal representatieve golfcondities betreft. Ook is bij deze locatie geen referentiewind beschikbaar.

In het rapport is aandacht gegeven aan beschuttingseffecten. Meetlocatie FL25 heeft bij de korte strijklengtes een beschutte ligging bij circa zuidwestelijke tot noordwestelijke windrichtingen (bebouwd/bebost Enkhuizen) en meetlocatie FL2 is ‘licht’ beschut gelegen bij circa oostelijke wind (aflandig). Vanuit andere windrichtingen geldt voor deze meetlocaties weliswaar een onbeschutte ligging, echter valt de strijklengte buiten het toepassingsgebied (meer dan 5 km).

4.2.2 Lake George

Young & Verhagen hebben voor het afleiden van de golfgroeiformule gebruik gemaakt van de noord-zuid data. In totaal zijn door Young & Verhagen bijna 1000 spectra geanalyseerd. Deze data zijn gecontroleerd op constante windsnelheid en –richting gedurende de meetperiode, maar ook in de periodes voor en na de meting. Dit zorgde ervoor dat er geen gegevens zijn opgenomen die niet overeenkomen met een constante wind. Voor een beschrijving van de wijze waarop gekomen is tot deze betrouwbare datasets, wordt verwezen naar [Verhagen, 1999].

Door Breugem & Holthuijsen is van dezelfde data gebruik gemaakt als Young & Verhagen. Zij concludeerden dat golfgroei bij zuidelijke winden meer beperkt wordt dan bij noordelijke winden vanwege de beschikbare breedte. Deze studie maakt gebruikt van de datasets van de noordelijke winden, waarbij golven zich sterker hebben ontwikkeld.

Westelijke en oostelijke winden zijn met name interessant omdat in vergelijking met de Noord-zuid data dit inzicht kan opleveren in de invloed van zijoevers op golfgroei (er zijn eventuele "narrow fetch" invloeden bij noord-zuid wind. Deze data zijn qua strijklengtes (tussen 4-6 km) interessant, maar deze data blijkt nog nooit goed geanalyseerd. Zonder nadere analyse voldoet deze data niet zondermeer aan de criteria 1 en 2. Een dergelijke analyse valt echter buiten de scope van dit onderzoek.

De data van Young and Babanin bevatten meer diepte-gelimiteerde situaties dan de data van Young & Verhagen in Lake George uit 1996. In de studie van Deltares [Deltares, 2008] is gebruik gemaakt van de data van Young and Babanin. In het rapport is opgenomen op welke wijze van 92 meetreeksen een selectie van bruikbare en betrouwbare data is gemaakt. Windsnelheden lagen tussen 5 m/s en 50 m/s en golfhoogtes tussen 0.05 m en 2.5 m. Deze selectie wordt in deze studie ook gebruikt.

4.3 Karakterisering van de gebruikte golfdata

In deze paragraaf wordt kort op een rij gezet wat de karakteristieken zijn van de gebruikte golfdata. Een nuttige parameter voor het in kaart brengen van het karakter van de golven, is de golfsteilheid *s*. Deze golfsteilheid representeert de verhouding tussen golfhoogte en golflengte en is een relevante parameter bij het inschatten van het type golfbreking op een talud. Gemakkelijker dan via een dispersierelatie (via iteratie), is voor diep water de golfsteilheid te bepalen als:

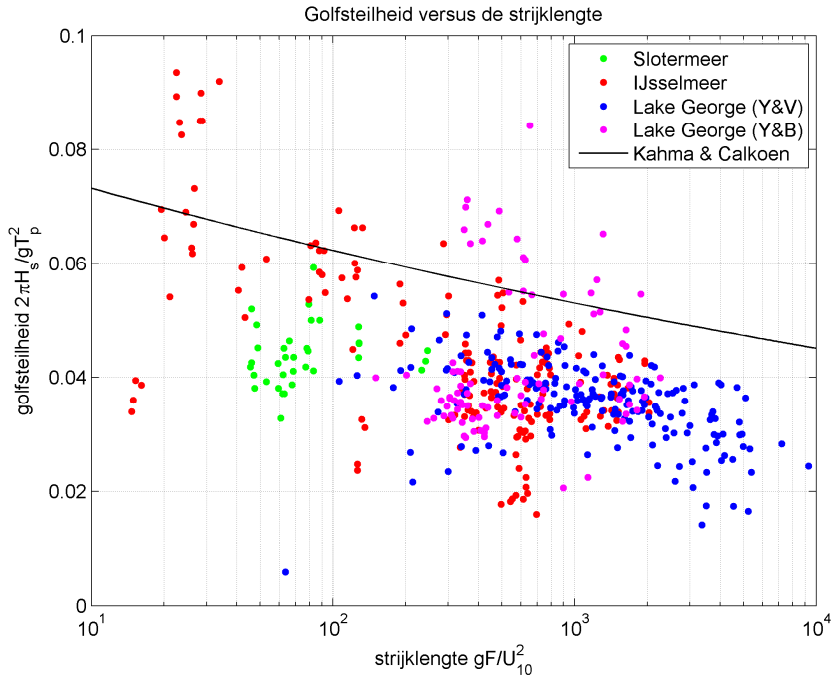
$$s = \frac{2\pi H_s}{gT_p^2},$$

welke te interpreteren is als de diep-water golfsteilheid. Deze golfsteilheid is voor alle meetdata getoond in Figuur 4-3.

In Figuur 4-3 is tevens een parameterisatie getoond van de relatie tussen de diep-water golfsteilheid en de dimensieloze strijklengte. Deze parameterisatie kan worden afgeleid uit de golfgroeicurve van [Kahma en Calkoen, 1992] en luidt:

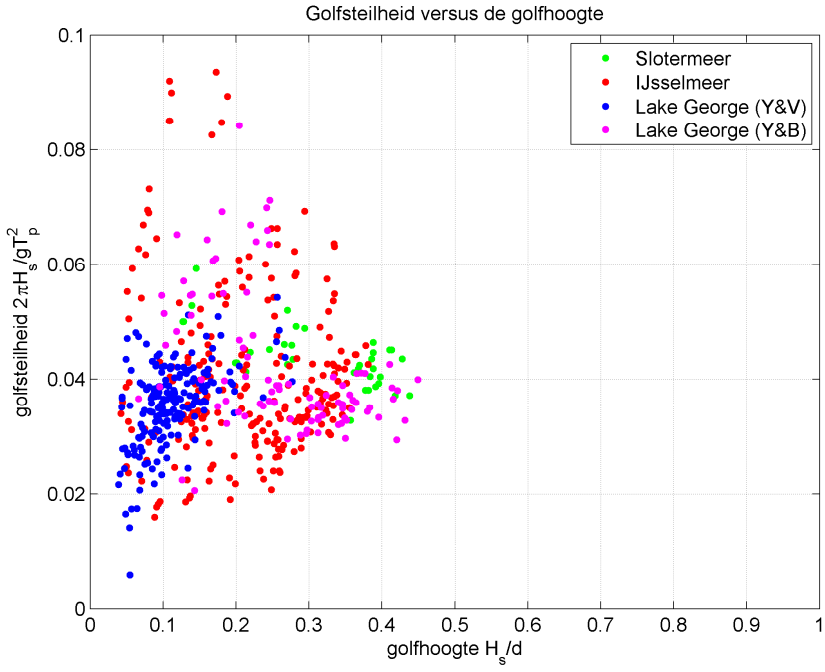
$$s \approx 0.086 \cdot \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{-0.07}.$$

Bij een strijklengte van maximaal 5 km en een windsnelheid van minimaal 17 m/s, zou de golfsteilheid minimaal 0.06 zijn. Figuur 4-3 laat zien dat de golfsteilheid voor de meetdata duidelijk onder de hierboven genoemde diep-water parameterisatie, gebaseerd op Kahma & Calkoen, ligt. De data van Young & Verhagen liggen structureel onder de parameterisatie met waarden tussen 0.03 en 0.04.



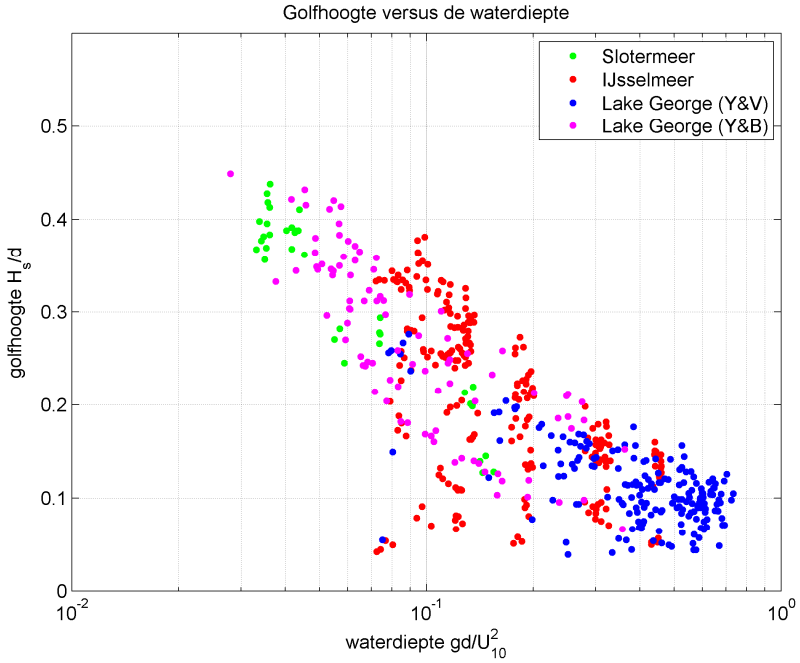
Figuur 4-3: Golfsteilheid voor alle gebruikte meetdata. De zwarte lijn geeft de parameterisatie volgens Kahma en Calkoen [Kahma en Calkoen, 1992].

Met de strenge restrictie van een maximale strijklengte van 5 km en een minimale windsnelheid van 17 m/s en een op basis daarvan geschatte golfsteilheid van minimaal 0.06, is het aantal relevante metingen beperkt: alleen metingen voor het IJsselmeer lijken hieraan te voldoen. In toevoeging op Figuur 4-3 toont Figuur 4-4 welke golfhoogtes kunnen worden verwacht bij een restrictie van $s > 0.06$. De golfhoogtes H_s blijken voor de gebruikte meetdata beperkt te blijven tot maximaal één derde van de waterdiepte.



Figuur 4-4: Relatie tussen de golfsteilheid en de dimensieloze golfhoogte, voor alle gebruikte meetdata.

In navolging van [RIZA, 2007] en [Deltares, 2008] is het verband tussen de dimensieloze golfhoogte H_s/d en de dimensieloze waterdiepte gd/U_{10}^2 getoond in Figuur 4-5. Aangezien de data voor het Slotermeer en IJsselmeer zijn gefilterd op criteria die zijn vermeld in paragraaf 4.2, is de puntenwolk in Figuur 4-5 een uitgedunde versie van de puntenwolk zoals getoond in figuur 6.15 van [RIZA, 2007] en figuur 3.8 van [Deltares, 2008].



Figuur 4-5: Relatie tussen de dimensieloze golfhoogte tegen de dimensieloze waterdiepte, voor alle gebruikte meetdata.

Figuur 4-5 laat zien dat de data voor het Slotermeer en de data voor Lake George (van Young en Babanin) van vergelijkbare aard zijn. Dit beeld is consistent met het beeld van Figuur 4-4; het verschil tussen de Slotermeer-data en de Lake-George-data heeft met name betrekking op de strijklengte (zie Figuur 4-3). Zoals reeds aangegeven in [Deltares, 2008] lijken de datasets in Figuur 4-5 onderling verschoven georiënteerd te zijn.

4.4 Consequenties voor de analyse

In het voorgaande zijn de volgende zaken naar voren gekomen:

- er is een aanzienlijke spreiding aanwezig in de meetdata,
- er is een tamelijk gering aantal metingen beschikbaar waarbij de strijklengte kleiner is dan 5 km en de windsnelheid groter dan 17 m/s – alleen gedeelten van de Slotermeer-data en de IJsselmeer-data voldoen aan die criteria,
- bij deze twee criteria kunnen grosso modo golfsteilheden groter dan 0.06 en H_s/d – ratio's kleiner dan 0.3 verwacht worden.

Deze vaststelling heeft consequenties voor de doelstelling van deze studie om golfgroeiformules te valideren, juist aan de hand van *deze* data. Immers, het aantal golfrealisaties, waarin de omstandigheden in voldoende mate overeenkomen met de omstandigheden van het regionale systeem, is beperkt.

In het voorliggende rapport zullen we daarom ingaan op de vraag: wat zijn de prestaties van de golfgroeiformules, indien:

- alle golfdata (d.w.z. alle meetpunten die getoond zijn Figuur 4-3, Figuur 4-4 en Figuur 4-5) in beschouwing worden genomen?
- alleen golfdata bij relatief korte (dimensieloze) strijklengtes worden beschouwd?
- alleen golfdata bij (het ontbreken van) diepte-limitering worden beschouwd, aan de hand van de H_s/d –ratio?
- alleen golfdata bij strijklengtes kleiner dan 5 km, windsnelheden hoger dan 17 m/s en dieptes kleiner dan 3 m worden meegenomen?

In de volgende hoofdstukken zullen zowel de gemeten *golfhoogte* als de gemeten *piekperiode* worden beschouwd binnen de context van de geselecteerde golfgroeiformules.

5 Validatie golfgroeiformules

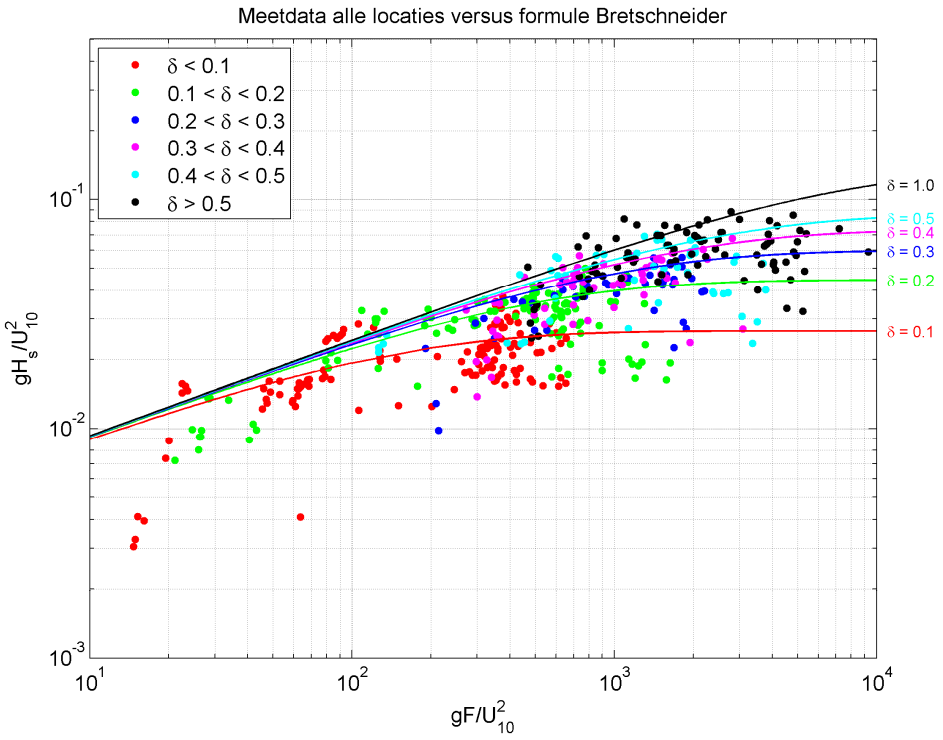
In dit hoofdstuk is nagegaan of de golfgroeiformules (Bretschneider, Young & Verhagen, Breugem & Holthuijsen), zoals geformuleerd in het vorige hoofdstuk, te relateren zijn aan de gemeten data in het Slotermeer, het IJsselmeer en Lake George. Tijdens een overleg met de klankbordgroep is besloten de formule van Kahma & Calkoen niet meer in deze studie te beschouwen. De reden is dat de formule geldig is vanaf dimensieloze strijklengtes groter dan 10^2. Hiermee valt de formule relatief snel buiten het toepassingsbereik voor golfgroei in het regionale systeem. Bovendien kent de formule geen diepteafhankelijkheid en is daarmee niet geschikt voor toepassing op relatief ondiep water. De formule voldoet niet aan de algemene toepasbaarheid in het regionale systeem.

5.1 Golfhoogte

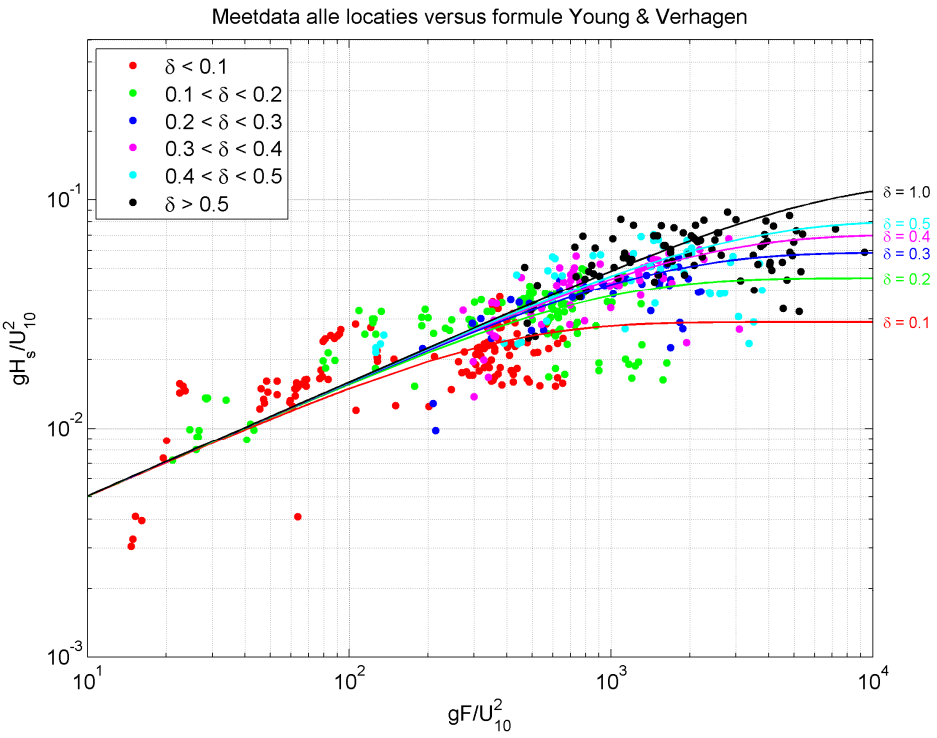
Deze paragraaf focust op de prestaties van de golfgroeiformules voor golfhoogte.

5.1.1 Beschouwing van alle beschikbare metingen

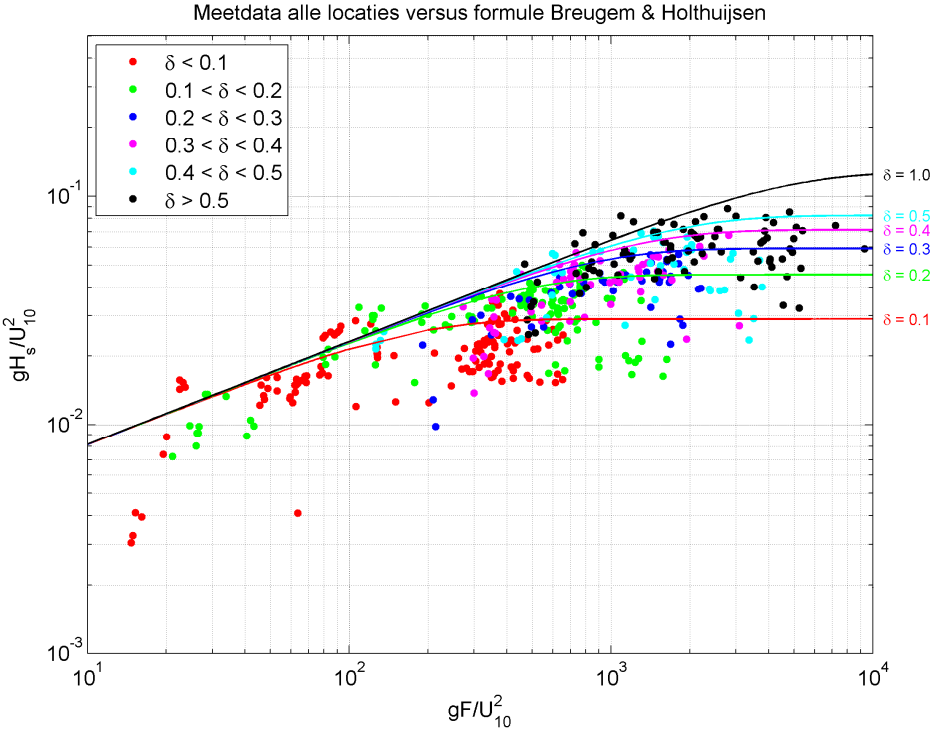
In Figuur 5-1 zijn de gemeten golfhoogtes (dimensieloos gemaakt) voor het Slotermeer, het IJsselmeer en Lake George (bij noordelijke wind) – dus *alle meetdata* – uitgezet tegen de dimensieloze strijklengte. Hierbij is tevens de golfgroeiformule volgens Bretschneider getoond bij diverse waarden voor de dimensieloze diepte δ. In Figuur 5-2 en Figuur 5-3 zijn dezelfde meetdata getoond, maar dan voor Young & Verhagen en Breugem & Holthuijsen.



Figuur 5-1: Dimensieloze golfhoogte uitgezet tegen de dimensieloze strijklengte, geordend naar dimensieloze diepte. De doorgetrokken lijnen representeren de formule van Bretschneider bij de gegeven waarde van de dimensieloze diepte. De punten representeren alle geanalyseerde meetdata.



Figuur 5-2: Dimensieloze golfhoogte uitgezet tegen de dimensieloze strijklengte, geordend naar dimensieloze diepte. De doorgetrokken lijnen representeren de formule van Young & Verhagen bij de gegeven waarde van de dimensieloze diepte. De punten representeren alle geanalyseerde meetdata.

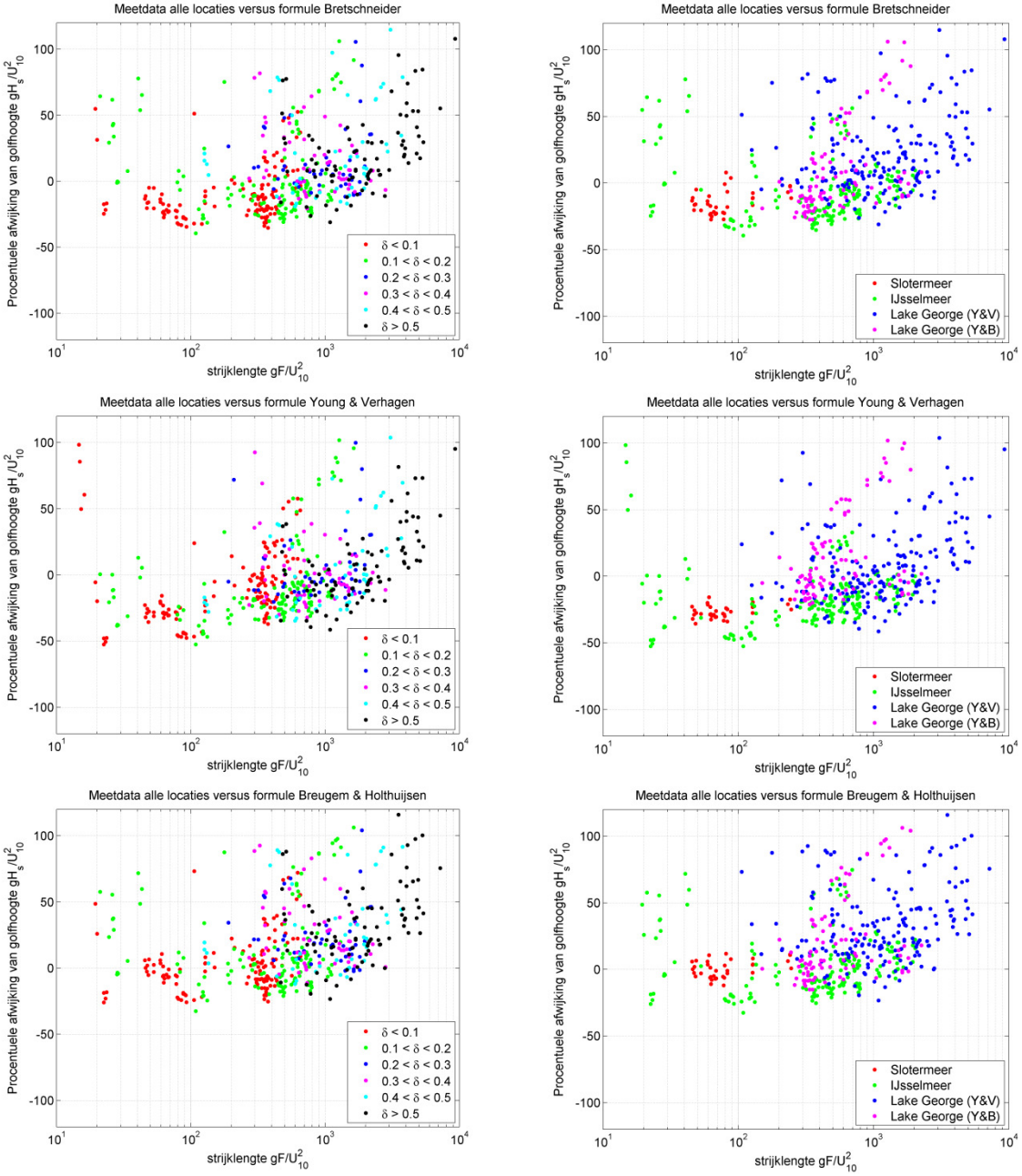


Figuur 5-3: Dimensieloze golfhoogte uitgezet tegen de dimensieloze strijklengte, geordend naar dimensieloze diepte. De doorgetrokken lijnen representeren de formule van Breugem & Holthuijsen bij de gegeven waarde van de dimensieloze diepte. De punten representeren alle geanalyseerde meetdata.

De drie figuren suggereren dat voor dimensieloze strijklengtes kleiner 10^2 de formules van Bretschneider en Breugem & Holthuijsen meestal leiden tot een overschatting van de golfhoogte. De formule van Young & Verhagen onderschat de gemeten golfhoogtes bij relatief korte dimensieloze strijklengtes. Om een kwantitatief inzicht te krijgen in de afwijkingen tussen de formules en de meetdata, wordt de relatieve afwijking, uitgedrukt als:

$$afwijking = \frac{berekening - meting}{meting} \cdot 100\%$$

nader beschouwd. De relatieve afwijking van de dimensieloze golfhoogte is getoond in Figuur 5-4, zowel geordend naar diepte, als naar meetlocatie. Voor de leesbaarheid zijn de figuren verticaal begrensd op +120%: afwijkingen groter dan +120% komen beperkt voor.



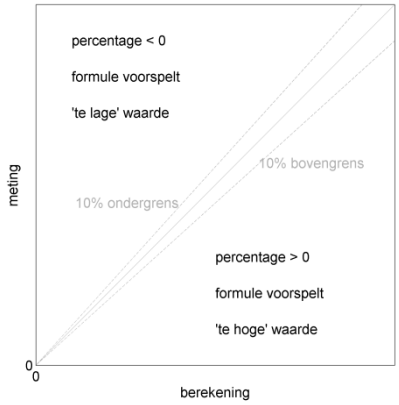
Figuur 5-4: Relatieve afwijking in dimensieloze golfhoogte tussen formules en meetdata, uitgezet tegen de strijklengte. Links: ordening naar dimensieloze diepte, rechts: ordening naar locatie.

Op de horizontale as van de plaatjes in Figuur 5-4 staat de dimensieloze strijklengte. De figuur suggereert dat de spreiding van de afwijkingen tussen meting en berekening niet te correleren is aan de strijklengte.

Bij strijklengtes tot ca. 5 km en een storm met een karakteristieke windsnelheid van 17 m/s, kunnen dimensieloze strijklengtes tot ca. 200 beschouwd worden. Figuur 5-4 laat zien dat voor strijkvaklengtes kleiner dan 200 met name de spreiding van de afwijking voor de IJsselmeer-data tamelijk groot is, variërend van –50% (berekende waarde is 2 x zo klein als de gemeten waarde) tot meer dan +100% (berekende waarde is 2 x zo groot als de gemeten waarde). Ook de meetdata voor Lake George (Y&V) – gemeten bij dimensieloze strijklengtes die groter zijn dan ca. 200 – vertonen een aanzienlijke spreiding.

Op basis van Figuur 5-4 is het nagenoeg onmogelijk om conclusies te trekken inzake de relatie tussen de waterdiepte en de afwijking tussen berekening en meting. Een correlatie tussen de afwijkingen en de dimensieloze diepte δ lijkt op het oog afwezig.

Om de afwijkingen zoals getoond in Figuur 5-4 toch verder te kwantificeren worden de gemeten waarden uitgezet tegen de berekende waarden. Het principe hiervan is gegeven in Figuur 5-5. Idealiter liggen de punten op een 1:1 lijn in de figuur. Een afwijking van -50% betekent dus dat de gemeten waarde 2 x hoger is dan berekende waarde.

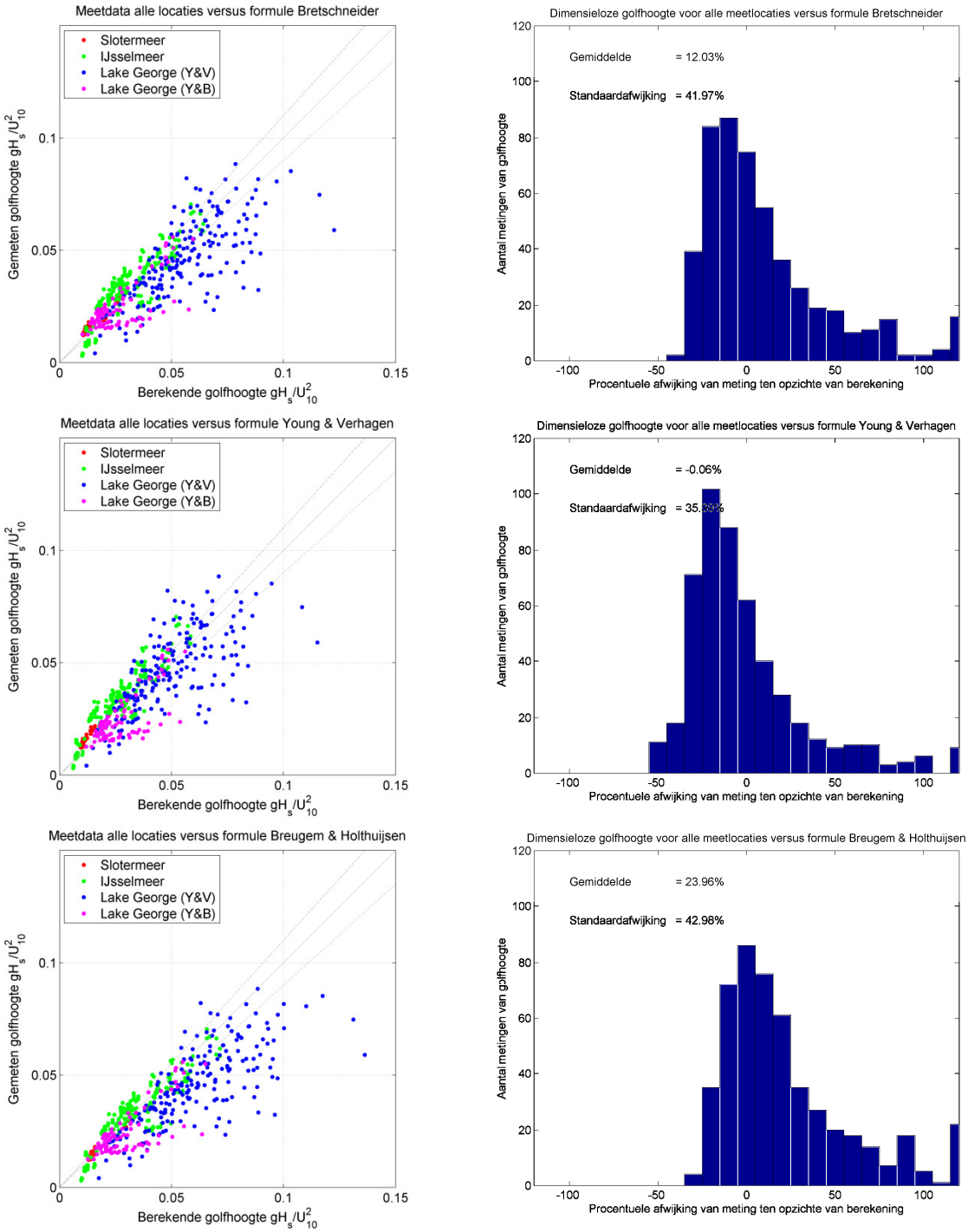


Figuur 5-5: Illustratie van het principe waarmee de gemeten waarden met de berekende waarden kunnen worden vergeleken.

De gemeten golfhoogtes zijn uitgezet tegen de berekende golfhoogtes in linker figuren in Figuur 5-6, geordend naar locatie. Het is niet verwonderlijk dat de formule van Young & Verhagen tamelijk goed overeenkomt met het gemiddelde van de resultaten voor Lake George (van Young & Verhagen); immers, op basis van deze data is de formule afgeleid.

De resultaten van Young & Babanin lijken te bestaan uit twee sets, waarvan er één redelijk goede overeenkomsten vertoont met de formules, en waarvan de ander sterk afwijkt van de formules. De resultaten voor het IJsselmeer worden door de formules goeddeels onderschat, terwijl de waarden voor het Slotermeer tamelijk goed overeen lijken te komen met de formules.

De mate van 'goed overeenkomen' wordt weerspiegeld in de rechter figuren in Figuur 5-6. In deze figuren worden histogrammen getoond die de verdeling van de afwijkingen toont, inclusief de berekende gemiddelde afwijking en de bijbehorende standaardafwijking. Strikt genomen, vertoont de formule van Young & Verhagen de beste overeenkomst met een gemiddelde afwijking van –0.06%. De spreidingen in de overeenkomst zijn in het algemeen zeer groot.

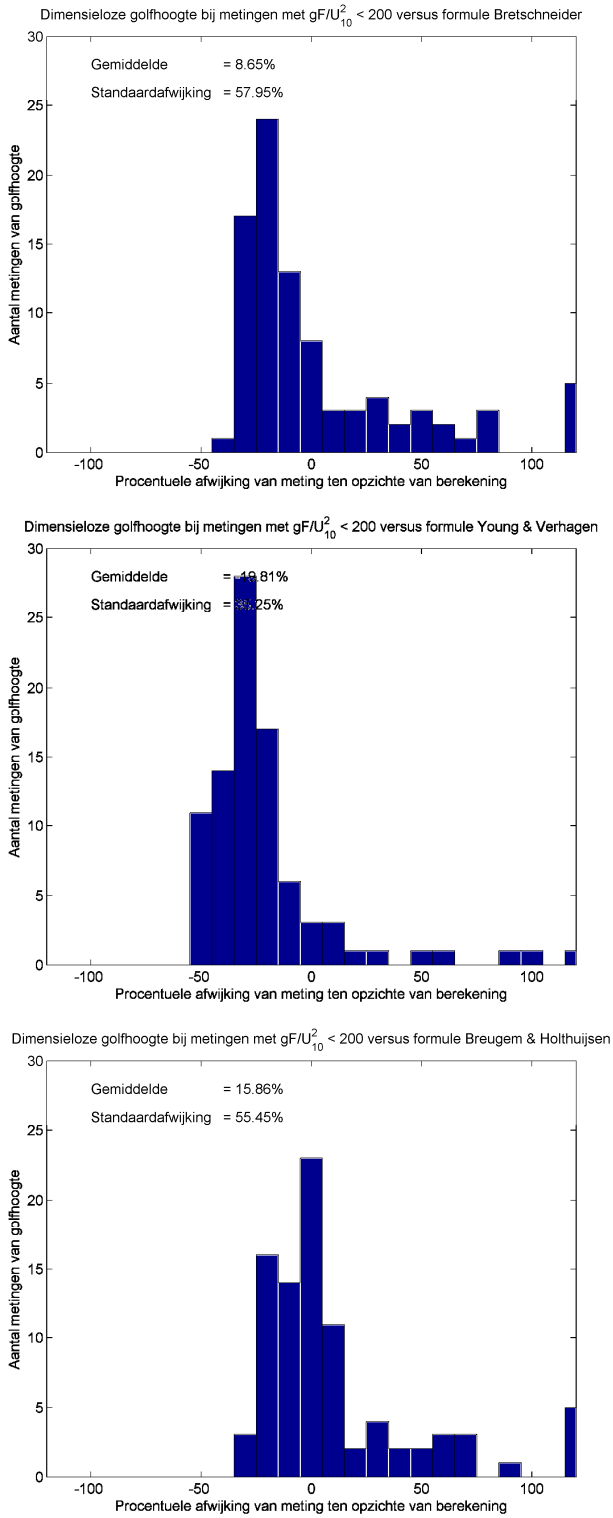


Figuur 5-6: Linker figuren: gemeten golfhoogtes uitgezet tegen de berekende golfhoogtes, volgens de drie golfgroeiformules. Rechter figuren: verdeling van de afwijkingen tussen gemeten en berekende waarden, inclusief de gemiddelde afwijking en de standaardafwijking.

De gemiddeld relatief geringe afwijking voor Young & Verhagen is te verklaren vanuit het aantal metingen dat is uitgevoerd voor de diverse locaties. Immers, de meeste meetdata zijn afkomstig van Young & Verhagen zelf: de golfgroeiformule is direct afgeleid van deze meetdata. De formule van Breugem & Holthuijsen vertoont de grootste gemiddelde afwijking: 23.96%. Deze waarde is voornamelijk te verklaren uit een overschatting van de Lake George data van Young & Verhagen. De afwijkingen bij het gebruik van de formule van Young & Verhagen lijken hoofdzakelijk veroorzaakt te worden door de IJsselmeer data.

5.1.2 Filtering op basis van dimensieloze strijklengtes

Gezien de toepassing van de golfgroeiformules op het regionale systeem, zijn de data gefilterd op basis van de dimensieloze strijklengte. Hierbij zijn data met waarden kleiner dan 200 (dimensieloos) gebruikt. Het resultaat van de filtering op de verdeling van de afwijkingen is gegeven in Figuur 5-7.

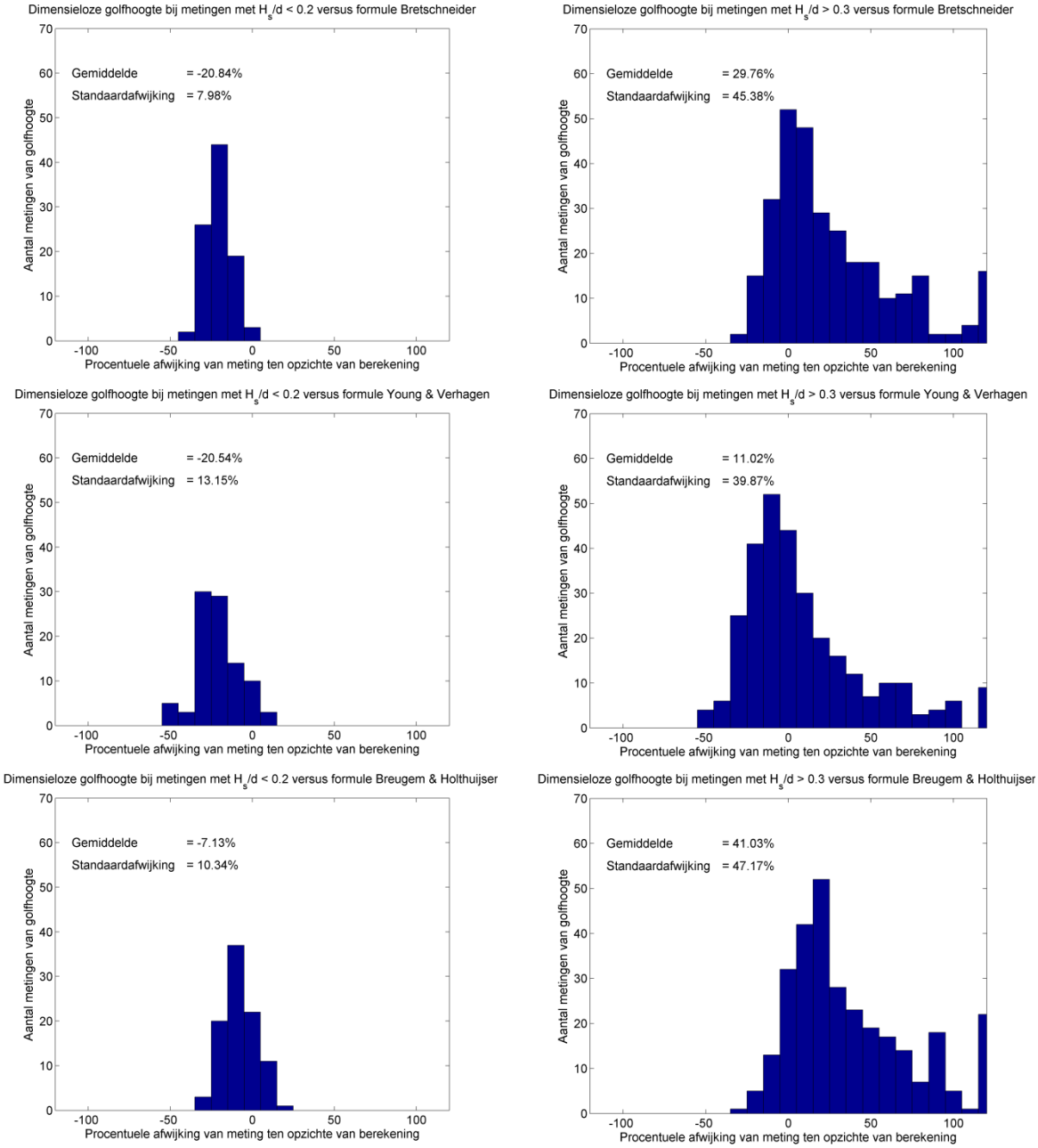


Figuur 5-7: Afwijkingen tussen gemeten golfhoogtes en formules, waarbij een selectie is toegepast op basis van dimensieloze strijklengte (kleiner dan 200, dimensieloos).

Figuur 5-7 laat zien dat, bij dimensieloze strijklengtes kleiner dan 200, de formule van Bretschneider de geringste afwijkingen laat zien: 8.65%. De spreiding is echter relatief groot. De rechter figuren in Figuur 5-4 laten zien dat bij deze relatief korte strijklengtes met name de resultaten voor het Slotermeer en het IJsselmeer (grote spreiding) meegenomen zijn.
Figuur 5-7 laat zien dat voor korte strijklengtes een structurele onderschatting aanwezig is bij gebruik van de formule van Young & Verhagen. Dit is tevens te zien in Figuur 5-2 en Figuur 5-4.

5.1.3 Filtering op basis van diep/ondiep water

Tevens is een selectie uitgevoerd op de meetdata op basis van H_s/d. Hierbij zijn waarden kleiner dan 0.2 als relatief diep gekwalificeerd, en waarden groter dan 0.3 als relatief ondiep. Het resultaat is getoond in Figuur 5-8. Hierbij is *geen* selectie op basis van strijklengte toegepast.



Figuur 5-8: Afwijkingen tussen gemeten golfhoogtes en formules, waarbij een selectie is toegepast op basis van dimensieloze diepte (links diep: $H_s/d < 0.2$, rechts ondiep: $H_s/d > 0.3$).

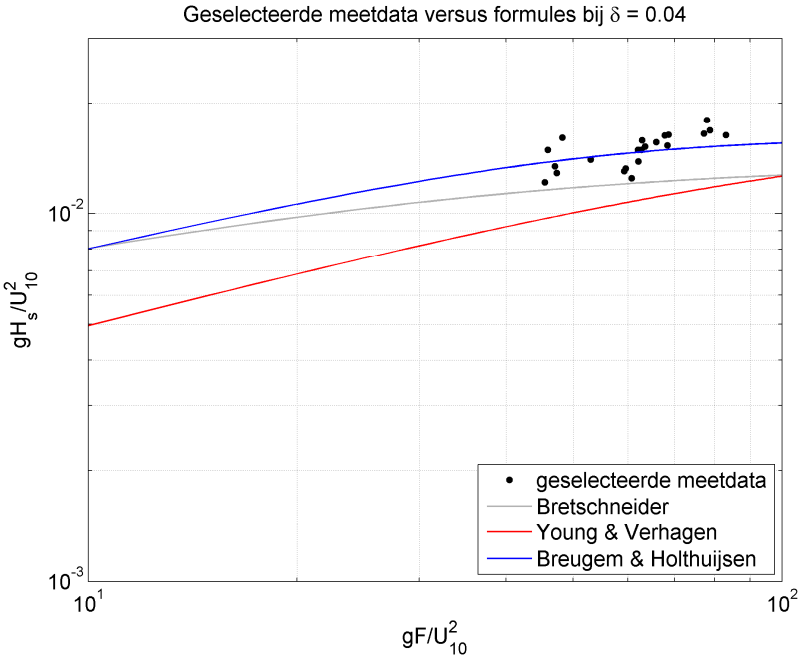
Bij relatief diep water lijken alle drie formules de gemeten waarden te onderschatten (negatieve percentages). Bij relatief ondiep water lijken de drie formules de gemeten waarden juist te overschatten. Bij relatief ondiep water lijkt de formule van Young & Verhagen het beste te presteren, met een gemiddelde afwijking van 11.02%. Ook bij een schaling van de waterdiepte met behulp van de gravitatieversnelling en de windsnelheid (dus: diepte δ) lijkt dit beeld naar voren te komen: dit beeld is immers reeds getoond in Figuur 5-2, Figuur 5-3 en Figuur 5-4.

5.1.4 Filtering op basis van kenmerken van het regionale systeem

Na deze observatie is het nuttig om nader te focussen op het regionale systeem. Deze focus wordt aangebracht door de meetdata te filteren op basis van de volgende criteria:

- windsnelheid is groter dan 17 m/s, dus: U_{10} > 17 m/s,
- waterdiepte is kleiner dan 3 m, dus: d < 3 m,
- strijklengte is kleiner dan 5 km, dus: F < 5000 m.

Het aantal metingen dat voldoet aan deze criteria is ongeveer 25. De dimensieloze diepte voor deze meetdata varieert van 0.03 tot 0.05, met een gemiddelde van circa 0.04. De dimensieloze golfhoogte is voor de gefilterde meetdata uitgezet tegen de dimensieloze strijklengte in Figuur 5-9. Hierbij zijn de drie golfgroeiformules tevens getoond, bij een dimensieloze diepte van 0.04.

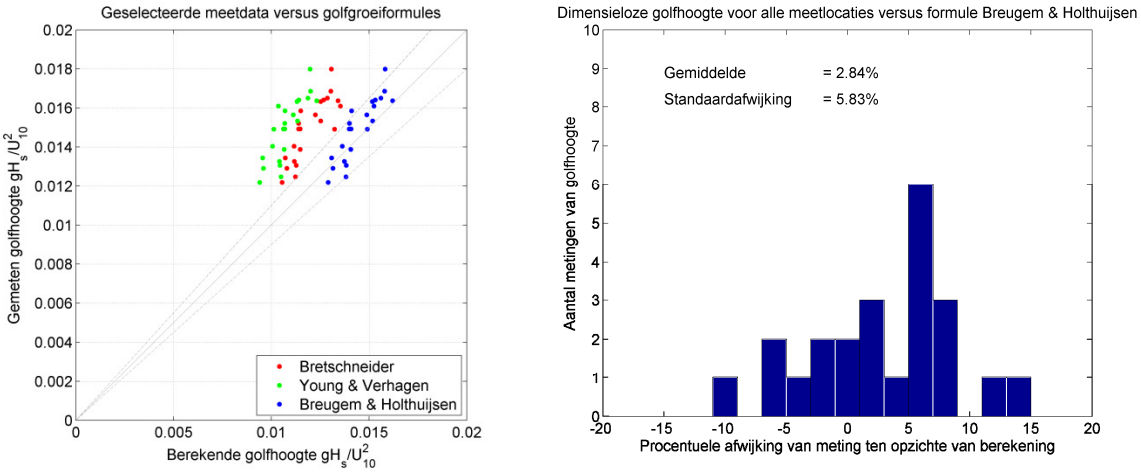


Figuur 5-9: Meetdata die voldoen aan de criteria U_{10} > 17 m/s, d < 3 m èn F < 5000 m, vergeleken met de drie golfgroeiformules, bij een dimensieloze diepte van 0.04 (ter illustratie).

Uit Figuur 5-9 blijkt dat de formule van Breugem & Holthuijsen de meest accurate voorspelling geeft van de golfhoogte. Dit beeld wordt bevestigd door Figuur 5-10, waarin de berekende golfhoogte is uitgezet tegen de gemeten golfhoogte. De waarden die volgen uit de formule van Breugem & Holthuijsen vallen, op twee meetpunten na, alle binnen de 10%-betrouwbaarheidsband (linker figuur).

De rechterfiguur van Figuur 5-10 toont een nadere kwantificering van deze observatie: gemiddeld wijken de berekende waarden ca. 2.84% (met spreiding 5.83%) af van de gemeten waarden. De gemiddelde afwijking is voor Bretschneider 24.18% (spreiding 7.80%) en voor

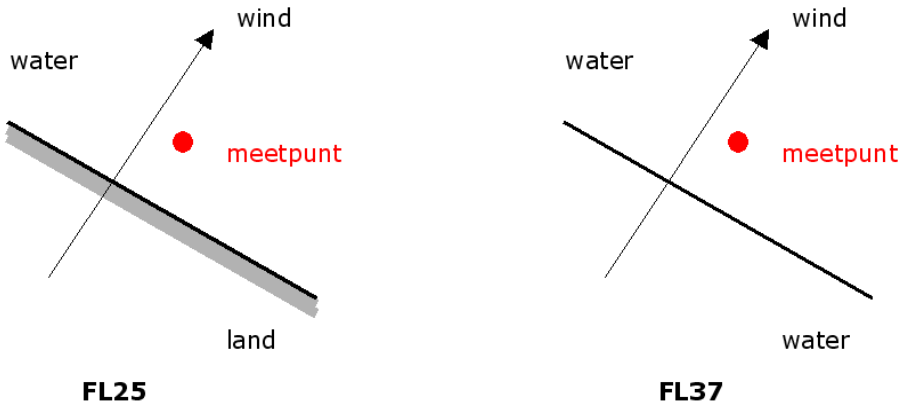
Young & Verhagen 38.78% (spreiding 8.69%). Gezien dit significante verschil is in Figuur 5-10 alleen het resultaat voor Breugem & Holthuijsen getoond.



Figuur 5-10: Links: gemeten golfhoogte versus de berekende golfhoogte, voor de drie golfgroeiformules. Rechts: histogram waarin de percentuele afwijking van de berekening ten opzichte van de meting is weergegeven voor de formule van Breugem & Holthuijsen.

5.1.5 De rol van verschillen in ruwheid

Een ander onderscheid doet zich voor bij de meetpunten FL25 en FL37. Bij meetpunt FL25 ligt het meetpunt relatief nabij het vaste land, terwijl bij meetpunt FL37 het meetpunt achter een dijk ligt, die twee wateren scheidt. Bij FL25 is het mogelijk dat door de beschutting landwaarts de wind een minder sterke rol speelt. Het aantal meetpunten is echter beperkt: FL25 heeft 32 punten, FL37 heeft 8 punten. Het verschil in situatie is indicatief getoond in Figuur 5-11.



Figuur 5-11: Schematische voorstelling van het verschil in omstandigheden tussen FL25 en FL37. Bij FL25 is er sprake van een land/water overgang, bij FL37 is er sprake van een water/water overgang, gescheiden door een dijk.

Het element van beschutting kan in breder perspectief begrepen worden vanuit het concept *ruwheid*. Land heeft een andere (grotere) ruwheid dan water. Toch speelt dit effect van ruwheidsovergangen ook een rol bij FL37. Aan de zuidzijde van de dijk kunnen immers golven groeien over een grotere strijklengte dan even ten noorden van de dijk. Hierdoor zal de ruwheid even ten zuiden groter zijn dan even ten noorden van de dijk. Dit water/water-ruwheidsverschil zal echter kleiner zijn dan het land/water-ruwheidsverschil. Geen van alle golfgroeiformules houdt op welke wijze ook maar rekening met de rol van beschutting of, in bredere zin, de rol van ruwheid.

Op analoge wijze als in het voorgaande, zijn de afwijkingen tussen de berekende en de gemeten golfhoogte gekwantificeerd. De resultaten voor FL25 en FL37 zijn afzonderlijk gegeven in Tabel 2. Het beeld is wederom diffuus: de spreidingen zijn groot. Bij de beschutte locatie FL25 lijken Bretschneider en Breugem & Holthuijsen de metingen te onderschatten, terwijl bij de niet-beschutte locatie FL37 alle formules, en met name Young & Verhagen, de metingen lijken te overschatten. Het beperkte aantal meetpunten en de grote onzekerheden in de invloed van de ruwheidsovergangen resulteren echter in zodanig grote onzekerheden, dat een eenduidige interpretatie van de resultaten erg lastig is.

	Golfgroeiformule	Gemiddelde	Standaardafwijking
FL25	Bretschneider	-28.90 %	18.06 %
'beschut'	Young & Verhagen	2.84 %	29.30 %
	Breugem & Holthuijsen	-29.75 %	18.54 %
FL37	Bretschneider	14.71 %	10.82 %
'onbeschut'	Young & Verhagen	52.35 %	46.41 %
	Breugem & Holthuijsen	9.31 %	17.74 %

Tabel 2: Gemiddelde en standaardafwijking van de afwijkingen tussen de gemeten en berekende dimensieloze golfhoogte voor de beschutte locatie FL25 en de niet-beschutte locatie FL37.

5.1.6 Evaluatie golfhoogte

De resultaten voor de golfhoogte, bij filtering op dimensieloze strijklengte of op relatieve diepte, zoals deze getoond zijn in de bovenstaande figuren, tonen een diffuus beeld:

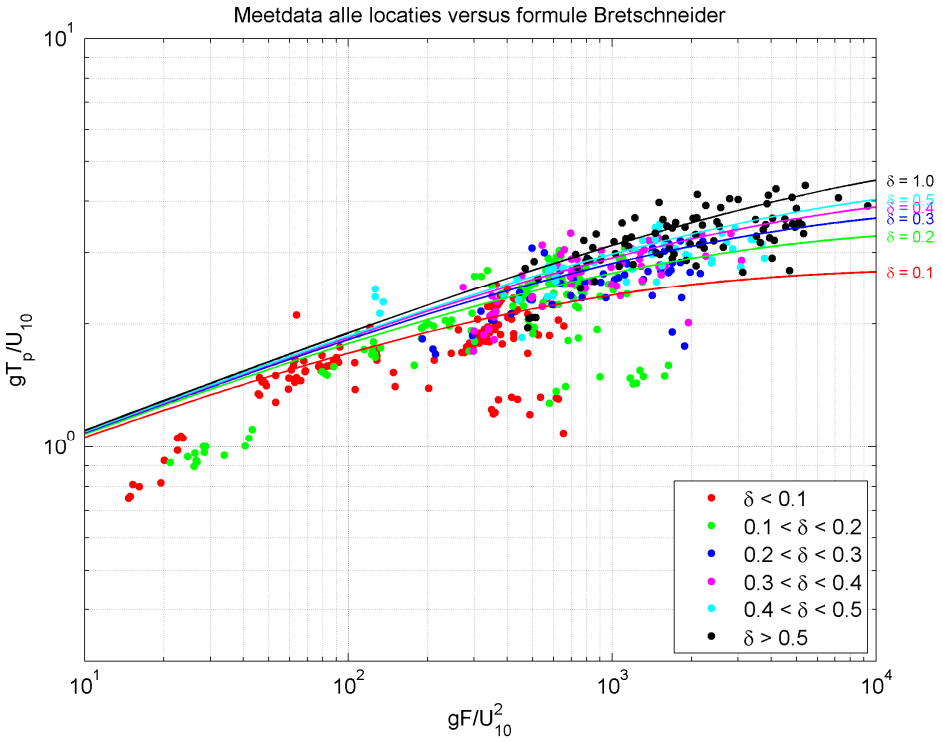
- Young & Verhagen vertoont de beste overeenkomsten, indien *alle* data (niet gefilterd op strijklengte of waterdiepte) worden beschouwd. Deze afwijking is voor Young & Verhagen *gemiddeld* –0.06%. De spreiding is zeer groot.
- Young & Verhagen vertoont de beste overeenkomsten als relatief ondiep water (H_s/d > 0.3) wordt beschouwd. Deze afwijking is voor Young & Verhagen gemiddeld 11.02%. Bij relatief diep water (H_s/d < 0.2) presteert de formule van Breugem & Holthuijsen het beste met gemiddeld –7.13%.
- Bretschneider vertoont de beste overeenkomsten als relatief korte strijklengtes (< 200, dimensieloos) worden beschouwd. Deze afwijking is voor Bretschneider 8.65%.
- Bij een filtering die specifiek gericht is op toepassing in het regionale systeem, presteert de formule van Breugem & Holthuijsen het beste met een gemiddelde afwijking van 2.84%.

5.2 Piekperiode

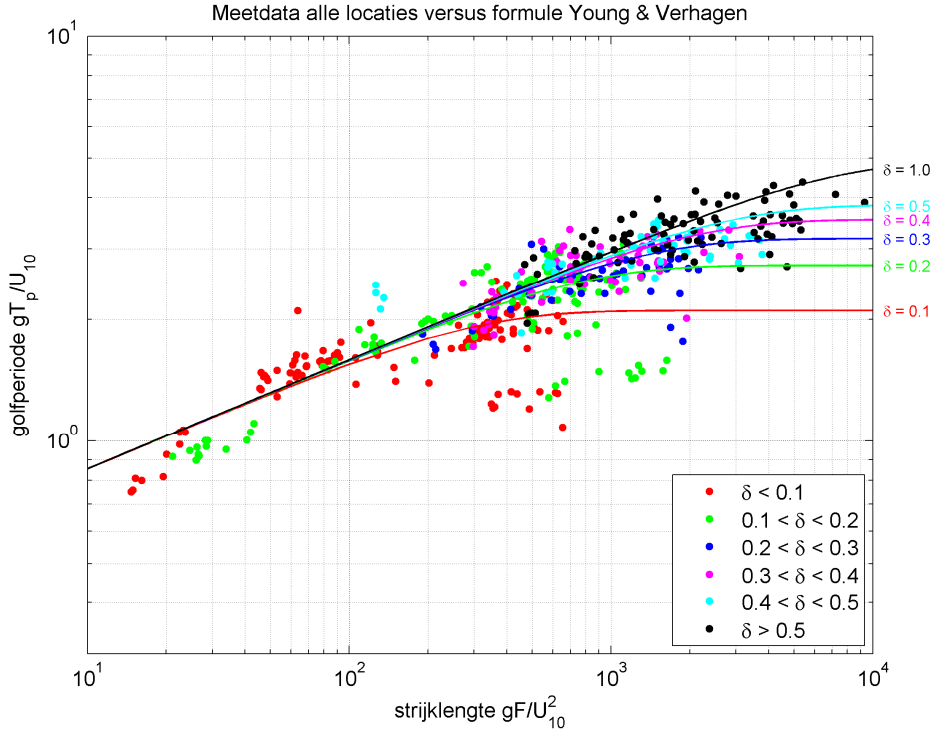
In de vorige paragraaf zijn de data voor de *golfhoogte* H_s getoond in relatie tot de drie golfgroeiformules. In deze paragraaf worden de data voor de *piekperiode* T_p getoond.

5.2.1 Beschouwing van alle beschikbare metingen

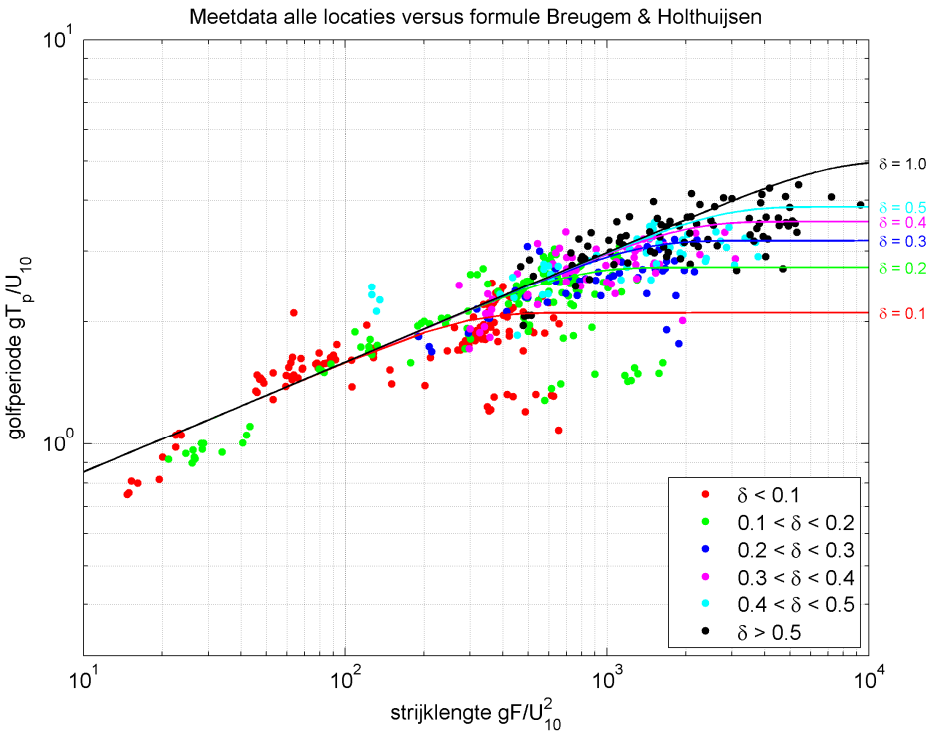
In Figuur 5-12 zijn de gemeten piekperiodes voor het Slotermeer, het IJsselmeer en Lake George getoond versus de strijklengte. Hierbij is tevens de golfperiode volgens Bretschneider getoond, bij diverse waarden voor de dimensieloze diepte δ. In Figuur 5-13 en Figuur 5-14 zijn dezelfde meetdata getoond, maar dan voor Young & Verhagen en Breugem & Holthuijsen.



Figuur 5-12: Dimensieloze piekperiode uitgezet tegen de dimensieloze strijklengte, geordend naar dimensieloze diepte. De doorgetrokken lijnen representeren de formule van Bretschneider bij de gegeven waarde van de dimensieloze diepte. De punten representeren alle geanalyseerde meetdata.



Figuur 5-13: Dimensieloze piekperiode uitgezet tegen de dimensieloze strijklengte, geordend naar dimensieloze diepte. De doorgetrokken lijnen representeren de formule van Young & Verhagen bij de gegeven waarde van de dimensieloze diepte. De punten representeren alle geanalyseerde meetdata.



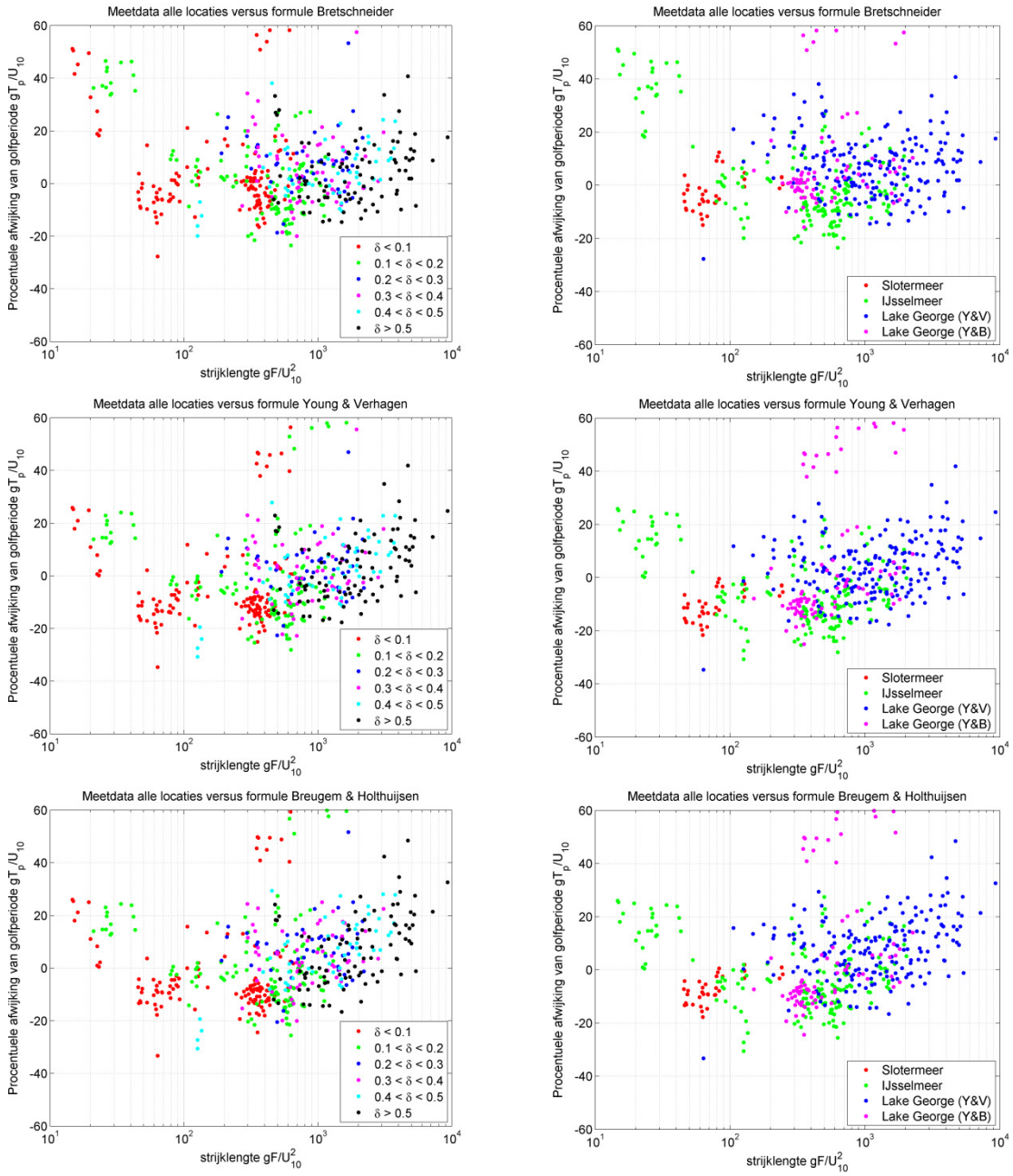
Figuur 5-14: Dimensieloze piekperiode uitgezet tegen de dimensieloze strijklengte, geordend naar dimensieloze diepte. De doorgetrokken lijnen representeren de formule van Breugem & Holthuijsen bij de gegeven waarde van de dimensieloze diepte. De punten representeren alle geanalyseerde meetdata.

De drie figuren suggereren dat de piekperiode gemakkelijker te voorspellen is door de golfgroeiformules dan de golfhoogte. De afwijkingen tussen de metingen en de formules lijken aanzienlijk geringer te zijn, vergeleken met de afwijkingen bij de golfhoogte.

Net als bij de analyse van de golfhoogte, wordt bij de analyse van de piekperiode gebruik gemaakt van de relatieve afwijking, uitgedrukt als:

$$afwijking = \frac{berekening - meting}{meting} \cdot 100\%$$

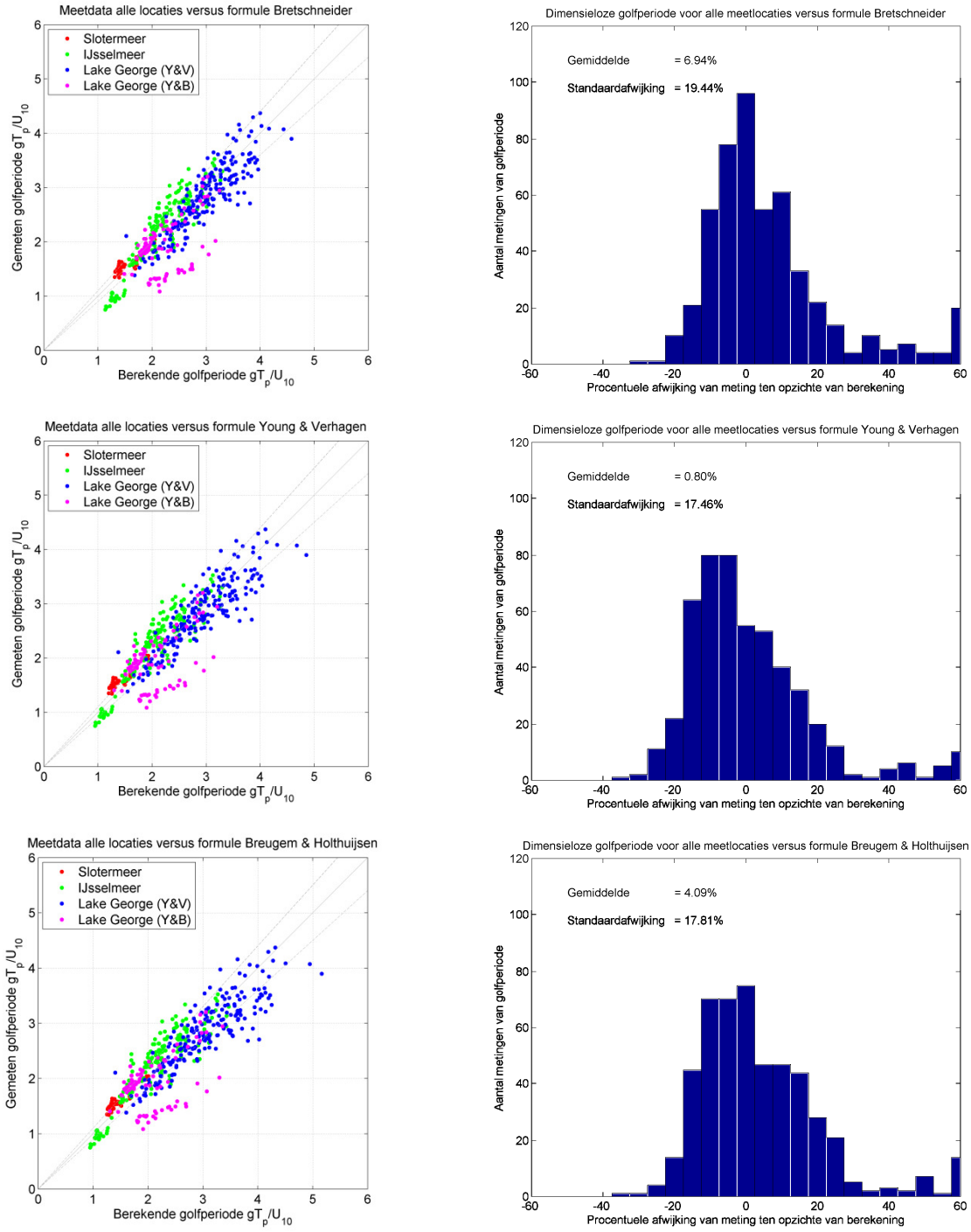
De relatieve afwijking van de dimensieloze piekperiode is getoond in Figuur 5-15, zowel geordend naar diepte, als naar meetlocatie.



Figuur 5-15: Relatieve afwijking in dimensieloze piekperiode tussen formules en meetdata, uitgezet tegen de strijklengte. Links: ordening naar dimensieloze diepte, rechts: ordening naar locatie.

Figuur 5-15 laat zien dat de relatieve afwijkingen bij de piekperiode (tot 60%) circa twee maal kleiner zijn dan de afwijkingen bij de golfhoogte (tot 120%). Opmerkelijk is dat de meetdata voor Lake George van Young & Babanin uit twee sets bestaan met duidelijk verschillende afwijkingen: een set van circa 20 datapunten vertoont een structurele afwijking van ca. +50%.

Een kwantitatieve analyse van de afwijkingen is getoond in Figuur 5-16. De berekende en gemeten piekperiodes zijn sterker gecentreerd rondom de 1:1 lijn dan dat dat bij de piekperiodes het geval is (zie Figuur 5-6). De kleinste afwijkingen worden gezien bij toepassing van de formule van Young & Verhagen (+0.80%).

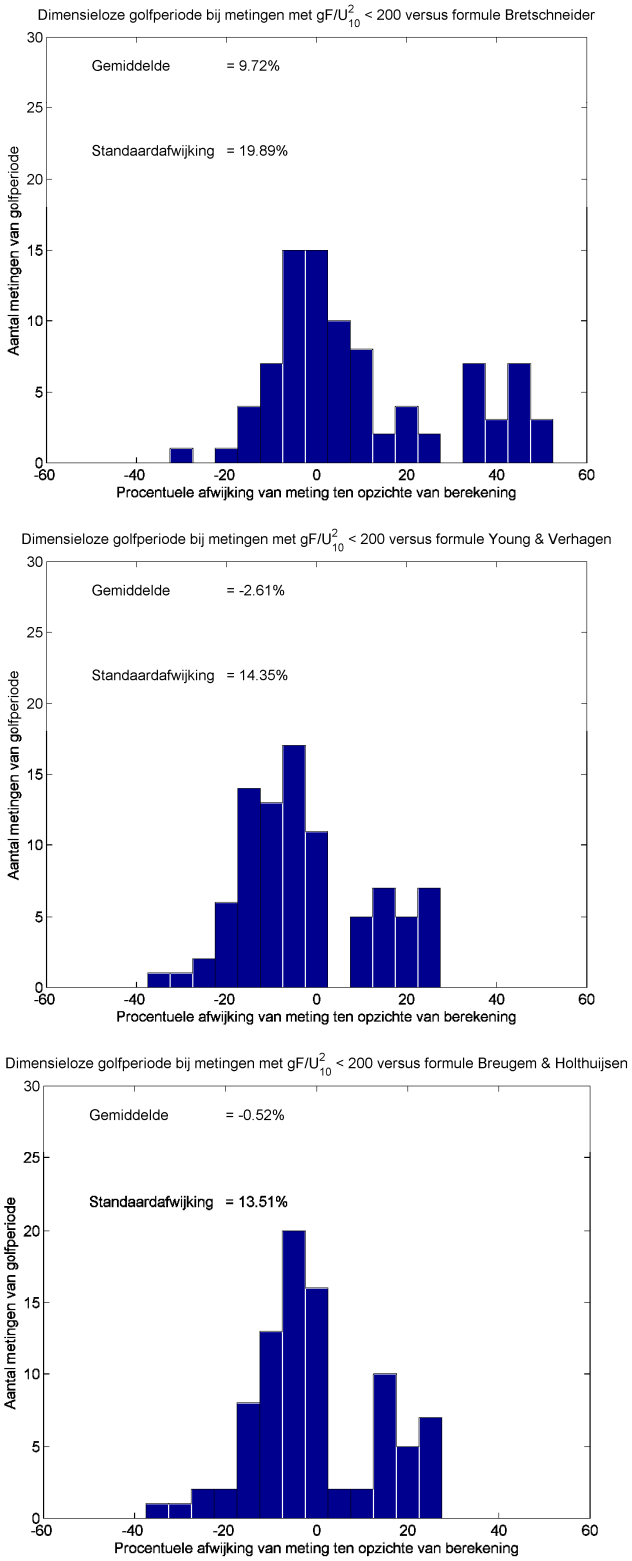


Figuur 5-16: Linker figuren: gemeten piekperiodes uitgezet tegen de berekende golfhoogtes, volgens de drie golfgroeiformules. Rechter figuren: verdeling van de afwijkingen tussen gemeten en berekende waarden, inclusief de gemiddelde afwijking en de standaardafwijking.

De verschillen tussen de voorspelling van de drie formules zijn echter tamelijk klein. De spreiding van de afwijkingen is ook vergelijkbaar voor de drie formules: ca. 20%.

5.2.2 Filtering op basis van dimensieloze strijklengte

De resultaten bij filtering op strijklengtes kleiner dan 200 (dimensieloos) is getoond in Figuur 5-17.

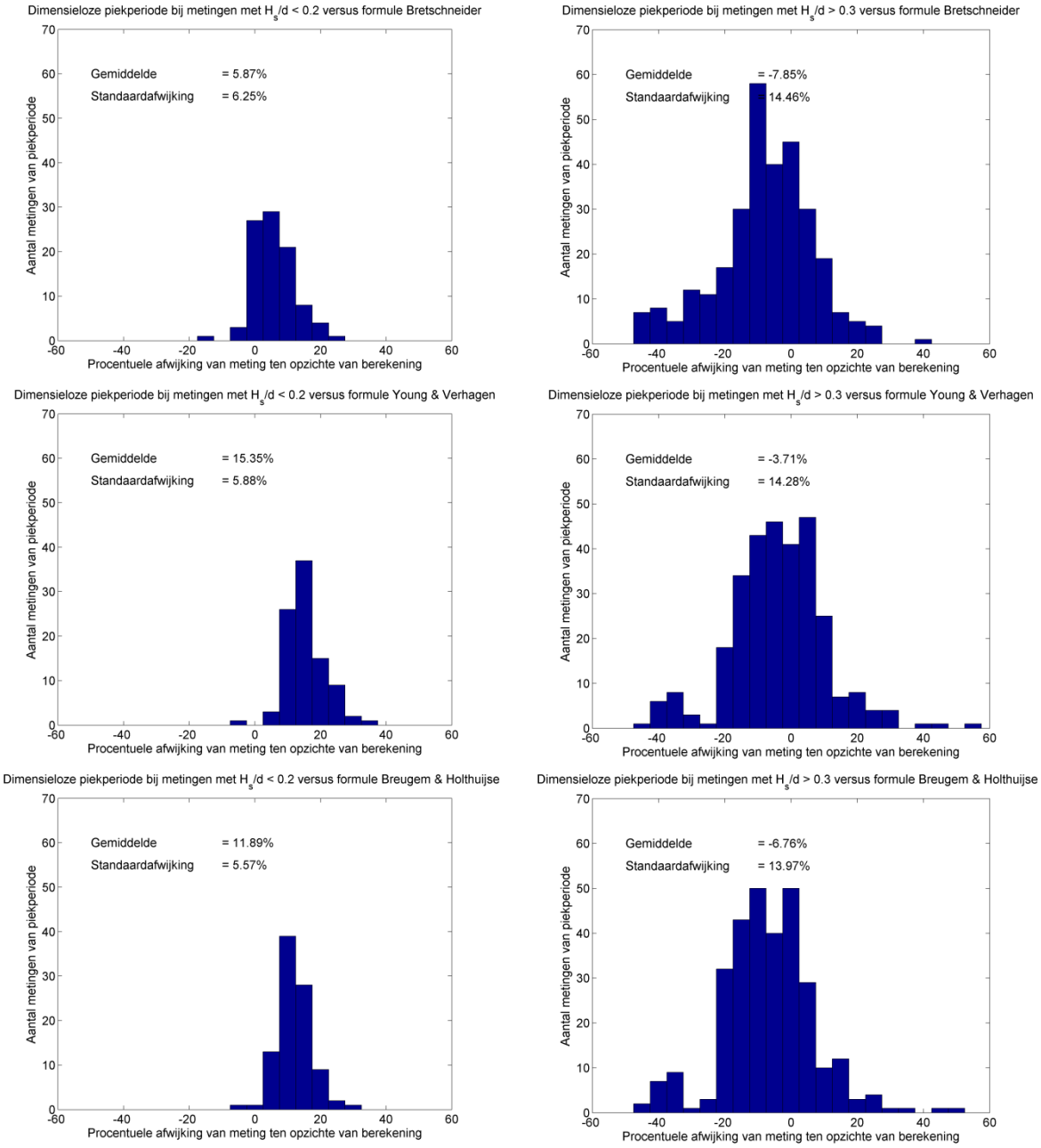


Figuur 5-17: Afwijkingen tussen gemeten piekperiodes en formules, waarbij een selectie is toegepast op basis van dimensieloze strijklengte (kleiner dan 200).

Bij filtering van de data op relatief korte dimensieloze strijklengtes nemen de afwijkingen tussen de gemeten waarden en de berekende waarden enigszins toe. De histogrammen blijken nu bovendien, sterker dan in Figuur 5-16, uit twee pieken te bestaan. De formule van Breugem & Holthuijsen geeft het beste resultaat met een gemiddelde afwijking van 0.52%, na filtering op relatief korte strijklengtes. Er is echter sprake van een grote onzekerheid.

5.2.3 Filtering op basis van diep/ondiep water

Wederom wordt een filtering uitgevoerd op basis van het quotiënt H_s/d. Indien $H_s/d < 0.2$, dan wordt het water als diep beschouwd, bij $H_s/d > 0.3$ als ondiep.



Figuur 5-18: Afwijkingen tussen gemeten piekperiodes en formules, waarbij een selectie is toegepast op basis van dimensieloze diepte (links diep: $H_s/d < 0.2$, rechts ondiep: $H_s/d > 0.3$).

Bij relatief diep water ($H_s/d < 0.2$) overschatten alle drie formules de gemeten waarden (positieve percentages). Bij relatief ondiep water ($H_s/d > 0.3$) onderschatten de drie formules de gemeten waarden juist. Dit beeld is precies tegenovergesteld aan het beeld bij de golfhoogtes. Bij relatief ondiep water presteert de formule van Young & Verhagen het beste, met een gemiddelde afwijking van -3.71%.

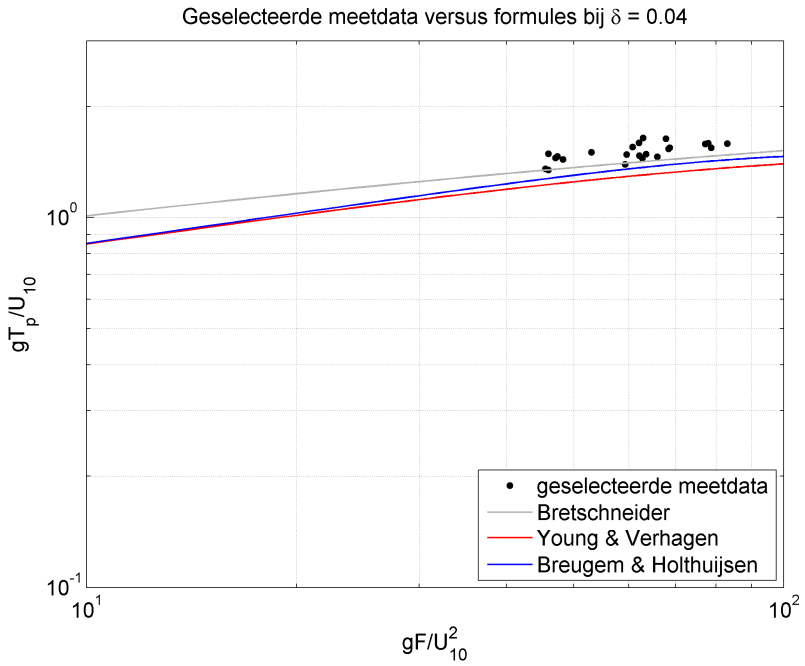
5.2.4 Filtering op basis van kenmerken van het regionale systeem

Het is nuttig om nu nader de aandacht te richten op het regionale systeem. Deze focus wordt aangebracht door de meetdata te filteren op basis van de volgende criteria:

- windsnelheid is groter dan 17 m/s, dus: U_{10} > 17 m/s;
- waterdiepte is kleiner dan 3 m, dus: d < 3 m;
- strijklengte is kleiner dan 5 km, dus: F < 5000 m.

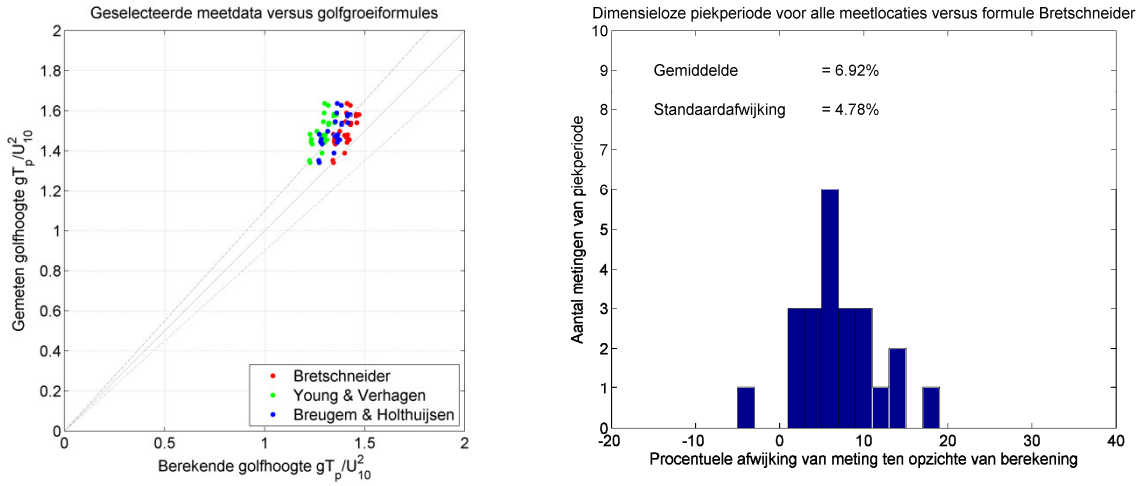
Zoals eerder is aangegeven, is de dimensieloze diepte voor deze meetdata variërend van 0.03 tot 0.05, met een gemiddelde van circa 0.04. In Figuur 5-19 worden de gemeten piekperiodes uitgezet tegen de berekende piekperiodes volgens de drie golfgroeiformules.

Het algemene beeld dat vanuit Figuur 5-19 naar voren komt is dat de drie formules de gemeten waarden onderschatten, voor deze gefilterde dataset. De verschillen tussen de drie formules zijn echter klein.



Figuur 5-19: Meetdata die voldoen aan de criteria U_{10} > 17 m/s, d < 3 m èn F < 5000 m, vergeleken met de drie golfgroeiformules, bij een dimensieloze diepte van 0.04 (ter illustratie).

Om het beeld van Figuur 5-19 verder te kwantificeren, zijn in Figuur 5-20 twee plaatjes weergegeven. De linkerfiguur toont de relatieve afwijking van de berekende waarden ten opzichte van de gemeten waarden. Gemiddeld blijven de waarden volgens Bretschneider (met gemiddelde 6.92% en spreiding 4.78%) binnen de 10% marges. Dit is echter niet het geval voor de waarden volgens Young & Verhagen (met gemiddelde 16.41% en spreiding 4.94%) en Breugem & Holthuijsen (met gemiddelde 11.30% en spreiding 4.54%). De best presterende formule heeft een gemiddelde afwijking van 6.92% met een spreiding van 4.78%, zoals getoond in de rechterfiguur van Figuur 5-20.



Figuur 5-20: Links: gemeten piekperiode versus de berekende piekperiode, voor de drie golfgroeiformules. Rechts: histogram waarin de percentuele afwijking van de berekening ten opzichte van de meting is weergegeven voor de formule van Bretschneider.

5.2.5 Evaluatie piekperiode

De resultaten voor de piekperiode, bij filtering op dimensieloze strijklengte of op relatieve diepte, zoals deze getoond zijn in de voorgaande paragrafen, tonen het volgende beeld:

- Young & Verhagen vertoont de beste overeenkomsten, indien *alle* data (niet gefilterd op strijklengte of waterdiepte) worden beschouwd. Deze afwijking is voor Young & Verhagen *gemiddeld* 0.80%. De spreiding is zeer groot.
- Young & Verhagen vertoont de beste overeenkomsten als relatief ondiep water (H_s/d > 0.3) wordt beschouwd. Deze afwijking is voor Young & Verhagen gemiddeld -3.71%. Bij relatief diep water (H_s/d < 0.2) presteert de formule van Bretschneider het beste met gemiddeld 5.87%.
- Breugem & Holthuijsen vertoont de beste overeenkomsten als relatief korte strijklengtes (< 200, dimensieloos) worden beschouwd. Deze afwijking is hierbij –0.52%.
- Bij een filtering die specifiek gericht is op toepassing in het regionale systeem, presteert de formule van Bretschneider het beste met een gemiddelde afwijking van 6.92%.

5.3 Conclusies

De afwijkingen tussen de gemeten waarden en de berekende waarden zijn als volgt in een tabel samen te vatten: zie Tabel 3 en Tabel 4.

De spreiding in de resultaten is echter dermate groot, dat het moeilijk is om eenduidig een formule aan te wijzen die het beste de meetdata benadert.

Indien een filtering, specifiek toegespitst op het regionale systeem, wordt toegepast op de meetdata, dan blijkt de formule van Breugem & Holthuijsen duidelijk het meest nauwkeurig de meetdata te benaderen. De afwijkingen zijn dan gemiddeld 3% met een spreiding van 6%. Het aantal meetpunten, waarop dit gemiddelde en deze spreiding zijn gebaseerd, is met 25 echter erg beperkt.

De gemiddelde afwijkingen zijn tamelijk klein; echter, de spreiding in de resultaten is echter dermate groot, dat het moeilijk is om eenduidig een formule aan te wijzen die het beste de meetdata benadert.

Indien een filtering, specifiek toegespitst op het regionale systeem, wordt toegepast op de meetdata, dan blijkt de formule van Bretschneider het meest nauwkeurig de meetdata te benaderen. De afwijkingen zijn dan gemiddeld 7% met een spreiding van 5%. Hier geldt andermaal dat het aantal meetpunten (25), waarop dit gemiddelde en deze spreiding zijn gebaseerd, erg beperkt is.

Golfhoogte

	Golfgroeiformule	Gemiddelde	Standaardafwijking
Alle data	Bretschneider	12.03 %	41.97 %
	Young & Verhagen	-0.06 %	35.39 %
	Breugem & Holthuijsen	23.96 %	42.98 %
Korte strijklengtes	Bretschneider	8.65 %	57.95 %
	Young & Verhagen	19.81 %	35.25 %
	Breugem & Holthuijsen	15.86 %	55.45 %
Diep water	Bretschneider	-20.84 %	7.98 %
	Young & Verhagen	-20.54 %	13.15 %
	Breugem & Holthuijsen	-7.13 %	10.34 %
Ondiep water	Bretschneider	29.78 %	45.38 %
	Young & Verhagen	11.02 %	39.87 %
	Breugem & Holthuijsen	41.03 %	47.17 %
Regionaal systeem	Bretschneider	24.18 %	7.80 %
	Young & Verhagen	38.78 %	8.69 %
	Breugem & Holthuijsen	2.84 %	5.83 %

Tabel 3: Gemiddelde en standaardafwijking van de afwijkingen tussen de gemeten en berekende dimensieloze golfhoogte.

Piekperiode

	Golfgroeiformule	Gemiddelde	Standaardafwijking
Alle data	Bretschneider	6.94 %	19.44 %
	Young & Verhagen	0.80 %	17.46 %
	Breugem & Holthuijsen	4.09 %	17.81 %
Korte strijklengtes	Bretschneider	9.72 %	19.89 %
	Young & Verhagen	-2.61 %	14.35 %
	Breugem & Holthuijsen	-0.52 %	13.51 %
Diep water	Bretschneider	5.87 %	6.25 %
	Young & Verhagen	15.35 %	5.88 %
	Breugem & Holthuijsen	11.89 %	5.57 %
Ondiep water	Bretschneider	-7.85 %	14.46 %
	Young & Verhagen	-3.71 %	14.28 %
	Breugem & Holthuijsen	-6.76 %	13.97 %
Regionaal systeem	Bretschneider	6.92 %	4.78 %
	Young & Verhagen	16.41 %	4.94 %
	Breugem & Holthuijsen	11.30 %	4.54 %

Tabel 4: Gemiddelde en standaardafwijking van de afwijkingen tussen de gemeten en berekende dimensieloze piekperiode.

6 Nadere analyse

In het vorige hoofdstuk zijn de golfgroeiformules volgens Bretschneider, Young & Verhagen en Breugem & Holthuijsen geanalyseerd tegen de achtergrond van de beschikbare metingen voor het Slotermeer, het IJsselmeer en Lake George. De resultaten uit het vorige hoofdstuk laten zien dat er grote afwijkingen (en spreidingen daarin) bestaan tussen de meetdata en de formules. Deze afwijkingen zijn in zichzelf niet verwonderlijk, aangezien er een enorme variabiliteit in het natuurlijke proces aanwezig is. Het is daarom lastig om deze natuurlijke variabiliteit correct te vatten in een relatief eenvoudige formule. In dit hoofdstuk wordt nagegaan wat de elementaire onzekerheden zijn die hierbij een rol spelen. In het volgende hoofdstuk worden aanbevelingen gedaan hoe daar in de toekomst mee kan worden omgegaan.

6.1 Onzekerheden in de metingen

Bij de interpretatie van de meetdata, tegen de achtergrond van de golfgroeiformules, spelen vele onzekerheden een rol. De voornaamste onzekerheden betreffen het gebruik van een representatieve windsnelheid, de definitie van de effectieve strijklengte, de toe te passen waterdiepte, de ruwheids(overgangen) voor de luchtstroming nabij oevers en de geometrie van wateroppervlakken. De laatste twee onzekerheden hebben een directe relatie met windsnelheid en strijklengte. In veel minder mate zijn er onzekerheden in de gemeten golfhoogte en piekperiode, gezien de mate van validatie. Hieronder gaan we enkele onzekerheden na.

6.1.1 Meetonzekerheden

Bij elke meting die wordt uitgevoerd, worden meetfouten in de analyse geïntroduceerd. In de achtergrondrapportages bij de meetresultaten is reeds in ruime mate aandacht geschonken aan deze meetonzekerheden (Appendix B in [RIZA, 2007] voor het Slotermeer en het IJsselmeer, en paragraaf 4.3.3 in [Verhagen, 1999] voor de Lake George data).

Het is echter vanuit die achtergrondrapportages niet geheel duidelijk hoe deze onzekerheden kunnen worden gerelateerd aan de afwijkingen met de golfgroeiformules. Alleen in figuur 4.10 en figuur 4.11 van [Verhagen, 1999] wordt expliciet een connectie gelegd tussen onzekerheden door ‘meetfouten, analyse methoden, inadequate theorie, onechte correlaties en instrument onzekerheden’ en de golfgroeiformule van Young & Verhagen (bij dimensieloze dieptes tussen 0.2 en 0.3).

Een meer integraal overzicht waarin alle meetdata (Slotermeer, IJsselmeer en Lake George) en meetonzekerheden betrokken wordt tezamen met de drie golfgroeiformules kan worden verkregen door een Monte Carlo analyse. Vervolgens kan op basis van een kansverdeling voor elke als onzeker beschouwde meetgrootheid een onzekerheidsband worden geconstrueerd om elk meetpunt heen. Deze bandbreedte kan vervolgens weer gerelateerd worden aan de afwijkingen met de golfgroeiformules. Figuur 4.10 en figuur 4.11 uit [Verhagen, 1999] leveren hier vooralsnog ook nog geen volledig zicht op.

6.1.2 Windsnelheid

De wijze waarop de windsnelheid in de modellering gebracht wordt, kan onderling verschillen tussen de diverse uitgevoerde studies. Bij studies van Lake George metingen wordt soms

gebruik gemaakt van de component van de windsnelheid langs de as van het meer en soms van de windsnelheid zelf. Bovendien kan gebruikt gemaakt worden van windsnelheid en uurgemiddelde waarden.

In veel gevallen wordt gebruik gemaakt van U_{10}, ofwel de windsnelheid op 10 meter hoogte boven het wateroppervlak. In deze studie is gebruik gemaakt van de windsnelheid op 10 meter hoogte van het wateroppervlak. Hiermee is dus geen impliciet verband tussen de resultaten en de ruwheid van het wateroppervlak aanwezig. In hoofdstuk 3 is reeds een aantal aandachtspunten geplaatst bij het gebruik van U_{10} als schalingsparameter.

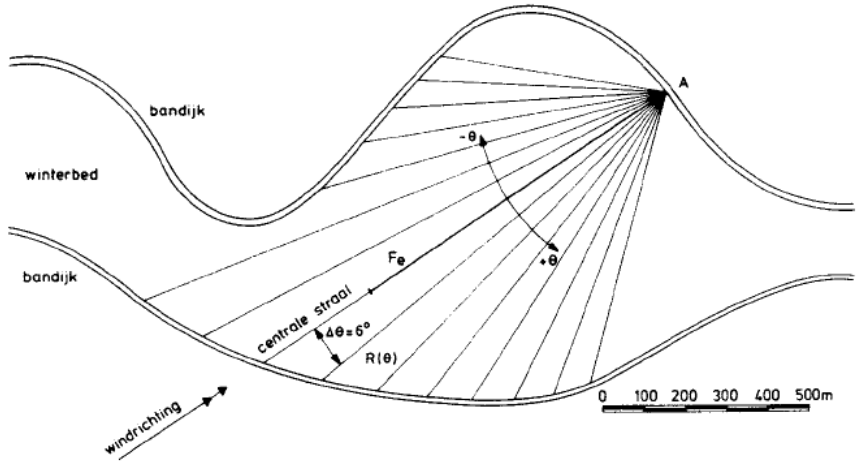
Het centrale aandachtspunt bij het definiëren van een windsnelheid als schalingsparameter is *ruimtelijk variatie*. Deze ruimtelijke variatie kan veroorzaakt worden door, onder meer, de natuurlijke variabiliteit, verschillen in ruwheid en de oriëntatie van de wind ten opzichte van de dijk (aanlandig of aflandig). Met name bij korte strijklengtes is deze ruimtelijke variabiliteit groot.

Geen van de geanalyseerde golfgroeiformules houdt rekening met ruwheid en overgangen in de ruwheid. Enerzijds zou ruwheid (en daarmee dus *verschillen* in ruwheid) impliciet in de formules kunnen worden verwerkt door middel van het rekenen met de schuifspanningssnelheid u_*, die aan de windsnelheid en de ruwheid van het oppervlak gerelateerd is door middel van een logaritmisch verband. Het bezwaar hierbij is dat bij ruimtelijke variabiliteit een logaritmisch verband per definitie niet geldig is. Van een logaritmisch verband is sprake bij een volledig ontwikkelde turbulente grenslaag, met een constante, unidirectionele aandrijvende kracht (drukgradiënt).

Anderzijds zou een extra modelfactor in de formule kunnen worden gebracht door *overgangen* in ruwheid mee te nemen. Momenteel zijn echter te weinig data voorhanden om te komen tot een geschikte en goed onderbouwde waarde voor een dergelijke factor. Het meenemen van een modelfactor is echter eenvoudiger dan modellering van een snelheidsprofiel via u_*.

6.1.3 Strijklengte

De methode voor de bepaling van de strijklengte is niet eenduidig en blijkt in voorgaande studies van elkaar te verschillen. In 1985 is door de toenmalige TAW een methode beschreven waarmee een *effectieve strijklengte* kan worden bepaald.



Figuur 6-1: Bepaling van de effectieve strijklengte op basis van een waaier rondom de beschouwde windrichting.

Figuur 6-1 geeft een indruk van hoe deze effectieve strijklengte kan worden bepaald. Een belangrijk element van de methode is het gewogen meenemen van windrichtingen om de beschouwde windrichting heen (over een bepaalde hoek). Hierbij krijgen windrichtingen nabij de hoofdrichting een groter gewicht dan verder weg gelegen windrichtingen.

In diverse gevallen zijn alternatieve methoden gebruikt voor het bepalen van de strijklengte. Bij de data voor Lake George wordt bijvoorbeeld soms uitgegaan van een golfgroei op diepwater voor het eerste meetstation, waarna voor de andere meetstations aan de berekende strijklengte een geometrische strijklengte wordt toegevoegd [Verhagen, 1999]. Soms wordt bij Lake George uitgegaan van de geometrische strijklengtes [Breugem & Holthuijsen, 2007], dat wil zeggen afstanden tussen de meetstations (ook voor het eerste meetstation).

De strijklengte is een belangrijke parameter bij de golfgroeiformules. Als indicatie voor de invloed kan worden gebruikt dat 20% afwijkingen in de strijklengte leiden tot 10% afwijkingen in de golfhoogte en tot 5% afwijkingen in de piekperiode. Juist gegeven het belang de strijklengte is aan te bevelen de invloed van te schatten aan de hand van een Monte Carlo analyse. Deze Monte Carlo analyse geeft inzicht in de invloed van het samenspel van de diverse onzekerheden.

In toevoeging op het onderscheid tussen aflandige of aanlandige wind, speelt ook de geometrie van het water zelf een rol. Een uitgebreide analyse is op dit punt uitgevoerd door [Breugem & Holthuijsen, 2007] voor Lake George. In [Breugem & Holthuijsen, 2007] is voor Lake George in detail gekeken naar de verschillen tussen de golfgroei bij wind uit noordelijke richting en wind uit zuidelijke richting. Uit de resultaten is naar voren gekomen dat de golven bij noordelijke windrichting aanzienlijk hoger zijn dan bij zuidelijke windrichting. [Breugem & Holthuijsen, 2007] hebben dit verschijnsel van ‘subset-stratificatie’ verklaard vanuit de geometrie van het meer.

Dergelijke verschillen door asymmetrieën in de geometrie van het water doen zich uiteraard veelvuldig voor in de realiteit en dus ook bij regionale systemen. Er is momenteel geen enkel formule die dergelijke effecten van ‘subset-stratificatie’ meeneemt.

6.2 Onzekerheden in de formuleparameters

In deze paragraaf wordt ingegaan op de rol van de modelparameters zoals deze direct in de golfgroeiformules voorkomen.

De formules van Bretschneider, Young & Verhagen en Breugem & Holthuijsen gaan alle uit van dezelfde standaardvorm. De onderlinge verschillen worden gevonden in de keuze voor de diverse parameters. Deze parameters zijn in de regel het resultaat van het uitvoeren van een kleinste-kwadraten optimalisatie, gegeven de meetdata.

De drie golfgroeiformules worden alle beschreven met de volgende uitdrukkingen:

$$H_s = \frac{p_1 \cdot U^2 v_1^{p_2}}{g} \tanh\left(\frac{p_3}{v_1} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{p_4} \right)^{p_2}$$

$$T_p = \frac{q_1 \cdot U v_2^{q_2}}{g} \tanh\left(\frac{q_3}{v_2} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{q_4} \right)^{q_2}$$

waarbij:

$$v_1 = \tanh\left(p_5 \left(\frac{gd}{U^2} \right)^{p_6} \right) \quad \text{en} \quad v_2 = \tanh\left(q_5 \left(\frac{gd}{U^2} \right)^{q_6} \right).$$

De parameters die worden gehanteerd in de drie formules zijn gegeven in Tabel 5.

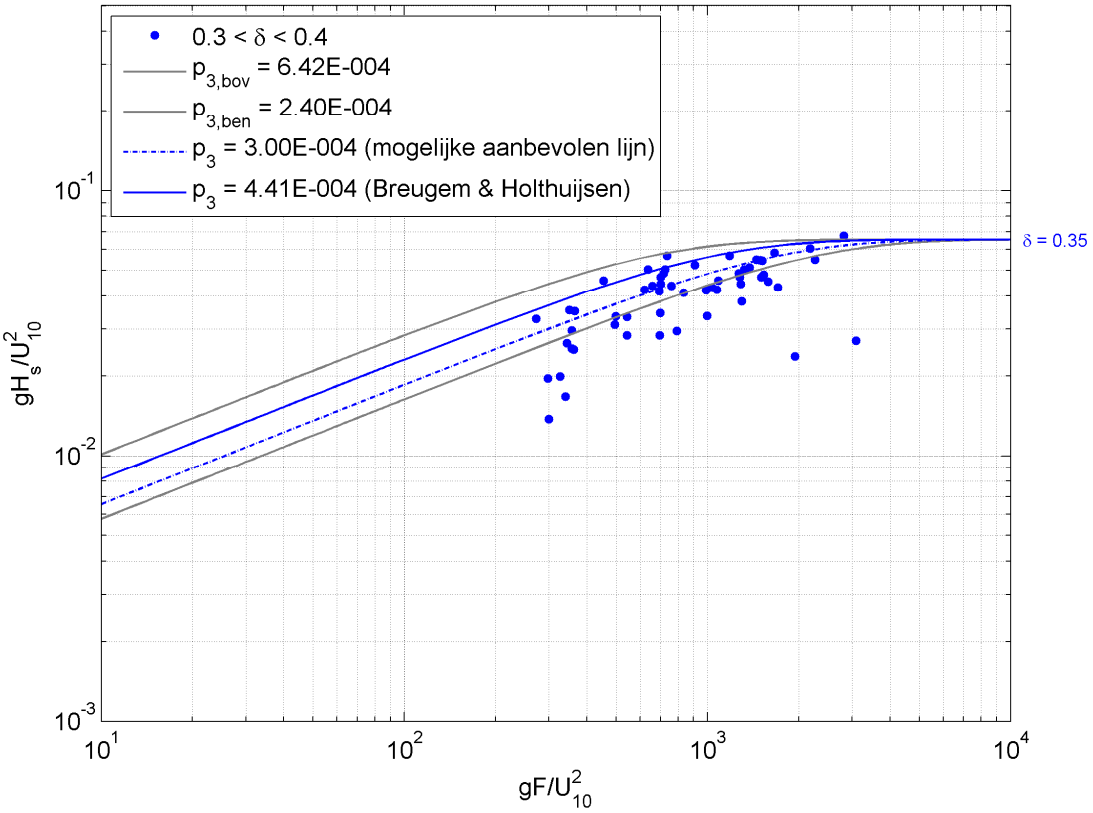
		Bretschneider	Young & Verhagen	Breugem & Holthuijsen
golfhoogte	p_1	0.283	0.241	0.240
	p_2	1.000	0.870	0.572
	p_3	0.0125	$3.133.10^{-3}$	$4.410.10^{-4}$
	p_4	0.42	0.575	0.79
	p_5	0.530	0.493	0.343
	p_6	0.750	0.747	1.140
piekperiode	q_1	8.143	7.519	7.690
	q_2	1.000	0.370	0.187
	q_3	0.077	$5.215.10^{-4}$	$2.770.10^{-7}$
	q_4	0.25	0.73	1.45
	q_5	0.833	0.331	0.100
	q_6	0.375	1.014	2.010

Tabel 5: Parameters p_1 t/m p_6 voor de formules voor de golfhoogtes en parameters q_1 t/m q_6 voor de formules voor de piekperiode.

In Figuur 3-1 en Figuur 3-2 is reeds getoond in het kort aangegeven welke verschillen er tussen de golfgroeiformules zijn.

Het bestaan van deze varianten laat zien dat de parameters zoals gegeven in Tabel 6-1 ook onzeker zijn. De invloed van deze onzekerheden kan in kaart worden gebracht door de variatie in de meetdata meer direct te relateren aan verschillende parameters binnen de golfgroeiformules.

Als voorbeeld wordt een selectie geanalyseerd getoond van de meetdata met een dimensieloze diepte tussen 0.3 en 0.4 in relatie tot de formule voor de golfhoogte volgens Breugem & Holthuijsen. Deze dataselectie is getoond in Figuur 6-2, tezamen met de formule volgens Breugem & Holthuijsen bij een dimensieloze diepte van 0.35.



Figuur 6-2: Selectie van de gemeten golfhoogtes (bij een dimensieloze diepte tussen 0.3 en 0.4), uitgezet tegen de dimensieloze strijklengte. De blauwe lijn representeert de formule volgens Breugem & Holthuijsen met de daarbij horende waarde van p_3. De grijze lijnen representeren de formule van Breugem & Holthuijsen met een alternatieve waarde voor p_3.

Figuur 6-2 laat zien dat vrijwel alle meetpunten *onder* de lijn volgens Breugem & Holthuijsen liggen. Met behulp van variatie van parameter p_3 kan echter het volgende worden bereikt:

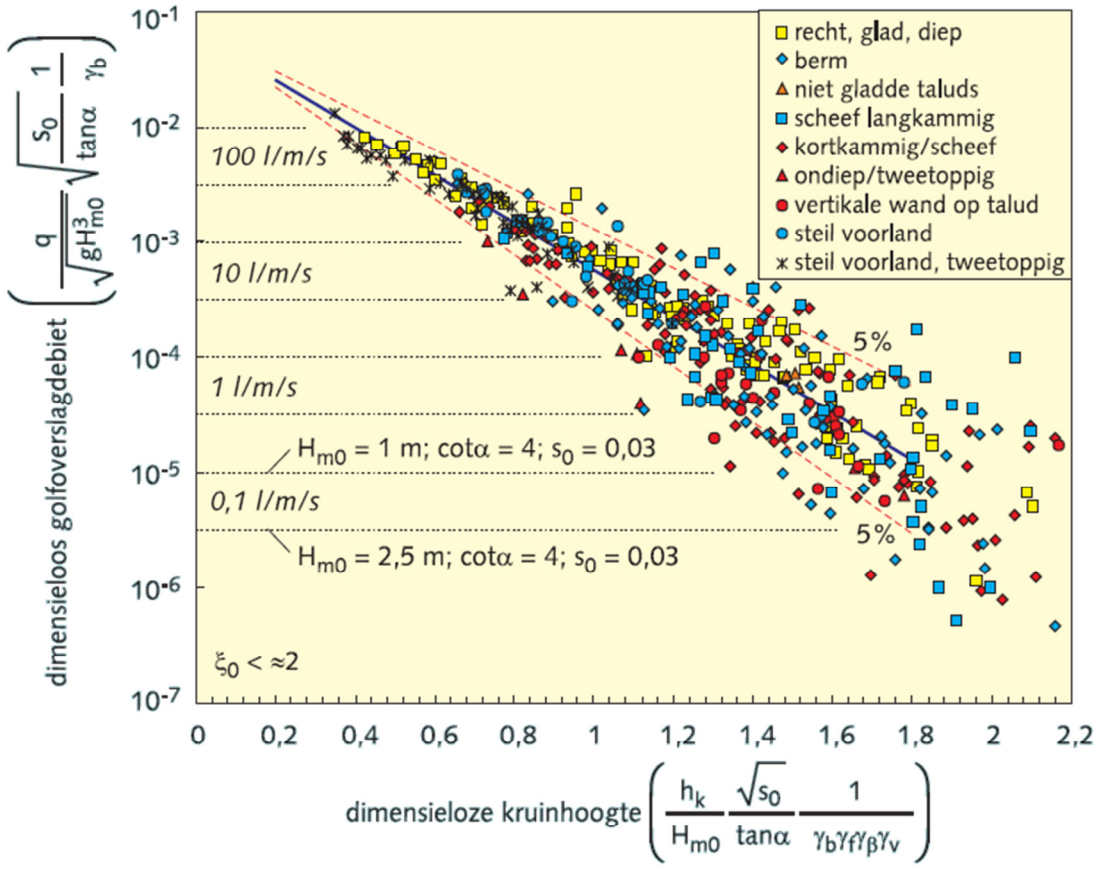
- bij grote strijklengtes blijft de berekende golfhoogte gelijk bij veranderende p_3;
- bij kleine strijklengtes neemt de berekende golfhoogte af met afnemende p_3.

Feitelijk kan met de parameter p_3 relatief eenvoudig het verschil tussen de drie golfgroeiformules in beeld worden gebracht.

Op basis van de gemeten waarden, kan echter de waarde van p_3 zodanig gekozen worden dat deze exact door de dataset heen gaat. Indien deze *gemiddelde* lijn bekend is, kan vervolgens gemotiveerd worden afgeweken van die lijn door middel van het inbrengen van een zekere mate van veiligheid. Zo kan bijvoorbeeld een waarde voor p_3 gekozen worden die een standaardafwijking hoger ligt dan de gemiddelde waarde. Op deze wijze kan worden gekomen tot een bepaalde *aanbevolen* waarde. Als voorbeeld van een dergelijke aanbevolen lijn is de gestreepte blauwe lijn in Figuur 6-2 toegevoegd. Een dergelijke analyse kan gezien worden als een soort probabilistische hercalibratie van de formules, op basis van meerdere meetseries.

Analogie met de golfoverslagformule

De methode om te komen tot een *aanbevolen lijn* is in feite analoog aan de werkwijze die is beschreven in het Technische Rapport voor Golfoploop en Golfoverslag [TAW, 2002]. Figuur 6-3 toont de golfoverslagformule van Van der Meer in relatie tot de gemeten waarden in het laboratorium bij diverse type golven, bij diverse golfsteilheden en bij diverse taludhellingen.



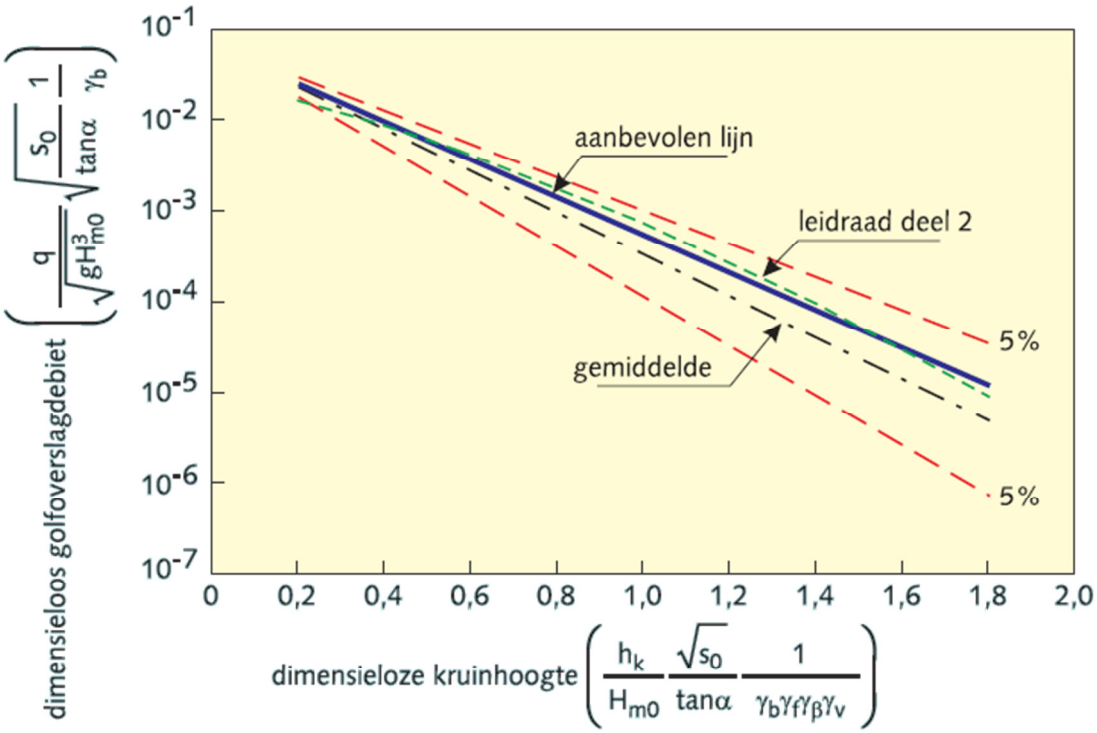
Figuur 6-3: Golfoverslaggegevens uit metingen met een gemiddelde en 5% onder- en overschrijdingslijnen en met een aanduiding van het toepassingsgebied; brekende golven (overgenomen uit: [TAW, 2002], figuur 27).

Figuur 6-3 laat de volgende zaken zien:

- meetdata uit het laboratorium;
- een dikke blauwe lijn als een 'gemiddelde lijn';
- twee gestreepte rode lijnen die dienen als betrouwbaarheidsbanden, die een maat zijn voor de spreiding van de gemeten data.

Op basis van Figuur 6-3 worden bepaalde parameters uit de formule van Van der Meer gemodificeerd om op enige wijze om te gaan met de spreiding in de meetdata. Deze parameter zou in principe kunnen worden opgevat als een stochastische variabele met een bepaald gemiddelde (de 'gemiddelde lijn') en een bepaalde standaardafwijking op basis van de dataset.

Gegeven de dataset kan een rekenwaarde gekozen worden voor de stochastische variabele op basis van de gemiddelde waarde en de standaardafwijking. Dit resulteert vervolgens in een *aanbevolen lijn*. De keuze voor deze rekenwaarde hangt samen met de keuze voor het percentage meetwaarden dat *onder* de aanbevolen lijn ligt. De aanbevolen lijn volgens [TAW, 2002] ligt iets boven de gemiddelde lijn, en is getoond in Figuur 6-4.



Figuur 6-4: Golfoverslagdebiet bij brekende golven (overgenomen uit: [TAW, 2002], figuur 19).

De in Figuur 6-4 getoonde aanbevolen lijn is gebaseerd op een rekenwaarde voor de stochastische variabele die ruim één standaardafwijking hoger dan de gemiddelde waarde ligt.

Feitelijk is de methode die in [TAW, 2002] wordt gerapporteerd ten aanzien van golfoverslag analoog aan de werkwijze zoals deze is voorgesteld in de vorige paragraaf. Aan de hand van een statistische interpretatie van een geselecteerde parameter in de golfgroeiformule kan worden gecompenseerd aan de structurele overschatting van de gemeten golfhoogtes door enkele golfgroeiformules.

6.3 Het nut van nieuwe meetcampagnes

De in dit rapport gepresenteerde analyse roept de vraag op of het nuttig zou zijn om in de nabije toekomst een extra meetcampagne te initiëren om meer inzicht te krijgen in de toepasbaarheid van de golfgroeiformules in het regionale systeem. Op basis van de bevindingen uit deze studie en gesprekken met de klankbordgroep, wordt dit opzetten van een nieuwe meetcampagne op korte termijn echter *niet aanbevolen*.

De voornaamste reden om deze campagne niet te aanbevelen is het feit dat er simpelweg nog te veel fundamentele vragen zijn die volgen uit de thans aanwezige meetdata en analyses, zoals bijvoorbeeld ruimtelijk variërende ruwheid, de rol van ondiepte, etc. De invulling van een nieuwe meetcampagne kan beter gemotiveerd worden, als voor enkele fundamentele aspecten van de bestaande analyses meer inzicht en helderheid is.

De inconsistenties tussen verschillende meetdatasets zijn namelijk niet via één meetcampagne op te lossen, maar alleen via diverse meetcampagnes op ongelijksoortige locaties. Dit vraagt een grote investering en vele jaren en is daarmee een lange-termijn-oplossing.

7 Conclusies en aanbevelingen

In dit rapport zijn golfdata geanalyseerd, zoals deze zijn gemeten in het Slotermeer, het IJsselmeer en Lake George. Het doel van de analyse is het onderzoeken in welke mate beschikbare golfgroeiformules (Bretschneider, Young & Verhagen en Breugem & Holthuijsen) overeenkomen met de gemeten waarden voor de golfhoogte en de piekperiode. In dit hoofdstuk wordt teruggeblikt op enkele bevindingen en een overzicht gegeven van de meest relevante conclusies, alsmede enkele aanbevelingen.

7.1 Terugblik

De opbouw van de formules van Bretschneider, Young & Verhagen en Breugem & Holthuijsen bevat dezelfde structuur: een tangens-hyperbolicus functie voor de dimensieloze strijklengte, aangevuld met een tangens-hyperbolicus functie om diepte-limitering te representeren. De parametersets voor elk van de formules zijn gefit op basis van verschillende type metingen. Strikt genomen mag een golfgroeiformule alleen worden toegepast op een situatie als waarvoor deze is afgeleid. Een kleine wijziging in de gebruikte parameters kan een aanzienlijke invloed hebben op de ligging van de grafiek, en daarmee op de voorspelde golfhoogte of piekperiode. Met name voor korte strijklengtes verschillen de golfgroeiformules onderling sterk in hun predicties.

Toch worden de golfgroeiformules algemeen gebruikt binnen het kader van de toetsing op hoogte van regionale keringen. In dit rapport worden daarom golfdata vanuit diverse bronnen gecombineerd tot één dataset waarvoor een bepaalde golfgroeiformule equivalente waarden zou moeten voorspellen. De relevante variabelen voor de formules (windsnelheid, strijklengte, waterdiepte) zijn direct vanuit de meetdata gebruikt voor een analyse. Zodoende is onderzocht wat de nauwkeurigheid is van de diverse golfgroeiformules bij het reproduceren van de complete dataset.

7.2 Conclusies

De meetdata voor de golfhoogte en de piekperiode zijn op diverse wijzen geanalyseerd. Als kwantitatieve maat is de relatieve afwijking van de berekende waarde (volgens de formules) van de gemeten waarden genomen (in procenten). Hierbij is op vier manieren gekeken naar de meetdata, namelijk door de volgende selecties toe te passen:

- geen selectie: alle meetdata worden beschouwd (hierbij is Lake George sterk vertegenwoordigd door het hoge aantal datapunten),
- selectie op korte strijklengtes ($gF/U^2 < 200$) (hierbij neemt de invloed van de Slotermeer-data en IJsselmeer-data sterk toe),
- selectie op ondiep water ($H_s/d > 0.3$),
- selectie op basis van kenmerken van het regionale systeem ($F < 5$ km, $U > 17$ m/s, $d < 3$ m) (hierbij worden voornamelijk het Slotermeer en IJsselmeer beschouwd).

Selectie 1: alle meetdata beschouwen

Wanneer er niet gefilterd wordt op de representativiteit van de meetdata voor het regionale systeem, vertoont Young & Verhagen de beste overeenkomst met de meetdata (zowel golfhoogte als piekperiode). Dat is niet verwonderlijk, aangezien de (in de analyse dominante) Lake George data ten grondslag liggen aan de golfgroeiformule van Young & Verhagen. De

formules van Bretschneider en Breugem & Holthuijsen *overschatten* de golfhoogte met respectievelijk 12% en 24%. De spreiding is met waarden van zo'n 40% erg groot. Bij de piekperiode zijn de afwijkingen gemiddeld een orde kleiner. De spreiding is ongeveer 20%.

Selectie 2: korte strijklengtes

Indien alleen korte strijklengtes worden beschouwd, vertoont de formule van Bretschneider de minst grote afwijkingen voor de golfhoogte: ca. 8% als *overschatting*. De afwijkingen voor de andere twee formules zijn grosso modo dubbel zo groot. Ook hier zijn de afwijkingen voor de piekperiode aanzienlijk kleiner. De kleinste afwijking voor de piekperiode is waargenomen voor de formule van Breugem & Holthuijsen.

Selectie 3: ondiep water

Indien er een onderscheid wordt gemaakt naar diep water en ondiep water, op basis van de ratio H_s/d, dan wordt structureel een *overschatting* van de golfhoogte en piekperiode waargenomen bij ondiep water en een *onderschatting* bij diep water. Bij ondiep water is de overschatting het geringst bij de formule van Young & Verhagen (zowel golfhoogte als piekperiode), en bij diep water is de onderschatting het geringst bij de formule van Breugem & Holthuijsen (golfhoogte) en bij Bretschneider (piekperiode).

Selectie 4: het regionale systeem

Indien de meetdata specifiek worden gefilterd op basis van kernmerken van het regionale systeem bij een toetsing op hoogte, dan blijven slechts ca. 25 meetpunten over ter validatie van de golfgroeiformules. Bij de beschouwing van de golfhoogte blijkt de formule van Breugem & Holthuijsen het beste te presenteren met een relatief kleine gemiddelde afwijking van 3%; bij de beschouwing van de piekperiode presteert Bretschneider het beste met een gemiddelde afwijking van 7%.

Welke formule presteert het beste?

De hierboven opgesomde waarnemingen laten een uiterst diffuus beeld zien van de kwaliteit waarmee de golfgroeiformules de meetdata reproduceren. Als strikt wordt gekeken naar de toepassing bij de toetsing van keringen in het regionale systeem, lijkt de formule van Breugem & Holthuijsen het best te presteren voor de golfhoogte en de piekperiode. Deze conclusie is moeilijk algemeen te rechtvaardigen, aangezien het aantal meetpunten, waarbij de situatie vergelijkbaar is met een situatie op basis waarvan getoetst wordt, beperkt is (25).

Indien *alle meetdata* in de beschouwing zouden worden meegenomen, dan zou de formule van Young & Verhagen als beste presteren. Dat is uiteraard verklaarbaar vanuit de dominantie van de Lake George data in de analyse. Indien de formule van Young & Verhagen dus ingezet zou worden bij de toetsing van hoogte in het regionale systeem, dan zou impliciet worden aangenomen dat het te toetsen systeem sterk vergelijkbaar is met de situatie die hoort bij Lake George (in de periode waarin de meetdata vergaard zijn). Uitgaande van de Nederlandse context van het regionale systeem, is dat niet algemeen te verdedigen.

Natuurlijke complexiteit

De groei van windgolven in de natuur is een uiterst complex proces. Deze complexiteit wordt in hoge mate veroorzaakt door het intrinsiek stochastische karakter van de relevante parameters, zoals de windsnelheid. Maar ook andere natuurlijke verschijnselen laten zich gelden, zoals overgangen in ruwheid, de geometrie en bathymetry van het watersysteem, dichtheidsverschillen tussen water en lucht, niet-stationaire aspecten, en vele zaken meer.

In dit rapport is beknopt ingegaan op een beperkt aantal zaken, waarmee de invloed van enkele parameters nader beschouwd is. Ondiepte is hier één van. Bij het maken van onderscheid tussen ondiep en diep water is gebleken dat de formules een sterke neiging tot overschatting hebben bij ondiep water, daar waar bij diep water een sterke neiging tot onderschatting is. Mogelijk kan nadere studie licht werpen op de achterliggende oorzaak hiervan. Mogelijk zijn hierbij tevens Figuur 4-3, Figuur 4-4 en Figuur 4-5 te betrekken, waarin een doorkijk is gegeven naar de aard van het golfveld. Echter, nadere studie zal hierbij vereist zijn.

Tevens is beknopt aandacht geschonken aan de rol van ruwheidsovergangen. Twee punten in het IJsselmeer lijken zich te lenen voor een dergelijke analyse: FL25 (meetpunt nabij water/land overgang) en FL37 (meetpunt bij water/water overgang, gescheiden door een dijk). Uit deze beknopte analyse kwam de suggestie naar voren dat de golfgroeiformules de meetdata *onderschatten* bij een water/land overgang en *overschatten* bij een water/water overgang. Indien deze waarneming juist is, dan zou deze consequenties kunnen hebben voor de toetsing binnen het kader van het regionale systeem. Immers, binnen het regionale systeem is veelvuldig sprake van water/land overgangen (in het rapport ook wel geduid als 'beschutting'). De onderschatting in geval van beschutting is overigens afwezig bij de formule van Young & Verhagen.

Welke formule is het meest geschikt voor de hoogtetoets?

Op basis van het bovenstaande is het onmogelijk om eenduidig een bepaalde formule aan te wijzen als zijnde het meest geschikt voor toepassing in het regionale systeem. Er zijn simpelweg te veel onzekerheden om een dergelijke conclusie te rechtvaardigen.

De meest relevante aspecten die deze conclusie onmogelijk maken zijn als volgt:

- De meetdata voor Lake George zijn dominant in de analyse waarbij alle meetdata worden beschouwd.
- Het aantal metingen, waarbij de omstandigheden vergelijkbaar zijn met de omstandigheden in het regionale systeem bij toetsing, is zeer beperkt.
- De onzekerheden in de natuurlijke variabiliteit. Elke meting bevat locale invloeden (beschutting), invloeden van geometrie en bathymetry, meetonzekerheden, etc. Niettemin is deze onzekerheid altijd aanwezig bij metingen in het veld.
- De manier waarop de diepte is verdisconteerd in de golfgroeiformules. Als de analyse bij het onderscheid op basis van H_s/d juist is, dan zou men kunnen vermoeden dat de wijze waarop de diepte is meegenomen in de formules eventueel verbeterd zou kunnen worden.
- Een andere onzekerheid in de formules vormen de meetdata die de basis zijn geweest voor het afleiden van de formules. Deze zijn verschillend voor elke van de golfgroeiformules. Het is echter moeilijk te achterhalen wat de precieze verschillen zijn, en wat de precieze consequenties hiervan zijn ten aanzien van de algemene toepasbaarheid. Immers, kleine wijzigingen in de waarden van de parameters kunnen al snel relatief grote verschillen in golfhoogte opleveren.

Het is moeilijk te rechtvaardigen om op basis van de bevindingen in het voorliggende rapport eenduidig een 'meest geschikte' formule aan te wijzen voor de toepassing bij de hoogtetoets binnen het kader van het regionale systeem.

7.3 Aanbevelingen

In de voorgaande paragraaf zijn reeds enkele suggesties gedaan voor nader onderzoek. Deze suggesties worden hieronder samengevat.

Ten eerste wordt aanbevolen om in een nadere studie inzicht te krijgen in de rol van land/water overgangen, of in bredere zin: ruimtelijk variërende ruwheid. Mogelijk kunnen hierbij in de nabije toekomst de meetresultaten voor het IJsselmeer, nabij de Wieringermeerdijk, worden betrokken. De meetlocaties in deze meetcampagne zijn 800 m en 1600 m van de oever gesitueerd.

De tweede aanbeveling wordt ingegeven door de opmerkelijke puntenwolk, zoals getoond in Figuur 4-5, waarin de dimensieloze golfhoogte H_s/d wordt uitgezet tegen de dimensieloze diepte gd/U^2. De datasets bleken in deze weergave coherent van elkaar verspreid te liggen. Dit is eerder ook geconstateerd door Deltares [Deltares, 2008]. We bevelen aan om nader te kijken naar een goede verklaring hiervoor. Een goede verklaring kan mogelijk inzicht bieden in de rol van diepte-limitering op golfgroei en kan daarmee mogelijk een fundamentele bijdrage leveren aan de algemene formulering van golfgroeiformules. Mogelijk dient er een extra term in de formules te worden opgenomen, bijvoorbeeld.

Ten derde wordt aanbevolen om het gebruik van golfgroeiformules te koppelen aan een eenduidige definitie van de parameters die in de golfgroeiformules voorkomen. De strijklengtes, bijvoorbeeld, zijn bij de afleiding van de formule van Bretschneider anders gedefinieerd dan bij de afleiding van de formule van Young & Verhagen. Bij de toepassing voor toetsing op hoogte bij het regionale systeem is het wenselijk om met een vaste set aan gegevens een bepaalde golfgroeiformule toe te passen, zonder daarbij elke keer de nuances achter de golfgroeiformule bij in acht te moeten nemen.

Ten vierde wordt aanbevolen om op korte termijn *geen* nieuwe meetcampagne te initiëren. Op dit moment liggen er nog te veel fundamentele, onbeantwoorde vragen om een, vaak kostbare, meetcampagne goed te kunnen motiveren. Deze fundamentele vragen hebben met name betrekking op de rol van ruimtelijke variatie in ruwheid en windsnelheden. Op basis van antwoorden op deze fundamentele vragen zou gericht een bepaalde meetcampagne ontworpen kunnen worden.

7.4 Slotsom

Op basis van de resultaten van deze studie is het onmogelijk om één eenduidige golfgroeiformule aan te bevelen voor de toepassing bij toetsing van regionale keringen op hoogte. De reden hiervoor is drieledig:

- de afwijkingen, en de spreiding daarin, tussen de formules en de meetwaarden is te groot,
- het aantal metingen waarbij de situatie sterk vergelijkbaar is met de omstandigheden voor de toetsing is te beperkt,
- er zijn te veel onzekerheden ten aanzien van lokale effecten, zoals bijvoorbeeld ruimtelijke verschillen in ruwheid.

8 Referenties

[Bottema en Van Vledder, 2008]
Marcel Bottema and Gerbrant van Vledder, "Effective fetch and non-linear four-wave interactions during wave growth in slanting fetch conditions, Coastal Engineering, Volume 55, Issue 3, March 2008, Pages 261-275

[Bottema en Van Vledder, 2009]
Marcel Bottema and Gerbrant Ph. van Vledder, A ten-year data set for fetch- and depth-limited wave growth, Coastal Engineering, Volume 56, Issue 7, July 2009, Pages 703-725

[Breugem & Holthuijsen, 2007]
W.A. Breugem and L.H. Holthuijsen, Generalized shallow water wave growth from Lake George, Journal of Waterway, port, coastal and ocean engineering, vol. 133, no.3, may/june 2007.

[CERC, 1973]
Shore Protection Manual, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, Virginia, USA.

[Deltares, 2008]
A.J. van der Westhuysen, J.P. de Waal, Deltares, Observed finite depth wave growth limit in the Wadden Sea, juli 2008.

[Holthuijsen, 1980]
Holthuijsen, L.H., Methoden voor golfvoorspelling. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1980.

[Kahma en Calkoen, 1992]
Reconciling discrepancies in the observed growth rate of waves, J. Phys. Oceanogr. 22, p. 1271-1285, 1992.

[Kahma en Calkoen, 1994]
Growth curve observations, chapter II-8 in(p. 174-182) in Komen et al., 1994, Dynamics and Modelling of Ocean Waves, Cambridge Univ. Press, 532 p., 1994.

[RIZA, 2007]
M. Bottema, RWS RIZA, Measured wind-wave climatology Lake IJssel inclusief bijbehorende data-DVD, 4 juli 2007.

[Stowa, 2010]
Stowa, Addendum op de leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen betreffende de boezemkaden, ISBN 978.90.5773.481.6, 2010

[Stowa, 2007]
Stowa, Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen, 2007

[Sverdrup en Munk, 1947]
Wind, sea and swell, theory of relations for forecasting, U.S. Navy Hydrographic Office, Washington, Pub. No. 601, 44 pp.

[TAW, 2002]
TAW, Technisch rapport golfoploop en golfoverloop bij dijken, mei 2002.

[Verhagen, 1999]
L. Verhagen, The Growth of Wind Waves in Finite Water Depth, 1999.

[WL|Delft Hydraulics, Alkyon en TUDelft, 2001]
WL|Delft Hydraulics, Alkyon en TUDelft, 2001, Deep Water Wave Growth at Short Fetches for High Wind Speeds, januari 2001

[Wieringa en Rijkoort, 1983]
Wieringa en Rijkoort, "Windklimaat van Nederland", 1983.

[Young en Babanin, 2006]
The form of the asymptotic depth-limited wind wave frequency spectrum, J.Geophys. Res., Vol. 111, C06031, doi:10.1029/2005JC003398.

Bijlage

Bijlage A: Memo opmerkingen klankbordgroep op concept-rapportage

In deze bijlage is de memo opgenomen met daarin de verzamelde opmerkingen van de klankbordgroep op de concept-rapportage van deze studie.

memorandum

PR2160.20

Project : Bureaustudie ter validatie van golfgroeiformules voor gelimiteerde strijklengte
Datum : 5 november 2012
Onderwerp : Opmerkingen klankbordgroep op concept rapport
Van : HKV
Aan : Stowa

Voor de uitwerking van de studie is een klankbordgroep samengesteld bestaande uit Nederlandse golvendeskundigen. De rol van de klankbordgroep was om analyses, resultaten, stukken en uiteindelijk de validiteit van een formule te beoordelen. Tijdens de uitvoering van het onderzoek hebben zij geadviseerd over nut en noodzaak van nadere analyses (van onderdelen) van de studie.

De klankbordgroep bestond uit de volgende personen:
- Jacco Groeneweg (JG) van Deltares;
- Marcel Bottema (MB) van RWS Waterdienst;
- Gerbrant van Vledder (GvV) van TUDelft;
- Louis Verhagen (LV) van Qolor;

Uit het onderzoek blijkt dat het onmogelijk is om eenduidig een bepaalde formule aan te wijzen als zijnde het meest geschikt voor toepassing in het regionale systeem. Er zijn simpelweg te veel onzekerheden om een dergelijke conclusie te rechtvaardigen. Bovendien zijn er inconsistenties tussen datasets waardoor onmogelijk golfgroei met een bepaalde formule te beschrijven is.

Op 12 september 2012 zijn de resultaten van het onderzoek gepresenteerd bij de Stowa en is gesproken over vervolguitwerking. In het overleg zijn de onzekerheden van een voorspelling in relatie gebracht tot de gewenste betrouwbaarheid.

Het nauwkeurig voorspellen van een golfhoogte in het regionale systeem lijkt nu mogelijk minder van belang vanwege de nieuwste inzichten ten aanzien van erosiebestendigheid van gras als gevolg van golfoverslag (gras kan veel meer overslagdebiet aan). Een nieuwe methode gaat uit van een zogenaamde cumulatieve overbelasting (onder andere gebaseerd op golfvolumes, golfhoogte en snelheden). Deze methode is gericht op de primaire kering, maar de toepasbaarheid hiervan is ook voor het regionale systeem verkend. Hieruit kwam onder andere naar voren dat gezien het veiligheidsniveau van regionale keringen en het schaalniveau van het regionale systeem, dit zou kunnen leiden tot het kunnen toestaan van veel meer overslag.

Het onderzoek naar golfgroei is met het concept rapport "Bureaustudie ter validatie van golfgroeiformules voor gelimiteerde strijklengte, voor veiligheidstoetsing van regionale keringen" van augustus 2012, voortijdig afgerond. In dit rapport zijn de suggesties van de klankbordgroep op het concept niet meer verwerkt. Dit memo behoort bij het concept rapport en geeft een globaal overzicht van suggesties die de klankbordgroep nog had.

Suggesties voor onderzoek naar invoerparameters;

- Door inconsistenties tussen datasets is een betrouwbare kwalitatieve validatie lastig uitvoerbaar. De wijze waarop de windsnelheid in de formules is ingebracht en hoe strijklengtes zijn bepaald, kan tussen de krommes onderling namelijk sterk verschillen. Om beter datasets en krommes te vergelijken is nader onderzoek nodig naar de totstandkoming van de diverse golfgroeikrommes en hun specifieke toepassingsgebied. Dit levert ook op onder welke omstandigheden formules het wel/niet goed doen.
- Onderzoeken van het effect van landwater-overgangen op windsnelheid.
- De toetsing gaat uit van loodrechte golfaanval. Het is de vraag of dit in smalle rechte kanalen maatgevend is.
- Onderzoeken of golfgroeiformules in termen van U10 of u* beschreven moeten worden.
- Mogelijk dat andere effecten, zoals de invloed van typische bodemvormen, van belang zijn voor golfgroei, maar niet in de formuleringen terecht komen.

Suggesties bij validatie golfgroeiformules

- In het rapport zijn analyses van selecties van datasets gemaakt. Het vergelijken van de data onderling kunnen vertekenend zijn door zogenaamde selectie-effecten en moet meer aandacht krijgen.
- De dominantie van (bijvoorbeeld Lake George) data zou meegenomen moeten worden om de generaliseerbaarheid van een formule vast te stellen.
- Beschouwen van meer relevante subsets van de meetdata. De uitsplitsing naar meetdatasets is een essentiële. Daarmee kan aangetoond worden dat de verschillende datasets niet alleen inconsistent en niet schaalbaar zijn, maar ook dat als gevolg daarvan op één gebied afgeregelde formules elders niet automatisch de beste of zelfs maar geschikt zijn.
- Explicieter melden dat de puntenwolk van het IJsselmeer verschoven is ten opzichte van de ondiepe Lake George en Slotermeer. Het resultaat van deze studie is dat het IJsselmeer en meren met andere waterdieptes niet onderling schaalbaar en uit te drukken zijn in één parametrische formule.

Suggesties voor Hoofdstuk 6 Nadere Analyse

- Voorstellen voor onzekerheidstoeslagen op belasting is niet gewenst en zouden eerst aan ENW-V moeten worden voorgelegd.
- Door inconsistenties en niet-schaalbaarheid van de huidige datasets wordt afgeraden een nieuwe meetcampagne te starten. Het verkrijgen van extra datasets lost dit probleem niet op.

Suggesties bij aanbevelingen

- Onderzoek of de formule van Breugem-Holthuijsen te gebruiken is voor de eenvoudige hoogtetoets.
- Onzekerheden in invoer (strijklengte, windsnelheid en diepte) is vermoedelijk velen malen groter dan modelonzekerheid (vertaling van verschillen in uitkomsten van golfgroeikrommes bij dezelfde invoer). Dit houdt in dat het feitelijk niet zoveel uitmaakt welke kromme toegepast wordt en zou ervoor pleiten niet af te wijken van de huidige aanpak met Bretschneider.

HKV lijn in water BV

Postbus 2120
8203 AC Lelystad

Botter 11-29
8232 JN Lelystad

0320 29 42 42
info@hkv.nl
www.hkv.nl