

Notitie

Aan : Erik Marsman
Van : Bram Roskam
Datum : 6 juni 2007
Betreft : vuistregels voor de nauwkeurigheid van golfparameters

Vooraf.

Er wordt gewerkt aan een nieuwe versie van Wavix, waarin een aantal nieuwe golfparameters is opgenomen. Voor die nieuwe golfparameters zijn schattingsformules voor de nauwkeurigheid van de meetwaarden nodig, analoog aan die welke bij het oude Wavix worden gebruikt voor zes golfparameters.

Mij is gevraagd om te kijken of daarvoor dezelfde, iets aangepaste, vergelijkingen kunnen gebruikt, dan wel of dat er geheel nieuwe moeten worden bedacht.

Dit laatste lijkt mij het geval!

Alvorens echter allerlei onbegrijpelijke vuistregels te componeren, wil ik eerst even uitleggen, waarop dit allemaal gebaseerd is. Ik heb een en ander ten tijde van de ontwikkeling van Wavix_1 bedacht en opgeschreven, maar ik ben bang dat daar nu niet veel meer van terug te vinden is. In de Wavix-rapporten van ca. 1998 staan alleen de toegepaste regels, vrijwel zonder enige uitleg. Ik wil graag nog even laten zien dat het weliswaar vuistregels zijn, maar dat ze niet uitsluitend uit de duim komen.....

Helaas lokte het ene antwoord weer de andere vraag uit en zodoende is het nogal een lang verhaal geworden, veel langer dan ik me aanvankelijk voorstelde. Als het je allemaal iets teveel van het goede is, kun je volstaan met de samenvatting op de volgende bladzijden. Daarin worden eerst de zes formules gegeven uit het oude Wavix, gevolgd door een zeer summiere uitleg en enige toelichting. Daarna worden de nieuwe varianten van de Wavix formules en die voor de nieuwe parameters gegeven.

Na die samenvatting volgen de uiteenzettingen over de oude Wavix-formules en worden de nieuwe afgeleid, met hier en daar wat achtergrond informatie.

Belangrijk : de in de samenvatting gegeven formules gelden uitsluitend voor waarden berekend uit datareeksen van 20 minuten. **Dit gegeven is gebruikt in de afleiding.** Verder is gerekend met metingen onder Noordzee omstandigheden, met significante golfhoogten in de orde van 0,5 tot 8 meter, gemiddelde golfperioden in de orde van 3 tot 10 seconden en inwinfrequenties van 1,28 of 2Hz.

Samenvatting.

In Wavix wordt gerekend met waarden van parameters en hun nauwkeurigheid. In het oude Wavix zijn voor zes golfhoogte, golfperiode en golfrichting parameters vergelijkingen gegeven om de nauwkeurigheid te schatten (de spreiding ofwel de standaardafwijking).

Deze vergelijkingen zijn (in de eenheden van het oude Wavix, resp. cm, 0.1s en °) :

$$\begin{aligned}\sigma_{Hm0} &= 0.002 * Hm0 * \sqrt{(Hm0)} + 3 && [\text{cm}] \\ \sigma_{H1/3} &= 0.002 * H1/3 * \sqrt{(H1/3)} + 3 && [\text{cm}] \\ \sigma_{HTE3}^* &= 0.060 * HTE3 + 0.8 * \sqrt{(HTE3)} && [\text{cm}] \\ \sigma_{TH1/3} &= 0.0025 * TH1/3 * \sqrt{(TH1/3)} + 6/\sqrt{(Hm0)} + 0.3 && [0.1\text{s en cm}] \\ \sigma_{Tm02} &= 0.0025 * Tm02 * \sqrt{(Tm02)} + 5/\sqrt{(Hm0)} + 0.2 && [0.1\text{s en cm}] \\ \sigma_{Th0} &= 4^\circ + 2000 / (Hm0 * \sqrt{(Hm0)}) && [^\circ \text{ en cm}]\end{aligned}$$

* : in het oude Wavix wordt deze parameter HE10 genoemd!

Nu wordt gewerkt aan een uitbreiding van het nieuwe Wavix, waarbij een groter aantal parameters wordt gebruikt. Voor deze parameters worden ook vergelijkingen opgesteld. Van deze gelegenheid wordt gebruik gemaakt om ook bovenstaande vergelijkingen te herzien en enigszins aan te passen. Tevens zal de statistisch/wiskundige achtergrond worden toegelicht. Deze komt in de oude Wavix documentatie nauwelijks aan de orde.

De bovenstaande vergelijkingen zijn gebaseerd op de berekening van de statistische nauwkeurigheid van de metingen en een schatting van de meet- en verwerkingsnauwkeurigheid.

De metingen worden beschouwd als een steekproef (van 20 minuten) uit het veranderlijke zeeoppervlak. Van zo'n steekproef kan de nauwkeurigheid van eigenschappen van die steekproef (gemiddelde hoogte, gemiddelde periode e.d.) worden berekend, resulterend in een waarde voor de standaardafwijking van de verwachtingswaarde van die eigenschappen (gemiddelden). Verder kan ook een standaardafwijking door meet- en verwerkingsfouten worden geschat. De som (kwadratisch opgeteld) van deze beide standaardafwijkingen geeft de totale schattingsfout van deze eigenschappen van de steekproef, die we hierna parameters zullen noemen.

De Wavix-formules, tenslotte, zijn benaderingsformules, gebaseerd op voor de hand liggende parameters, waarmee bovenstaande resultaten zo goed mogelijk worden beschreven.

In de hiernavolgende hoofdstukken is een en ander uitgebreider uiteengezet.

Tijdens het reconstrueren van de afleiding van bovengenoemde zes formules uit het oude Wavix bleek dat deze hier en daar wel enige aanpassing behoeften. Daarom zijn ook voor deze 6 parameters nieuwe formuleringen opgesteld.

De verschillen tussen de oude en de nieuwe versie zijn meestal klein, behalve bij erg grote golfhoogten. De oude versies geven daar meestal wat hogere waarden voor de spreiding. Hieronder worden de nieuwe formules gegeven.

De constanten daarin zijn niet dimensieloos en veranderen dus als er andere eenheden worden gebruikt. Om die reden worden de formules tweemaal gegeven, eerst voor de eenheden van het oude Wavix (cm, 0.1s en °) en daarna in normale eenheden (m, s en °).

De nieuw in Wavix te gebruiken parameters zijn de golfhoogten H1/10, H1/50 en Hmax, de golfperioden Tm01, Tm-10, T1/3, Tmax en THmax.

De afleiding van de nauwkeurigheid van de golfhoogte parameters zijn alle gebaseerd op de nauwkeurigheid van de gemiddelde golfhoogte Hgem. Voor de golfperiode parameters geldt hetzelfde t.o.v. de gemiddelde golfperiode Tgem. Daarom zijn voor deze beide parameters, hoewel niet genoemd als nieuwe parameters in Wavix, toch ook formules voor de nauwkeurigheid afgeleid.

De laagfrequente golfrichting Thl en de gemiddelde richtingspreiding s0 worden ook in het oude Wavix al gebruikt, maar ze werden daar niet in de berekeningen opgenomen. Ze werden alleen visueel gecontroleerd. Er zijn dan ook in het oude Wavix geen formuleringen voor de nauwkeurigheid van die parameters. Deze worden nu ook toegevoegd.

In de laatste hoofdstukken van deze notitie worden de vergelijkingen voor het schatten van de nauwkeurigheid voor al deze nieuwe parameters opgesteld. De resultaten worden hieronder gegeven (voor zowel de oude als de nieuwe Wavix parameters. Er worden steeds twee versies gegeven, de eerste in de eenheden van het oude Wavix (cm, 0.1s en °) en de tweede in standaard eenheden (m, s en °).

Golfhoogte parameters

$$\begin{aligned} \text{Hgem} : \quad \sigma_{\text{Hgem}} &= 0.0036 * \text{Hgem}^{1.4} + 3 && [\text{cm}] \\ \sigma_{\text{Hgem}} &= 0.0225 * \text{Hgem}^{1.4} + 0.03 && [\text{m}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{H1/3} : \quad \sigma_{\text{H1/3}} &= 0.0032 * \text{H1/3}^{1.4} + 3 && [\text{cm}] \\ \sigma_{\text{H1/3}} &= 0.020 * \text{H1/3}^{1.4} + 0.03 && [\text{m}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Hm0} : \quad \sigma_{\text{Hm0}} &= 0.00345 * \text{Hm0}^{1.4} + 3 && [\text{cm}] \\ \sigma_{\text{Hm0}} &= 0.0217 * \text{Hm0}^{1.4} + 0.03 && [\text{m}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{H1/10} : \quad \sigma_{\text{H1/10}} &= 0.0037 * \text{H1/10}^{1.4} + 3 && [\text{cm}] \\ \sigma_{\text{H1/10}} &= 0.023 * \text{H1/10}^{1.4} + 0.03 && [\text{m}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{H1/50} : \quad \sigma_{\text{H1/50}} &= 0.00525 * \text{H1/50}^{1.4} + 3 && [\text{cm}] \\ \sigma_{\text{H1/50}} &= 0.033 * \text{H1/50}^{1.4} + 0.03 && [\text{m}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Hmax} : \quad \sigma_{\text{Hmax}} &= 0.047 * \text{Hmax}^{1.12} + 3 && [\text{cm}] \\ \sigma_{\text{Hmax}} &= 0.082 * \text{Hmax}^{1.12} + 0.03 && [\text{m}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{HTE3} : \quad \sigma_{\text{HTE3}} &= 0.05 * \text{HTE3} + 0.4 * \text{HTE3}^{0.5} + 0.2 * \text{Hm0}^{0.5} && [\text{cm}] \\ \sigma_{\text{HTE3}} &= 0.05 * \text{HTE3} + 0.04 * \text{HTE3}^{0.5} + 0.02 * \text{Hm0}^{0.5} && [\text{m}] \end{aligned}$$

Golfperiode parameters

Tgem :	$\sigma_{Tgem} = 0.00021 * Tgem^2 + 10/Hm0^{0.5}$	[0.1s ; cm]
	$\sigma_{Tgem} = 0.0021 * Tgem^2 + 0.10/Hm0^{0.5}$	[s ; m]
TH1/3 :	$\sigma_{TH1/3} = 0.00020 * TH1/3^2 + 10/Hm0^{0.5}$	[0.1s ; cm]
	$\sigma_{TH1/3} = 0.0020 * TH1/3^2 + 0.10/Hm0^{0.5}$	[s ; m]
T1/3 :	$\sigma_{T1/3} = 0.00015 * T1/3^2 + 10/Hm0^{0.5}$	[0.1s ; cm]
	$\sigma_{T1/3} = 0.0015 * T1/3^2 + 0.10/Hm0^{0.5}$	[s ; m]
THmax :	$\sigma_{THmax} = 0.000625 * THmax^2 + 10/Hm0^{0.5}$	[0.1s ; cm]
	$\sigma_{THmax} = 0.00625 * THmax^2 + 0.10/Hm0^{0.5}$	[s ; m]
Tmax :	$\sigma_{Tmax} = 0.00040 * Tmax^2 + 10/Hm0^{0.5}$	[0.1s ; cm]
	$\sigma_{Tmax} = 0.0040 * Tmax^2 + 0.10/Hm0^{0.5}$	[s ; m]
Tm02 :	$\sigma_{Tm02} = 0.00021 * Tm02^2 + 10/Hm0^{0.5}$	[0.1s ; cm]
	$\sigma_{Tm02} = 0.0021 * Tm02^2 + 0.10/Hm0^{0.5}$	[s ; m]
Tm01 :	$\sigma_{Tm01} = 0.00021 * Tm01^2 + 10/Hm0^{0.5}$	[0.1s ; cm]
	$\sigma_{Tm01} = 0.0021 * Tm01^2 + 0.10/Hm0^{0.5}$	[s ; m]
Tm-10 :	$\sigma_{Tm-10} = 0.00019 * Tm-10^2 + 10/Hm0^{0.5}$	[0.1s ; cm]
	$\sigma_{Tm-10} = 0.0019 * Tm-10^2 + 0.10/Hm0^{0.5}$	[s ; m]

Golfrichting parameters

Th0 :	$\sigma_{Th0} = 3 + 2000/Hm0^{1.5}$	[° ; cm]
	$\sigma_{Th0} = 3 + 2/Hm0^{1.5}$	[° ; m]

Opm. : er is voor deze parameter eventueel een andere, uitgebreidere formule beschikbaar, die rekening houdt met de richtingspreiding s0. Deze is beschreven in hoofdstuk 14 met de bijbehorende voor- en nadelen. Wavix gebruikers en/of bouwers moeten maar beslissen welke in Wavix wordt opgenomen.

Th1 :	$\sigma_{Th1} = 3 + 2000/HTE3^{1.5} + 20 * ((Hm0 - HTE3)/Hm0)^2$	[° ; cm]
	$\sigma_{Th1} = 3 + 2/HTE3^{1.5} + 20 * ((Hm0 - HTE3)/Hm0)^2$	[° ; m]

s0 :	$\sigma_{s0} = s0^{0.5} - 3 + 8/Hm0^{0.5}$	[° ; cm]
(s0bh)	$\sigma_{s0} = s0^{0.5} - 3 + 0.8/Hm0^{0.5}$	[° ; m]

Inhoud.

	blz

Vooraf.	1
Samenvatting.	2
Inhoud.	5
1. Inleiding.	6
2. De Rayleigh verdeling.	8
3. De nauwkeurigheid van de golfhoogte H_{gem} .	9
4. Simulaties.	10
5. De nauwkeurigheid als functie van alleen de golfhoogte.	11
6. Meet- en verwerkingsfouten.	12
7. De nauwkeurigheid van de gemiddelde golfhoogte H_{gem} .	13
8. De nauwkeurigheid van de golfhoogte parameters in Wavix-1.	14
9. De nauwkeurigheid van alle golfhoogte parameters.	15
10. De nauwkeurigheid van de gemiddelde golfperiode T_{gem} .	23
11. De nauwkeurigheid van de golfperiode parameters in Wavix-1.	26
12. De nauwkeurigheid van alle golfperiode parameters.	27
13. De nauwkeurigheid van golfrichting parameters in Wavix-1.	34
14. De nauwkeurigheid van golfrichting parameters.	35
Tenslotte	38
Bijlage 1 t/m 24	40

1. Inleiding.

Met het programma Wavix kunnen tijdreeksen met waarden van bepaalde golfparameters worden gecontroleerd en kunnen hiaten in die reeksen worden aangevuld met geschatte waarden.

De werking van Wavix is gebaseerd op neurale netwerken, waarmee steeds de meest waarschijnlijke waarde voor een parameter wordt geschat op basis van waarden van dezelfde en andere parameters in de omgeving, waarbij omgeving zowel de ruimtelijke zin als in de zin van het tijdsverloop wordt bedoeld.

Daarbij speelt het minimaliseren van de schattingsfout een rol en om dit goed te kunnen doen, moet voor elke meetwaarde de initiële nauwkeurigheid bekend zijn. Met deze gegevens zorgt Wavix ervoor dat voor alle waarden van de parameters, dus zowel voor de meetwaarden als voor de door Wavix geschatte waarden, een indicatie van de schattingsnauwkeurigheid wordt gegenereerd. De uitvoer van Wavix bestaat dan ook altijd uit waarden met een bijbehorende standaardafwijking, die de nauwkeurigheid van die waarde aangeeft.

Bij het ontwikkelen van de eerste Wavix-versie (ca. 1997) zijn een aantal formules opgesteld, die voor de zes belangrijkste parameters binnen Wavix-1 een schatting geven van de nauwkeurigheid van de waarden van die parameters. Deze formules zijn gedeeltelijk gebaseerd op statistische eigenschappen van die parameters en gedeeltelijk op empirische kennis. Bovendien zijn ze alleen geldig voor een bepaalde meetmethode (20 minuten reeksen). In de documentatie van Wavix-1 worden ze gepresenteerd als vuistregels, vrijwel zonder achtergrondinformatie. Bij de tweede versie van Wavix (2004) zijn deze vuistregels ongewijzigd gehandhaafd.

Nu wordt gewerkt aan een volgende versie van Wavix, waarin een aantal nieuwe golfparameters is opgenomen. Voor die parameters zijn ook schattingsformules voor de nauwkeurigheid nodig. Deze zullen in het hiernavolgende worden gepresenteerd. Daarbij wordt van de gelegenheid gebruik gemaakt om de afleiding van de formules en de statistisch/wiskundige achtergrond zo goed mogelijk te beschrijven en ook voor het empirische deel zo goed als mogelijk is regels op te stellen om zodoende de vuistregels om te vormen naar reproduceerbare regels. Zodoende kan bij een eventuele verdere uitbreiding teruggegrepen worden naar deze afleidingen en kunnen volgens dezelfde methodiek zonnodig formules worden opgesteld voor weer andere parameters of kunnen de regels worden bijgesteld voor andere meetmethoden.

In deze notitie wordt eerst ingegaan op de verdeling van de golfhoogten. Voor het bepalen van de nauwkeurigheid van golfhoogten is het nodig een theoretische, wiskundig te beschrijven verdeling aan te nemen. Daarvoor wordt de Rayleigh verdeling gebruikt. Dit is de algemeen gebruikte verdeling voor golfhoogten.

Onder deze aanname wordt vervolgens de nauwkeurigheid van de gemiddelde golfhoogte (H_{gem}) berekend. Deze is, met statistische rekenregels, exact te bepalen.

Voor andere golfhoogte parameters dan H_{gem} is de nauwkeurigheid niet (of niet eenvoudig) rechtstreeks te bepalen. Dit is daarom, opnieuw onder de aanname van de Rayleigh verdeling, gedaan met behulp van simulaties. Daarmee kunnen zeer goede benaderingen worden berekend.

Bovengenoemde nauwkeurigheid is de statistische of steekproefnauwkeurigheid. Als er perfect zou worden gemeten en verwerkt, dan zou dit de enige bron van onnauwkeurigheid zijn. Maar perfect meten bestaat natuurlijk niet dus er moet nog een foutenbron worden toegevoegd. Meten en verwerken worden daarbij tezamen bekeken. Bij erg kleine golfhoogten kan deze foutenbron dominant zijn, bij wat grotere golfhoogten speelt de meet- en

verwerkingsnauwkeurigheid een ondergeschikte rol. In hoofdstuk 6 worden aannamen gedaan over de grootte van de meet- en verwerkingsnauwkeurigheid.

De onnauwkeurigheid door het steekproefeffect en door de meet- en verwerkingsnauwkeurigheid worden daarna volgens statistische rekenregels samengevoegd tot de totale schattingsnauwkeurigheid.

In de laatste hoofdstukken worden de vuistregels afgeleid voor de gevraagde parameters. Daarbij worden steeds eerst de regels uit het oude Wavix (meestal Wavix-1 genoemd) afgeleid.

Daarna volgt de afleiding van regels voor de nieuwe parameters. Daarbij wordt voor een iets andere vorm gekozen dan bij de Wavix-1 formules. Ook wordt geconstateerd dat de Wavix-1 formules bij erg grote golfhoogten iets overschatten. Daarom worden ook voor de Wavix-1 parameters nieuwe formules afgeleid, van dezelfde vorm als van de nieuwe parameters.

Het afleiden gebeurt per categorie parameters, eerst voor de golfhoogten, daarna voor golfperiode en tenslotte voor golfrichtingen.

De afleiding wordt in de tekst besproken en in bijlagen in detail doorgerekend. Voor enkele belangrijke parameters worden tussen- en eindresultaat in grafiekvorm weergegeven.

De golfparameters waarvoor nieuwe of verbeterde schattingsformules voor de nauwkeurigheid zijn afgeleid, zijn :

Golfhoogten	Golfperioden	Golfrichtingen
Hgem	Tgem	Th0
H1/3	T1/3	Th1
H1/10	TH1/3	s0 (s0bh)
H1/50	Tmax	
Hmax	THmax	
Hm0	Tm02	
HTE3	Tm01	
	Tm-10	

2. De Rayleigh verdeling.

De verdeling van golfhoogten op zee wordt in het algemeen goed beschreven door de Rayleigh verdeling. Dit is een verdeling die aan de linkerzijde bij nul begint (negatieve golfhoogten bestaan per definitie niet), vrij snel naar een maximum klimt, daarna eerst snel, daarna langzaam afneemt en aan de rechterzijde doorloopt naar oneindig, maar praktisch gesproken bij ca. vijf- of tienmaal het gemiddelde al praktisch nul is.

De Rayleigh verdeling kan worden beschreven door :

$$p(h) = 4 \cdot h / (H_s)^2 * \exp [-2(h/H_s)^2]$$

of, in overschrijdingsvorm :

$$q(h) = \exp [-2(h/H_s)^2]$$

In diep water voldoet de verdeling van de golfhoogten in het algemeen goed aan de Rayleigh verdeling. In ondieper water begint de verdeling af te wijken, vooral bij de grootste golven. In echt ondiep water, waar golfbreking overheerst is de Rayleigh verdeling onbruikbaar.

Verder is de verdeling zeer robuust, dat wil zeggen dat ook als niet meer precies aan de verdeling wordt voldaan, de belangrijkste eigenschappen toch bij goede benadering blijven gelden. Zodoende kunnen we voor al onze Noordzee locaties (in diep water) de Rayleigh verdeling gebruiken, behalve misschien voor de allerhoogste golven tijdens zware stormen.

De Rayleigh verdeling kan worden beschreven door allerlei verschillende parameters. Hierboven is H_s ($H_{1/3}$) gebruikt. De verdeling kan ook worden beschreven door parameters als σ (de standaardafwijking van de verdeling), H_{rms} , $H_{1/10}$, H_{gem} etc.

Een eigenschap van een vaste verdeling, zoals die van Rayleigh, is dat al zulke parameters vaste onderlinge verhoudingen hebben. Een aantal van die verhoudingen zullen in het hiernavolgende worden gebruikt. Daarom hier alvast een opsomming :

- $\sigma / H_{gem} = 0.523$
- $H_{1/3} / H_{gem} = 1.60$
- $H_{1/3} / H_{rms} = \sqrt{2} \quad (1.416)$
- $H_{1/3} / H_{1/10} = 0.787$
- $H_{1/3} / H_{1/50} = 0.642$
- $H_{1/3} / H_{max}$ is afhankelijk van het beschouwde aantal golven (normaliter tussen 0.55 en 0.63)
- $H_{1/10} / H_{gem} = 2.03$
- $H_{1/50} / H_{gem} = 2.49$

3. De nauwkeurigheid van de golfhoogte H_{gem}.

De nauwkeurigheid van de gemiddelde golfhoogte kan eenvoudig worden bepaald m.b.v. wat elementaire statistiek. Beschouw de gemeten golfhoogten (bijv. een meting van 20 minuten) als een steekproef (uit alle golfhoogten in het meetgebied op dat tijdstip en/of in dat tijdvak). De nauwkeurigheid van het gemiddelde van een steekproef wordt dan gegeven door :

$$\sigma_{\text{gem}} = \sigma / \sqrt{n} \quad [\text{m}]$$

σ_{gem} = standaard afwijking van het gemiddelde
 σ = standaard afwijking van de steekproef
 n = aantal golven in de steekproef

Het gemiddelde van de steekproef komt in termen van golfparameters overeen met H_{gem}. We nemen aan dat de golfhoogten verdeeld zijn volgens Rayleigh, zodat $\sigma / H_{\text{gem}} = 0.523$ (zie vorig hoofdstuk) . Dan geldt :

$$\sigma_{H_{\text{gem}}} = 0.523 * H_{\text{gem}} / \sqrt{n} \quad [\text{m}]$$

Voor de relatieve standaardafwijking wordt dit (delen door H_{gem}) :

$$\sigma_{H_{\text{gem}}} = 0.523 / \sqrt{n} \quad [-]$$

of eventueel in procenten :

$$\sigma_{H_{\text{gem}}} = 52.3 / \sqrt{n} \quad [\%]$$

Deze exacte afleiding is alleen te maken voor de parameter H_{gem} omdat bij die parameter alle golven uit de steekproef worden gebruikt. Voor parameters, die maar een deel van de (hoogste) golven gebruiken (H_{1/3}, H_{1/10} e.d.) is de standaard afwijking minder eenvoudig te berekenen omdat die zowel afhangt van de inhoud van de steekproef alsook van welk deel daarvan binnen de afsplitsing (hoogste derde deel of zo) valt.

Het lijkt wel duidelijk dat naarmate de afsplitsing kleiner is de standaardafwijking groter zal zijn. Verder ligt het voor de hand dat de standaardafwijking voor alle parameters (die over een bepaald, vast deel van de verdeling worden berekend) evenredig zal zijn met $1/\sqrt{n}$.

4. Simulaties.

De nauwkeurigheid van de gemiddelde golfhoogte H_{gem} is direct af te leiden uit de Rayleigh verdeling van de golfhoogten en wordt gegeven door de standaardafwijking, die $0,523 \cdot H_{gem} / \sqrt{n}$ bedraagt.

Voor andere golfparameters gelden soortgelijke relaties ($\sigma_{...} = c \cdot H_{...} / \sqrt{n}$). Deze zijn echter minder eenvoudig af te leiden. Deze zijn daarom m.b.v. simulaties berekend. Daarbij wordt uit een Rayleigh verdeling een steekproef getrokken en daaruit wordt de waarde van de onderzochte parameter berekend. Dit wordt een groot aantal malen herhaald en de spreiding in de uitkomsten van de waarden van de onderzochte parameter is dan de nauwkeurigheid van die parameter.

In de praktijk is een Rayleigh verdeling gebruikt met 100.000 golven, met een H_{rms} van 100,00 cm. Uit die verdeling werd een groot aantal malen (10.000) een steekproef van n golven getrokken. Van elke steekproef werden de waarden van een groot aantal golfhoogte parameters berekend. Van de waarden van elke parameter werden vervolgens gemiddelde en standaard afwijking berekend.

Dit werd vervolgens herhaald voor allerlei andere waarden van de steekproefomvang n . Daaruit bleek de (relatieve) standaard afwijking inderdaad evenredig te zijn met $1/\sqrt{n}$. Voor elke parameter is zodoende de waarde van de evenredigheidsconstante c berekend.

Onderstaand de resultaten voor de belangrijkste parameters. Gegeven wordt de relatieve standaard afwijking (Voor de absolute standaard afwijking vermenigvuldigen met de waarde van de parameter.) Enkele van deze resultaten worden later in dit document gebruikt bij de afleiding.

$$\begin{aligned}\sigma_{H_{gem}} &= 0.523 / \sqrt{n} & [-] \\ \sigma_{H_{rms}} &= 0.500 / \sqrt{n} & [-] \\ \sigma_{H_{1/3}} &= 0.526 / \sqrt{n} & [-] \\ \sigma_{H_{1/10}} &= 0.644 / \sqrt{n} & [-] \\ \sigma_{H_{1/50}} &= 0.983 / \sqrt{n} & [-] \\ \sigma_{H_{10\%}} &= 0.654 / \sqrt{n} & [-] \\ \sigma_{H_{2\%}} &= 0.91 / \sqrt{n} & [-]\end{aligned}$$

Onderstaand een voorbeeld van de berekening van de waarden van een aantal golfhoogte parameters en de waarde van de bijbehorende standaard afwijking σ . In dit voorbeeld is uitgegaan van $H_{rms} = 100$ cm ; Rayleigh verdeling en aantal golven $n = 200$:

parameter	waarde [cm]	σ (rel) [-]	σ (rel) [%]	σ (abs) [cm]
Hgem	88.6	0.037	3.7	3.3
Hrms	100	0.035	3.5	3.5
H1/3	142	0.037	3.7	5.3
H1/10	180	0.046	4.6	8.2
H1/50	221	0.070	7.0	15.4

5. De nauwkeurigheid als functie van alleen de golfhoogte.

In het vorige hoofdstuk is aangetoond dat de relatieve nauwkeurigheid van golfhoogte parameters alleen afhankelijk is van de factor $1/\sqrt{n}$. Omdat het aantal golven n meestal niet rechtstreeks bekend is, zal hier worden afgeleid dat de nauwkeurigheid ook kan worden berekend als functie van alleen de golfhoogte.

Het aantal golven in de steekproef hangt af van de golfperiode en de golfperiode is sterk afhankelijk van de golfhoogte. De relatie tussen het aantal golven en de gemiddelde golfperiode T_{gem} is evident :

$$n = \text{duur} / T_{gem}$$

Bij onze gebruikelijke meetmethode duurt een registratie 20 minuten ofwel 1200 seconden. Aan het begin en het einde van de registratie treedt enig verlies op. We stellen de netto duur op 1180 seconden. Het aantal golven n wordt dan :

$$n = 1180 / T_{gem}$$

Voor de relatie tussen golfperiode en golfhoogte wordt in het algemeen een vergelijking gebruikt van de gedaante :

$$T_{...} = c * \sqrt{(H_{...})}$$

zoals bijvoorbeeld de bekende relatie :

$$T_{m02} = c * \sqrt{(H_{m0})}$$

met voor de constante c , enigszins afhankelijk van de locatie een waarde tussen 3,2 en 3,5. Hier gebruiken we de variant :

$$T_{gem} = 4,2 * \sqrt{(H_{gem})} \quad [s \quad en \quad m]$$

Het is nu mogelijk de nauwkeurigheid van een golfhoogte parameter uit te drukken als functie van alleen die parameter. Combineren we bovengenoemde vergelijking met :

$$n = 1180 / T_{gem} \quad en \quad \sigma_{H_{gem}} = 0.523 * H_{gem} / \sqrt{n} \quad [m]$$

dan ontstaat na enig rekenwerk :

$$\sigma_{H_{gem}} = 0.031 * (H_{gem})^{5/4} \quad [m]$$

of, als relatieve fout :

$$\sigma_{H_{gem}} = 0.031 * (H_{gem})^{1/4} \quad [-]$$

6. Meet- en verwerkingsfouten.

In het voorgaande is alleen gekeken naar de steekproefnauwkeurigheid. Als de steekproef perfect wordt gemeten en ook in de verwerking geen fouten, benaderingen en afrondingen of vereenvoudigingen voorkomen, dan is dit ook de enige bron van onnauwkeurigheid. Dit is natuurlijk niet het geval.

Naast de steekproefonnauwkeurigheid spelen ook meetfouten en fouten in de verwerking een rol in de nauwkeurigheid van golfhoogte parameters, berekend uit meetwaarden. Bij grote golfhoogten zijn meetfouten e.d. in het algemeen ondergeschikt aan de steekproefnauwkeurigheid.

Dit soort fouten moet ook in rekening worden gebracht. We zullen eerst trachten ze te kwantificeren.

Golfmeetinstrumenten werken in het algemeen heel nauwkeurig. Voor de meetnauwkeurigheid van golfmeetsensoren als boeien en stappenbaken wordt meestal beter dan 1% opgegeven. We zullen hier **1%** aanhouden.

Bij de verwerking (eigenlijk inwinning en verwerking) is de discretisatie een belangrijke factor en verder speelt de verwerking van storingen een rol en ook afspraken, zoals het verwaarlozingscriterium voor heel kleine golven hebben invloed.

We concentreren ons op de discretisatie, d.i. de opdeling in discrete waarden. Dit betreft bijvoorbeeld bij de stappenbaak de stapgrootte (meestal zo'n 5 cm). Bij alle meetsensoren is vooral de discretisatie in de tijd (de tijdstap, meestal enkele tienden van seconden) een factor, die de meetnauwkeurigheid beïnvloedt.

Discretisatiefouten spelen vooral een rol bij kleine golfhoogten en korte golfperioden. Het ligt daarom voor de hand om voor dit soort fouten een vaste (lage) waarde aan te nemen en geen percentage.

We kiezen als vaste waarde voor dit type fout **3 cm** (0,03 m).

Verder nemen we aan dat de overige genoemde foutenbronnen in deze beide aannamen (1% en 3 cm) verwerkt zijn.

We stellen het totaal van meet- en verwerkingsfouten op : **1% + 0,03 m**

Bij lage golfhoogten is de meet- en verwerkingsfout dominant (door de vaste bijdrage van 3 cm), maar bij grote golfhoogten domineert de steekproefonnauwkeurigheid, die al gauw 3-5% bedraagt.

De totale fout gevonden wordt door steekproeffout en meetfout kwadratisch op te tellen.

7. De nauwkeurigheid van de gemiddelde golfhoogte Hgem.

In onderstaande tabel wordt de totale schattingsnauwkeurigheid voor de golfhoogte parameter Hgem berekend voor een aantal golfhoogten.

In kolom 1 wordt de golfhoogte Hgem gegeven, waarvoor de standaard afwijkingen worden berekend. Kolom 2 geeft de spreiding door steekproefnauwkeurigheid, volgens :

$$\sigma_{Hgem(1)} = 0.031 * (Hgem)^{5/4} \quad [m]$$

Kolom 3 geeft de spreiding door meet- en verwerkingsfouten, volgens :

$$\sigma_{Hgem(2)} = 0.01 * Hgem + 0.03 \quad [m]$$

In kolom 4 wordt de totale spreiding berekend volgens :

$$\sigma_t = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}$$

Om tot de een eenvoudige formule te komen, geschikt om in Wavix te gebruiken, is door de resultaten van kolom 4 een lijn gefit. De vergelijking van die lijn is :

$$\sigma_{Hgem} = 0.02 * H * \sqrt{H} + 0.03 \quad [m]$$

In kolom 5 zijn de uitkomsten van die formule gegeven voor de daar gebruikte waarden. Ze blijken goed overeen te komen met de waarden in kolom 4.

golfhoogte Hgem [m]	σ_{Hgem} steekpr [m]	σ_{Hgem} meet- [m]	σ_{Hgem} totaal [m]	σ_H volgens Wavix formule [m]
0.20	0.004	0.032	0.032	0.032
0.50	0.013	0.035	0.037	0.037
1.00	0.031	0.040	0.051	0.050
2.00	0.074	0.050	0.089	0.087
3.00	0.122	0.060	0.136	0.134
4.00	0.175	0.070	0.188	0.190
5.00	0.232	0.080	0.245	0.254
6.00	0.291	0.090	0.305	0.324

De totale schattingsnauwkeurigheid van de golfhoogte parameter Hgem blijkt dus goed benaderd te kunnen worden met de vergelijking :

$$\sigma_{Hgem} = 0.02 * Hgem * \sqrt{Hgem} + 0.03 \quad [m]$$

of, als de in Wavix-1 gebruikelijke eenheid cm wordt gebruikt :

$$\sigma_{Hgem} = 0.002 * Hgem * \sqrt{Hgem} + 3 \quad [cm]$$

In bijlage 1 (bovenste panel) wordt bovenstaande grafisch weergegeven. De plot toont de bijdragen van de steekproefnauwkeurigheid, van de meet- en verwerkingsfouten en de som van deze beide. Bovendien toont deze figuur de benadering door de Wavix-formule.

8. De nauwkeurigheid van de golfhoogte parameters in Wavix-1.

De golfhoogte H_{gem} wordt niet gebruikt in Wavix, wel de golfhoogten $H_{1/3}$ en H_{m0} . In hoofdstuk 3 hebben we gezien dat uit de simulaties blijkt, dat de relatieve nauwkeurigheid voor $H_{1/3}$ vrijwel gelijk is aan die van H_{gem} . Er geldt immers :

$$\sigma_{H_{gem}} = 0.523 / \sqrt{n} \quad \text{en} \quad \sigma_{H_{1/3}} = 0.526 / \sqrt{n}$$

Gezien deze resultaten kunnen we de formule voor H_{gem} ongewijzigd gebruiken voor de golfhoogte $H_{1/3}$.

In (het oude) Wavix wordt als eenheid van de golfhoogte cm's gebruikt. Omdat de constanten niet dimensieloos zijn, verandert, bij overgang van meters naar centimeters, de constante 0,02 in 0,002 en de constante 0,03 in 3.

De Wavix-1 formule voor de nauwkeurigheid van de golfhoogte $H_{1/3}$ wordt dan :

$$\sigma_{H_{1/3}} = 0.002 * H_{1/3} * \sqrt{(H_{1/3})} + 3 \quad [\text{cm}]$$

Dit is exact de formule, zoals die in de Wavix-literatuur sec wordt gegeven. Nu is echter in het voorgaande (naar ik hoop), de herkomst en de wiskundige/statistische achtergrond wel voldoende duidelijk gemaakt.

De golfhoogte H_{m0} is sterk verwant aan de golfhoogte $H_{1/3}$. De verwachtingswaarde is bijna gelijk en de correlatie tussen beide parameters is zeer sterk. Op basis daarvan mag verwacht worden dat de nauwkeurigheid ook ongeveer gelijk is.

De parameter H_{m0} is echter een spectrale parameter en wordt op geheel andere wijze berekend uit de metingen dan de golfhoogte $H_{1/3}$. Op grond daarvan zouden de nauwkeurigheidseigenschappen wel eens iets anders kunnen zijn.

Vroeger onderzoek (ook op basis van simulaties, nu echter met theoretische spectrum vormen, aangevuld met een random-factor) heeft echter aangetoond dat H_{m0} vrijwel even nauwkeurig is als $H_{1/3}$ en ook op dezelfde manier afhangt van de golfhoogte.

Daarom is in het oude Wavix dezelfde formule gebruikt als voor $H_{1/3}$:

$$\sigma_{H_{m0}} = 0.002 * H_{m0} * \sqrt{(H_{m0})} + 3 \quad [\text{cm}]$$

In Wavix wordt nog een derde golfhoogte parameter gebruikt, namelijk HTE3, de laagfrequente golfhoogte (in Wavix-1 HE10 genoemd). Daarvan is bekend dat deze een onnauwkeuriger is dan H_{m0} , omdat deze over slechts een klein deel van het spectrum wordt berekend.

Bij grote (laagfrequente) golfhoogten is HTE3 maar betrekkelijk weinig onnauwkeuriger dan H_{m0} , tot ca. een factor 1,5. Het laagfrequente deel van het spectrum bevat onder die omstandigheden een aanzienlijk deel van de totale energie.

Bij weinig laagfrequente energie is HTE3 relatief erg onnauwkeurig, tot ca. driemaal zo onnauwkeurig als H_{m0} . Dit alles is empirisch tot uitdrukking gebracht in de volgende vergelijking :

$$\sigma_{HTE3} = 0.06 * HTE3 + 0.8 * \sqrt{(HTE3)} \quad [\text{cm}]$$

Bijlage 1 (onderste panel) laat het verloop van bovengenoemde functies zien.

9. De nauwkeurigheid van alle golfhoogte parameters.

9.1. Inleiding

In dit hoofdstuk worden de definitieve vergelijkingen voor het bepalen van de nauwkeurigheid van vier nieuwe golfhoogte parameters afgeleid en vastgelegd.

Daarbij wordt een iets andere formulering gebruikt dan eerder bij Wavix-1. Dit gaf een eerste aanleiding te overwegen om ook de formules voor de Wavix-1 parameters te herzien.

Als tweede aanleiding bleek dat de Wavix-1_formules bij erg grote golfhoogten in toenemende mate gingen overschatten.

Om deze twee redenen is besloten om ook voor de oude Wavix-parameters nieuwe formules af te leiden. Bij de afleiding zullen de verschillen in uitkomsten tussen de oude en de nieuwe formuleringen worden getoond.

In de volgende paragrafen wordt voor elke golfhoogte parameter apart een formule voor de standaard afwijking afgeleid.

De volgende golfhoogte parameters zullen aan de orde komen : Hgem, H1/3, H1/10, H1/50, Hmax, Hm0 en HTE3.

In de onderstaande paragrafen wordt voor elke parameter dezelfde werkwijze gevolgd. Eerst wordt de steekproefnauwkeurigheid s1 berekend, volgens :

$$s1 = c * H... / \sqrt{n} \quad [cm]$$

c volgt uit het simulatie onderzoek (hoofdstuk 4)
n volgt uit : $Tgem = 4.2 * \sqrt{(Hgem/100)}$ (N.B. : Hgem wordt hier omgezet in m)
en $n = 1180 / Tgem$

Dan de meet- en verwerkingsnauwkeurigheid s2 uit :

$$s2 = 0.01 * H... + 3 \quad [cm]$$

en de totale schattingsnauwkeurigheid s3 met :

$$s3 = \sqrt{(s1^2 + s2^2)} \quad [cm]$$

Deze drie spreidingen worden berekend voor een brede range van waarden van de golfhoogte parameter H... Door de waarden van de laatste (s3) wordt een lijn gefit van de gedaante :

$$s4 = c * H...^{*1.4} + 3 \quad [cm]$$

Tenslotte wordt de relatieve nauwkeurigheid in % berekend, volgens :

$$s5 = s4 * 100 / H... \quad [\%]$$

Als van de betreffende parameter ook een berekening volgens het oude Wavix in gebruik is, dan wordt deze ook gegeven , als :

$$s6 = c * H...^{*1.5} + 3 \quad [cm]$$

Daarmee kunnen de oude en de nieuwe versie worden vergeleken.

De berekening wordt voor elke golfhoogte parameter in detail in een bijlage gegeven, met de gebruikte formules, constanten e.d. In sommige gevallen wordt een en ander ook grafisch weergegeven, eveneens in een bijlage.

De nieuwe formule wordt steeds tweemaal gegeven, namelijk voor de eenheid [cm] en voor de eenheid [m]. De constante c (die niet dimensieloos is) verschilt in beide versies.

9.2. De gemiddelde golfhoogte H_{gem}

De berekening van de schattingsnauwkeurigheid van de golfhoogte H_{gem}, de standaard afwijking $\sigma_{H_{gem}}$, is al in hoofdstuk 7 uiteengezet. Er is echter een nieuwe benaderingsformule toegepast.

De oude benaderingsformule (dezelfde als die voor H_{1/3} en H_{m0} in Wavix-1) bleek bij erg grote golfhoogten iets te gaan overschatten.

Daarom is voor een wat lagere macht gekozen (1,4 i.p.v. 1,5). De constante moest daarbij natuurlijk ook worden aangepast. De nieuwe formule luidt :

$$\sigma_{H_{gem}} = 0.0036 * H_{gem}^{1.4} + 3 \quad [\text{cm}]$$

De afleiding wordt gegeven in bijlage 2. De tabel in die bijlage laat zien dat de benaderingsformule zeer goed overeen komt met de berekende spreiding en dat de relatieve nauwkeurigheid voor wat grotere golfhoogten steeds zo'n 5% bedraagt.

Als de golfhoogte H_{gem} wordt uitgedrukt in m (i.p.v. cm) veranderen de constanten in de vergelijking voor $\sigma_{H_{gem}}$. Deze wordt dan :

$$\sigma_{H_{gem}} = 0.0225 * H_{gem}^{1.4} + 0.03 \quad [\text{m}]$$

9.3. De golfhoogte H_{1/3} (significante golfhoogte)

De berekening van de schattingsnauwkeurigheid $\sigma_{H_{1/3}}$ wordt in detail gegeven in bijlage 3. De constante in de s1-formule bedraagt 0.526. Deze waarde is gevonden in het simulatie onderzoek (hoofdstuk 4).

De relatieve schattingsfout bedraagt bij wat grotere golfhoogten 4 tot 5%.

De gevonden benaderingsformules luiden :

$$\sigma_{H_{1/3}} = 0.0032 * H_{1/3}^{1.4} + 3 \quad [\text{cm}]$$

$$\sigma_{H_{1/3}} = 0.020 * H_{1/3}^{1.4} + 0.03 \quad [\text{m}]$$

De resultaten zijn ook grafisch weergegeven, zie bijlage 4 bovenste panel. De plot laat de samenstellend delen zien en de totale standaard afwijking, de benadering daarvan door bovengenoemde formules en de benadering door de Wavix-1 formule. De grafiek laat zien dat de benadering door de nieuwe formule zeer goed is (maximale overschatting is 1 cm bij H_{1/3} = 800 cm).

Bij de oude formule is de overschatting bij zulke grote golfhoogten aanzienlijk meer. Bij normale golfhoogten valt de overschatting door de oude formule wel mee.

9.4. De golfhoogte H1/10.

De berekening van de schattingsnauwkeurigheid $\sigma_{H1/10}$ wordt gegeven in bijlage 5. De constante in de s1-formule bedraagt 0.644 (zie hoofdstuk 4).

De relatieve schattingsfout bedraagt bij wat grotere golfhoogten 4,5 tot 6%.

De gevonden benaderingsformules zijn :

$$\sigma_{H1/10} = 0.0037 * H1/10^{1.4} + 3 \quad [\text{cm}]$$

$$\sigma_{H1/10} = 0.023 * H1/10^{1.4} + 0.03 \quad [\text{m}]$$

De relatieve fouten van de tot nu toe beschouwde parameters Hgem, H1/3 en H1/10 liggen alle rond de 5%. Het lijkt er op alsof deze parameters alle ongeveer even nauwkeurig worden bepaald uit metingen. In feite is echter Hgem, die bepaald wordt uit **alle** golven, het nauwkeurigst, daarna is H1/3, die bepaald wordt uit een aanzienlijk deel van de golven, het nauwkeurigst en H1/10, die volgt uit een klein deel van de golven, verreweg het onnauwkeurigst.

Een getallenvoorbeeld met absolute nauwkeurigheden laat dat zien. Neem bijvoorbeeld een golfmeting met een significante golfhoogte van 2 m. Onderstaand tabelletje laat dan zien wat de waarden zijn van de drie bovengenoemde parameters en hun absolute en relatieve nauwkeurigheid.

parameter	golfhoogte cm	σ (abs) cm	σ (rel) %
Hgem	125	6.1	4.9
H1/3	200	8.3	4.2
H1/10	254	11.6	4.6

De tabel laat zien dat de waarde van H1/10 in dezelfde golfmeting ongeveer tweemaal zo onnauwkeurig is als die van Hgem, maar omdat de verwachtingswaarde ook ongeveer tweemaal zo groot is, is de relatieve fout van dezelfde orde van grootte!

9.5. De golfhoogte H1/50.

De berekening van de schattingsnauwkeurigheid $\sigma_{H1/50}$ wordt gegeven in bijlage 6. De constante in de s1-formule bedraagt 0.983 (zie hoofdstuk 4).

De relatieve schattingsfout bedraagt bij wat grotere golfhoogten 6 tot 8%. Dit is duidelijk groter dan die van de vorige parameters. De absolute fout is, bij dezelfde significante golfhoogte, bijna tweemaal zo groot als die van H1/10. Dit komt omdat H1/50 uit maar heel weinig golven wordt berekend. Deze parameter is tamelijk instabiel.

De gevonden benaderingsformules zijn :

$$\sigma_{H1/50} = 0.00525 * H1/50^{1.4} + 3 \quad [\text{cm}]$$

$$\sigma_{H1/50} = 0.033 * H1/50^{1.4} + 0.03 \quad [\text{m}]$$

9.6. De golfhoogte Hmax.

De berekening van de schattingsnauwkeurigheid $\sigma_{H_{max}}$ wordt gegeven in bijlage 7. Deze is wat ingewikkelder dan bij de vorige parameters. Dat komt omdat er in de Rayleigh verdeling geen vaste verhouding is tussen Hmax en andere parameters als Hgem, H1/3 e.d.

De verwachtingswaarde van Hmax t.o.v. andere golfhoogte parameters wordt bepaald door het aantal golven. Bij een klein aantal golven is de verwachtingswaarde van Hmax maar weinig groter dan bijvoorbeeld H1/10 en bij een groot aantal golven (de kans op een erg hoge golf is dan natuurlijk groter) is de verwachtingswaarde veel groter dan zelfs H1/50.

De kans op een Hmax, groter dan een bepaalde waarde is gemakkelijk te berekenen. Volgens de Rayleigh verdeling (hoofdstuk 2) geldt:

$$q(h) = \exp[-2(h/H_s)^2]$$

Dit is, met h expliciet, te schrijven als :

$$h = H_s * \sqrt{(\log(q(h)))/-2.}$$

Door voor q(h) in te vullen 1/n is hiermee te berekenen, welke golfhoogte h, bij een verdeling van n golven, naar verwachting precies eenmaal zal worden overschreden.

Hmax zal dus gelijk zijn of groter dan die waarde. De verwachtingswaarde voor Hmax is dus hoger dan de waarde voor h, die hoort bij 1/n. Af te leiden valt (door een theoretische beschouwing of met simulaties) dat de verwachtingswaarde voor Hmax wordt verkregen door voor q(h) niet 1/n maar 0,6/n in te vullen.

Dit wordt gedaan in bijlage 7. Er wordt uitgegaan van waarden van de significante golfhoogte H1/3. Het bij die waarde behorend aantal golven wordt berekend en daarmee volgens bovengenoemde methode de bijbehorende verwachtingswaarde voor Hmax.

Het volgende probleem is dat de constante in de berekening van de steekproefnauwkeurigheid (c uit $\sigma = c * H / \sqrt{n}$) in dit geval geen constante is. Ook hier hangt de waarde van de 'constante' af van het aantal golven.

Bij een klein aantal golven (de verwachtingswaarde voor Hmax is dan laag) is die constante ongeveer 1 en bij veel golven is c ongeveer 2,5 (de verwachtingswaarde voor Hmax is dan groot). Dit blijkt uit het simulatie onderzoek, dat beschreven is in hoofdstuk 4.

Om aan dit probleem tegemoet te komen, is in het programma, waarmee $\sigma_{H_{max}}$ wordt berekend een tabel opgenomen met waarden voor de constante c voor elke waarde van n die een veelvoud is van 50. Voor tussenliggende waarden van n interpoleert het programma. Teneinde de berekening reproduceerbaar te houden, wordt die tabel hieronder gegeven.

n	c	n	c	n	c	n	c
50	0.977	300	1.71	550	2.12	800	2.43
100	1.19	350	1.80	600	2.18	850	2.49
150	1.35	400	1.89	650	2.24	900	2.54
200	1.49	450	1.97	700	2.30	950	2.59
250	1.61	500	2.05	750	2.37	1000	2.63

Nu kan de steekproefnauwkeurigheid s1 worden berekend en vervolgens de meetnauwkeurigheid s2 en de totale nauwkeurigheid s3. Daar wordt weer een lijn door gefit.

Voor deze lijn blijkt een lagere macht (lager dan 1,4) voor de golfhoogte nodig om een redelijke fit te verkrijgen. Dit was ook wel te verwachten, gezien de geheel andere relatie met het aantal golven n dan de andere golfhoogte parameters.

Uiteindelijk zijn de volgende benaderingsformules gevonden :

$$\sigma_{H_{max}} = 0.047 * H_{max}^{1.12} + 3 \quad [cm]$$

$$\sigma_{H_{max}} = 0.082 * H_{max}^{1.12} + 0.03 \quad [m]$$

De relatieve schattingsfout bedraagt bij wat grotere golfhoogten 10-11%. Dit is heel veel, maar dat is ook te verwachten voor zo'n extreme parameter.

9.7. De golfhoogte H_{m0} .

De tot nu toe behandelde golfhoogte parameters waren alle tijddomein parameters, d.w.z dat ze berekend zijn uit de achtereenvolgens opgetreden golfhoogten. De golfhoogte H_{m0} is een spectrale parameter, berekend uit het energiedichtheid spectrum, zonder gebruik te maken van individuele golfhoogten (of golfperiodes). Het aantal golven is dan ook niet (rechtstreeks) van invloed op de nauwkeurigheid van H_{m0} . Dit houdt in dat de tot nu toe gevolgde methode voor het berekenen van de nauwkeurigheid voor deze parameter eigenlijk niet bruikbaar is.

De nauwkeurigheid van spectrale golfparameters wordt berekend uit eigenschappen van het spectrum, rekening houdend met de berekeningswijze van het spectrum (aantal deelreeksen, tapering e.d.). Die nauwkeurigheid wordt meestal uitgedrukt in een aantal vrijheidsgraden. Dit is het aantal vrijheidsgraden van een χ^2 -verdeling. Dit kan, met wat aannamen, eenvoudig worden omgezet naar een standaardafwijking van een normale verdeling.

De golfhoogte H_{m0} komt in hoge mate overeen met de golfhoogte $H_{1/3}$. Ze worden beide wel significante golfhoogte genoemd. De waarde van H_{m0} , is meestal iets hoger (3-7%, enigszins afhankelijk van het type meetinstrument).

Ook de nauwkeurigheidseigenschappen van H_{m0} en $H_{1/3}$ zijn vrijwel gelijk. H_{m0} is weliswaar meestal iets onnauwkeuriger (door enig dataverlies tijdens de verwerking, veroorzaakt door tapering), maar ze hangen op vrijwel gelijke wijze samen met golfhoogte en golfperiode. Daarom wordt het schatten van de nauwkeurigheid van H_{m0} toch op dezelfde manier gedaan als bij die van $H_{1/3}$. Om tegemoet te komen aan de iets mindere nauwkeurigheid van H_{m0} , wordt de constante in de bepaling van de steekproef-nauwkeurigheid met ca. 10% verhoogd (0.58 i.p.v. 0.526).

De berekening van de schattingsnauwkeurigheid $\sigma_{H_{m0}}$ wordt verder gegeven in bijlage 8. De resulterende schattingsformules zijn :

$$\sigma_{H_{m0}} = 0.00345 * H_{m0}^{1.4} + 3 \quad [cm]$$

$$\sigma_{H_{m0}} = 0.0217 * H_{m0}^{1.4} + 0.03 \quad [m]$$

De relatieve schattingsfout bedraagt bij wat grotere golfhoogten 4,5 tot 6%.

In bijlage 4 (onderste panel) wordt het verloop van de nauwkeurigheid van H_{m0} in grafiekvorm weergegeven.

9.8. De golfhoogte HTE3.

De laagfrequente golfhoogte HTE3 is, evenals H_{m0} , een spectrale parameter. De waarde wordt berekend uit het deel van het energiedichtheidspectrum tussen 0,03 en 0,1 Hz. Daarmee is al direct duidelijk dat de nauwkeurigheid van deze parameter veel minder is dan bijvoorbeeld die van H_{m0} , omdat deze over het gehele spectrum wordt berekend.

De golfhoogte HTE3 wordt vaak gerelateerd aan deining. Als er deining aanwezig is in een golfveld, heeft deze veelal een frequentie tussen 0,05 en 0,10-0,12 Hz. In dat geval representeert HTE3 dus inderdaad deiningenergie. Bij lage golfhoogten, zonder of vrijwel zonder deining, wordt echter ook altijd enige energie gevonden in het spectrumdeel tussen 0,03 en 0,10 Hz, veroorzaakt door meet- en verwerkingsonnauwkeurigheid. In dat geval betekent HTE3 niets.

Bij grote golfhoogten (vanaf ca. H_{m0} is 2,5 m) valt een deel van de door de wind opgebouwde golfenergie binnen het laagfrequente deel van het spectrum. HTE3 geeft dan geen deining weer maar pure windgolfergie. Soms echter komt er onder die omstandigheden ook deining voor, ontstaan in een ouder golfveld. In dat geval vertegenwoordigt HTE3 zowel deining als windgolven.

Het zal duidelijk zijn dat de nauwkeurigheid van HTE3 samenhangt met het optreden van bovengenoemde verschijningsvormen. Daarom is de schattingsnauwkeurigheid van deze parameter moeilijk te bepalen. De uiteindelijk hieronder afgeleide schattingsformules zijn dan ook, meer dan bij de voorgaande parameters, een benadering.

HTE3 is ook afhankelijk van meer veranderlijken, dan alleen zijn eigen waarde, zoals dat bij de voorgaande parameters is afgeleid. Daarom is in de benaderingsformules ook de golfhoogte H_{m0} opgenomen.

Eerst een empirische beschouwing. Bij lage golfhoogten zal de spreiding van HTE3 in relatieve zin groot zijn, veel groter dan die van H_{m0} of $H_{1/3}$. Daarbij valt op te merken, dat als HTE3 en H_{m0} van dezelfde orde van grootte zijn, dan bestaat kennelijk veel van de aanwezige energie uit deining en valt een groot deel van de energie in het spectrum in het laagfrequente gebied. In dat geval is de nauwkeurigheid van HTE3 niet zo veel slechter dan die van H_{m0} .

Bij zeer grote golfhoogte valt ook een groot deel van de energie binnen het laagfrequente gebied en ook dan is HTE3 niet veel onnauwkeuriger dan H_{m0} .

Een oud onderzoek naar de nauwkeurigheid van spectrale parameters, (ook d.m.v. simulaties) heeft aangetoond dat de standaard afwijking van HTE3 ongeveer 1,5 (bij grote golfhoogten) tot 2,5 maal zo groot is als die van H_{m0} .

Dan nu een kwantitatieve analyse. Hoewel HTE3 een spectrale parameter is, gebruiken we, net als bij H_{m0} , toch dezelfde methode als bij de tijddomein parameters ($H_{1/3}$ e.d.).

Daarbij wordt eerst de steekproefnauwkeurigheid bepaald en deze hangt af van het aantal golven. Dit is bij de laagfrequente golfhoogte eenvoudig te bepalen. Aangezien het frequentiegebied beperkt is tot 0,03 - 0,10 Hz, liggen de golfperioden tussen 10 en 33 seconden, met het zwaartepunt dicht bij de kortere perioden. We nemen een gemiddelde periode aan van 15 seconden. Het aantal golven is dan $1200/15$ ofwel 80. Dit is vrijwel onafhankelijk van de grootte van HTE3.

Een belangrijke keuze is ook de constante in de s_1 -vergelijking. We kunnen hier niet terugvallen op een waarde uit hoofdstuk 4. Op empirische gronden is hier gekozen voor de waarde 0,65, dat is ongeveer dezelfde waarde als die bij $H_{1/10}$ wordt gebruikt. Dit op grond van de analogie dat HTE3 wordt berekend uit een klein deel van het spectrum en $H_{1/10}$ uit een klein deel van de golfhoogte verdeling.

Voor de meet- en verwerkingsnauwkeurigheid nemen we een grotere waarde aan dan voor de voorgaande parameters. Voor de meeste meetinstrumenten (boeien) ligt dit laagfrequente gebied immers op de grens van wat ze nog kunnen meten. Bij de verwerking is de nauwkeurigheid om die reden ook wat minder.

We stellen de meet- en verwerkingsnauwkeurigheid op 2% + 5 cm.

De steekproefnauwkeurigheid en de meet- en verwerkingsnauwkeurigheid worden weer samengevoegd tot de totale schattingsnauwkeurigheid en daardoor wordt weer een lijn gefit.

De schattingsformules bevatten een term, waarin Hm0 voorkomt. Hiermee wordt de eerder in deze paragraaf gesignaleerde afhankelijkheid tussen Hm0 en HTE3 enigszins verdisconteerd. De schattingsformules zijn :

$$\sigma_{\text{HTE3}} = 0.05 * \text{HTE3} + 0.4 * \text{HTE3}^{0.5} + 0.2 * \text{Hm0}^{0.5} \quad [\text{cm}]$$

$$\sigma_{\text{HTE3}} = 0.05 * \text{HTE3} + 0.04 * \text{HTE3}^{0.5} + 0.02 * \text{Hm0}^{0.5} \quad [\text{m}]$$

Details van de berekening van σ_{HTE3} zijn te vinden in bijlage 9. De berekeningen worden gemaakt voor drie verschillende relaties tussen HTE3 en Hm0, namelijk :

$$\begin{aligned} \text{Hm0} &= 1,2 * \text{HTE3} && (\text{HTE3 bestaat voornamelijk uit deining}) \\ \text{Hm0} &= 1,2 * \text{HTE3} + 75 && (\text{HTE3 kan zowel deining als windgolf zijn}) \\ \text{Hm0} &= 1,2 * \text{HTE3} + 300 && (\text{HTE3 bestaat voornamelijk uit windgolf}) \end{aligned}$$

In bijlage 10 (bovenste panel) wordt de totale schattingsnauwkeurigheid gegeven, samen met de samenstellende delen daarvan en de benadering daarvan voor de bovengenoemde waarden van Hm0. Ook de oude Wavix vergelijking wordt gegeven.

De nieuwe benaderingen geven duidelijk lagere waarden. De relatieve schattingsfout ligt voor de wat hogere waarden van HTE3 tussen 8 en 12%.

9.9 Samenvatting van de nauwkeurigheid van de golfhoogte parameters.

In de voorgaande paragrafen zijn de formules afgeleid voor de standaard afwijking van uit metingen berekende waarden van zeven golfhoogte parameters. Met deze standaard afwijkingen wordt de bepalingnauwkeurigheid vastgelegd. Elke berekende waarde van één van deze parameters kan worden beschouwd als een schatting. De met bovengenoemde formules berekende standaard afwijkingen leggen het spreidingsgebied van die schattingen vast. Daarbij mag vrijwel altijd een normale verdeling worden aangenomen.

De eerste vijf parameters stammen alle uit het tijddomein, dat wil zeggen dat ze worden berekend uit de verdeling van de gemeten golfhoogten. Voor de eerste vier is daarbij dezelfde basisformule gebruikt met alleen een andere constante.

Voor de vijfde, de golfhoogte Hmax, moest, vanwege de afwijkende aard van deze parameter, de formulering wat verder worden aangepast.

De benadering van de schattingsfout is voor deze parameters vrijwel exact.

De beide laatste parameters, Hm0 en HTE3, worden berekend uit het energiedichtheidspectrum. Van dit soort parameters kan de nauwkeurigheid ook worden berekend, maar dit is veel lastiger te veralgemeniseren. Daarom is voor deze beide parameters dezelfde afleiding gebruikt als voor de tijddomein parameters, waarbij empirische argumenten zijn gebruikt om tot de juiste constanten te komen.

De benadering is voor deze beide parameters wat minder exact, het zijn meer vuistregels dan de voorgaande.

Belangrijk is dat de afgeleide formules slechts gelden voor de omstandigheden waarvoor ze zijn afgeleid. Zo vormt het feit dat de golfhoogte parameters worden berekend uit registraties van 20 minuten een onmisbare onderdeel bij het afleiden van de formules. Voor registraties van 10 minuten of 30 minuten of welke afwijkende duur dan ook gelden andere formules!! Bij het schatten van de meet- en verwerkingsnauwkeurigheid is impliciet aangenomen dat het gaat om metingen in diep water (Noordzee), met de daar gebruikelijke meetinstrumenten, met een inwinfrequentie in de orde van 1,28 of 2 Hz en met de bij die metingen gebruikelijke verwerkingstechnieken.

Elke afwijking van deze meetmethodiek kan invloed hebben op de grootte van de standaard afwijking.

Het zal echter, nu de afleiding van de formules eindelijk beschreven is, in de meeste gevallen vrij eenvoudig zijn om de formules aan te passen aan andere meetmethodieken. Vaak zal kunnen worden volstaan met het aanpassen van één van de constanten.

Bijlage 10 (onderste panel) laat het verloop zien van de waarden van de schattingsnauwkeurigheid, afhankelijk van de golfhoogte. Dit laat zien dat de relatieve schattingsnauwkeurigheid voor de parameters Hgem, H1/3, H1/10 en Hm0 ongeveer even groot is, voor H1/10 en HTE3 een stuk groter en voor Hmax nog flink wat groter. Bij HTE3 valt bovendien op dat de vorm van de lijn verschilt van die van de andere.

De lengte van de lijnen in de figuur is een indicatie voor het geldigheidsgebied.

De lijnen in figuur 10(onder) geven wel een duidelijke indicatie van de grootte van de schattingsfout, maar niet helemaal van de onderlinge verhoudingen. Zo lijkt bijvoorbeeld de grootte van de schattingsfout van Hgem en H1/10 vrijwel even groot. Wat niet uit de figuur blijkt is dat binnen eenzelfde meting de waarde van H1/10 gemiddeld ruim tweemaal die van Hgem bedraagt en dat daarom de absolute fout ook ongeveer tweemaal zo groot is!

Neem bijvoorbeeld een golfmeting met een voor de Noordzee gemiddelde waarde voor de significante golfhoogte van 1,25 m. Onderstaande tabel geeft dan de verwachtingswaarde van de zeven hier gebruikte golfhoogte parameters met hun relatieve en absolute standaard afwijkingen. (Voor HTE3 drie waarden vanwege de verschillende verschijningsvormen.)

De tabel laat de absolute fouten in het juiste perspectief zien. De absolute fouten van Hgem en Hmax verschillen een factor 5, de relatieve fouten een factor 2!

parameter	golfhoogte cm	σ (abs) cm	σ (rel) %
Hgem	78	4.6	5.9
H1/3	125	5.8	4.6
H1/10	159	7.5	4.7
H1/50	195	11.4	5.8
Hmax	216	22.4	10.3
Hm0	130	6.1	4.7
HTE3 (1)	15	4.6	31
HTE3 (2)	40	6.8	17
HTE3 (3)	110	12.0	10.9

10. De nauwkeurigheid van de gemiddelde golfperiode Tgem.

De nauwkeurigheid van golfperiode parameters is niet onderzocht in de simulatie studie. We kunnen echter, met behulp van wat statistiek, wel een goede schatting afleiden uit die van de golfhoogte parameters.

Al eerder is geconstateerd dat de golfperioden sterk afhankelijk zijn van de golfhoogten. Die afhankelijkheid wordt vaak beschreven door een relatie van de gedaante :

$$\text{golfperiode} = c * (\text{golfhoogte})^a$$

De optimale waarde van a ligt (voor onze Noordzee locaties) tussen 0,45 en 0,50 en in de praktijk wordt vrijwel altijd 0,5 gebruikt.

Volgens statistische foutvoortplantingswetten geldt dan voor de relatieve nauwkeurigheid :

$$\sigma_{\text{golfperiode}} = a * \sigma_{\text{golfhoogte}} \quad \text{of, met } a = 0,5$$

$$\sigma_{\text{golfperiode}} = 0.5 * \sigma_{\text{golfhoogte}}$$

zodat bijvoorbeeld voor de relatieve steekproefnauwkeurigheid van de golfperiode Tgem geldt :

$$\sigma_{T_{\text{gem}}(1)} = 0.5 * \sigma_{H_{\text{gem}}} = 0.5 * 0.523 / \sqrt{n} = 0.26 / \sqrt{n} \quad [-]$$

De meet- en verwerkingsnauwkeurigheid van golfperiode parameters is moeilijker vast te stellen. De meetnauwkeurigheid heeft, gezien de definitie van de golfperiode (de tijdsduur tussen opeenvolgende nuldoorgangen) nauwelijks invloed. De verwerkingsnauwkeurigheid, in het bijzonder de discretisatie, des te meer, vooral bij kleine golfhoogten.

Het ligt voor de hand dat de verwerkingsnauwkeurigheid omgekeerd evenredig is met de golfhoogte. Bij geringe golfhoogte zal deze groter of veel groter zijn dan de steekproefnauwkeurigheid en bij grote golfhoogten zal de invloed geringer zijn.

Voor het weergeven van de meet- en verwerkingsnauwkeurigheid van de golfperiode Tgem is daarom, in Wavix-1, gekozen voor een empirische relatie, die hoofdzakelijk afhankelijk is van de golfhoogte Hm0 met daarbij een kleine optelconstante. De relatie luidt :

$$\sigma_{T_{\text{gem}}(2)} = 0.1 / \sqrt{H_{m0}} + 0.03 \quad [\text{s} \text{ en } \text{m}]$$

De totale schattingsfout wordt weer berekend door de beide nauwkeurigheden kwadratisch op te tellen :

$$\sigma_{T_{\text{gem}}(\text{tot})} = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}$$

In Wavix-1 wordt geen expliciete benadering gegeven voor de nauwkeurigheid van Tgem. We mogen aannemen dat, analoog aan de golfhoogten, voor Tgem dezelfde formulering geldt als voor TH1/3. Deze zal dan luiden, in de Wavix eenheden [0.1 s] voor golfperioden en [cm] voor golfhoogten :

$$\sigma_{T_{gem}} = 0.0025 * T_{gem}^{1.5} + 6/\sqrt{Hm0} + 0.3 \quad [0.1s \text{ en } cm]$$

Omgerekend naar de in dit hoofdstuk gebruikte eenheden [s] en [m] wordt dit :

$$\sigma_{T_{gem}} = 0.00791 * T_{gem}^{1.5} + 0.06/\sqrt{Hm0} + 0.03 \quad [s \text{ en } m]$$

De schattingsnauwkeurigheid $\sigma_{T_{gem}}$ hangt af van de waarden van twee golfparameters, namelijk van de golfperiode T_{gem} zelf en van de golfhoogte $Hm0$. Deze beide parameters zijn natuurlijk sterk gecorreleerd. Hiervan is in het voorgaande al gebruik gemaakt. Door de bekende relatie te gebruiken is het mogelijk $Hm0$ te elimineren en een formule af te leiden voor $\sigma_{T_{gem}}$ die alleen afhankelijk is van T_{gem} . Dit is hier echter niet de bedoeling. Zo'n formule zou alleen gelden onder de omstandigheden, waarbij de relatie tussen $Hm0$ en T_{gem} geldig is, met name onder door de wind gedomineerde omstandigheden. De bedoeling van $Hm0$ in deze formule is echter juist om onder omstandigheden met een kleine golfhoogte en een lange golfperiode (deining) de nauwkeurigheid van T_{gem} aan te passen (de standaard afwijking te verhogen) .

De berekening wordt in de hiernavolgende tabel toegelicht met een rekenvoorbeeld. In de eerste kolom wordt een range van waarden van de gemiddelde golfperiode T_{gem} gegeven. Dit zijn zo ongeveer de waarden, die voorkomen in het meetgebied Noordzee. In de tweede kolom wordt golfhoogte $Hm0$ gegeven. Hier wordt die golfhoogte $Hm0$ gebruikt, die onder normale (windgedomineerde) omstandigheden bij de in kolom 1 gegeven waarde van T_{gem} behoort. Deze volgt uit de al eerder gebruikte relatie tussen golfhoogte en golfperiode.

$$T_{gem} = 4.2 * \sqrt{H_{gem}} \text{ of } T_{gem} = 3.35 * \sqrt{Hm0} \text{ of } Hm0 = T_{gem}^2 / 11.2$$

$$\text{Het aantal golven (kolom 3) wordt berekend uit : } n = 1180 / T_{gem}$$

$$\text{De steekproefnauwkeurigheid (kolom 4) volgt uit : } s1 = 0.26 * T_{gem} / \sqrt{n}$$

$$\text{De meet- en verwerkingsnauwkeurigheid (kolom 5) : } s2 = 0.1 / \sqrt{Hm0} + 0.03$$

$$\text{De totale schattingsnauwkeurigheid (kolom 6) : } s3 = \sqrt{(s1^2 + s2^2)}$$

Kolom 7 (s4) geeft de totale schattingsnauwkeurigheid volgens de Wavix-1 formulering. Vergelijking van de kolommen 6 en 7 laat zien dat de Wavix/1 benadering bij korte golfperiodes een iets te lage waarde geeft en bij lange golfperiodes een te hoge.

T_{gem} [s]	$Hm0$ [m]	n	s1 [s]	s2 [s]	s3 [s]	s4 [s]	s3a [s]	s4a [s]
2.0	0.36	590	0.021	0.197	0.198	0.153	0.231	0.172
3.0	0.80	393	0.039	0.142	0.147	0.138	0.233	0.191
4.0	1.43	295	0.061	0.114	0.129	0.143	0.238	0.213
5.0	2.23	236	0.085	0.097	0.129	0.159	0.245	0.238
6.0	3.21	197	0.111	0.086	0.140	0.180	0.255	0.266
8.0	5.71	148	0.171	0.072	0.186	0.234	0.287	0.329
10.0	8.93	118	0.239	0.063	0.248	0.300	0.332	0.400

In kolom 8 worden waarden van $\sigma_{T_{gem}}$ gegeven (s3a) bij een gegeven constante golfhoogte $Hm0$ van 25 cm. Voor T_{gem} -waarden van meer dan 4 seconden duidt dit op deining. Vergelijking van kolom 6 en 8 laat zien dat de standaard afwijking onder dit soort

omstandigheden beduidend groter is. In kolom 9 wordt de Wavix-1 benadering voor die omstandigheden gegeven. Ook hier is de benadering bij lage T_{gem} iets te laag en bij hogere waarden te hoog.

Bijlage 11 (bovenste panel) toont een en ander. Deze plot laat het verloop zien van de steekproefnauwkeurigheid, de meet- en verwerkingsnauwkeurigheid, de totale schattingsnauwkeurigheid en de benadering daarvan door de Wavix-1 formule. Dit alles onder de aanname dat H_{m0} en T_{gem} gekoppeld zijn door de relatie golfhoogte-golfperiode relatie : $T_{gem} = 3.35 \cdot \sqrt{H_{m0}}$.

In de plot wordt deze aanname eenvoudigheidshalve 'standaard H_{m0} ' genoemd.

De plot laat ook het verloop van de totale schattingsnauwkeurigheid en de Wavix-1 benadering daarvan zien als H_{m0} een constante waarde heeft van 25 cm. Deze beide zijn dan veel groter.

De overeenkomst tussen berekende nauwkeurigheid en de benadering door de Wavix-1 formule is niet heel erg goed. De benadering geeft, zowel bij de standaard H_{m0} als bij de constante, lage H_{m0} , te hoge waarden. Reden om ook voor de golfperiode parameters in Wavix-1 naar nieuwe, beter passende formuleringen voor het schatten van de nauwkeurigheid te zoeken.

11. De nauwkeurigheid van de golfperiode parameters in Wavix-1.

In het oude Wavix worden twee golfperiode parameters gebruikt, TH1/3 en Tm02. De eerste is een parameter in het tijddomein en de tweede is een spectrale parameter.

Bij de ontwikkeling van de Wavix-1 formules voor de nauwkeurigheid van golfperiode parameters is eigenlijk alleen de nauwkeurigheid van de gemiddelde golfperiode (Tgem) onderzocht. Impliciet is toen aangenomen, dat de relatieve nauwkeurigheid van TH1/3 en Tm02 ongeveer even groot zouden zijn. Dit analoog aan de nauwkeurigheid van de golfhoogte parameters Hgem, H1/3 en Hm0. Dit is niet onredelijk omdat ook TH1/3 over een groot deel van de golfhoogte en golfperiode verdeling wordt berekend en ook Tm02 uit het gehele energiedichtheidspectrum.

Dit leidt tot onderstaande vergelijking voor de totale schattingsfout voor de golfperiode TH1/3 in de vorm voor het oude Wavix, in de eenheden [0.1 s] en [cm] :

$$\sigma_{TH1/3} = 0.0025 * TH1/3 * \sqrt{(TH1/3)} + 6/\sqrt{(Hm0)} + 0.3 \quad [0.1s \text{ en } cm]$$

De merkwaardige eenheid 0.1s hangt samen met de manier waarop vroeger golfgegevens werden opgeslagen. Daarbij werden uitsluitend integers gebruikt en opslag in hele seconden was te onnauwkeurig. Er was minimaal 1 decimaal gewenst en daarom werden de golfperiodes uitgedrukt in de eenheid deciseconde ofwel 0.1s. Bij de ontwikkeling van Wavix-1 is dit zo gebleven. Ik neem aan dat het nieuwe Wavix normale eenheden gebruikt. Ik zal van alle nieuwe formules 2 varianten geven, één voor de eenheden [0.1s en cm] en één voor de eenheden [s en m].

De spectrale, gemiddelde golfperiode Tm02, in waarde vergelijkbaar met Tgem, kent vrijwel dezelfde relatieve steekproefnauwkeurigheid als Tgem, maar voor Wavix-1 is aangenomen dat deze iets stabielere is voor wat betreft meet- en verwerkingsnauwkeurigheid. In de aanvullende termen worden daarom iets lagere constanten gebruikt :

$$\sigma_{Tm02} = 0.0025 * Tm02 * \sqrt{(Tm02)} + 5/\sqrt{(Hm0)} + 0.2 \quad [0.1s \text{ en } cm]$$

12. De nauwkeurigheid van alle golfperiode parameters.

12.1. Inleiding

In dit hoofdstuk worden de definitieve vergelijkingen voor het bepalen van de nauwkeurigheid van de golfperiode parameters afgeleid en vastgelegd. Ook de formules voor de golfperiode parameters uit Wavix-1 zullen worden herberekend.

Daarbij wordt een iets andere formulering gekozen. Zo is bijvoorbeeld de derde term, de optelconstante van 0.03 seconde, verdwenen. Om dit te compenseren is de tweede term iets verhoogd. Deze tweede term is voor alle golfperiode parameters gelijk. De eerste term is nu kwadratisch. De constante voor de eerste term is nu het enige verschil in de formuleringen voor de nauwkeurigheid van de diverse golfperiode parameters.

De algemene gedaante is :

$$\sigma_{T...} = c * T_{...}^2 + 10 / \sqrt{Hm0} \quad [0.1s \text{ en } cm]$$

De grootte van de meet- en verwerkingsnauwkeurigheid wordt voor alle parameters gesteld op :

$$\sigma_{T...(2)} = 12 / \sqrt{Hm0} \quad [0.1s \text{ en } cm]$$

De volgende golfhoogte parameters zullen aan de orde komen : Tgem, T1/3, TH1/3, Tmax, THmax, Tm02, Tm01 en Tm-10.

In de onderstaande paragrafen wordt voor elke parameter dezelfde werkwijze gevolgd. Eerst wordt de steekproefnauwkeurigheid berekend. In het vorige hoofdstuk aangetoond dat ook de golfperiode parameters, althans die in het tijddomein, de steekproefnauwkeurigheid evenredig met $1/\sqrt{n}$. De evenredigheidsconstanten zijn daarbij half zo groot als die bij de overeenkomende golfhoogte parameters.

De steekproefnauwkeurigheid s1 volgt dan ook uit :

$$s1 = c * T_{...} / \sqrt{n} \quad [0.1s]$$

c volgt uit het simulatie onderzoek (hoofdstuk 4)

n volgt uit : $n = 1180/T_{gem}$ (Tgem hier in seconden)

(Tgem volgt uit evenredigheid met beschouwde golfperiode parameter)

De waarde van de golfhoogte Hm0, behorend bij de gekozen waarde van T... (de standaardwaarde van Hm0) volgt uit :

$$Hm0 = T_{gem}^2 / 11.2 \quad \text{zowel voor } [0.1s \text{ en } cm] \text{ als voor } [s \text{ en } m]$$

Dan volgt de meet- en verwerkingsnauwkeurigheid s2 uit :

$$s2 = 12 / \sqrt{Hm0} \quad [0.1s \text{ en } cm]$$

en de totale schattingsnauwkeurigheid s3 met :

$$s3 = \sqrt{(s1^2 + s2^2)} \quad [0.1s]$$

Deze drie spreidingen worden berekend voor een brede range van waarden van de golfhoogte parameter T... Door de waarden van de laatste (s3) wordt een lijn gefit van de gedaante :

$$s4 = c * T...^2 + 10 / \sqrt{Hm0} \quad [0.1s \text{ en } cm]$$

Tenslotte wordt de relatieve nauwkeurigheid in % berekend, volgens :

$$s5 = s4 * 100/H... \quad [%]$$

Als van de betreffende parameter ook een berekening volgens het oude Wavix in gebruik is, dan wordt deze ook gegeven , als :

$$s6 = c * H...^{*1.5} + 3 \quad [cm]$$

Daarmee kunnen de oude en de nieuwe versie worden vergeleken.

Bovenstaande berekening is uitgevoerd met de standaardwaarde voor Hm0, dat is de waarde van Hm0 die onder 'normale' ofwel windgedomineerde omstandigheden behoort bij de gekozen waarde van T...

Om te laten zien hoe $\sigma_{T...}$ verandert bij een andere waarde van Hm0 wordt de berekening nogmaals uitgevoerd voor typische deiningsomstandigheden, dat wil zeggen kleine golfhoogte en lange golfperioden. Gekozen is voor een golfhoogte Hm0 van 25 cm bij alle golfperioden. De hier gekozen 'standaardgolfhoogte' en 'lage deining' zijn natuurlijk maar twee willekeurige voorbeelden uit de vele mogelijke vormen van het optreden van deining, windgolven en combinaties van die beide.

De steekproefnauwkeurigheid s1 verandert niet bij veranderde golfhoogte. De meet- en verwerkingsnauwkeurigheid wordt :

$$s2a = 12 / \sqrt{Hm0a} \quad [0.1s \text{ en } cm] \quad (Hm0a = 25)$$

en de totale schattingsnauwkeurigheid s3 met :

$$s3a = \sqrt{(s1^2 + s2a^2)} \quad [0.1s]$$

Verder worden de waarden die volgen uit de gefitte vergelijking berekend (**s4a**) en eventueel ook die van de oude Wavix-1 vergelijking (**s6a**).

In de volgende paragrafen worden de formules voor de spreiding van de acht eerder genoemde golfperiode parameters afgeleid. Daarbij worden de bijzonderheden in de tekst behandeld en het gedetailleerde rekenwerk in bijlagen. Zo nu een dan wordt een en ander grafisch toegelicht.

12.2. De gemiddelde golfperiode Tgem

De berekening van de schattingsnauwkeurigheid van de gemiddelde golfperiode Tgem, de standaard afwijking $\sigma_{T_{gem}}$, is al in hoofdstuk 10 uiteengezet. Er is hier echter een nieuwe benaderingsformule toegepast.

De oude benaderingsformule (dezelfde als die voor TH1/3 en Tm02 in Wavix-1) bleek iets te overschatten.

Daarom is voor iets andere vorm gekozen, zoals in de inleiding uiteengezet.

De nieuwe formule luidt :

$$\sigma_{T_{gem}} = 0.00021 * T_{gem}^2 + 10/Hm0^{0.5} \quad [0.1s ; cm]$$

De afleiding wordt gegeven in bijlage 12. De tabel in die bijlage laat zien dat de benaderingsformule voor de standaardwaarden van Hm0 zeer goed overeen komt met de berekende spreiding en dat de relatieve nauwkeurigheid voor wat langere golfperioden steeds slechts 2 tot 3% bedraagt. Ook in absolute zin is de standaardafwijking heel klein : 0,1 tot 0,2 seconde.

Voor het geval met een constante lage waarde voor de golfhoogte Hm0 (25 cm) zijn de absolute fouten groter : 0,25 tot 0,35 s.

In bijlage 11 (onderste panel) wordt een en ander grafisch weergegeven. De figuur toont het verloop van de schattingsnauwkeurigheid en de benadering daarvan voor de standaard golfhoogte en voor de lage deining. Vergelijking met het bovenste panel laat zien dat de nieuwe formule bij de standaard golfhoogte een veel betere benadering geeft en bij de lage deining een iets betere.

Als de golfperiode Tgem wordt uitgedrukt in s (i.p.v. 0.1s) veranderen de constanten in de vergelijking voor $\sigma_{T_{gem}}$. Deze wordt dan :

$$\sigma_{T_{gem}} = 0.0021 * T_{gem}^2 + 0.10/Hm0^{0.5} \quad [s ; m]$$

12.3. De golfperiode T1/3

De golfperiode T1/3 is het gemiddelde van het langste derde deel van alle golfperiode, analoog aan H1/3 bij de golfhoogten. De berekening van de schattingsnauwkeurigheid $\sigma_{T_{1/3}}$ wordt in detail gegeven in bijlage 13. Om de standaard waarde van de golfhoogte Hm0 te kunnen berekenen wordt gebruik gemaakt van de gemiddelde verhouding tussen de golfperiode parameters T1/3 en Tgem. Deze bedraagt 1,45.

De constante in de s1-formule bedraagt 0.26, dit is de helft van die voor de golfhoogte H1/3 uit het simulatie onderzoek (hoofdstuk 4).

De relatieve schattingsfout blijkt bij wat langere golfperioden 2 - 2,5% te bedragen ofwel 0,15 – 0,35 seconde.

De formules zijn :

$$\sigma_{T_{1/3}} = 0.00015 * T_{1/3}^2 + 10/Hm0^{0.5} \quad [0.1s ; cm]$$

en

$$\sigma_{T_{1/3}} = 0.0015 * T_{1/3}^2 + 0.10/Hm0^{0.5} \quad [s ; m]$$

12.4. De golfperiode TH1/3

De golfperiode TH1/3 is eigenlijk een tussenvorm tussen een golfhoogte en een golfperiode parameter. Het is immers de gemiddelde periode van het hoogste derde deel van de golven. De golfhoogte verdeling bepaalt van welke golven de gemiddelde periode wordt berekend. Om die reden is voor de constante in de bepaling van de steekproefnauwkeurigheid een wat hogere waarde gekozen dan die voor T1/3, namelijk 0,30.

De gemiddelde verhouding tussen Tgem en TH1/3 is ook wat lager, namelijk 1,30.

De volledige berekening wordt gegeven in bijlage 14. De spreiding blijkt voor de wat langere golfperiode 2 – 3% te bedragen ofwel 0,13 – 0,3 seconden.

Deze parameter werd ook in Wavix-1 gebruikt. De daar gebruikte formulering levert een ca. 20% hogere spreiding op.

De nieuwe Wavix formules luiden :

$$\sigma_{TH1/3} = 0.00020 * TH1/3^2 + 10/Hm0^{0.5} \quad [0.1s ; cm]$$

$$\sigma_{TH1/3} = 0.0020 * TH1/3^2 + 0.10/Hm0^{0.5} \quad [s ; m]$$

Een en ander is voor deze parameter ook grafisch weergegeven en wel in bijlage 15 (bovenste panel).

12.5. De golfperiode Tmax

De golfhoogte Tmax is een bijzonder onnauwkeurige parameter. De waarde wordt bepaald door één enkele golf en vaak door een toevallige omstandigheid. Dikwijls is Tmax het resultaat van wat eigenlijk twee opeenvolgende golven zijn, maar waarbij de middelste top/dal combinatie net niet door de middenstand gaat, zodat het per definitie slechts één golf is. Daarom is de spreiding voor Tmax groot.

De afleiding van de nauwkeurigheid van de golfperiode parameter Tmax wordt in detail gegeven in bijlage 16. Daarbij wordt voor de constante c in de schatting van de steekproefnauwkeurigheid de waarde 0,75 gebruikt, dit is zo ongeveer de helft van de waarde die onder gemiddelde omstandigheden bij de golfhoogte Hmax wordt gebruikt.

De gemiddelde verhouding tussen Tmax en Tgem bedraagt ca. 1,8.

Dit resulteert in een veel grotere relatieve fout dan bij de voorgaande parameters, namelijk 4 – 7 %. De absolute fout is 0,3 tot 1,2 seconde.

De formules voor Wavix zijn :

$$\sigma_{Tmax} = 0.00040 * Tmax^2 + 10/Hm0^{0.5} \quad [0.1s ; cm]$$

$$\sigma_{Tmax} = 0.0040 * Tmax^2 + 0.10/Hm0^{0.5} \quad [s ; m]$$

12.6. De golfperiode THmax

Ook deze parameter is heel onnauwkeurig. Dit is de golfperiode van de hoogste golf in de registratie. Dit kan een mooi gevormde, korte, steile golf zijn, maar ook een combinatie van twee opeenvolgende golven en dus veel langer. Meestal is THmax veel korter dan Tmax. Voor de verhouding THmax / Tgem is 1,35 gebruikt.

Hier is voor de constante in de steekproefnauwkeurigheid 0,875 gekozen. Dit resulteert (zie bijlage 17) in de navolgende Wavix formules :

$$\sigma_{THmax} = 0.000625 * THmax^2 + 10/Hm0^{0.5} \quad [0.1s ; cm]$$

$$\sigma_{THmax} = 0.00625 * THmax^2 + 0.10/Hm0^{0.5} \quad [s ; m]$$

De relatieve nauwkeurigheid van THmax bedraagt 5 – 8%. Dit is, in absolute termen, 0,3 – 1,1 seconde.

12.7. De golfperiode Tm02

De golfperiode Tm02 is het spectraal equivalent van de gemiddelde golfperiode. De waarde is gemiddeld ongeveer even groot als die van Tgem (hoewel er in eenzelfde registratie best wel flinke verschillen kunnen zijn).

In de afleiding in bijlage 18 zijn dan ook dezelfde constanten e.d. gebruikt en dit resulteert ook in dezelfde formules als die voor Tgem, te weten :

$$\sigma_{Tm02} = 0.00021 * Tm02^2 + 10/Hm0^{0.5} \quad [0.1s ; cm]$$

$$\sigma_{Tm02} = 0.0021 * Tm02^2 + 0.10/Hm0^{0.5} \quad [s ; m]$$

De orde van grootte van de fouten is even klein als bij Tgem, namelijk 0,1 – 0,2 sec.

Deze parameter werd ook in Wavix-1 gebruikt. In bijlage 18 worden de oude en de nieuwe formuleringen vergeleken. De nieuwe levert ongeveer 20% lagere standaard afwijkingen.

12.8. De golfperiode Tm01

De golfperiode Tm01 is heel sterk gecorreleerd met Tm02. De waarden zijn zo'n 3 - 7% hoger, gemiddeld 5%.

De afleiding van de nauwkeurigheid wordt gegeven in bijlage 19. Er worden dezelfde formules gevonden als voor Tgem en Tm02.

$$\sigma_{Tm01} = 0.00021 * Tm01^2 + 10/Hm0^{0.5} \quad [0.1s ; cm]$$

$$\sigma_{Tm01} = 0.0021 * Tm01^2 + 0.10/Hm0^{0.5} \quad [s ; m]$$

Voor wat langere golfperiodes bedraagt de standaard afwijking 0,1 – 0,2 seconden.

12.9. De golfperiode Tm-10

De golfperiode Tm-10 wordt, net zoals de beide voorgaande, berekend uit spectrale momenten, in dit geval m_{-1} en m_0 . Vanwege de keuze van de momenten is Tm-10 aanzienlijk groter dan Tm02, gemiddeld 15%. Bij de afleiding van de vergelijkingen

voor de nauwkeurigheid, in bijlage 20 worden dezelfde constanten e.d. gebruikt als bij de voor Tm02.

Dit resulteert in de volgende formules :

$$\sigma_{Tm-10} = 0.00019 * Tm-10^2 + 10/Hm0^{0.5} \quad [0.1s ; cm]$$

$$\sigma_{Tm-10} = 0.0019 * Tm-10^2 + 0.10/Hm0^{0.5} \quad [s ; m]$$

De relatieve schattingsfout (standaard afwijking) bedraagt 2 – 3%. Dit komt neer op 0,1 – 0,3 seconden.

12.10. Samenvatting van de nauwkeurigheid van de golfperiode parameters

In dit hoofdstuk zijn de formules afgeleid voor de standaard afwijking van uit metingen berekende waarden van acht golfperiode parameters. Met deze standaard afwijkingen wordt de bepalingenauwkeurigheid vastgelegd. Elke berekende waarde van één van deze parameters kan worden beschouwd als een schatting. De met bovengenoemde formules berekende standaard afwijkingen leggen het spreidingsgebied van die schattingen vast. Daarbij mag vrijwel altijd een normale verdeling worden aangenomen.

Voor alle golfperiode parameters is dezelfde basis formule gebruikt, alleen de constante voor de eerste term verschilt. In de vergelijkingen komt steeds de beschouwde golfperiode parameter voor en de golfhoogte Hm0. Dit omdat de nauwkeurigheid van golfperiode parameters mede afhangt van de golfhoogte.

De formules zijn steeds afgeleid voor verschillende eenheden, namelijk voor de in het oude Wavix-1 gebruikte cm en deciseconden en voor de normale eenheden, meters en seconden.

De eerste vijf parameters stammen alle uit het tijddomein, dat wil zeggen dat ze worden berekend uit de verdeling van de gemeten golfhoogten en golfperiodes.

De laatste drie zijn spectrale parameters, ze worden berekend uit het energiedichtheidspectrum.

De afleiding van de nauwkeurigheid van golfperiode parameters is gebaseerd op eigenschappen van tijddomein parameters. De nauwkeurigheid van de spectrale parameters zou eigenlijk bepaald moeten worden aan de hand van eigenschappen van het spectrum. Dit is in een vroeger onderzoek met simulaties gedaan. Daarbij bleek dat de nauwkeurigheid van spectrale parameters sterk overeen komt met overeenkomstige parameters in het tijddomein. Daarom is bij de afleiding van de nauwkeurigheid van spectrale parameters ook de tijddomein methode gebruikt.

De afgeleide formules gelden slechts voor de omstandigheden waarvoor ze zijn afgeleid. Zo vormt het feit dat de golfperiode parameters worden berekend uit registraties van 20 minuten een onmisbare onderdeel bij het afleiden van de formules. Voor registraties van 10 minuten of 30 minuten of welke afwijkende duur dan ook gelden andere formules!!

Bij het schatten van de meet- en verwerkingsnauwkeurigheid is impliciet aangenomen dat het gaat om metingen in diep water (Noordzee), met de daar gebruikelijke meetinstrumenten, met een inwifrequentie in de orde van 1,28 of 2 Hz en met de bij die metingen gebruikelijke verwerkingstechnieken.

Elke afwijking van deze meet- of verwerkingsmethodiek kan invloed hebben op de grootte van de standaard afwijking.

Het zal echter, nu de afleiding van de formules beschreven is, in de meeste gevallen vrij eenvoudig zijn om de formules aan te passen aan andere meetmethodieken. Vaak zal kunnen worden volstaan met het aanpassen van één van de constanten.

Bijlage 15 (onderste panel) laat het verloop zien van de waarden van de schattingsnauwkeurigheid, afhankelijk van de golfhoogte. Dit laat zien dat de relatieve schattingsnauwkeurigheid voor de parameters T_{gem} , $T_{1/3}$, $TH_{1/3}$, T_{m02} , T_{m01} en T_{m-01} ongeveer even groot is. De lijnen voor T_{gem} , T_{m02} , T_{m01} en T_{m-10} vallen zelfs voor een groot deel samen. De lijnen voor T_{max} en TH_{max} liggen een stuk hoger! De lengte van de lijnen in de figuur is een indicatie voor het geldigheidsgebied.

Tenslotte een getallenvoorbeeld om de gevonden nauwkeurigheden in de juiste onderlinge verhoudingen te laten zien. We sluiten daarbij aan bij het voorbeeld aan het einde van hoofdstuk 9. Daarbij wordt uitgegaan van de gemiddelde golfhoogte in de zuidelijke Noordzee, namelijk H_{m0} is 1,3 meter.

Onderstaande tabel geeft voor de acht golfperiode parameters aan welke waarde onder die omstandigheden te verwachten is voor die golfperiode en wat de bijbehorende absolute en relatieve standaard afwijking is.

De tabel laat de absolute fouten in het juiste perspectief zien. Uitgezonderd de beide 'max'-parameters, zijn ze alle heel klein en vrijwel gelijk (0,12 – 0,14 s), met een relatieve fout van ca. 3%. Bij T_{max} en TH_{max} zijn de absolute fouten vrijwel het dubbele, maar dit is nog steeds niet erg veel.

Bij grotere golfhoogten en langere golfperiodes zullen de onderlinge verschillen wel wat groter zijn.

golfperiode parameter	golfperiode in seconden	σ (abs) s	σ (rel) %
T_{gem}	3.82	0.118	3.1
$T_{1/3}$	5.54	0.134	2.4
$TH_{1/3}$	4.97	0.137	2.8
T_{max}	6.88	0.277	4.0
TH_{max}	5.16	0.254	4.9
T_{m02}	3.82	0.118	3.1
T_{m01}	4.01	0.121	3.0
T_{m-10}	4.39	0.124	2.8

13. De nauwkeurigheid van golfrichting parameters in Wavix-1.

De nauwkeurigheid van golfrichting parameters is niet onderzocht en ik ken ook geen methode om ze af te leiden of uit simulaties te berekenen. Daarom zijn hier wel puur empirische relaties gebruikt.

Vast staat dat de gemeten golfrichtingen tijdens stormen, of tenminste onder omstandigheden met grote golfhoogten, zeer stabiel zijn. Tijdreeksen van de hoofdgolfrichting Th_0 laten een stabiel verloop zien onder zulke omstandigheden.

Als de golfrichting gedurende een aantal uren constant is, blijken de meetwaarden gedurende die tijd slechts aan kleine fluctuaties onderhevig. Het verschil tussen de hoogste en de laagste meetwaarde bedraagt dan zo'n 10° . Op grond daarvan nemen we aan dat de schattingsnauwkeurigheid onder die omstandigheden in elk geval minder dan 5° bedraagt. Onder omstandigheden met minder golfenergie is de nauwkeurigheid wat slechter, maar bij erg weinig golfenergie wordt de nauwkeurigheid heel slecht, bij vrijwel vlakke zee lijkt de golfrichting soms random gekozen. Dit ligt ten dele aan de toestand van de zee en ten dele aan de meetinstrumenten, die bedoeld zijn om goed te functioneren tijdens zwaardere omstandigheden.

Voor de spreiding in de hoofdgolfrichting Th_0 wordt daarom in Wavix-1 een vergelijking gebruikt, die bij grotere golfhoogten (vanaf 1 m) een totale schattingsnauwkeurigheid geeft van 4° tot 6° en die bij afnemende golfhoogten progressief toeneemt, tot bijvoorbeeld 20° bij $H_{m0} = 25$ cm en tot 35° bij $H_{m0} = 16$ cm.

De vergelijking voor de nauwkeurigheid van de golfrichting Th_0 , zoals die in Wavix-1 wordt gebruik, luidt :

$$\sigma_{Th_0} = 4^\circ + 2000 \cdot / (H_{m0} \cdot \sqrt{H_{m0}}) \quad [^\circ \text{ en cm}]$$

Voor de laagfrequente golfrichting Th_3 geldt in nog sterkere mate dat de waarden van deze parameter in hoge mate onnauwkeurig zijn bij weinig (laagfrequente) golfenergie. Omdat deze parameter over maar een klein deel van het spectrum wordt berekend is de nauwkeurigheid intrinsiek al slechter dan die van Th_0 en omdat er vaak heel weinig laagfrequente energie is, komt die slechte nauwkeurigheid heel frequent voor.

Om die reden werd de golfrichting Th_3 in het oude Wavix wel gebruikt, maar niet aangevuld of gecontroleerd en werd dus ook de nauwkeurigheid niet berekend.

Dit geldt ook voor de richtingspreiding s_0 . Ook deze parameter wordt in Wavix gebruikt, maar ook zonder indicatie voor de schattingsnauwkeurigheid.

Er zijn dan ook nog geen vergelijkingen beschikbaar voor de schattingsnauwkeurigheid van de golfrichting Th_3 en de richtingspreiding s_0 . Aangezien ze in de uitbreiding van het nieuwe Wavix wel gewenst zijn, zullen we trachten hier iets voor te componeren. Zie volgend hoofdstuk.

14. De nauwkeurigheid van alle golfrichting parameters.

14.1. De gemiddelde golfrichting Th0

De hoofdgolfrichting Th0 is de over het gehele spectrum gemiddelde golfrichting. De in het vorige hoofdstuk genoemde formule voor de nauwkeurigheid van die richting voldoet in principe goed, maar de waarden voor de standaard afwijking zijn bij grote golfhoogten wellicht nog iets te groot. Bij de in het vorige hoofdstuk genoemde range van ca. 10°, waarbinnen de meetuitkomsten vallen bij een gedurende enige tijd constante windrichting, past eerder een standaard afwijking van 3° dan van 4°.

We veranderen daarom de constante in 3° en laten de rest van de formule ongewijzigd.

De vergelijkingen worden dan :

$$\sigma_{Th0} = 3 + 2000/Hm0^{1.5} \quad [\text{° en cm}]$$

$$\sigma_{Th0} = 3 + 2/Hm0^{1.5} \quad [\text{° en m}]$$

Met deze formules wordt een goede schatting geproduceerd van de nauwkeurigheid van de hoofdgolfrichting onder stabiele omstandigheden, maar niet voor meer veranderlijke condities. De schatting van de hoofdgolfrichting in een van richting veranderend windveld is heel onnauwkeurig. Er ontstaan dan verschillende golfvelden met eigen richtingen en de hoofdgolfrichting is daar een soort gewogen gemiddelde van. Dit kan nooit erg stabiel zijn. Wavix-1 ondervond daar ook altijd problemen mee en vond onder dit soort omstandigheden de gemeten hoofdgolfrichting altijd verdacht.

Als er voor de nauwkeurigheid van Th0 onder dit soort omstandigheden een hogere waarde voor σ_{Th0} gegenereerd kan worden, dan zou dit de goede werking van Wavix bevorderen.

Er is een mogelijkheid om iets in die richting te doen door gebruik te maken van de gemiddelde richtingspreiding s0 (voluit eigenlijk s0bh). Bij een stabiele windrichting en niet al te kleine golfhoogten is s0 klein, zo ongeveer 20° tot 25°. Bij een samengesteld golfveld, met meer dan één hoofdrichting is de spreiding in de richtingen uiteraard groter, s0 dus ook. Hiervan kunnen we gebruik maken door de nauwkeurigheid van de hoofdgolfrichting afhankelijk te maken van de waarde van s0, als die groter is dan normaal.

Daaraan zijn een paar nadelen verbonden. Ten eerste is s0 zelf niet zo'n heel goede schatter van de richtingspreiding. Deze parameter is erg gevoelig voor ruis en signaalstoringen, vooral bij weinig golfenergie. De waarde van s0 is hierdoor, vooral bij lage golfhoogten zo nu en dan vrij hoog zonder dat er echt sprake van een breed scala aan golfrichtingen.

Ten tweede komt het wel voor dat de meetboei wel golfrichtingen produceert, maar geen richtingspreidingen. Dit geeft dan een probleem bij het berekenen de spreiding in Th0. Dit is natuurlijk te ondervangen met defaultwaarden, maar het maakt het wel ingewikkelder.

Er zijn ook voordelen. Ten eerste wordt de spreiding in de hoofdgolfrichting realistischer weergegeven en ten tweede zal het de stabiliteit en nauwkeurigheid van Wavix bevorderen voor wat betreft golfrichtingen. Dit kan belangrijk zijn, zeker nu ook Th1 en s0 parameter worden binnen Wavix.

Onderstaand wordt een alternatief gegeven voor de berekening van de nauwkeurigheid van Th0, gebaseerd op het bovenstaande. Beheerders / gebruikers / bouwers van Wavix moeten maar beslissen welke van beide in Wavix wordt opgenomen.

De volgende alternatieve formulering is gekozen :

$$\sigma_{Th0} = 3 + 2000/Hm0^{1.5} + T1 \quad [\text{° en cm}]$$

of

$$\sigma_{Th0} = 3 + 2/Hm0^{1.5} + T1 \quad [\text{° en m}]$$

waarbij geldt :

$$s0 \leq 40^\circ : T1 = 0^\circ$$

$$s0 > 40^\circ : T1 = (s0-40)*0.5*s0/40 \quad [\text{°}]$$

$$\text{als } \sigma_{Th0} > 81 \text{ dan } \sigma_{Th0} = 81$$

$$\text{default } s0 = 50^\circ \quad (\text{ te gebruiken als } s0 \text{ niet is gemeten})$$

Als overgang is, enigszins arbitrair, gekozen voor 40°. Met een richtingspreiding van minder dan 40° zijn beide formules exact gelijk, bij een grotere richtingspreiding gaan ze verschillen. De hoogst mogelijke spreiding in de golfrichtingen, gemeten door richtingsboeien, bedraagt 81°. Daarom wordt hier ook dit maximum gesteld aan σ_{Th0} .

De defaultwaarde voor s0 bij het eventueel ontbreken van een meetwaarde daarvoor, is vrij hoog gekozen. De reden daarvoor is dat als de richtingspreiding niet kan worden berekend uit het gemeten signaal, dan is te verwachten dat de wel berekende golfrichtingen ook duidelijk minder nauwkeurig zullen zijn.

Bijlage 21 geeft een rekenvoorbeeld van de berekening van de berekening σ_{Th0} , zowel volgens de eenvoudige benadering als ook volgens de uitgebreide formulering.

In bijlage 22 (bovenste panel) wordt het verloop van de spreiding van de hoofdgolfrichting gegeven voor een aantal waarden van de richtingspreiding s0.

14.2. De laagfrequente golfrichting Th1

De laagfrequente golfrichting Th1 is de gemiddelde golfrichting, die behoort bij het laagfrequente deel van het energiedichtheidspectrum. De nauwkeurigheid hangt af van de laagfrequente golfhoogte en van de spectrumvorm. Als de laagfrequente energie een relatief groot deel van de totale hoeveelheid energie vormt (deining of grote golfhoogten), dan is de spreiding van Th1 vrijwel gelijk aan die van Th0, maar als de laagfrequente energie maar een klein deel is van de totale energie dan is de spreiding van Th1 flink wat groter .

Dit is vastgelegd in onderstaande vergelijkingen :

$$\sigma_{Th1} = 3 + 2000/HTE3^{1.5} + 20*((Hm0-HTE3)/Hm0)^2 \quad [\text{° ; cm}]$$

$$\sigma_{Th1} = 3 + 2/HTE3^{1.5} + 20*((Hm0-HTE3)/Hm0)^2 \quad [\text{° ; m}]$$

$$\text{als } \sigma_{Th1} > 81 \text{ dan } \sigma_{Th1} = 81$$

In bijlage 23 wordt een rekenvoorbeeld gegeven voor diverse waarden van de verhouding tussen Hm0 en Th3 en in bijlage 22 (onderste panel) wordt dit grafisch weergegeven.

14.3. De gemiddelde richtingspreiding s_0

De gemiddelde richtingspreiding s_0 (eigenlijk s_{0bh}) vertegenwoordigt de over het gehele spectrum (0.03-0.50 Hz) gemiddelde spreiding in de golfrichting. Gemiddelde richtingspreiding is op zichzelf een tamelijk onzuiver begrip. Denk aan twee golfvelden, waarvan de hoofdrichting 90° verschilt met elk een kleine richtingspreiding bijv 15° . De gemiddelde richtingspreiding over beide golfvelden zal door het verschil in hoofdrichting groot zijn, veel groter dan die 15° . Eigenlijk betekent alleen een lage waarde van s_0 dat de richtingspreiding klein is. Een hoge waarde betekent ofwel een enkelvoudig golfveld met een grote richtingspreiding ofwel twee golfvelden met een kleine spreiding ofwel weinig golfenergie en daardoor veel ruisinvloed.

Bovenstaande beschouwing betekent niet dat s_0 erg onnauwkeurig is in de zin van een grote variabiliteit in waarden onder gelijke omstandigheden. Integendeel, s_0 zal onder dezelfde omstandigheden steeds ongeveer dezelfde waarde geven, maar deze is niet altijd zuiver. Er is dan sprake van systematische fouten.

Dit betekent dat de standaard afwijking, die de nauwkeurigheid van s_0 aangeeft (de variabiliteit door toevallige fluctuaties) niet erg groot zal zijn. De grootte zal afhankelijk zijn s_0 zelf en van het energieniveau ofwel van de golfhoogte (H_{m0}).

De variabiliteit bedraagt bij kleine s_0 een paar graden (empirische kennis) en bij grote s_0 vijf graden of wat meer. Bij een kleine H_{m0} is de variabiliteit een paar graden hoger dan bij grote H_{m0} .

Deze empirische kennis omgezet in een formule, levert :

$$\sigma_{s_0} = s_0^{0.5} \cdot (-3 + 8/H_{m0}^{0.5}) \quad [^\circ ; \text{cm}]$$

$$\sigma_{s_0} = s_0^{0.5} \cdot (-3 + 0.8/H_{m0}^{0.5}) \quad [^\circ ; \text{m}]$$

In bijlage 24 wordt een rekenvoorbeeld gegeven.

Tenslotte

nog wat losse opmerkingen, herhalingen van belangrijke uitgangspunten en dergelijke.

De formules voor de nauwkeurigheid van de golfparameters geven steeds een standaard afwijking. Deze standaardafwijking geeft de schattingsnauwkeurigheid weer.

Elke meetuitkomst, elke berekende waarde van een parameter kan worden beschouwd als een schatting. Met de standaard afwijking kan het spreidingsgebied worden berekend. Daarbij geldt als uitgangspunt steeds de normale verdeling. Nemen we als voorbeeld een golfhoogte H_{m0} met een meetwaarde van 2,0 m. De standaard afwijking bedraagt volgens de $\sigma_{H_{m0}}$ -formule 0,09 m. Er is dan bijvoorbeeld bijna 70% kans dat de werkelijke significante golfhoogte van het zeeoppervlak ligt tussen 1,91 en 2,09 m en ruim 95% kans dat deze tussen 1,82 en 2,18 m ligt.

De afgeleide formules gelden, strikt gesteld, alleen voor metingen in diep water op de Noordzee, ingewonnen met het meetnet Noordzee. Wat ruimer gesteld gelden ze voor metingen met een registratieduur van 20 minuten, gemeten met sensoren met een meetbereik van ca. 10 meter en een inwinfrequentie in de orde van 1,28 – 2,0 Hz.

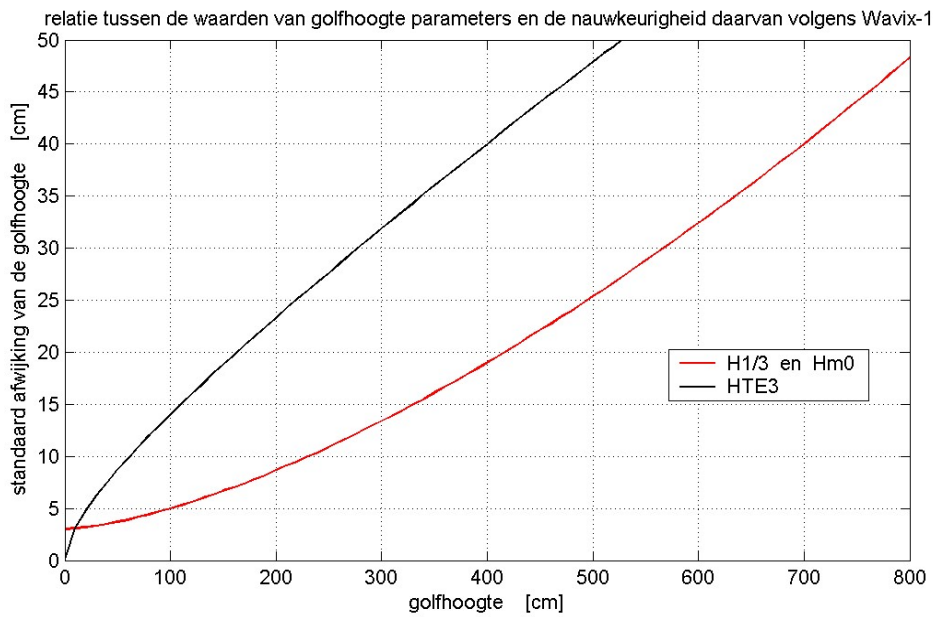
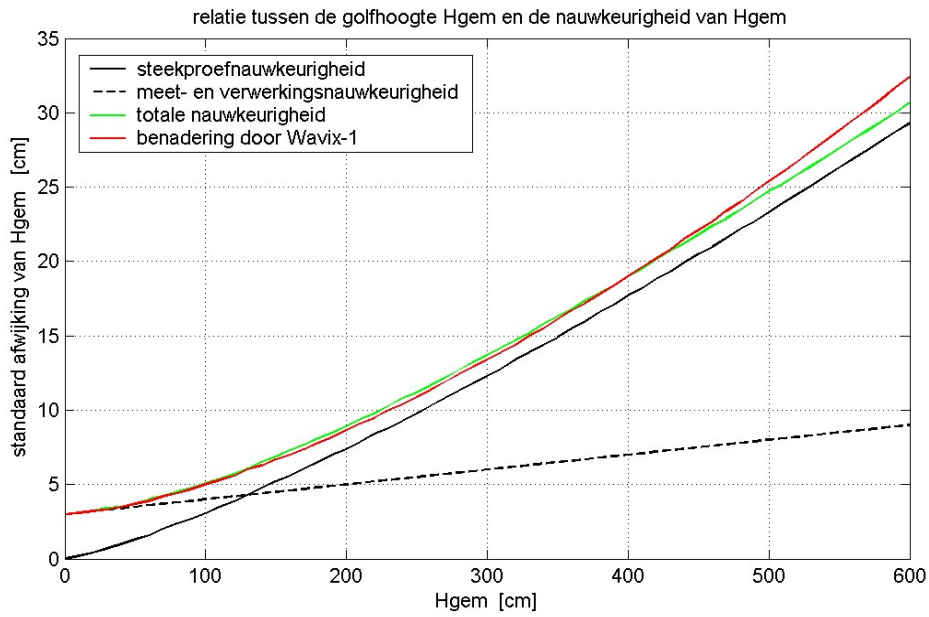
Bij een andere meetduur moeten de formules herzien worden voor wat betreft de steekproefnauwkeurigheid en voor meetinstrumenten met een ander bereik of een andere inwinfrequentie moet de schatting van de meet- en verwerkingsnauwkeurigheid worden herzien.

Ten allerlaatste nog een klein overzichtje van de orde van grootte van de standaard afwijkingen van de bekendste golfparameters. Geen exacte waarden, maar een paar 'vuistregels' om zonder de formules toch een idee te hebben van de orde van grootte van de spreiding in de meetwaarden van deze parameters :

- | | |
|---|-------------|
| - gemiddelde golfhoogte parameters, zoals H_{gem} , $H_{1/3}$, H_{m0} | 5% |
| - extreme golfhoogte parameters, zoals H_{max} | 10% |
| - gemiddelde golfperiode parameters, zoals T_{gem} , $T_{H1/3}$, T_{m02} , T_{m01} | 2,5% |
| - extreme golfperiode parameters, zoals T_{max} , T_{Hmax} | 5% |
| - golfrichtingen bij lage golfhoogte $Th0$ en $Th1$ | $>10^\circ$ |
| - golfrichtingen bij grote golfhoogte $Th0$, $Th1$ (s_0) | $<5^\circ$ |

Bijlagen

1 t/m 24



Boven : de nauwkeurigheid van de golfhoogte Hgem, de samenstelling daarvan en de benadering volgens de oude Wavix formulering.

Onder : de nauwkeurigheid van de golfhoogte parameters H1/3, Hm0 en HTE3 volgens het oude Wavix

s1 = steekproefnauwkeurigheid
 s2 = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid
 s3 = totale nauwkeurigheid
 s4 = benadering
 s5 = relatieve nauwkeurigheid in procenten

Hgem in cm ; Tgem in s

$s1 = 0.523 * Hgem / \sqrt{n}$
 n volgt uit : $Tgem = 4.2 * \sqrt{(Hgem/100)}$ (N.B. : Hgem wordt hier omgezet in m)
 en $n = 1180 / Tgem$

$s2 = 0.01 * Hgem + 3$
 $s3 = \sqrt{(s1*s1 + s2*s2)}$
 $s4 = 0.0036 * Hgem^{**1.4} + 3$
 $s5 = s4 * 100. / Hgem$

Hgem	n	s1	s2	s3	s4	s5
20	628	0.4	3.2	3.2	3.2	16.2
40	444	1.0	3.4	3.5	3.6	9.1
60	363	1.6	3.6	4.0	4.1	6.9
80	314	2.4	3.8	4.5	4.7	5.8
100	281	3.1	4.0	5.1	5.3	5.3
150	229	5.2	4.5	6.9	7.0	4.7
200	199	7.4	5.0	8.9	9.0	4.5
250	178	9.8	5.5	11.2	11.2	4.5
300	162	12.3	6.0	13.7	13.6	4.5
400	140	17.7	7.0	19.0	18.8	4.7
500	126	23.3	8.0	24.7	24.6	4.9
600	115	29.3	9.0	30.7	30.9	5.2

Hgem in m

$s1 = 0.523 * Hgem / \sqrt{n}$
 $s2 = 0.01 * Hgem + 0.03$
 $s3 = \sqrt{(s1*s1 + s2*s2)}$
 $s4 = 0.00225 * Hgem^{**1.4} + 3$
 $s5 = s4 * 100. / Hgem$

Hgem	s1	s2	s3	s4	s5
0.20	0.004	0.032	0.032	0.032	16.2
0.40	0.010	0.034	0.035	0.036	9.1
0.60	0.016	0.036	0.040	0.041	6.8
0.80	0.024	0.038	0.045	0.046	5.8
1.00	0.031	0.040	0.051	0.053	5.3
1.50	0.052	0.045	0.069	0.070	4.6
2.00	0.074	0.050	0.089	0.089	4.5
2.50	0.098	0.055	0.112	0.111	4.4
3.00	0.123	0.060	0.137	0.135	4.5
4.00	0.177	0.070	0.190	0.187	4.7
5.00	0.233	0.080	0.247	0.244	4.9
6.00	0.293	0.090	0.307	0.306	5.1

Afleiding van de schattingsnauwkeurigheid van de golfhoogte Hgem.

s1 = steekproefnauwkeurigheid
 s2 = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid
 s3 = totale nauwkeurigheid
 s4 = benadering
 s5 = relatieve nauwkeurigheid in procenten
 s6 = benadering in Wavix-1

Hs = H1/3 ; Hs in cm ; Hgem in m ; Tgem in s

$$s1 = 0.526 * Hs / \sqrt{n}$$

met : Hgem = Hs * 0.01/1.60 en Tgem = 4.2 * \sqrt{Hgem} en n = 1180 / Tgem

$$s2 = 0.01 * Hs + 3$$

$$s3 = \sqrt{(s1*s1 + s2*s2)}$$

$$s4 = 0.0032 * Hs^{**1.4} + 3$$

$$s5 = s4 * 100/Hs$$

$$s6 = 0.0020 * Hs^{**1.5} + 3$$

Hs	n	s1	s2	s3	s4	s5	s6
20	795	0.4	3.2	3.2	3.2	16.1	3.2
40	562	0.9	3.4	3.5	3.6	8.9	3.5
60	459	1.5	3.6	3.9	4.0	6.6	3.9
100	355	2.8	4.0	4.9	5.0	5.0	5.0
150	290	4.6	4.5	6.5	6.6	4.4	6.7
200	251	6.6	5.0	8.3	8.3	4.2	8.7
300	205	11.0	6.0	12.5	12.4	4.1	13.4
400	178	15.8	7.0	17.3	17.1	4.3	19.0
600	145	26.2	9.0	27.7	27.8	4.6	32.4
800	126	37.5	11.0	39.1	40.1	5.0	48.3

Hs in m

$$s1 = 0.526 * Hs / \sqrt{n}$$

$$s2 = 0.01 * Hs + 0.03$$

$$s3 = \sqrt{(s1*s1 + s2*s2)}$$

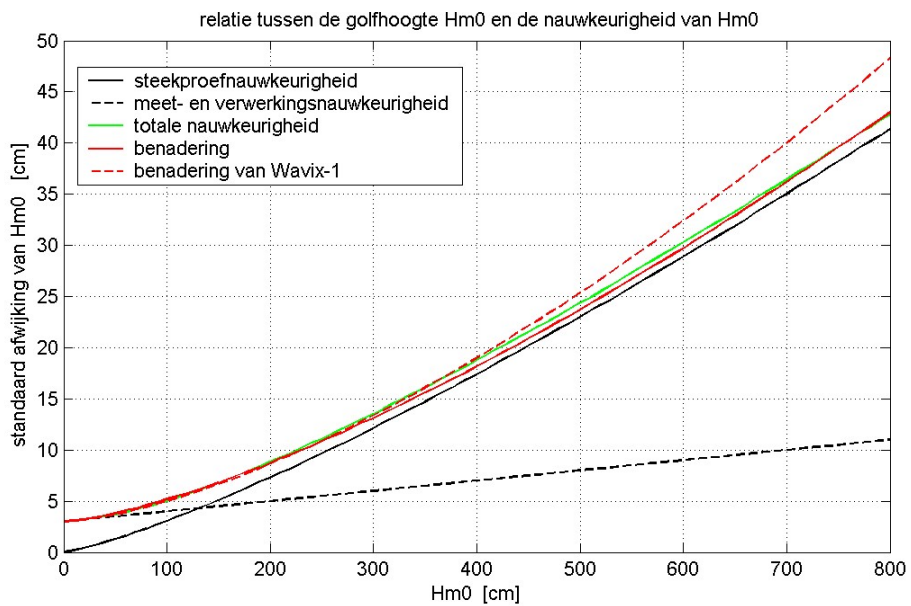
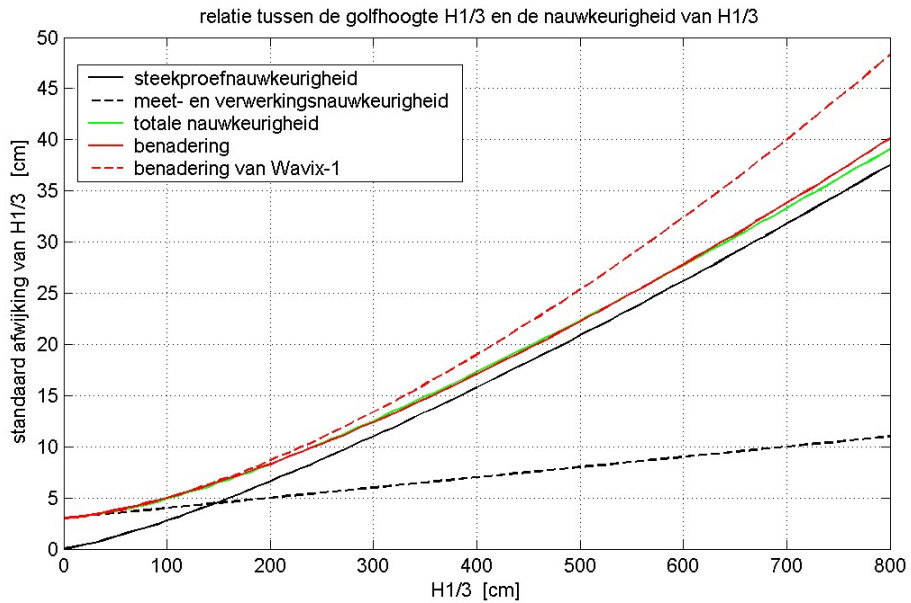
$$s4 = 0.020 * Hs^{**1.4} + 0.03$$

$$s5 = s4 * 100 / Hs$$

$$s6 = 0.02 * Hs^{**1.5} + 0.03$$

Hs	s1	s2	s3	s4	s5	s6
0.20	0.004	0.032	0.032	0.032	16.1	0.032
0.40	0.009	0.034	0.035	0.036	8.9	0.035
0.60	0.015	0.036	0.039	0.040	6.6	0.039
1.00	0.028	0.040	0.049	0.050	5.0	0.050
1.50	0.046	0.045	0.065	0.065	4.4	0.067
2.00	0.066	0.050	0.083	0.083	4.1	0.087
3.00	0.110	0.060	0.125	0.123	4.1	0.134
4.00	0.158	0.070	0.173	0.169	4.2	0.190
5.00	0.209	0.080	0.223	0.220	4.4	0.254
6.00	0.262	0.090	0.277	0.276	4.6	0.324
8.00	0.375	0.110	0.391	0.398	5.0	0.483

Afleiding van de schattingsnauwkeurigheid van de golfhoogte H1/3.



Boven : de nauwkeurigheid van de golfhoogte H1/3, de samenstelling daarvan en de benadering volgens de nieuwe en de oude Wavix formulering.

Onder : de nauwkeurigheid van de golfhoogte Hm0, de samenstelling daarvan en de benadering volgens de nieuwe en de oude Wavix formulering.

s1 = steekproefnauwkeurigheid
 s2 = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid
 s3 = totale nauwkeurigheid
 s4 = benadering
 s5 = relatieve nauwkeurigheid in procenten

Ht = H1/10 ; Ht in cm ; Hgem in m ; Tgem in s

$$s1 = 0.644 * Ht / \sqrt{n}$$

Met: Hgem = Ht * 0.01/2.03 en Tgem = 4.2 * \sqrt{Hgem} en n = 1180 / Tgem

$$s2 = 0.01 * Ht + 3$$

$$s3 = \sqrt{(s1*s1 + s2*s2)}$$

$$s4 = 0.0037 * Ht^{**1.4} + 3$$

$$s5 = s4 * 100/Ht$$

H1/10	n	s1	s2	s3	s4	s5
20	895	0.4	3.2	3.2	3.2	16.2
40	633	1.0	3.4	3.6	3.6	9.1
60	517	1.7	3.6	4.0	4.1	6.9
100	400	3.2	4.0	5.1	5.3	5.3
150	327	5.3	4.5	7.0	7.1	4.7
200	283	7.7	5.0	9.1	9.2	4.6
300	231	12.7	6.0	14.1	13.9	4.6
400	200	18.2	7.0	19.5	19.3	4.8
500	179	24.1	8.0	25.4	25.2	5.0
600	163	30.2	9.0	31.5	31.7	5.3
800	142	43.3	11.0	44.7	45.9	5.7
1000	127	57.2	13.0	58.7	61.6	6.2

Ht in m

$$s1 = 0.644 * Ht / \sqrt{n}$$

$$s2 = 0.01 * Ht + 0.03$$

$$s3 = \sqrt{(s1*s1 + s2*s2)}$$

$$s4 = 0.023 * Ht^{**1.4} + 0.03$$

$$s5 = s4 * 100 / Ht$$

H1/10	s1	s2	s3	s4	s5
0.20	0.004	0.032	0.032	0.032	16.2
0.40	0.010	0.034	0.036	0.036	9.1
0.60	0.017	0.036	0.040	0.041	6.9
1.00	0.032	0.040	0.051	0.053	5.3
1.50	0.053	0.045	0.070	0.071	4.7
2.00	0.077	0.050	0.091	0.091	4.5
3.00	0.127	0.060	0.141	0.137	4.6
4.00	0.182	0.070	0.195	0.190	4.8
5.00	0.241	0.080	0.254	0.249	5.0
6.00	0.302	0.090	0.315	0.313	5.2
8.00	0.433	0.110	0.447	0.453	5.7
10.00	0.572	0.130	0.587	0.608	6.1

Afleiding van de schattingsnauwkeurigheid van de golfhoogte H1/10.

s1 = steekproefnauwkeurigheid
 s2 = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid
 s3 = totale nauwkeurigheid
 s4 = benadering
 s5 = relatieve nauwkeurigheid in procenten

Hv = H1/50 ; Hv in cm ; Hgem in m ; Tgem in s

$$s1 = 0.983 * Hv / \sqrt{n}$$

$$\text{met: } H_{gem} = Hv * 0.01/2.49 \quad \text{en} \quad T_{gem} = 4.2 * \sqrt{H_{gem}} \quad \text{en} \quad n = 1180 / T_{gem}$$

$$s2 = 0.01 * Hv + 3$$

$$s3 = \sqrt{(s1*s1 + s2*s2)}$$

$$s4 = 0.00525 * Hv^{**1.4} + 3$$

$$s5 = s4 * 100/Hv$$

H1/50	n	s1	s2	s3	s4	s5
20	991	0.6	3.2	3.3	3.3	16.7
40	701	1.5	3.4	3.7	3.9	9.8
60	572	2.5	3.6	4.4	4.6	7.7
100	443	4.7	4.0	6.1	6.3	6.3
150	362	7.7	4.5	9.0	8.8	5.9
200	313	11.1	5.0	12.2	11.7	5.9
300	256	18.4	6.0	19.4	18.4	6.1
400	222	26.4	7.0	27.3	26.1	6.5
500	198	34.9	8.0	35.8	34.5	6.9
600	181	43.8	9.0	44.8	43.7	7.3
800	157	62.8	11.0	63.8	63.9	8.0
1000	140	83.0	13.0	84.0	86.2	8.6

Hv in m

$$s1 = 0.983 * Hv / \sqrt{n}$$

$$s2 = 0.01 * Hv + 0.03$$

$$s3 = \sqrt{(s1*s1 + s2*s2)}$$

$$s4 = 0.033 * Hv^{**1.4} + 0.03$$

$$s5 = s4 * 100 / Hv$$

H1/50	s1	s2	s3	s4	s5
0.20	0.006	0.032	0.033	0.033	16.7
0.40	0.015	0.034	0.037	0.039	9.8
0.60	0.025	0.036	0.044	0.046	7.7
1.00	0.047	0.040	0.061	0.063	6.3
1.50	0.077	0.045	0.090	0.088	5.9
2.00	0.111	0.050	0.122	0.117	5.9
3.00	0.184	0.060	0.194	0.184	6.1
4.00	0.264	0.070	0.273	0.260	6.5
5.00	0.349	0.080	0.358	0.344	6.9
6.00	0.438	0.090	0.448	0.435	7.3
8.00	0.628	0.110	0.638	0.637	8.0
10.00	0.830	0.130	0.840	0.859	8.6

Afleiding van de schattingsnauwkeurigheid van de golfhoogte H1/50.

s1 = steekproefnauwkeurigheid
s2 = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid
s3 = totale nauwkeurigheid
s4 = benadering
s5 = relatieve nauwkeurigheid in procenten

Hs = H1/3 ; Hs in cm ; Hmax in cm ; Hgem in m ; Tgem in s

Hgem = Hs * 0.01/1.60 en Tgem = 4.2 * √Hgem en n = 1180 / Tgem
q = 0.6 / n
Hmax = Hs * √(log(q)/-2.)

s1 = c * Hmax / √n
c = constante uit simulatie berekeningen, waarde volgt uit interpolatie, zie tekst

s2 = 0.01 * Hmax + 3
s3 = √(s1*s1 + s2*s2)
s4 = 0.047 * Hmax**1.12 + 3
s5 = s4 * 100/Hmax

H1/3	Hmax	n	c	s1	s2	s3	s4	s5
20	38	795	2.424	3.3	3.4	4.7	5.8	15.2
40	74	562	2.134	6.7	3.7	7.6	8.8	11.9
60	109	459	1.984	10.1	4.1	10.9	12.0	11.0
100	179	355	1.810	17.2	4.8	17.8	18.6	10.4
150	264	290	1.690	26.2	5.6	26.8	27.2	10.3
200	347	251	1.613	35.3	6.5	35.9	36.0	10.3
300	512	205	1.502	53.7	8.1	54.4	53.9	10.5
400	675	178	1.428	72.3	9.7	72.9	72.3	10.7
500	835	159	1.375	91.1	11.4	91.8	91.0	10.9
700	1151	134	1.300	129.1	14.5	129.9	129.1	11.2

Hs en Hmax in m

s1 = c * Hmax / √n
s2 = 0.01 * Hmax + 0.03
s3 = √(s1*s1 + s2*s2)
s4 = 0.082 * Hmax**1.12 + 0.03
s5 = s4 * 100 / Hmax

H1/3	Hmax	s1	s2	s3	s4	s5
0.20	0.38	0.033	0.034	0.047	0.058	15.2
0.40	0.74	0.067	0.037	0.076	0.089	12.0
0.60	1.09	0.101	0.041	0.109	0.121	11.0
1.00	1.79	0.172	0.048	0.178	0.187	10.5
1.50	2.64	0.262	0.056	0.268	0.273	10.3
2.00	3.47	0.353	0.065	0.359	0.361	10.4
3.00	5.12	0.537	0.081	0.544	0.541	10.6
4.00	6.75	0.723	0.097	0.729	0.726	10.8
5.00	8.35	0.911	0.114	0.918	0.913	10.9
7.00	11.51	1.291	0.145	1.299	1.296	11.3

Afleiding van de schattingsnauwkeurigheid van de golfhoogte Hmax.

s1 = steekproefnauwkeurigheid
 s2 = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid
 s3 = totale nauwkeurigheid
 s4 = benadering
 s5 = relatieve nauwkeurigheid in procenten
 s6 = benadering in Wavix-1

Hs = Hm0 ; Hs in cm ; Hgem in m ; Tgem in s

$$s1 = 0.58 * Hs / \sqrt{n}$$

met : Hgem = Hs * 0.01/1.60 en Tgem = 4.2 * \sqrt{Hgem} en n = 1180 / Tgem

$$s2 = 0.01 * Hs + 3$$

$$s3 = \sqrt{(s1*s1 + s2*s2)}$$

$$s4 = 0.00345 * Hs^{**1.4} + 3$$

$$s5 = s4 * 100 / Hs$$

$$s6 = 0.0020 * Hs^{**1.5} + 3$$

Hm0	n	s1	s2	s3	s4	s5	s6
20	795	0.4	3.2	3.2	3.2	16.1	3.2
40	562	1.0	3.4	3.5	3.6	9.0	3.5
60	459	1.6	3.6	3.9	4.1	6.8	3.9
100	355	3.1	4.0	5.0	5.2	5.2	5.0
150	290	5.1	4.5	6.8	6.8	4.6	6.7
200	251	7.3	5.0	8.9	8.7	4.4	8.7
300	205	12.1	6.0	13.5	13.1	4.4	13.4
400	178	17.4	7.0	18.8	18.2	4.5	19.0
500	159	23.0	8.0	24.4	23.7	4.7	25.4
600	145	28.9	9.0	30.3	29.7	5.0	32.4
800	126	41.4	11.0	42.8	43.0	5.4	48.3

Hs in m

$$s1 = 0.58 * Hs / \sqrt{n}$$

$$s2 = 0.01 * Hs + 0.03$$

$$s3 = \sqrt{(s1*s1 + s2*s2)}$$

$$s4 = 0.0217 * Hs^{**1.4} + 0.03$$

$$s5 = s4 * 100 / Hs$$

$$s6 = 0.02 * Hs^{**1.5} + 0.03$$

Hm0	s1	s2	s3	s4	s5	s6
0.20	0.004	0.032	0.032	0.032	16.1	0.032
0.40	0.010	0.034	0.035	0.036	9.0	0.035
0.60	0.016	0.036	0.039	0.041	6.8	0.039
1.00	0.031	0.040	0.050	0.052	5.2	0.050
1.50	0.051	0.045	0.068	0.068	4.6	0.067
2.00	0.073	0.050	0.089	0.087	4.4	0.087
3.00	0.121	0.060	0.135	0.131	4.4	0.134
4.00	0.174	0.070	0.188	0.181	4.5	0.190
5.00	0.230	0.080	0.244	0.237	4.7	0.254
6.00	0.289	0.090	0.303	0.297	4.9	0.324
8.00	0.414	0.110	0.428	0.429	5.4	0.483

Afleiding van de schattingsnauwkeurigheid van de golfhoogte Hm0.

s1 = steekproefnauwkeurigheid
 s2 = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid
 s3 = totale nauwkeurigheid
 s4 = benadering
 s5 = relatieve nauwkeurigheid in procenten
 s6 = benadering in Wavix-1

Ht = HTE3 ; Ht en Hm0 in cm

n = 80 (Tgem = 15 seconden)

s1 = 0.65 * Ht / \sqrt{n}
s2 = 0.02 * Ht + 5
s3 = $\sqrt{(s1*s1 + s2*s2)}$
s4 = 0.05 * Ht + 0.4 * \sqrt{Ht} + 0.2 * $\sqrt{Hm0}$
s5 = s4 * 100 / Ht
s6 = 0.06 * Ht + 0.8 * \sqrt{Ht}

HTE3	Hm0	s1	s2	s3	s4	s5	s6
10.	12.	0.7	5.2	5.3	2.5	24.6	3.1
30.	36.	2.2	5.6	6.0	4.9	16.3	6.2
60.	72.	4.4	6.2	7.6	7.8	13.0	9.8
100.	120.	7.3	7.0	10.1	11.2	11.2	14.0
200.	240.	14.5	9.0	17.1	18.8	9.4	23.3
350.	420.	25.4	12.0	28.1	29.1	8.3	36.0
500.	600.	36.3	15.0	39.3	38.8	7.8	47.9
10.	87.	0.7	5.2	5.3	3.6	36.3	3.1
30.	111.	2.2	5.6	6.0	5.8	19.3	6.2
60.	147.	4.4	6.2	7.6	8.5	14.2	9.8
100.	195.	7.3	7.0	10.1	11.8	11.8	14.0
200.	315.	14.5	9.0	17.1	19.2	9.6	23.3
350.	495.	25.4	12.0	28.1	29.4	8.4	36.0
500.	675.	36.3	15.0	39.3	39.1	7.8	47.9
10.	312.	0.7	5.2	5.3	5.3	53.0	3.1
30.	336.	2.2	5.6	6.0	7.4	24.5	6.2
60.	372.	4.4	6.2	7.6	10.0	16.6	9.8
100.	420.	7.3	7.0	10.1	13.1	13.1	14.0
200.	540.	14.5	9.0	17.1	20.3	10.2	23.3
350.	720.	25.4	12.0	28.1	30.3	8.7	36.0
500.	900.	36.3	15.0	39.3	39.9	8.0	47.9

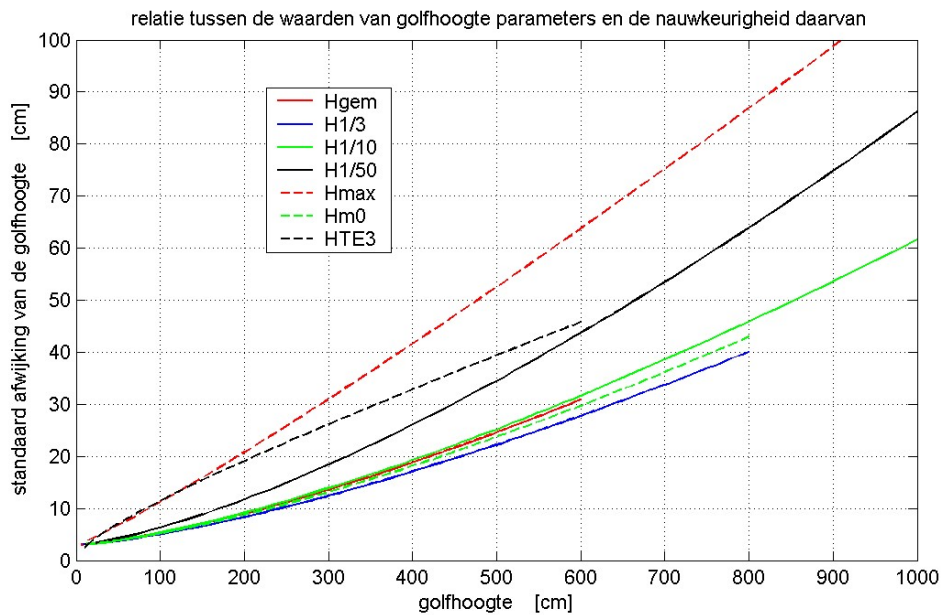
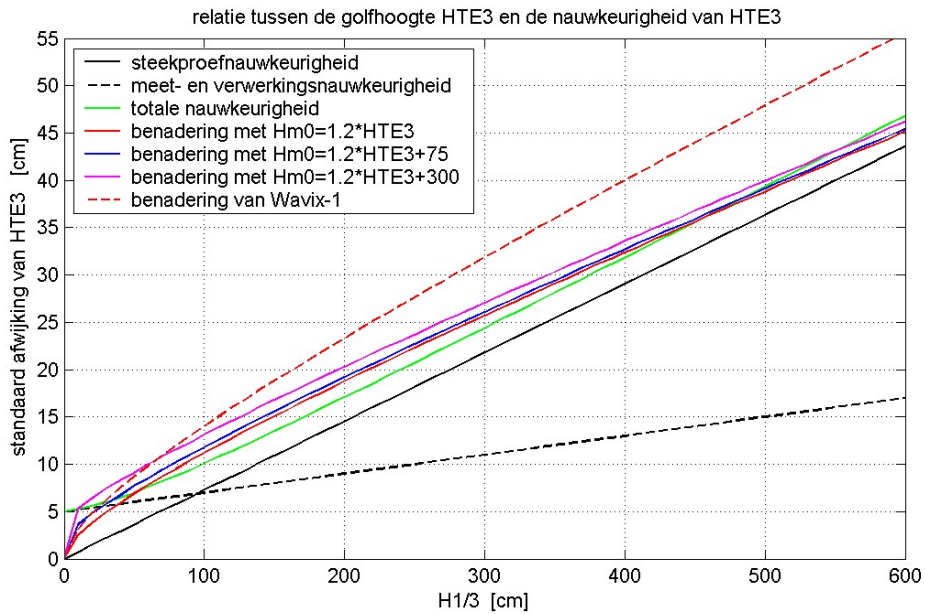
Ht en Hm0 in cm

n = 80

s1 = 0.65 * Ht / \sqrt{n}
s2 = 0.02 * Ht + 0.055
s3 = $\sqrt{(s1*s1 + s2*s2)}$
s4 = 0.05 * Ht + 0.04 * \sqrt{Ht} + 0.02 * $\sqrt{Hm0}$
s5 = s4 * 100 / Ht

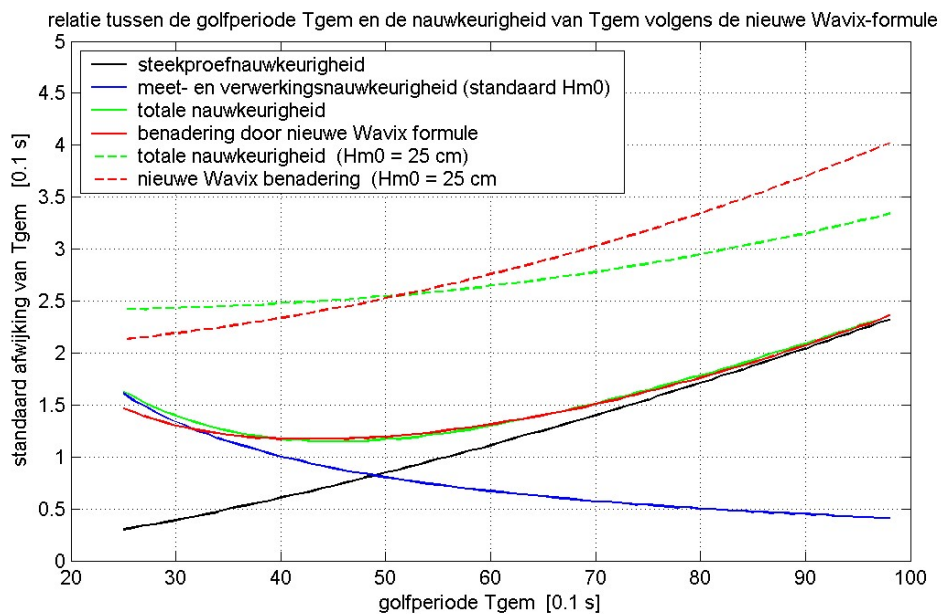
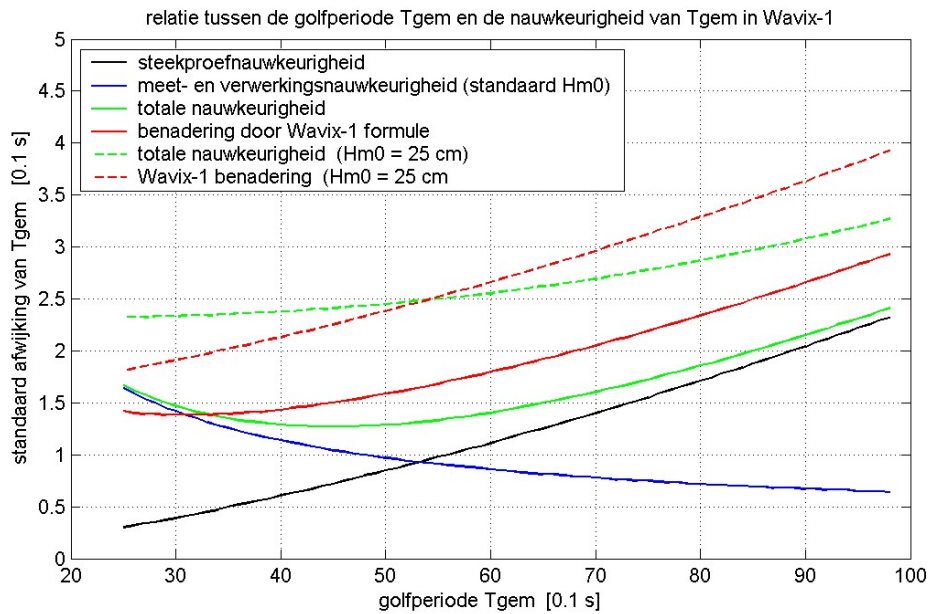
HTE3	Hm0	s1	s2	s3	s4	s5	s6
0.10	0.12	0.007	0.052	0.053	0.025	24.6	0.031
0.30	0.36	0.022	0.056	0.060	0.049	16.3	0.062
0.60	0.72	0.044	0.062	0.076	0.078	13.0	0.098
1.00	1.20	0.073	0.070	0.101	0.112	11.2	0.140
2.00	2.40	0.145	0.090	0.171	0.188	9.4	0.233
3.50	4.20	0.254	0.120	0.281	0.291	8.3	0.360
5.00	6.00	0.363	0.150	0.393	0.388	7.8	0.479

Afleiding van de schattingsnauwkeurigheid van de golfhoogte HTE3.



Boven : de nauwkeurigheid van de golfhoogte HTE3, de samenstelling daarvan, de nieuwe benadering voor 3 verschillende waarden van $Hm0$ en de oude Wavix formulering.

Onder : de nauwkeurigheid van de golfhoogte parameters Hgem, H1/3, H1/10, H1/50, Hmax, Hm0 en HTE3 volgens de nieuwe Wavix formulering.



Boven : de nauwkeurigheid van de golfperiode T_{gem} , de samenstelling daarvan en de benadering door de Wavix-1 formule.

Onder : de nauwkeurigheid van de golfperiode T_{gem} , de samenstelling daarvan en de benadering door de nieuwe Wavix formule.

s1 = steekproefnauwkeurigheid
 s2 = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid
 s3 = totale nauwkeurigheid
 s4 = benadering
 s5 = relatieve nauwkeurigheid in procenten
 s2a = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid met Hm0 = 25 cm
 s3a = totale nauwkeurigheid met Hm0 = 25 cm
 s4a = benadering met Hm0 = 25 cm

Tgem in 0.1 s ; Hm0 in cm

Hm0 = $T_{gem} * T_{gem} / 11.2$
 n = $1180 / (T_{gem}/10)$
 s1 = $0.26 * T_{gem} / \sqrt{n}$
 s2 = $12 / \sqrt{Hm0}$
 s3 = $\sqrt{(s1*s1 + s2*s2)}$
 s4 = $0.00021 * T_{gem}^{**2} + 10 / \sqrt{Hm0}$
 s5 = $s4*100 / T_{gem}$

Hm0a = 25 cm
 s2a = $12 / \sqrt{Hm0a}$
 s3a = $\sqrt{(s1*s1 + s2a*s2a)}$
 s4a = $0.00021 * T_{gem}^{**2} + 10 / \sqrt{Hm0a}$

Tgem	Hm0	n	s1	s2	s3	s4	s5	s3a	s4a
20.	36.	590	0.21	2.01	2.02	1.76	8.8	2.41	2.08
30.	80.	393	0.39	1.34	1.40	1.30	4.3	2.43	2.19
40.	143.	295	0.61	1.00	1.17	1.17	2.9	2.48	2.34
50.	223.	236	0.85	0.80	1.17	1.19	2.4	2.54	2.53
60.	321.	197	1.11	0.67	1.30	1.31	2.2	2.65	2.76
70.	438.	169	1.40	0.57	1.51	1.51	2.2	2.78	3.03
80.	571.	148	1.71	0.50	1.78	1.76	2.2	2.95	3.34
90.	723.	131	2.04	0.45	2.09	2.07	2.3	3.15	3.70
100.	893.	118	2.39	0.40	2.43	2.43	2.4	3.39	4.10

Tgem in s ; Hm0 in m

Hm0 = $T_{gem} * T_{gem} / 11.2$
 s1 = $0.26 * T_{gem} / \sqrt{n}$
 s2 = $0.12 / \sqrt{Hm0}$
 s3 = $\sqrt{(s1*s1 + s2*s2)}$
 s4 = $0.0021 * T_{gem}^{**2} + 0.1 / \sqrt{Hm0}$
 s5 = $s4*100. / T_{gem}$

Hm0a = 0.25 m
 s2a = $0.12 / \sqrt{Hm0a}$
 s3a = $\sqrt{(s1*s1 + s2a*s2a)}$
 s4a = $0.0021 * T_{gem}^{**2} + 0.1 / \sqrt{Hm0a}$

Tgem	Hm0	n	s1	s2	s3	s4	s5	s3a	s4a
2.0	0.36	590	0.021	0.201	0.202	0.176	8.8	0.241	0.208
3.0	0.80	393	0.039	0.134	0.140	0.130	4.3	0.243	0.219
4.0	1.43	295	0.061	0.100	0.117	0.117	2.9	0.248	0.234
5.0	2.23	236	0.085	0.080	0.117	0.119	2.4	0.254	0.252
6.0	3.21	197	0.111	0.067	0.130	0.131	2.2	0.265	0.276
7.0	4.38	169	0.140	0.057	0.151	0.151	2.2	0.278	0.303
8.0	5.71	148	0.171	0.050	0.178	0.176	2.2	0.295	0.334
9.0	7.23	131	0.204	0.045	0.209	0.207	2.3	0.315	0.370
10.0	8.93	118	0.239	0.040	0.243	0.243	2.4	0.339	0.410

Afleiding van de schattingsnauwkeurigheid van de golfperiode Tgem.

s1 = steekproefnauwkeurigheid
 s2 = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid
 s3 = totale nauwkeurigheid
 s4 = benadering (standaard Hm0)
 s5 = relatieve nauwkeurigheid in procenten
 s2a = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid met Hm0 = 25 cm
 s3a = totale nauwkeurigheid met Hm0 = 25 cm
 s4a = benadering met Hm0 = 25 cm

T13 = T1/3 ; T13 in 0.1s ; Tgem in 0.1s ; Hm0 in cm

Tgem = T13 / 1.45
Hm0 = Tgem * Tgem / 11.2
n = 1180 / (Tgem/10)
s1 = 0.26 * T13 / √n
s2 = 12 / √Hm0
s3 = √(s1*s1 + s2*s2)
s4 = 0.00015 * T132 + 10 / √Hm0**
s5 = s4*100 / T13

Hm0a = 25 cm
s2a = 12 / √Hm0a
s3a = √(s1*s1 + s2a*s2a)
s4a = 0.00015 * T132 + 10 / √Hm0a**

T1/3	Hm0	n	s1	s2	s3	s4	s5	s3a	s4a
40.	68.	428	0.50	1.46	1.54	1.45	3.6	2.45	2.24
55.	128.	311	0.81	1.06	1.33	1.34	2.4	2.53	2.45
70.	208.	244	1.16	0.83	1.43	1.43	2.0	2.67	2.74
85.	307.	201	1.56	0.69	1.70	1.65	1.9	2.86	3.08
100.	425.	171	1.99	0.58	2.07	1.99	2.0	3.12	3.50
115.	562.	149	2.45	0.51	2.50	2.41	2.1	3.43	3.98
130.	718.	132	2.95	0.45	2.98	2.91	2.2	3.80	4.53
145.	893.	118	3.47	0.40	3.49	3.49	2.4	4.22	5.15

T13 = T1/3 ; T13 en Tgem in s ; Hm0 in m

Hm0 = Tgem * Tgem / 11.2
s1 = 0.26 * T13 / √n
s2 = 0.12 / √Hm0
s3 = √(s1*s1 + s2*s2)
s4 = 0.0015 * T132 + 10 / √Hm0**
s5 = s4*100 / T13

Hm0a = 0.25 m
s2a = 0.12 / √Hm0a
s3a = √(s1*s1 + s2a*s2a)
s4a = 0.0015 * T132 + 10 / √Hm0a**

T1/3	Hm0	n	s1	s2	s3	s4	s5	s3a	s4a
4.0	0.68	428	0.050	0.146	0.154	0.145	3.6	0.245	0.224
5.5	1.28	311	0.081	0.106	0.133	0.134	2.4	0.253	0.245
7.0	2.08	244	0.116	0.083	0.143	0.143	2.0	0.267	0.273
8.5	3.07	201	0.156	0.069	0.170	0.165	1.9	0.286	0.308
10.0	4.25	171	0.199	0.058	0.207	0.199	2.0	0.312	0.350
11.5	5.62	149	0.245	0.051	0.250	0.241	2.1	0.343	0.398
13.0	7.18	132	0.295	0.045	0.298	0.291	2.2	0.380	0.454
14.5	8.93	118	0.347	0.040	0.349	0.349	2.4	0.422	0.515

Afleiding van de schattingsnauwkeurigheid van de golfperiode T1/3.

s1 = steekproefnauwkeurigheid
 s2 = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid
 s3 = totale nauwkeurigheid
 s4 = benadering (standaard Hm0)
 s5 = relatieve nauwkeurigheid in procenten
 s6 = benadering van Wavix-1 (standaard Hm0)
 s2a = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid met Hm0 = 25 cm
 s3a = totale nauwkeurigheid met Hm0 = 25 cm
 s4a = benadering met Hm0 = 25 cm

TH13 = TH1/3 ; TH13 in 0.1s ; Tgem in 0.1s ; Hm0 in cm

Tgem = TH13 / 1.30
 Hm0 = Tgem * Tgem / 11.2
 n = 1180 / (Tgem/10)
 s1 = 0.30 * TH13 / √n
 s2 = 12 / √Hm0
 s3 = √(s1*s1 + s2*s2)
 s4 = 0.00020 * TH13**2 + 10 / √Hm0
 s5 = s4*100 / TH13
 s6 = 0.0025 * TH13**1.5 + 6 / √Hm0 + 0.3

Hm0a = 25 cm
 s2a = 12 / √Hm0a
 s3a = √(s1*s1 + s2a*s2a)
 s4a = 0.00020 * TH13**2 + 10 / √Hm0a

TH1/3	Hm0	n	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s3a	s4a
30.	48.	511	0.40	1.74	1.79	1.63	5.4	1.58	2.43	2.18
40.	85.	384	0.61	1.31	1.44	1.41	3.5	1.59	2.48	2.32
50.	132.	307	0.86	1.04	1.35	1.37	2.7	1.71	2.55	2.50
60.	190.	256	1.13	0.87	1.42	1.45	2.4	1.90	2.65	2.72
70.	259.	219	1.42	0.75	1.60	1.60	2.3	2.14	2.79	2.98
80.	338.	192	1.73	0.65	1.85	1.82	2.3	2.42	2.96	3.28
100.	528.	153	2.42	0.52	2.48	2.44	2.4	3.06	3.41	4.00
120.	761.	128	3.18	0.44	3.21	3.24	2.7	3.80	3.99	4.88

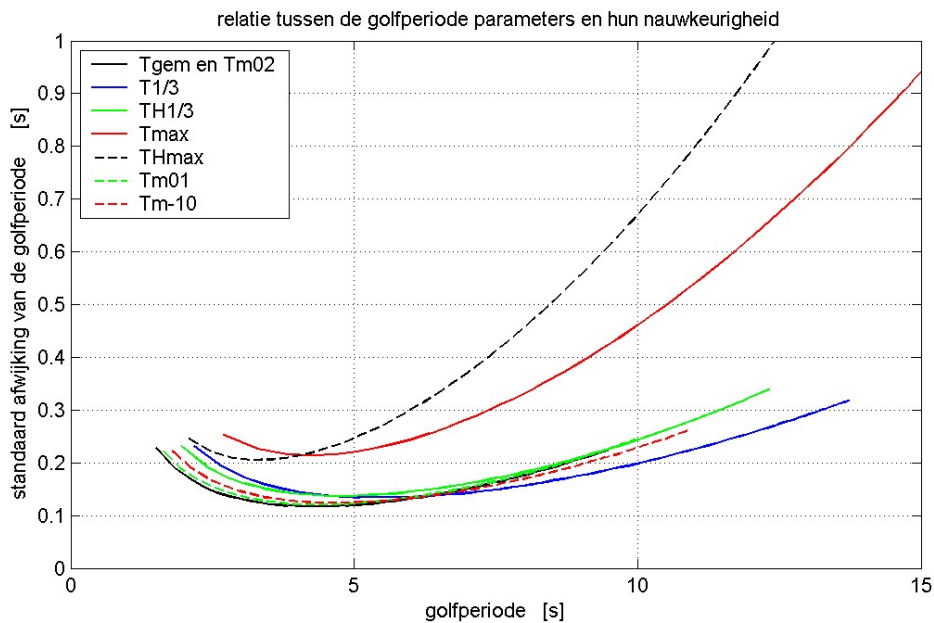
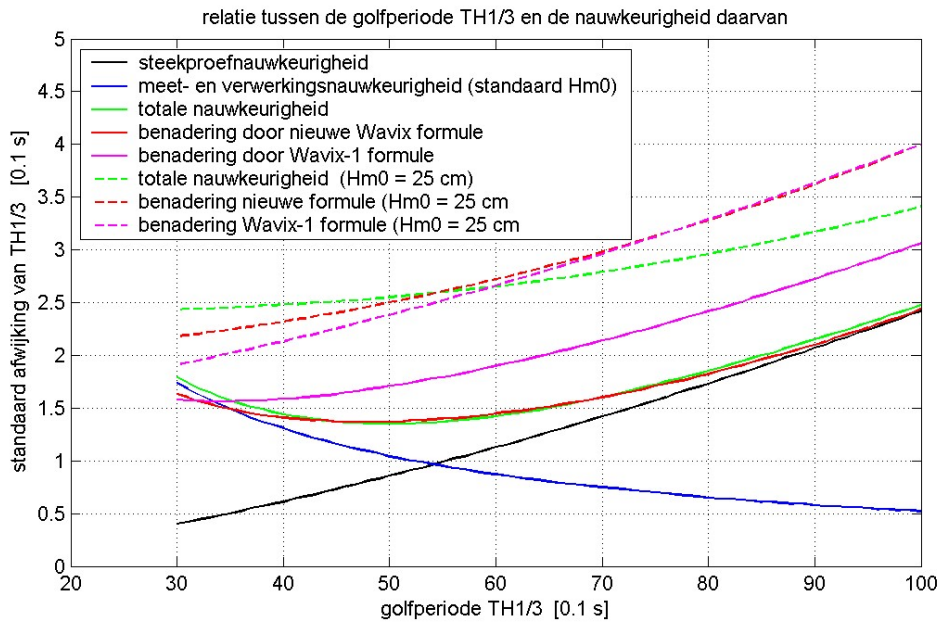
TH13 = TH1/3 ; TH13 en Tgem in s ; Hm0 in m

Hm0 = Tgem * Tgem / 11.2
 s1 = 0.30 * TH13 / √n
 s2 = 0.12 / √Hm0
 s3 = √(s1*s1 + s2*s2)
 s4 = 0.0020 * TH13**2 + 10 / √Hm0
 s5 = s4*100 / TH13

Hm0a = 0.25 m
 s2a = 0.12 / √Hm0a
 s3a = √(s1*s1 + s2a*s2a)
 s4a = 0.0020 * TH13**2 + 10 / √Hm0a

TH1/3	Hm0	n	s1	s2	s3	s4	s5	s3a	s4a
3.0	0.48	511	0.040	0.174	0.179	0.163	5.4	0.243	0.218
4.0	0.85	384	0.061	0.131	0.144	0.141	3.5	0.248	0.232
5.0	1.32	307	0.086	0.104	0.135	0.137	2.7	0.255	0.250
6.0	1.90	256	0.113	0.087	0.142	0.145	2.4	0.265	0.272
7.0	2.59	219	0.142	0.075	0.160	0.160	2.3	0.279	0.298
8.0	3.38	192	0.173	0.065	0.185	0.182	2.3	0.296	0.328
10.0	5.28	153	0.242	0.052	0.248	0.244	2.4	0.341	0.400
12.0	7.61	128	0.318	0.044	0.321	0.324	2.7	0.399	0.488

Afleiding van de schattingsnauwkeurigheid van de golfperiode TH1/3.



Boven : de nauwkeurigheid van de golfperiode TH1/3, de samenstelling daarvan, de nieuwe benadering voor 2 verschillende waarden van Hm0 en de oude Wavix formulering.

Onder : de nauwkeurigheid van de golfhoogte parameters Tgem, T1/3, TH1/3, Tmax, THmax, Tm02, Tm01 en Tm-10 volgens de nieuwe Wavix formulering.

s1 = steekproefnauwkeurigheid
 s2 = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid
 s3 = totale nauwkeurigheid
 s4 = benadering (standaard Hm0)
 s5 = relatieve nauwkeurigheid in procenten
 s2a = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid met Hm0 = 25 cm
 s3a = totale nauwkeurigheid met Hm0 = 25 cm
 s4a = benadering met Hm0 = 25 cm

Tmax in 0.1s ; Tgem in 0.1s ; Hm0 in cm

$T_{gem} = T_{max} / 1.80$
 $Hm0 = T_{gem} * T_{gem} / 11.2$
 $n = 1180 / \sqrt{(T_{gem}/10)}$
 $s1 = 0.75 * T_{max} / \sqrt{n}$
 $s2 = 12 / \sqrt{Hm0}$
 $s3 = \sqrt{(s1*s1 + s2*s2)}$
 $s4 = 0.00040 * T_{max}^{**2} + 10 / \sqrt{Hm0}$
 $s5 = s4*100 / T_{max}$

$Hm0a = 25 \text{ cm}$
 $s2a = 12 / \sqrt{Hm0a}$
 $s3a = \sqrt{(s1*s1 + s2a*s2a)}$
 $s4a = 0.00040 * T_{max}^{**2} + 10 / \sqrt{Hm0a}$

Tmax	Hm0	n	s1	s2	s3	s4	s5	s3a	s4a
40.	44.	531	1.30	1.81	2.23	2.15	5.4	2.73	2.64
60.	99.	354	2.39	1.20	2.68	2.44	4.1	3.39	3.44
80.	176.	266	3.68	0.90	3.79	3.31	4.1	4.40	4.56
100.	276.	212	5.15	0.72	5.20	4.60	4.6	5.68	6.00
120.	397.	177	6.76	0.60	6.79	6.26	5.2	7.18	7.76
140.	540.	152	8.52	0.52	8.54	8.27	5.9	8.86	9.84
160.	705.	133	10.42	0.45	10.42	10.62	6.6	10.69	12.24
180.	893.	118	12.43	0.40	12.43	13.29	7.4	12.66	14.96

Tmax en Tgem in s ; Hm0 in m

$Hm0 = T_{gem} * T_{gem} / 11.2$
 $s1 = 0.75 * T_{max} / \sqrt{n}$
 $s2 = 0.12 / \sqrt{Hm0}$
 $s3 = \sqrt{(s1*s1 + s2*s2)}$
 $s4 = 0.0040 * T_{max}^{**2} + 10 / \sqrt{Hm0}$
 $s5 = s4*100 / T_{max}$

$Hm0a = 0.25 \text{ m}$
 $s2a = 0.12 / \sqrt{Hm0a}$
 $s3a = \sqrt{(s1*s1 + s2a*s2a)}$
 $s4a = 0.0040 * T_{max}^{**2} + 10 / \sqrt{Hm0a}$

Tmax	Hm0	n	s1	s2	s3	s4	s5	s3a	s4a
4.0	0.44	531	0.130	0.181	0.223	0.215	5.4	0.273	0.264
6.0	0.99	354	0.239	0.120	0.268	0.244	4.1	0.339	0.344
8.0	1.76	266	0.368	0.090	0.379	0.331	4.1	0.440	0.456
10.0	2.76	212	0.515	0.072	0.520	0.460	4.6	0.568	0.600
12.0	3.97	177	0.676	0.060	0.679	0.626	5.2	0.718	0.776
14.0	5.40	152	0.852	0.052	0.854	0.827	5.9	0.886	0.984
16.0	7.05	133	1.042	0.045	1.042	1.062	6.6	1.069	1.224
18.0	8.93	118	1.243	0.040	1.243	1.329	7.4	1.266	1.496

Afleiding van de schattingsnauwkeurigheid van de golfperiode Tmax.

s1 = steekproefnauwkeurigheid
 s2 = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid
 s3 = totale nauwkeurigheid
 s4 = benadering (standaard Hm0)
 s5 = relatieve nauwkeurigheid in procenten
 s2a = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid met Hm0 = 25 cm
 s3a = totale nauwkeurigheid met Hm0 = 25 cm
 s4a = benadering met Hm0 = 25 cm

THmax in 0.1s ; Tgem in 0.1s ; Hm0 in cm

Tgem = THmax / 1.35
 Hm0 = Tgem * Tgem / 11.2
 n = 1180 / (Tgem/10)
 s1 = 0.875 * THmax / \sqrt{n}
 s2 = 12 / $\sqrt{Hm0}$
 s3 = $\sqrt{(s1*s1 + s2*s2)}$
 s4 = $0.000625 * THmax^{**2} + 10 / \sqrt{Hm0}$
 s5 = s4*100 / THmax

 Hm0a = 25 cm
 s2a = 12 / $\sqrt{Hm0a}$
 s3a = $\sqrt{(s1*s1 + s2a*s2a)}$
 s4a = $0.000625 * THmax^{**2} + 10 / \sqrt{Hm0a}$

THmax	Hm0	n	s1	s2	s3	s4	s5	s3a	s4a
40.	78.	398	1.75	1.36	2.22	2.13	5.3	2.97	3.00
55.	148.	290	2.83	0.99	2.99	2.71	4.9	3.71	3.89
70.	240.	228	4.06	0.77	4.13	3.71	5.3	4.72	5.06
85.	354.	187	5.43	0.64	5.47	5.05	5.9	5.94	6.52
100.	490.	159	6.93	0.54	6.95	6.70	6.7	7.34	8.25
115.	648.	139	8.55	0.47	8.56	8.66	7.5	8.88	10.27
130.	828.	123	10.28	0.42	10.28	10.91	8.4	10.55	12.56

THmax en Tgem in s ; Hm0 in m

Hm0 = Tgem * Tgem / 11.2
 s1 = 0.875 * THmax / \sqrt{n}
 s2 = 0.12 / $\sqrt{Hm0}$
 s3 = $\sqrt{(s1*s1 + s2*s2)}$
 s4 = $0.00625 * THmax^{**2} + 10 / \sqrt{Hm0}$
 s5 = s4*100 / THmax

 Hm0a = 0.25 m
 s2a = 0.12 / $\sqrt{Hm0a}$
 s3a = $\sqrt{(s1*s1 + s2a*s2a)}$
 s4a = $0.00625 * THmax^{**2} + 10 / \sqrt{Hm0a}$

THmax	Hm0	n	s1	s2	s3	s4	s5	s3a	s4a
4.0	0.78	398	0.175	0.136	0.222	0.213	5.3	0.297	0.300
5.5	1.48	290	0.283	0.099	0.299	0.271	4.9	0.371	0.389
7.0	2.40	228	0.406	0.077	0.413	0.371	5.3	0.472	0.506
8.5	3.54	187	0.543	0.064	0.547	0.505	5.9	0.594	0.652
10.0	4.90	159	0.693	0.054	0.695	0.670	6.7	0.734	0.825
11.5	6.48	139	0.855	0.047	0.856	0.866	7.5	0.888	1.027
13.0	8.28	123	1.028	0.042	1.028	1.091	8.4	1.055	1.256

Afleiding van de schattingsnauwkeurigheid van de golfperiode THmax.

s1 = steekproefnauwkeurigheid
 s2 = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid
 s3 = totale nauwkeurigheid
 s4 = benadering (standaard Hm0)
 s5 = relatieve nauwkeurigheid in procenten
 s6 = benadering van Wavix-1 (standaard Hm0)
 s2a = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid met Hm0 = 25 cm
 s3a = totale nauwkeurigheid met Hm0 = 25 cm
 s4a = benadering met Hm0 = 25 cm

Tm02 in 0.1s ; Tgem in 0.1s ; Hm0 in cm

Tgem = Tm02 / 1.00
 Hm0 = Tgem * Tgem / 11.2
 n = 1180 / (Tgem/10)
 s1 = 0.26 * Tm02 / √n
 s2 = 12 / √Hm0
 s3 = √(s1*s1 + s2*s2)
 s4 = 0.00021 * Tm02**2 + 10 / √Hm0
 s5 = s4*100 / Tm02
 s6 = 0.0025 * Tm02**1.5 + 5 / √Hm0 + 0.2

Hm0a = 25 cm
 s2a = 12 / √Hm0a
 s3a = √(s1*s1 + s2a*s2a)
 s4a = 0.00021 * Tm02**2 + 10 / √Hm0a

Tm02	Hm0	n	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s3a	s4a
30.	80.	393	0.39	1.34	1.40	1.30	4.3	1.17	2.43	2.19
40.	143.	295	0.61	1.00	1.17	1.17	2.9	1.25	2.48	2.34
50.	223.	236	0.85	0.80	1.17	1.19	2.4	1.42	2.54	2.53
60.	321.	197	1.11	0.67	1.30	1.31	2.2	1.64	2.65	2.76
70.	438.	169	1.40	0.57	1.51	1.51	2.2	1.90	2.78	3.03
80.	571.	148	1.71	0.50	1.78	1.76	2.2	2.20	2.95	3.34
90.	723.	131	2.04	0.45	2.09	2.07	2.3	2.52	3.15	3.70
100.	893.	118	2.39	0.40	2.43	2.43	2.4	2.87	3.39	4.10

Tm02 en Tgem in s ; Hm0 in m

Hm0 = Tgem * Tgem / 11.2
 s1 = 0.26 * Tm02 / √n
 s2 = 0.12 / √Hm0
 s3 = √(s1*s1 + s2*s2)
 s4 = 0.0021 * Tm02**2 + 10 / √Hm0
 s5 = s4*100 / Tm02

Hm0a = 0.25 m
 s2a = 0.12 / √Hm0a
 s3a = √(s1*s1 + s2a*s2a)
 s4a = 0.0021 * Tm02**2 + 10 / √Hm0a

Tm02	Hm0	n	s1	s2	s3	s4	s5	s3a	s4a
3.0	0.80	393	0.039	0.134	0.140	0.130	4.3	0.243	0.219
4.0	1.43	295	0.061	0.100	0.117	0.117	2.9	0.248	0.234
5.0	2.23	236	0.085	0.080	0.117	0.119	2.4	0.254	0.252
6.0	3.21	197	0.111	0.067	0.130	0.131	2.2	0.265	0.276
7.0	4.38	169	0.140	0.057	0.151	0.151	2.2	0.278	0.303
8.0	5.71	148	0.171	0.050	0.178	0.176	2.2	0.295	0.334
9.0	7.23	131	0.204	0.045	0.209	0.207	2.3	0.315	0.370
10.0	8.93	118	0.239	0.040	0.243	0.243	2.4	0.339	0.410

Afleiding van de schattingsnauwkeurigheid van de golfperiode Tm02.

s1 = steekproefnauwkeurigheid
 s2 = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid
 s3 = totale nauwkeurigheid
 s4 = benadering (standaard Hm0)
 s5 = relatieve nauwkeurigheid in procenten
 s2a = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid met Hm0 = 25 cm
 s3a = totale nauwkeurigheid met Hm0 = 25 cm
 s4a = benadering met Hm0 = 25 cm

Tm01 in 0.1s ; Tgem in 0.1s ; Hm0 in cm

Tgem = Tm01 / 1.05
 Hm0 = Tgem * Tgem / 11.2
 n = 1180 / (Tgem/10)
 s1 = 0.26 * Tm01 / \sqrt{n}
 s2 = 12 / $\sqrt{Hm0}$
 s3 = $\sqrt{(s1*s1 + s2*s2)}$
 s4 = 0.00021 * Tm01**2 + 10 / $\sqrt{Hm0}$
 s5 = s4*100 / Tm01
 Hm0a = 25 cm
 s2a = 12 / $\sqrt{Hm0a}$
 s3a = $\sqrt{(s1*s1 + s2a*s2a)}$
 s4a = 0.00021 * Tm01**2 + 10 / $\sqrt{Hm0a}$

Tm01	Hm0	n	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s3a	s4a
30.	73.	413	0.38	1.41	1.46	1.36	4.5	2.43	2.19	
40.	130.	310	0.59	1.05	1.21	1.21	3.0	2.47	2.34	
50.	202.	248	0.83	0.84	1.18	1.23	2.5	2.54	2.53	
60.	292.	206	1.09	0.70	1.29	1.34	2.2	2.63	2.76	
70.	397.	177	1.37	0.60	1.49	1.53	2.2	2.76	3.03	
80.	518.	155	1.67	0.53	1.75	1.78	2.2	2.92	3.34	
90.	656.	138	1.99	0.47	2.05	2.09	2.3	3.12	3.70	
100.	810.	124	2.34	0.42	2.37	2.45	2.5	3.35	4.10	
110.	980.	113	2.69	0.38	2.72	2.86	2.6	3.61	4.54	

Tm01 en Tgem in s ; Hm0 in m

Hm0 = Tgem * Tgem / 11.2
 s1 = 0.26 * Tm01 / \sqrt{n}
 s2 = 0.12 / $\sqrt{Hm0}$
 s3 = $\sqrt{(s1*s1 + s2*s2)}$
 s4 = 0.0021 * Tm01**2 + 10 / $\sqrt{Hm0}$
 s5 = s4*100 / Tm01
 Hm0a = 0.25 m
 s2a = 0.12 / $\sqrt{Hm0a}$
 s3a = $\sqrt{(s1*s1 + s2a*s2a)}$
 s4a = 0.0021 * Tm01**2 + 10 / $\sqrt{Hm0a}$

Tm01	Hm0	n	s1	s2	s3	s4	s5	s3a	s4a
3.0	0.73	413	0.038	0.141	0.146	0.136	4.5	0.243	0.219
4.0	1.30	310	0.059	0.105	0.121	0.121	3.0	0.247	0.234
5.0	2.02	248	0.083	0.084	0.118	0.123	2.5	0.254	0.252
6.0	2.92	206	0.109	0.070	0.129	0.134	2.2	0.263	0.276
7.0	3.97	177	0.137	0.060	0.149	0.153	2.2	0.276	0.303
8.0	5.18	155	0.167	0.053	0.175	0.178	2.2	0.292	0.334
9.0	6.56	138	0.199	0.047	0.205	0.209	2.3	0.312	0.370
10.0	8.10	124	0.234	0.042	0.237	0.245	2.5	0.335	0.410
11.0	9.80	113	0.269	0.038	0.272	0.286	2.6	0.361	0.454

Afleiding van de schattingsnauwkeurigheid van de golfperiode Tm01.

s1 = steekproefnauwkeurigheid
 s2 = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid
 s3 = totale nauwkeurigheid
 s4 = benadering (standaard Hm0)
 s5 = relatieve nauwkeurigheid in procenten
 s2a = meet- en verwerkingsnauwkeurigheid met Hm0 = 25 cm
 s3a = totale nauwkeurigheid met Hm0 = 25 cm
 s4a = benadering met Hm0 = 25 cm

Tmm = Tm-10 ; Tmm in 0.1s ; Tgem in 0.1s ; Hm0 in cm

Tgem = Tmm / 1.15
Hm0 = Tgem * Tgem / 11.2
n = 1180 / (Tgem/10)
s1 = 0.26 * Tmm / √n
s2 = 12 / √Hm0
s3 = √(s1*s1 + s2*s2)
s4 = 0.00019 * Tmm2 + 10 / √Hm0**
s5 = s4*100 / Tmm
Hm0a = 25 cm
s2a = 12 / √Hm0a
s3a = √(s1*s1 + s2a*s2a)
s4a = 0.00019 * Tmm2 + 10 / √Hm0a**

Tm-10	Hm0	n	s1	s2	s3	s4	s5	s3a	s4a
30.	61.	452	0.37	1.54	1.58	1.45	4.8	2.43	2.17
40.	108.	339	0.56	1.15	1.29	1.27	3.2	2.47	2.30
50.	169.	271	0.79	0.92	1.21	1.24	2.5	2.53	2.47
60.	243.	226	1.04	0.77	1.29	1.33	2.2	2.61	2.68
70.	331.	194	1.31	0.66	1.46	1.48	2.1	2.73	2.93
80.	432.	170	1.60	0.58	1.70	1.70	2.1	2.88	3.22
90.	547.	151	1.91	0.51	1.97	1.97	2.2	3.06	3.54
100.	675.	136	2.23	0.46	2.28	2.28	2.3	3.28	3.90
120.	972.	113	2.93	0.38	2.96	3.06	2.5	3.79	4.74

Tmm = Tm-10 ; Tmm en Tgem in s ; Hm0 in m

Hm0 = Tgem * Tgem / 11.2
s1 = 0.26 * Tmm / √n
s2 = 0.12 / √Hm0
s3 = √(s1*s1 + s2*s2)
s4 = 0.0019 * Tmm2 + 10 / √Hm0**
s5 = s4*100 / Tmm

Hm0a = 0.25 m
s2a = 0.12 / √Hm0a
s3a = √(s1*s1 + s2a*s2a)
s4a = 0.0019 * Tmm2 + 10 / √Hm0a**

Tm-10	Hm0	n	s1	s2	s3	s4	s5	s3a	s4a
3.0	0.61	452	0.037	0.154	0.158	0.145	4.8	0.243	0.217
4.0	1.08	339	0.056	0.115	0.129	0.127	3.2	0.247	0.230
5.0	1.69	271	0.079	0.092	0.121	0.124	2.5	0.253	0.248
6.0	2.43	226	0.104	0.077	0.129	0.133	2.2	0.261	0.268
7.0	3.31	194	0.131	0.066	0.146	0.148	2.1	0.273	0.293
8.0	4.32	170	0.160	0.058	0.170	0.170	2.1	0.288	0.322
9.0	5.47	151	0.191	0.051	0.197	0.197	2.2	0.306	0.354
10.0	6.75	136	0.223	0.046	0.228	0.228	2.3	0.328	0.390
12.0	9.72	113	0.293	0.038	0.296	0.306	2.5	0.379	0.474

Afleiding van de schattingsnauwkeurigheid van de golfperiode Tm-10.

$s1 = 4 + 2000 / Hm0^{**1.5}$ [° en cm] (Wavix-1)
 $s2 = 3 + 2000 / Hm0^{**1.5}$ [° en cm]
 $s3 = 3 + 2 / Hm0^{**1.5}$ [° en m]

Hm0	s1	s2	Hm0	s3
20.	26.4	25.4	0.20	25.4
40.	11.9	10.9	0.40	10.9
60.	8.3	7.3	0.60	7.3
80.	6.8	5.8	0.80	5.8
100.	6.0	5.0	1.00	5.0
150.	5.1	4.1	1.50	4.1
200.	4.7	3.7	2.00	3.7
250.	4.5	3.5	2.50	3.5
300.	4.4	3.4	3.00	3.4
400.	4.3	3.3	4.00	3.3
500.	4.2	3.2	5.00	3.2
600.	4.1	3.1	6.00	3.1
700.	4.1	3.1	7.00	3.1
800.	4.1	3.1	8.00	3.1

$s4 = 3 + 2000/Hm0^{**1.5} + T1$ met $s0 > 40$; $T1=0$

$s5 = 3 + 2000/Hm0^{**1.5} + T1$ met $s0 = 45$; $T1=(s0-40)*0.50*s0/40$

$s6 = 3 + 2000/Hm0^{**1.5} + T1$ met $s0 = 50$; $T1=(s0-40)*0.50*s0/40$

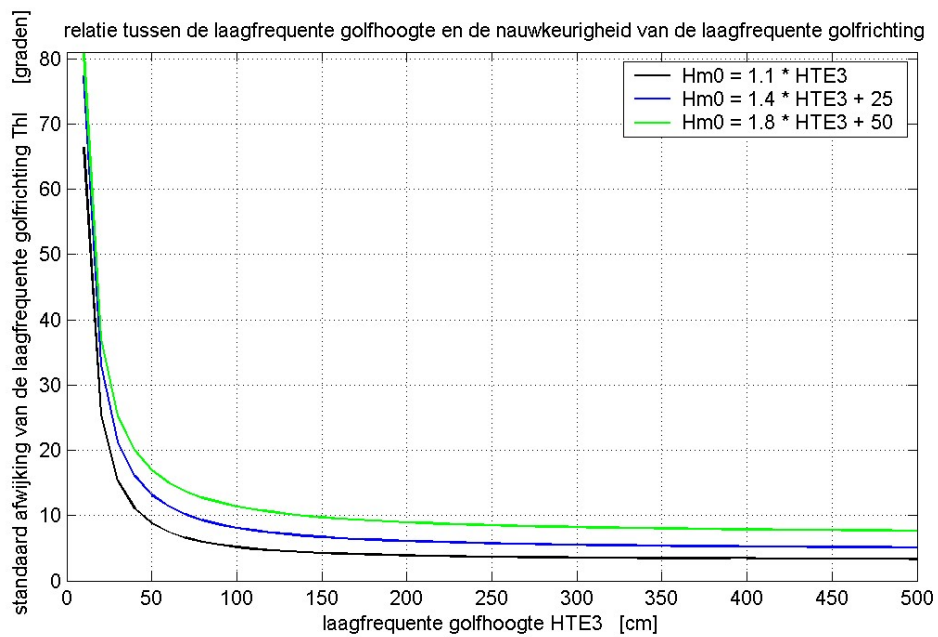
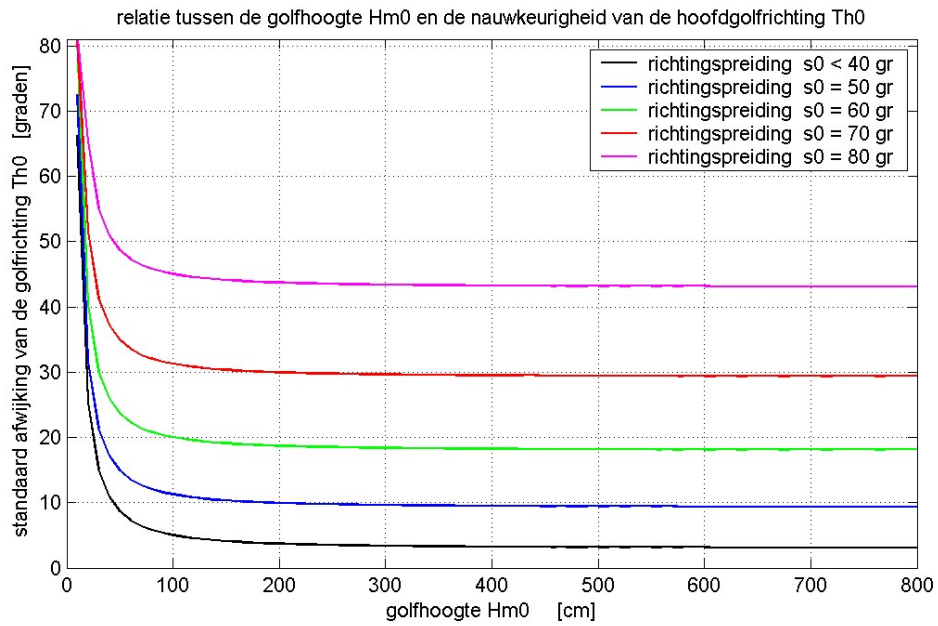
$s7 = 3 + 2000/Hm0^{**1.5} + T1$ met $s0 = 60$; $T1=(s0-40)*0.50*s0/40$

$s8 = 3 + 2000/Hm0^{**1.5} + T1$ met $s0 = 70$; $T1=(s0-40)*0.50*s0/40$

$s9 = 3 + 2000/Hm0^{**1.5} + T1$ met $s0 = 80$; $T1=(s0-40)*0.50*s0/40$

Hm0	s4	s5	s6	s7	s8	s9
20.	25.4	28.2	31.6	40.4	51.6	65.4
40.	10.9	13.7	17.2	25.9	37.2	50.9
60.	7.3	10.1	13.6	22.3	33.6	47.3
80.	5.8	8.6	12.0	20.8	32.0	45.8
100.	5.0	7.8	11.3	20.0	31.3	45.0
150.	4.1	6.9	10.3	19.1	30.3	44.1
200.	3.7	6.5	10.0	18.7	30.0	43.7
250.	3.5	6.3	9.8	18.5	29.8	43.5
300.	3.4	6.2	9.6	18.4	29.6	43.4
400.	3.3	6.1	9.5	18.3	29.5	43.3
500.	3.2	6.0	9.4	18.2	29.4	43.2
600.	3.1	5.9	9.4	18.1	29.4	43.1
700.	3.1	5.9	9.4	18.1	29.4	43.1
800.	3.1	5.9	9.3	18.1	29.3	43.1

De berekening van de standaard afwijking van de hoofdgolfrichting Th0.



Boven : de nauwkeurigheid van de hoofdgolfrichting Th0, afhankelijk van de golfhoogte Hm0 en eventueel van de richtingspreiding s0.

Onder : de nauwkeurigheid van de laagfrequente golfrichting s0, afhankelijk van de laagfrequente golfhoogte HTE3 en van de golfhoogte Hm0.

$$s(\text{Thl}) = 3 + 2000/\text{HTE3}^{**1.5} + 20*((\text{Hm0}-\text{HTE3})/\text{Hm0})^{**2} \quad [\text{ }^\circ \text{ en cm})$$

$$s(\text{Thl}) = 3 + 2/\text{HTE3}^{**1.5} + 20*((\text{Hm0}-\text{HTE3})/\text{Hm0})^{**2} \quad [\text{ }^\circ \text{ en m})$$

$$s(\text{Thl}) > 81 \quad \text{dan} \quad s(\text{Thl}) = 81$$

$$s1 : \text{Hm0} = 1.10 * \text{HTE3}$$

$$s2 : \text{Hm0} = 1.40 * \text{HTE3} + 25$$

$$s3 : \text{Hm0} = 1.80 * \text{HTE3} + 50$$

HTE3 cm	Hm0 cm	s1 grdn	Hm0 cm	s2 grdn	Hm0 cm	s3 grdn
10.	11.	66.4	39.	77.3	68.	81.0
20.	22.	25.5	53.	33.1	86.	37.1
30.	33.	15.3	67.	21.3	104.	25.3
40.	44.	11.1	81.	16.0	122.	19.9
50.	55.	8.8	95.	13.1	140.	16.9
75.	83.	6.2	130.	9.7	185.	13.2
100.	110.	5.2	165.	8.1	230.	11.4
125.	138.	4.6	200.	7.2	275.	10.4
150.	165.	4.3	235.	6.7	320.	9.7
200.	220.	3.9	305.	6.1	410.	9.0
250.	275.	3.7	375.	5.7	500.	8.5
300.	330.	3.6	445.	5.5	590.	8.2
350.	385.	3.5	515.	5.4	680.	8.0
400.	440.	3.4	585.	5.3	770.	7.9
450.	495.	3.4	655.	5.2	860.	7.8
500.	550.	3.3	725.	5.1	950.	7.7

De berekening van de standaard afwijking van de laagfrequente golfrichting Thl.

$s_0 = \text{gem. richtingspreiding} \quad [^\circ]$

$s(s_0) = s_0^{**0.5} - 3 + 8./Hm0^{**0.5} \quad [^\circ \text{ en cm}]$

$s_1 = s_0^{**0.5} - 3 + 8/Hm0^{**0.5} \quad \text{met} \quad Hm0 = 20 \text{ cm}$

$s_2 = s_0^{**0.5} - 3 + 8/Hm0^{**0.5} \quad \text{met} \quad Hm0 = 100 \text{ cm}$

$s_3 = s_0^{**0.5} - 3 + 8/Hm0^{**0.5} \quad \text{met} \quad Hm0 = 500 \text{ cm}$

$s_4 = s_0^{**0.5} - 3 + 0.8/Hm0^{**0.5} \quad \text{met} \quad Hm0 = 5 \text{ m}$

s0	s1	s2	s3	s4
15.	2.7	1.7	1.2	1.2
20.	3.3	2.3	1.8	1.8
25.	3.8	2.8	2.4	2.4
30.	4.3	3.3	2.8	2.8
35.	4.7	3.7	3.3	3.3
40.	5.1	4.1	3.7	3.7
45.	5.5	4.5	4.1	4.1
50.	5.9	4.9	4.4	4.4
55.	6.2	5.2	4.8	4.8
60.	6.5	5.5	5.1	5.1
65.	6.9	5.9	5.4	5.4
70.	7.2	6.2	5.7	5.7
75.	7.4	6.5	6.0	6.0
80.	7.7	6.7	6.3	6.3

De berekening van de standaard afwijking van de gemiddelde richtingspreiding s_0 .