

Golfverwerking

Bijlage bij de RWS Standaard

In opdracht van: Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

Project: Rijkswaterstaat Meetnet Infrastructuur (RMI)

Versie: 1.0 November 2005

Inhoudsopgave

1	INLEIDING	4
1.1	Doelstelling van het document.....	4
1.2	Indeling van het document	4
1.3	Documenthistorie.....	4
2	GOLFVERWERKING	5
2.1	Inleiding	5
2.2	Vorbewerking	5
2.2.1	Introductie.....	5
2.2.2	Samenstelling van de verwerkingsperiode.....	5
2.2.3	Getijfiltering	6
2.2.4	Foutafhandeling.....	8
2.2.5	Verwijdering van het 20-minuten-gemiddelde	9
2.2.6	Berekende parameters.....	9
2.3	Tijddomeinanalyse	10
2.3.1	Introductie.....	10
2.3.2	Kamhoogte.....	10
2.3.3	Golfclassificatie	10
2.3.4	Golfhoogte en -periodemiddeling	14
2.3.5	Berekende parameters.....	14
2.4	Spectrale hoogteverwerking	15
2.4.1	Introductie.....	15
2.4.2	Samenstelling van het energiedichtheidsspectrum	15
2.4.2.1	SAMENSTELLING VAN DE DEELREEKSEN	15
2.4.2.2	COSINUS-TAPERING	15
2.4.2.3	FOURIER-TRANSFORMATIE	17
2.4.2.4	HET 5 MHZ ENERGIEDICHTHEIDSSPECTRUM	17
2.4.2.5	CORRECTIEFILERS	17
2.4.2.6	HET 10 MHZ ENERGIEDICHTHEIDSSPECTRUM	19
2.4.3	Energiedichtheidsspectrumparameters	19
2.4.3.1	MOMENTEN	19
2.4.3.2	GOLFENERGIE	19
2.4.3.3	GOLFHOOGTE.....	19
2.4.3.4	GOLFPERIODE	19
2.4.4	Berekende parameters.....	20
2.5	Spectrale richtingsverwerking	21
2.5.1	Introductie.....	21
2.5.2	Samenstelling van auto-, co- en quad-spectra.....	21
2.5.2.1	DEELREEKSSAMENSTELLING, COSINUS-TAPERING EN FOURIER- TRANSFORMATIE	21
2.5.2.2	DE 5 MHZ AUTO-, CO- EN QUAD-SPECTRA	21
2.5.2.3	CORRECTIEFILTERS	22
2.5.2.4	DE 10 MHZ SPECTRA	23
2.5.3	Fourier-coëfficiënten	23
2.5.4	Gecentreerde fourier-coëfficiënten.....	24
2.5.5	Richtingsspectra.....	24
2.5.5.1	HOOFDRICHTINGSSPECTRUM.....	24
2.5.5.2	RICHTINGSPREIDINGSSPECTRUM	25
2.5.6	Richtingsspectrumparameters	25
2.5.6.1	GEMIDDELDE HOOFDRICHTING.....	26
2.5.6.2	GEMIDDELDE SPREIDING	26
2.5.7	Bandparameters.....	26
2.5.7.1	DEFINITIES	26
2.5.7.2	GOLFHOOGTE.....	27

2.5.7.3	VRIJHEIDSGRADEN VAN DE ENERGIEDICHTHEID	27
2.5.7.4	GEMIDDELDE HOOFDRICHTING	27
2.5.7.5	GEMIDDELDE SPREIDING	28
2.5.7.6	GEMIDDELDE SCHEEFHEID.....	28
2.5.7.7	GEMIDDELDE SLANKHEID	28
2.5.7.8	GEMIDDELDE FREQUENTIE.....	28
2.5.8	Berekende parameters.....	28
2.6	Uitvoerberichtdefinitie	30
2.6.1	Niveau 0	30
2.6.2	Niveau 1	30
2.6.3	Niveau 2	31
3	BEGRIPPEN EN AFKORTINGEN	34
3.1	Afkortingen	34
3.2	Begrippen	34
4	REFERENTIES	36

1 INLEIDING

1.1 Doelstelling van het document

In deze bijlage wordt de standaard golfverwerking van Rijkswaterstaat in detail beschreven zoals die plaatsvindt op de GH-berichten en GHR-berichten van de SESAM. Het document dient als bijlage van de RWS Standaard [1]. In voorgaande versies [2] van deze standaard was deze beschrijving een vast onderdeel (hoofdstuk 5). Bij de update van de standaard in November 2005 is het een separate bijlage geworden.

1.2 Indeling van het document

De indeling van dit document is volgt:

- Hoofdstuk 2 beschrijft de standaard golfverwerking
- Hoofdstuk 3 geeft een lijst met afkortingen en begrippen.
- Hoofdstuk 4 bevat de lijst met referenties naar literatuur

1.3 Documenthistorie

Versie	Datum	Auteur	Wijzigingen
1.0	November 2005	A. Kuijt	Extractie uit de RWS Standaard v1.2 (Hoofdstuk 5)

2 GOLFVERWERKING

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de standaard golfverwerking van Rijkswaterstaat zoals die plaatsvindt op de GH-berichten en GHR-berichten van de SESAM.

In paragraaf 2.2 wordt de voorbereiding beschreven. Vervolgens beschrijft paragraaf 2.3 de tijdomein-analyse. De spectrale golfhoogteverwerking en de spectrale golfrichtingsverwerking worden behandeld in paragraaf 2.4 respectievelijk paragraaf 2.5. Tot slot geeft paragraaf 2.6 een definitie van de uitvoerberichten op de verschillende niveau's.

Voor golfhoogte en golfrichting komt binnen de RWS-standaard uitvoer beschikbaar op drie niveaus. Hoewel deze complete lijst met parameters altijd berekend wordt, is het mogelijk dat er binnen een meetnet slechts een beperkte set parameters aan de gebruiker ter beschikking wordt gesteld.

2.2 Voorbewerking

2.2.1 Introductie

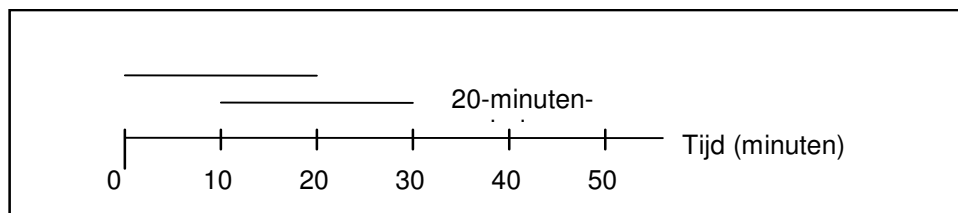
Deze paragraaf beschrijft de voorbereiding van de ruwe sensorgegevens. Gedurende deze fase worden de gegevens gereed gemaakt voor verdere verwerking. De datamonsters worden eerst samengevoegd tot een verwerkingsperiode (paragraaf 2.2.2). De getijfiltering voor Stappenbaak-signalen wordt beschreven in paragraaf 2.2.3. Paragraaf 2.2.4 behandelt de verwijdering van foutcodes en fysisch onmogelijke datapunten zoals pieken and constante signalen. Nadat de foutcodes zijn verwijderd wordt het gemiddelde van het signaal afgetrokken (paragraaf 2.2.5). De berekende parameters, die de kwaliteit van de binnengekomen data aangeven, worden geïntroduceerd in paragraaf 2.2.6.

2.2.2 Samenstelling van de verwerkingsperiode

Elk binnenkomend datamonster wordt voorzien van een tijdstempel in MET (Midden-Europese Tijd) van het aankomsttijdstip met een milliseconde-resolutie. De bemonsteringsfrequentie (afhankelijk van het sensortype) en het tijdstempel zijn nodig om de binnenkomende monsters op hun plaats in de verwerkingsperiode te kunnen zetten.

Onafhankelijk van het sensortype vindt de analyse van de golfgegevens plaats over een 20-minuten-periode die elke 10 minuten opgeschoven wordt waardoor er een overlap van 10 minuten met de vorige verwerkingsperiode ontstaat (zie Figuur 1).

Het tijdstempel dat wordt toegekend aan de 20-minuten-periode is gedefinieerd als het gemiddelde van de begintijd en de eindtijd in MET.



Figuur 1 Samenstelling van de 20-minuten-verwerkingsperiode

De 20-minuten-periodes beginnen 6 keer per uur: op 0, 10, 20, 30, 40 en 50 minuten na het hele uur.

De 20-minuten-periode kan worden samengesteld als er tenminste één geldig datapunt aanwezig is; daarom wordt er zelfs als er slechts een enkel datapunt is binnengekomen gedurende een 20-minuten-interval een verwerkingsperiode samengesteld en wordt de verwerking gestart.

2.2.3 Getijfiltering

Alle sensoren, behalve de Stappenbaak, zijn voorzien van een hoogdoorlaatfilter om een DC-drift van het signaal in het frequentiebereik waar het sensorgedrag niet is gedefinieerd te voorkomen. Deze filters verwijderen ook de getijcomponent uit het sensorsignaal. Door via filteren de getijcomponent uit het Stappenbaaksignaal te verwijderen wordt het mogelijk om het Stappenbaaksignaal op dezelfde manier te behandelen als de andere sensorsignalen. Voor verdere verwerking is compensatie voor deze filters noodzakelijk, dit is echter alleen mogelijk in het frequentiedomein (zie paragraaf 2.4 en 2.5), niet in het tijddomein (zie opmerking in paragraaf 2.3.5).

Het Stappenbaaksignaal wordt gefilterd door de getijcomponent, die gedefinieerd is als alle verticale beweging met een frequentie lager dan 30 mHz, van het signaal af te trekken. De getijcomponent wordt berekend uit de ruwe data vóór de foutcorrectie (paragraaf 2.2.4), maar datapunten die foutcode bevatten of een 'extreem grote' afwijking van het gemiddelde vertonen worden niet meegerekend. De definitie van 'extreem groot' wordt gepreciseerd door de zogenaamde 4-sigma-test: datapunten die buiten het interval $[\mu - 4\sigma, \mu + 4\sigma]$ liggen worden uitgezonderd van de getijberekening. Merk op dat afgekeurde punten niet op foutcode worden gezet, maar simpelweg niet meegerekend worden bij de berekening van het getij. De standaarddeviatie σ en het gemiddelde μ die dit interval bepalen worden gegeven door:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

waar N het aantal datapunten x_i is die geen foutcode bevatten.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N - 1}}$$

Als er geen geldige datapunten gevonden worden dan worden s en μ op foutcode gezet en als het aantal geldige datapunten één is dan wordt s op nul gezet en krijgt μ de waarde van het datapunt. De getijberekening wordt uitgevoerd door een laagdoorlaatfilter met kantelpunt bij 30 mHz. Dit filter is samengesteld uit vier (identieke) voortschrijdende gemiddelden (MA = Moving Average) filters. Eén zo'n MA-filter middelt elk datapunt D_i over het interval $[-(M-1)/2, (M-1)/2]$:

$$\frac{1}{M} \sum_{k=i-(M-1)/2}^{i+(M-1)/2} D_k$$

waar het oneven gehele getal M de filterbreedte is. Het vier keer toepassen van het MA-filter resulteert in een overeenkomstig 'gewogen' MA-filter.

Na filtering van het signaal met datapunten D_i , worden de corresponderende punten T_i van het getij gegeven door:

$$T_i = \frac{\sum_{k=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} E_{i+k} W_k D_{i+k}}{\sum_{k=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} E_{i+k} W_k}$$

waar W_k de weegfactor is en N de totale filterbreedte die gelijk is aan $4(M-1)+1$ (hoe W_k en N worden bepaald wordt hierna uitgelegd). De factor E_{i+k} is 0 voor die datapunten D_{i+k} die foutcode bevatten of niet door de hiervoor beschreven 4-sigma-test heen komen, en is 1 voor geldige datapunten D_{i+k} . Merk op dat voor het berekenen van het getij op een bepaald moment signaalwaarden uit zowel het verleden als de toekomst nodig zijn. Dit geeft problemen aan de randen van de verwerkingsperiode aangezien waarden buiten de verwerkingsperiode niet bekend zijn. Daarom worden factoren E_{i+k} corresponderend met $i+k$ buiten de verwerkingsperiode op 0 gezet.

Zoals al eerder opgemerkt worden datapunten met foutcode of die de 4-sigma-test niet halen niet meegenomen in de getijberekening. Als echter meer dan een bepaald gedeelte van de gewogen datapunten D_{i+k} van het signaal wordt afgekeurd, wordt het corresponderende getijpunt T_i op foutcode gezet. Het minimum aantal datapunten D_{i+k} wil getijpunt T_i goedgekeurd worden is zo gedefinieerd dat de som van de weegfactoren W_k in de berekening van getijpunt T_i 90% of meer van het totaal van alle weegfactoren moet zijn. In formule:

$$\frac{\sum_{k=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} E_{i+k} W_k}{\sum_{k=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} W_k} \geq 0.9$$

waarbij E_{i+k} en N als boven gedefinieerd zijn.

Deze limiet wordt mogelijk niet gehaald door de aanwezigheid van teveel foutcodes, maar ook door het ontbreken van verleden of toekomstige waarden aan het begin en aan het eind van de verwerkingsperiode. Deze waarden zijn niet bekend en dus neemt de fractie gewogen datapunten aan de randen van de verwerkingsperiode af.

De totale filterbreedte N is gelijk aan $4(M-1)+1$, waarbij M afhankelijk is van het kantelpunt en de bemonsteringsfrequentie. De juiste waarde van M kan worden afgeleid uit de volgende formule [3]:

$$\frac{1}{2} = \left(\frac{\sin(m\pi f / SR)}{M \sin(\pi f / SR)} \right)^4$$

waar SR de bemonsteringsfrequentie van de sensor is en f het kantelpunt van het filter (30 mHz). De filterbreedte wordt bepaald door de bovenstaande formule voor M op te lossen en het dichtstbijzijnde oneven getal voor M te kiezen. Tabel 1 geeft de beste waarden voor M en N die corresponderen met de twee door Rijkswaterstaat gebruikte bemonsteringsfrequenties met een kantelpunt bij ongeveer 30 mHz.

Tabel 1 Aanbevolen waarden voor M en N voor de bemonsteringsfrequenties van de Rijkswaterstaat sensoren

SR (bemonsteringsfreq.Hz)	Beste waarde voor N	Beste waarde voor M	Kantelpunt (mHz)
1.28	49	13	31.5
2.56	105	27	30.3

De waarden van de weegfactoren W_k zijn afhankelijk van de breedte M van het MA-filter en zijn symmetrisch rond $k=0$, d.w.z. $W_k=W_{-k}$.

De weegfactoren worden berekend in de intervallen $k \in [0, M-1]$ en $k \in [M-1, 2M-2]$ (rechte haken geven aan dat de grenzen meedoen) volgens de volgende formules:

$$W_{k \in (0, M-1)} = \frac{4}{6}(k-M-1)(k-M+1) - \frac{1}{6}(k-2M-1)(k-2M)(k-2M+1)$$

$$W_{k \in [M-1, 2M-2]} = -\frac{1}{6}(k-2M-1)(k-2M)(k-2M+1)$$

Nadat het getij is berekend kan het van het signaal afgetrokken worden, maar eerst moeten de gaten (rijen van foutcodes) worden gerepareerd, d.w.z. vervangen door geldige waarden.

De gaten aan het begin en het eind van het getij (als gevolg van foutcodes in de invoer en van het feit dat gegevens buiten de verwerkingsperiode niet bekend zijn) worden gerepareerd door lineaire extrapolatie van een lijn door het eerste resp. laatste getijpunt van de verwerkingsperiode dat geen foutcode bevat. Extrapolatie aan het begin en aan het eind wordt alleen gedaan als het gat kleiner is dan 75 seconden. Voor grotere begin- en eindgaten vindt er geen extrapolatie plaats.

Gaten in het getij tussen geldige getijpunten worden gerepareerd door lineaire interpolatie als het gat kleiner is dan 150 seconden. Lineaire interpolatie vindt plaats tussen het laatste geldige getijpunt vóór het gat en het eerste geldige getijpunt na het gat.

Bij het verwijderen van het getij uit het signaal worden alleen die datapunten berekend waarvoor zowel het signaal als het getij niet op foutcode staan, andere punten worden op foutcode gezet.

Merk op dat de foutcodes in het signaal nog niet gerepareerd zijn (zie paragraaf 2.2.4). Merk verder op dat er informatiereductie optreedt als geldige datapunten worden afgekeurd vanwege foutcodes in de corresponderende getijpunten (b.v. gaten die te groot zijn voor interpolatie of extrapolatie).

2.2.4 Foutafhandeling

Wanneer een 20-minuten-periode is samengesteld en eventueel getijfiltering heeft plaatsgevonden moet het gecontroleerd worden op foutcodes en indien mogelijk gerepareerd worden voordat verdere verwerking kan plaatsvinden. De ruwe gegevens kunnen foutcodes bevatten of waarden die, ofschoon geldig, fysisch onrealistisch zijn. Datapunten met dezelfde waarde als een 'groot' aantal buurpunten en datapunten met een 'grote' afgeleide worden als 'onrealistisch' beschouwd en verworpen door ze op foutcode te zetten in de volgende gevallen:

- Geldige datapunten met een constante waarde over een tijdinterval groter dan 10 seconden ('0-sigma-test'). Foutcodes in dit 10-seconden interval worden niet meegeteld.
- Geldige datapunten buiten het interval $[-4\sigma, +4\sigma]$ rond de gemiddelde waarde 0 ('4-sigma-test').
- Geldige datapunten met een afgeleide buiten het interval $[-4\delta, +4\delta]$ rond de gemiddelde waarde 0 ('4-delta-test').

De parameter σ is gedefinieerd als de standaarddeviatie van de geldige datapunten:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N x_j^2}{N}}$$

waarbij de sommatie plaatsvindt over alle datapunten in de verwerkingsperiode die geen foutcode bevatten en N het aantal geldige datapunten is.

De parameter δ is gedefinieerd als de standaarddeviatie van de afgeleide. De afgeleide in datapunt x_i is gedefinieerd als het verschil Δx_i tussen datapunt x_i en het voorgaande datapunt x_{i-1} als x_i en x_{i-1} beide niet op foutcode staan. Als x_i of x_{i-1} foutcode bevat wordt de afgeleide in punt x_i niet berekend. De definitie van de standaarddeviatie van de afgeleide wordt gegeven door de volgende formule:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^M (\Delta x_j)^2}{M}}$$

waarbij de sommatie plaatsvindt over alle afgeleiden Δx_j zoals hierboven gedefinieerd. M is het aantal paren waarvoor de afgeleide is gedefinieerd.

Omdat alle signalen gefilterd zijn met een hoogdoorlaatfilter wordt het gemiddelde van de datapunten en het gemiddelde van de afgeleiden nul veronderstelt. Aangezien de gemiddelden niet uit de data bepaald worden, is het gebruik van de factoren N (in plaats van N-1) en M (in plaats van M -1) in de noemer van de formules voor σ respectievelijk δ gerechtvaardigd.

Als er geen geldige datapunten gevonden worden wordt σ op de foutcode gezet, en als er geen paren van opeenvolgende geldige punten gevonden worden wordt δ op de foutcode gezet.

De hiervoor beschreven 0-sigma-, 4-sigma- en 4-delta-tests worden in deze volgorde uitgevoerd. Datapunten die door één van de tests op foutcode worden gezet worden niet meer meegerekend in de volgende.

Gaten (één of meer opeenvolgende datapunten op foutcode) kunnen onder bepaalde voorwaarden gerepareerd worden. Als het gat niet groter is dan 2 seconden (waarbij de gatgrootte in seconden is gedefinieerd als het aantal foutcodes gedeeld door de bemonsteringsfrequentie in Hz) kan het worden gerepareerd middels lineaire interpolatie over het gat. Op dezelfde manier worden gaten aan het begin of het einde van de verwerkingsperiode die niet groter zijn dan 1 seconde geëxtrapoleerd door voortzetting van de waarde van het eerste respectievelijk het laatste geldige datapunt. Merk op dat hoewel de *grootte in seconden* van het grootste gat dat kan worden gerepareerd voor elke sensor hetzelfde is, het *aantal datapunten* in het maximale gat afhankelijk is van de bemonsteringsfrequentie van het sensortype.

2.2.5 Verwijdering van het 20-minuten-gemiddelde

Ondanks de hoogdoorlaatfiltering die reeds door de sensor zelf wordt uitgevoerd (Wavec, Waverider en Directional Waverider) of door de getijfiltering voor de Stappenbaak die zoals hiervoor beschreven plaatsvindt, kan er toch nog een kleine DC-component in het signaal aanwezig zijn (b.v. veroorzaakt door het verwijderen van sigma- en delta-fouten, interpolatie of extrapolatie). Alvorens een 20-minuten-datablok verder te verwerken wordt deze DC-component verwijderd door het 20-minuten-gemiddelde van het signaal af te trekken. Dit wordt voornamelijk voor de tijddomeinanalyse gedaan, voor de spectrale verwerking worden nog eens apart gemiddelden over kortere periodes afgetrokken (zie paragraaf 2.4.2.1). Datapunten die na correctie d.m.v. interpolatie en extrapolatie nog steeds op foutcode staan worden niet gebruikt bij verdere verwerking.

2.2.6 Berekenende parameters

Gedurende de voorbereidingsfase worden verschillende parameters berekend die de kwaliteit van de data aangeven (merk op dat de parameters die een aantal datapunten aangeven bemonsteringsfrequentie-afhankelijk zijn):

- Ngd_zP: Percentage van de verticale golfbewegingspunten die vóór de voorbereiding geen foutcode bevatten.
- Ngd_xP: Percentage van de horizontale oost-west golfbewegingspunten die vóór de voorbereiding geen foutcode bevatten.
- Ngd_yP: Percentage van de horizontale noord-zuid golfbewegingspunten die vóór de voorbereiding geen foutcode bevatten.
- Nu_z: Aantal geldige verticale golfbewegingspunten die afgekeurd zijn vanwege 0 sigma-fouten.
- Nu_x: Aantal geldige horizontale oost-west golfbewegingspunten die afgekeurd zijn vanwege 0-sigma-fouten.
- Nu_y: Aantal geldige horizontale noord-zuid golfbewegingspunten die afgekeurd zijn vanwege 0-sigma-fouten.
- Nd_z: Aantal geldige verticale golfbewegingspunten die afgekeurd zijn vanwege 4 delta-fouten.

- Nd_x: Aantal geldige horizontale oost-west golfbewegingspunten die afgekeurd zijn vanwege 4-delta-fouten.
- Nd_y: Aantal geldige horizontale noord-zuid golfbewegingspunten die afgekeurd zijn vanwege 4-delta-fouten.
- Nv_z: Aantal geldige verticale golfbewegingspunten die afgekeurd zijn vanwege 4 sigma-fouten.
- Nv_x: Aantal geldige horizontale oost-west golfbewegingspunten die afgekeurd zijn vanwege 4-sigma-fouten.
- Nv_y: Aantal geldige horizontale noord-zuid golfbewegingspunten die afgekeurd zijn vanwege 4-sigma-fouten
- Ni_z: Aantal geïnterpoleerde of geëxtrapoleerde verticale golfbewegingspunten
- Ni_x: Aantal geïnterpoleerde of geëxtrapoleerde horizontale oost-west golf bewegingspunten
- Ni_y: Aantal geïnterpoleerde of geëxtrapoleerde horizontale noord-zuid golf bewegingspunten

2.3 Tijddomeinanalyse

2.3.1 Introductie

Dit hoofdstuk behandelt de tijddomeinanalyse van de golven, die plaatsvindt na de voorbewerking zoals beschreven in paragraaf 2.2. Alleen het golfhoogtesignaal wordt gebruikt tijdens deze fase. De kamhoogteberekening wordt beschreven in paragraaf 2.3.2, het golfclassificatieproces waarbij de golven worden geteld en gesorteerd op hoogte en periode in paragraaf 2.3.3, de berekening van de golfhoogte en periode in paragraaf 2.3.4 en resulterende parameters in paragraaf 2.3.5.

2.3.2 Kamhoogte

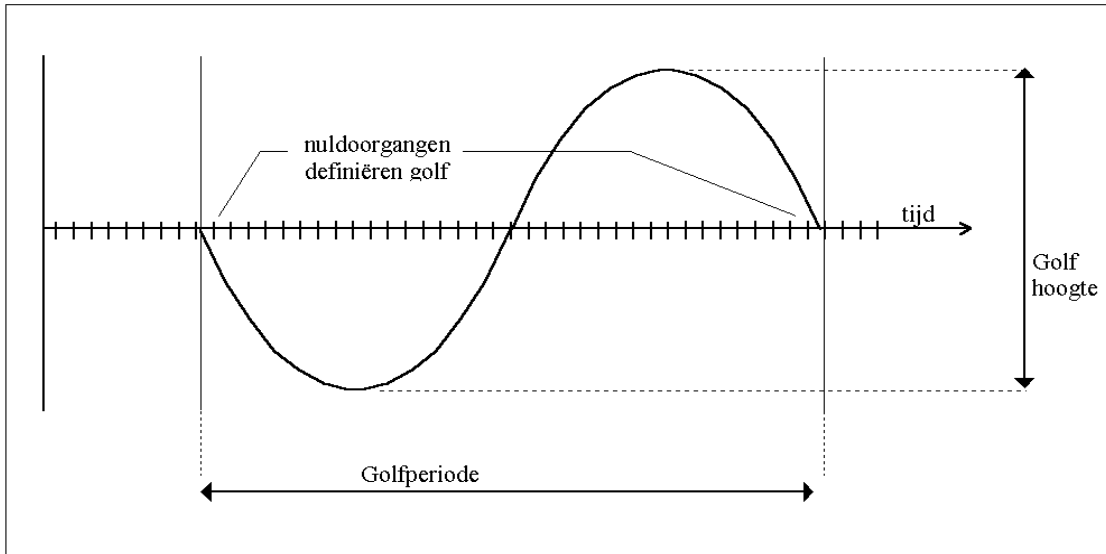
Voorafgaande aan de golfclassificatie (paragraaf 2.3.3) wordt de kamhoogte bepaald. De kamhoogte is gedefinieerd als de maximale positieve waarde van de verticale golfbewegingspunten in de verwerkingsperiode. Foutcodes worden niet meegeteld.

2.3.3 Golfclassificatie

Na de voorbewerking en de kamhoogtebepaling, worden de golven in de verwerkingsperiode geteld en gesorteerd op hoogte en periode. Hiervoor is het nodig een definitie van een golf te geven:

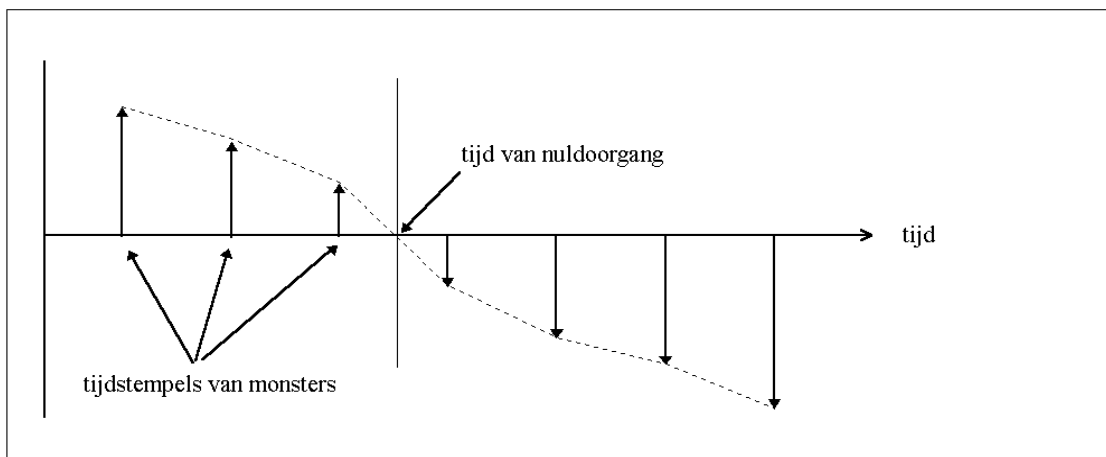
een golf is het gedeelte tussen twee neergaande nuldoorgangen in het golfhoogtesignaal.

De golfperiode is gedefinieerd als het verschil tussen de eindtijd en de begintijd van de golf. De golfhoogte is gedefinieerd als het verschil tussen de maximale positieve en de maximale negatieve waarde in de golfperiode (zie Figuur 2).



Figuur 2 Een golf

Lineaire interpolatie tussen de bemonsterde waarden wordt gebruikt om de nuldoorgangen te bepalen (zie Figuur 3).



Figuur 3 Lineaire interpolatie voor nuldoorgang bepaling

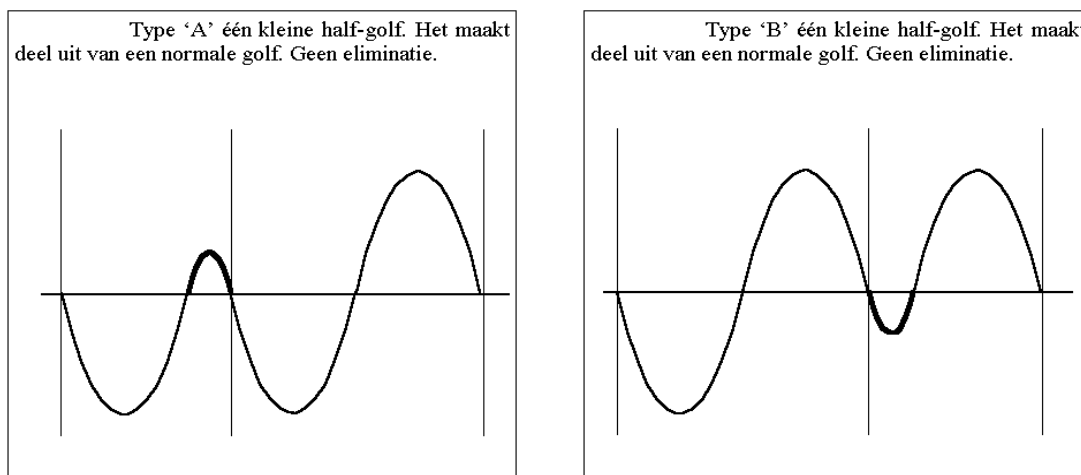
De hierboven gegeven definitie wordt gecompliceerd door de toegevoegde beperking dat twee opeenvolgende 'kleine' half-golven geëlimineerd moeten worden voordat de overige golven geteld en op hoogte en periode gesorteerd kunnen worden. De reden voor de eliminatie van kleine golven is dat kleine golven een extra nuldoorgang introduceren en daarmee de golfperiode en de golfhoogte in tweeën hakken.

Een 'kleine' half-golf is een halve golfperiode die minder dan een seconde duurt. Merk op dat de definitie van een kleine half-golf alleen afhangt van zijn duur en niet van zijn amplitude. Afhankelijk van het teken van de half-golf wordt het ofwel een type 'A' ofwel een type 'B' kleine golf genoemd; Figuur 4 (A en B). In de figuren zijn de kleine half-golven **vet** gedrukt en worden complete golven begrensd door verticale lijnen.

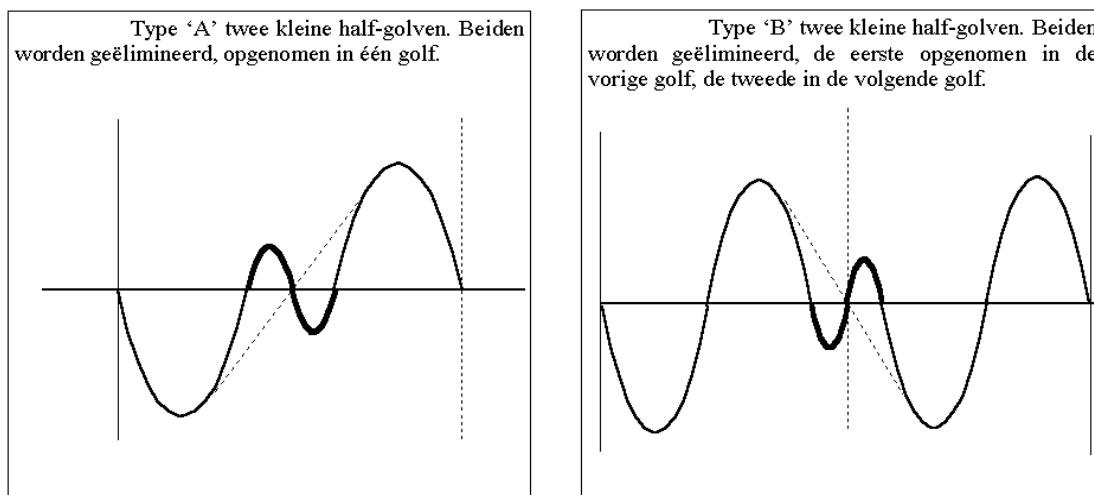
Als er slechts één kleine half-golf gevonden wordt dan is het ofwel het eerste gedeelte (type 'B') ofwel het laatste gedeelte (type 'A') van een normale golf. Echter in het geval er een tweede kleine half-golf op de eerste volgt worden de twee kleine half-golven geëlimineerd door ze op te nemen in normale golven. Twee verschillende situaties kunnen hierbij onderscheiden worden:

- De eerste kleine half-golf is een type 'A' kleine half-golf. In dit geval wordt de eerste kleine half-golf opgenomen in de voorgaande negatieve periode, terwijl de tweede kleine half-golf wordt samengenomen met de volgende positieve periode, resulterend in één golf. Men zegt dat de twee kleine half-golven in het midden van een normale golf zitten. Zie Figuur 5(A).
- De eerste kleine half-golf is een type 'B' kleine half-golf. Nu wordt de eerste klein half-golf opgenomen in de voorgaande positieve periode die het einde is van de vorige golf, terwijl de tweede kleine half-golf wordt samengenomen met de volgende negatieve periode, daarbij een nieuwe golf beginnend, resulterend in twee golven. Zie Figuur 5(B).

Men zegt dat de twee kleine half-golven tussen twee normale golven in zitten.

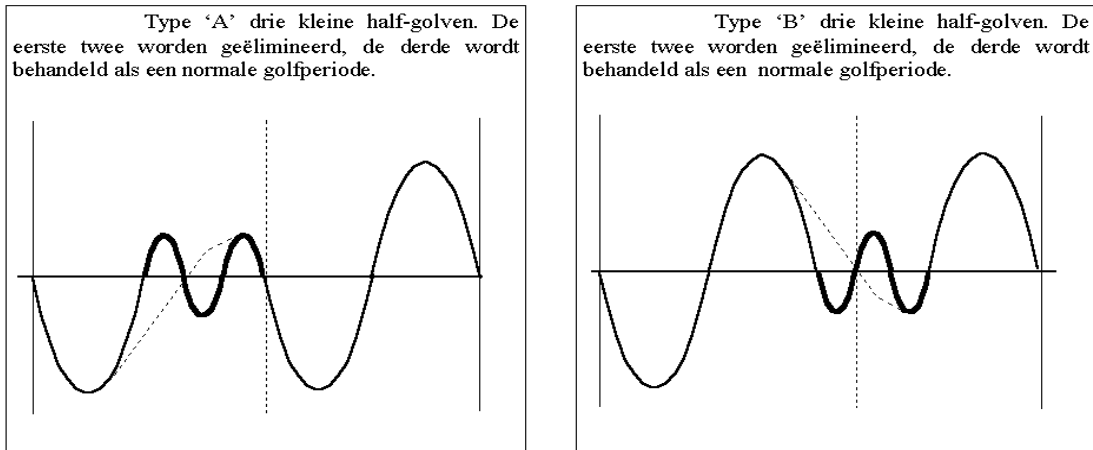


Figuur 4 Eén kleine halfgolf

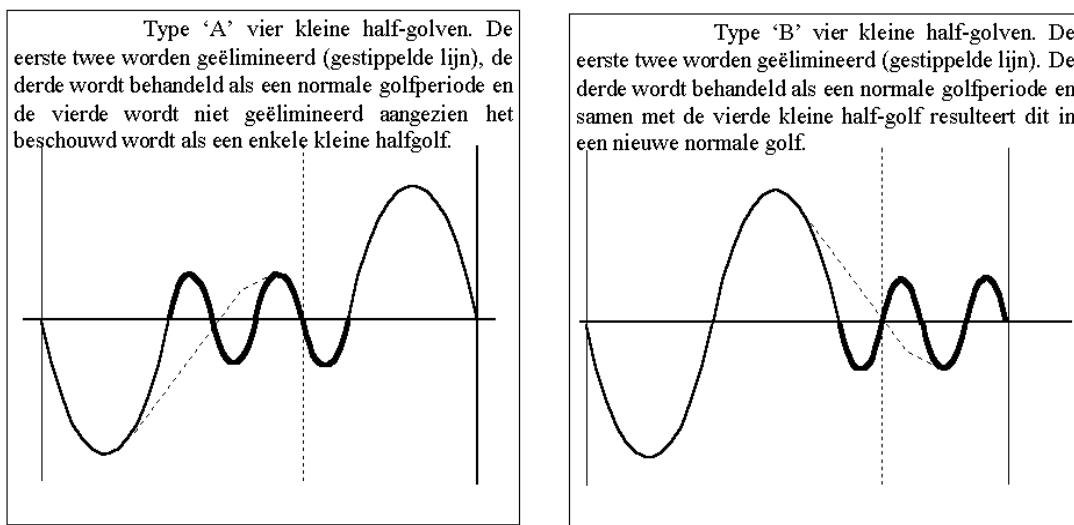


Figuur 5 Twee kleine halfgolven

De gereconstrueerde normale golven worden gemarkeerd door gestippelde lijnen en worden begrensd door verticale lijnen om hun begin- en eindpunt aan te geven. Er kunnen verschillende opeenvolgende kleine half-golven voorkomen. Om te voorkomen dat de golven eindeloos doorgroeien wanneer er meerdere kleine half-golven voorkomen, wordt er een limiet gesteld van twee eliminaties. De derde kleine half-golf wordt behandeld als een normale golfperiode, waarna het eliminatieproces opnieuw kan beginnen. Hoe dit bereikt wordt kan het beste worden uitgelegd aan de hand van de volgende figuren (zie Figuur 6 en Figuur 7).



Figuur 6 Drie kleine halfgolven



Figuur 7 Vier kleine halfgolven

Het valt gemakkelijk in te zien dat, met de bovengenoemde beperking, een reeks van vijf opeenvolgende kleine half-golven hetzelfde is als twee kleine half-golf eliminaties van type 'A' en type 'B' na elkaar. Op dezelfde manier kunnen zelfs nog langere reeksen van kleine half-golven worden gereduceerd tot de situaties afgebeeld in Figuur 6 en Figuur 7.

Ofschoon de foutafhandeling reeds heeft plaatsgevonden (paragraaf 2.2.4) kunnen sommige datapunten nog steeds op foutcode staan. Wanneer er een foutcode wordt aangetroffen wordt de verwerking van de golf afgebroken en wordt de speurtocht naar de volgende golf gestart, te beginnen bij de volgende neergaande nuldoorgang.

Voor alle verwerkte golven worden de hoogte en de periode bepaald zoals gedefinieerd in Figuur 3 en opgeslagen in de golfperiode- en golfhoogtetabellen. Merk op dat alleen volledige golven zonder foutcodes worden opgeslagen: golven met foutcodes erin worden overgeslagen.

Om de partiële gemiddelden te kunnen berekenen (zie volgende paragraaf) worden de golftabellen tweemaal gesorteerd:

- De eerste keer worden ze in volgorde van afnemende golfhoogte gesorteerd (voor het berekenen van de partieel gemiddelde golfhoogte van een bepaald gedeelte van de hoogste golven), waarbij de overeenkomstige golfperiodes ook mee gesorteerd worden (ten behoeve van de partieel gemiddelde periode van 1/3 van de hoogste golven).
- De tweede keer worden ze in volgorde van afnemende periode gesorteerd (voor het berekenen van de partieel gemiddelde periode van 1/3 van de langste golven).

2.3.4 Golfhoogte en -periodemiddeling

De individuele golfhoogtes en golfperiodes van de hierboven bepaalde golven worden gemiddeld om schatters te krijgen voor de golfhoogte en periode. De standaarddeviaties van de golfhoogte en de golfperiode worden berekend uit:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N - 1}$$

waarbij μ de gemiddelde golfhoogte (of golfperiode) is, x_i de individuele golfhoogte (of periode) en N het aantal golven dat meegerekend wordt.

Voor sommige parameters vindt de middeling plaats over een gedeelte van de golven uit de op afnemende grootte gesorteerde golftabel, bijvoorbeeld over 1/3 of 1/10 van de hoogste (langste) golven. Dit aantal is niet noodzakelijkerwijs een geheel getal: een golf ligt misschien slechts gedeeltelijk in het vereiste gebied en wordt daarom overeenkomstig gewogen in de berekeningen. Bijvoorbeeld: het totale aantal gevonden golven is N_T , het gedeelte nodig voor middeling van de golven is $1/P$. Dus is het aantal golven benodigd voor middeling N_T/P . Slechts een geheel aantal N_R golven ligt geheel in dit gebied. De weegfactor voor de N_R+1 -e golf (d.w.z. de hoogste (langste) golf na de N_R -e golf) is $N_T/P - N_R$. In formulevorm:

$$\bar{x} = \frac{\left(\frac{N_T}{P} - N_R\right) x_{N_R+1} + \sum_{n=1}^{N_R} x_n}{\frac{N_T}{P}}$$

Voor de berekening van het partieel gemiddelde van de golven is een minimum aantal golven vereist. Dit aantal wordt op de helft van de waarde van P gesteld (waar nodig naar boven afgerond). Als voorbeeld: $0.5 \cdot 50 \Rightarrow 25$ in geval van het 1/50 partieel gemiddelde en $0.5 \cdot 3 \Rightarrow 2$ in geval van het 1/3 partieel gemiddelde. Als het vereiste minimum aantal golven niet gehaald wordt, wordt het gemiddelde op foutcode gezet.

2.3.5 Berekende parameters

Merk op dat de heavefilters in de Waverider, Directional Waverider en Wavec en het getijfilter toegepast op het Stappenbaaksignaal niet worden gecompenseerd in de tijddomeinanalyse. Dit kan leiden tot een onderschatting van de golfhoogte bij lage frequenties.

In de tijddomeinanalysefase worden de golfperiodes en -hoogtes, hun maxima en hun gemiddelden en standaarddeviaties berekend. Eén parameter betreffende de kwaliteit van de metingen wordt er bepaald: het percentage van de totale verwerkingstijd die in beslag wordt genomen door complete golven in bovenstaande zin des woords.

Voor elke verwerkingsperiode worden de volgende 17 parameters betreffende de golfhoogte en de golfperiode berekend op bovenstaande manier (eenheid van golfhoogte is cm, eenheid van golfperiode is s):

- WTBH(i), $i \in [1,AG]$ Tabel van golfhoogtes.
- WTBT(i), $i \in [1,AG]$ Tabel van golfperiodes.
- AG Totale aantal golven.
- Hmax oogte van de hoogste golf.
- H1/50 Gemiddelde hoogte van de hoogste 1/50 van de golven.
- H1/10 Gemiddelde hoogte van de hoogste 1/10 van de golven.
- H1/3 Gemiddelde hoogte van de hoogste 1/3 van de golven.
- GGH Gemiddelde hoogte van alle golven.
- SPGH Standaarddeviatie van de golfhoogte.
- Tmax Periode van de langste golf.
- THmax Periode van de hoogste golf.

- T1/3 Gemiddelde periode van de langste 1/3 van de golven.
- TH1/3 Gemiddelde periode van de hoogste 1/3 van de golven.
- GGT Gemiddelde periode van alle golven.
- SPGT Standaarddeviatie van de golfperiode.
- HCM Kamhoogte, maximale positieve waarde van alle data binnen één verwerkingsperiode.
- Nwt_zP Som van golfperiodes gedeeld door verwerkingsperiode.

2.4 Spectrale hoogteverwerking

2.4.1 Introductie

Dit hoofdstuk legt de spectrale hoogteverwerking uit. Gedurende deze fase wordt de basis-golfhoogtetijdreeks Fourier-getransformeerd om het energiedichtheidsspectrum te verkrijgen (paragraaf 2.4.2). Dit spectrum wordt in het frequentiedomein geanalyseerd, wat verscheidene frequentie-afhankelijke parameters oplevert. Deze parameters worden gemiddeld over een aantal frequentiebanden om de karakteristieken van deze banden te verkrijgen: de golfenergie, de golfhoogte en de golfperiode worden per band afgeleid.

2.4.2 Samenstelling van het energiedichtheidsspectrum

De verticale bewegingsgegevens bevatten informatie over de frequentie-afhankelijkheid van de energiedichtheidsfunctie, de golfhoogte en de golfperiode. Om deze informatie eruit te halen worden d.m.v. Fourier-transformaties de golfhoogte-frequentiespectra geconstrueerd.

Dit proces vereist 6 stappen die in de volgende subparagrafen in detail worden besproken:

1. De bemonsterde 20-minuten-periode wordt verdeeld in 6 deelreeksen van 200 seconden elk.
2. Een 10% cosinus-tapering wordt toegepast op iedere deelreeks om lek in het frequentie-domein te minimaliseren [6].
3. Een Fast Fourier-transformatie wordt uitgevoerd op elke getaperde deelreeks.
4. Het energiedichtheidsspectrum wordt gevormd d.m.v. optelling van de resulterende golfhoogte-frequentiespectra.
5. Correctiefilters worden toegepast om de eerder toegepaste sensor- en getijfilters te compenseren.
6. Uit het gecorrigeerde 5 mHz resolutie energiedichtheidsspectrum wordt een 10 mHz resolutie energiedichtheidsspectrum afgeleid.

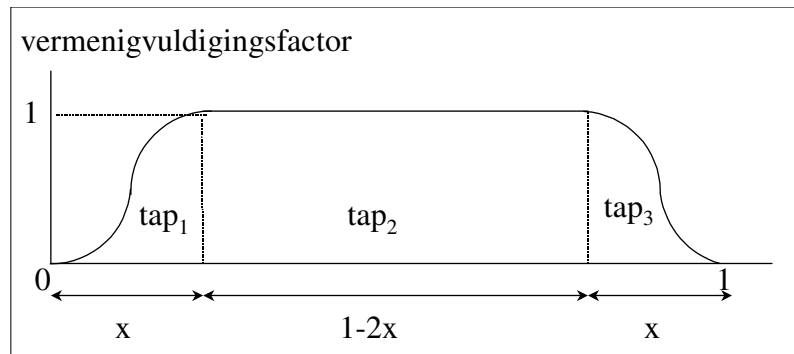
2.4.2.1 Samenstelling van de deelreeksen

Na de voorbereiding geschetst in paragraaf 2.2 wordt de 20-minuten-verwerkingsperiode verdeeld in zes deelreeksen, waarbij elke deelreeks 200 seconden lang is. Het aantal geldige deelreeksen (d.w.z. deelreeksen zonder foutcodes) wordt geteld en alleen de geldige deelreeksen worden gehandhaafd, deelreeksen met foutcodes worden genegeerd. Van elke deelreeks wordt het 200-seconden-gemiddelde verwijderd. (Merk op dat ofschoon het gemiddelde van de gehele 20-minuten-periode reeds verwijderd is (paragraaf 2.2.5), er per 200-seconden-deelreeks nog steeds een afwijking in kan zitten.)

2.4.2.2 Cosinus-tapering

Om lek tussen de frequenties gedurende de Fourier-transformatie te voorkomen, wordt er een cosinus-tapering toegepast op de geldige deelreeksen, d.w.z. de deelreeksen worden vermenigvuldigd met een inverteerbare functie die aan de randen geleidelijk afneemt. De

taperfunctie bestaat uit een opgaand gedeelte tap_1 , een eenheidsdeel tap_2 en een neergaand gedeelte tap_3 dat het gespiegelde is van het eerste deel tap_1 (zie Figuur 8).



Figuur 8 Continue afvlakfunctie in het gebied $\langle 0,1 \rangle$

Het eerste gedeelte tap_1 wordt beschreven door:

$$tap_1(t) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\pi \frac{t}{x}\right) \right]$$

waarbij t loopt van 0 tot x . Als er een discrete, bemonsterde deelreeks getaperd wordt, dan wordt de taperfunctie bemonsterd met hetzelfde aantal punten als de deelreeks. De datapunten van de deelreeks worden vermenigvuldigd met de corresponderende punten van de taperfunctie, wat een getaperde deelreeks oplevert. De componenten van de discrete taperfunctie functie $tap_1(i)$ worden berekend uit:

$$tap_1(i) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\pi \frac{i - 1/2}{Nx}\right) \right]$$

waarbij $i \in [1, \text{int}(N_x)]$ met $\text{int}(N_x)$ het gehele gedeelte van N_x en N het aantal datapunten in de deelreeks. De waarden van $tap_3(i)$ kunnen worden geschreven als een functie van

$$tap_1(i) : tap_3(i) = tap_1(N + 1 - i).$$

Als gevolg van de tapering wordt het totale signaal geschaald met een factor die gelijk is aan de oppervlakte van de taperfunctie, die afhangt van het taperfractie x (in de golfverwerking wordt de waarde $x=0.1$ (10%) genomen). De schaalfactor r is gelijk aan de integraal van het kwadraat van de taperfunctie:

$$r = \int tap_1^2 + \int tap_2^2 + \int tap_3^2$$

$$r = 2 \int_0^x tap_1^2(t) dt + (1 - 2x) = 1 - \frac{5x}{4}$$

waarbij x de taperfractie is (tussen 0 en 0.5, zie Figuur 8). De integraal van de eerste en derde term van de taperfunctie zijn gelijk en zijn samengenomen in de eerste term. Het door de tapering veroorzaakte verlies wordt gecompenseerd door alle datapunten vóór de Fourier-transformatie en de daarop volgende kwadratering van de absolute waarden te vermenigvuldigen met de wortel van de inverse van de schaalfactor $\sqrt{1/r}$. Merk op dat de schaalfactor wordt bepaald uit de continue taperfunctie en niet door de integraal van de bemonsterde taperfunctie te berekenen.

2.4.2.3 Fourier-transformatie

Met de bemonsteringsfrequenties van de sensoren binnen Rijkswaterstaat (1,28 en 2,56 Hz) is het aantal datapunten in elke deelreeks een macht van twee, wat het mogelijk maakt een radix-2 Fast Fourier-transformatie te gebruiken. Voor elke geldige deelreeks levert de Fourier-transformatie een complex spectrum op met componenten FZ_f tussen 0 Hz en de Nyquist-frequentie (die gelijk is aan de halve bemonsterings-frequentie) en een resolutie $\Delta f = 1/(\text{lengte van deelreeks})$ Hz. De definitie van de Fourier-transformatie zoals gebruikt binnen de golfverwerking luidt:

$$FZ_m = \sum_{n=1}^N Z_n e^{-2\pi i(m-1)(n-1)/N}$$

waar FZ_m de $m - e$ spectrale component van de Fourier-transformatie is en m gehele waarden heeft in het interval $[1, N]$, Z_n de monsters van de tijdreeks zijn en N het aantal datapunten in één deelreeks is.

Negatieve frequenties worden genegeerd, en m is daarom beperkt tot het interval $[1, (N/2)+1]$. The frequentie f en de index m zijn gerelateerd volgens de formule $f = (m - 1)\Delta f$ waarbij Δf gelijk is aan de spectrale resolutie ($=0.005$ Hz). De laagste frequentie is 0 Hz, de maximum frequentie hangt af van de bemonsteringsfrequentie SR en is gelijk aan de Nyquist-frequentie $SR / 2$. Dit levert uiteindelijk de spectrale componenten FZ_f op (waar de frequentie f gerelateerd is aan m zoals hierboven beschreven is): $FZ_0, FZ_{0.005}, FZ_{0.010}, \dots, FZ_{N/2*0.005}$.

2.4.2.4 Het 5 mHz energiedichtheidsspectrum

Na de Fourier-transformatie worden de spectrale componenten FZ_f van iedere deelreeks vermenigvuldigd met hun complex geconjugeerde FZ_f^* en opgeteld om een reëel spectrum te krijgen. Dit spectrum wordt vervolgens omgezet naar een energiedichtheidsspectrum. Normalisatie vindt plaats over het aantal geldige deelreeksen. De componenten van het resulterende energiedichtheidsspectrum zijn gelijk aan (met de complexe spectrale componenten in reële en imaginaire delen opgesplitst):

$${}_5 C_{zz}(f) = \frac{1}{nN} \frac{2}{SR} \sum_{i=1}^n \text{Re}(i FZ_f) \text{Re}(i FZ_f) + \text{Im}(i FZ_f) \text{Im}(i FZ_f) \text{ waarin } SR \text{ de}$$

bemonsteringsfrequentie in Hz, N het aantal datapunten binnen een deelreeks, n het aantal geldige deelreeksen, en de factor 2 een gevolg van het omzetten naar een enkelzijdig spectrum. De functies Re en Im nemen het reële respectievelijk het imaginaire gedeelte van hun complexe argumenten. Het subscript ${}_5$ geeft aan dat de resolutie van het energiedichtheidsspectrum 5 mHz is.

Het resultaat is een ongecorrigeerd enkelzijdig energiedichtheidsspectrum bestaande uit de spectrale componenten ${}_5 C_{zz}(f)$.

2.4.2.5 Correctiefilers

In de Wavec, de Directional Waverider en de Waverider worden hoogdoorlaatfilters gebruikt die zowel de amplitude- als de fasekarakteristieken van het signaal beïnvloeden, om te voorkomen dat het signaal gaat afwijken in het frequentiebereik waar het sensorgedrag niet gedefinieerd is. Een heavecorrectie-filter wordt toegepast op de spectra van de Waverider, Directional Waverider en Wavec data om de filterkarakteristieken van het heavefilter in de sensoren te compenseren. De spectrale componenten ${}_5 C_{zz}(f)$ van het energiedichtheidsspectrum bepaald volgens paragraaf 2.4.2.4 worden vermenigvuldigd met een frequentie- en sensor-afhankelijke correctiefactor $H_f(f)$

is de frequentie in Hz, wat een veelvoud is van de resolutie zoals in paragraaf 2.4.2.3: 0.005 Hz) om zo de gecorrigeerde componenten ${}_5C_{zz}^c(f)$ te verkrijgen:

Correctie voor Wavec en Waverider [7]:

$${}_5C_{zz}^c(f) = {}_5C_{zz}(f)H_f$$

$$H_f = R_f^2 + I_f^2$$

$$R_f = 1 - a_f^2 - a_f b_f \sqrt{2}$$

$$I_f = a_f^2 b_f - a_f \sqrt{2 - b_f}$$

$$a_f = \frac{1}{30.8 * f}$$

$$b_f = \frac{1}{170 * f}$$

Correctie voor Directional Waverider [8]:

$${}_5C_{zz}^c(f) = {}_5C_{zz}(f)H_f$$

$$H_f = 1 + a_f^6$$

$$a_f = \frac{1}{30.8 * f}$$

Het getijfilter dat wordt toegepast op de Stappenbaakgegevens zoals beschreven in paragraaf 2.2.3 is een hoogdoorlaatfilter met een kantelpunt bij 30 mHz, dat eveneens het signaal wijzigt. Enige invloed van het filter is nog steeds merkbaar boven de 30 mHz en dit wordt gecorrigeerd door de spectrale componenten van het energiedichtheidspectrum te vermenigvuldigen met een frequentie-afhankelijke factor $G_f[1]$:

Correctie voor Stappenbaak:

$${}_5C_{zz}^c(f) = {}_5C_{zz}(f)G_f$$

$$G_f = \left[1 - \left(\frac{\sin(M\pi f/SR)^4}{M\sin(\pi f/SR)} \right) \right]^{-2}$$

waar SR de bemonsteringsfrequentie weergeeft en M (zoals bepaald in paragraaf 2.2.3) de breedte van een filtersectie is zodanig dat het kantelpunt ongeveer bij 30 mHz ligt. Het superscript c dat de gecorrigeerde spectra aangeeft zal in het vervolg worden weggelaten.

2.4.2.6 Het 10 mHz energiedichtheidsspectrum

De bandparameters die in de volgende paragraaf worden berekend zijn gebaseerd op een 10 mHz resolutie spectrum, waarvan de componenten kunnen worden verkregen door de 5 mHz resolutie spectrum componenten te middelen (wat effectief neerkomt op het halveren van het aantal frequentiepunten):

$${}_{10}C_{zz}(f) = \frac{{}_5C_{zz}(f-\Delta f)}{4} + \frac{{}_5C_{zz}(f)}{2} + \frac{{}_5C_{zz}(f+\Delta f)}{4}$$

waarin Δf de resolutie van het 5 mHz spectrum in Hz is (d.w.z. 0.005 Hz). De componenten van het 10 mHz spectrum zijn gedefinieerd op frequenties f die veelvouden zijn van de spectrale resolutie (0.010 Hz) beginnend bij 0 Hz.

In het geval dat één van de 5 mHz spectrale componenten niet beschikbaar is, wordt de corresponderende 10 mHz component op foutcode gezet.

2.4.3 Energiedichtheidsspectrumparameters

Er zijn verscheidene frequentiebanden gedefinieerd waarover een paar karakteristieke parameters worden bepaald: de golfenergie (paragraaf 2.4.3.2), de golfhoogte (paragraaf 2.4.3.3) en de golfperiode (paragraaf 2.4.3.4). Voor deze berekeningen zijn verschillende momenten van het energiedichtheidsspectrum nodig, die worden beschreven in paragraaf 2.4.3.1.

2.4.3.1 Momenten

De bandparameters worden berekend met behulp van de momenten van het 5 mHz of het 10 mHz resolutie energiedichtheidsspectrum. Het n^{de} orde moment van een spectrumband is gedefinieerd als:

$$M_n = \Delta f \left[\frac{1}{2} l^n C_{zz}(l) + \sum_{f=l+\Delta f}^{h-\Delta f} f^n C_{zz}(f) + \frac{1}{2} h^n C_{zz}(h) \right]$$

waar l de ondergrens van de band is, h de bovengrens en Δf de resolutie van het spectrum in Hz.

2.4.3.2 Golfenergie

De golfenergie per frequentieband is gelijk aan de som van de componenten van het 10 mHz resolutie energiedichtheidsspectrum vermenigvuldigd met de spectrale resolutie. De bandenergie is daarom gelijk aan M_0 zoals gedefinieerd in de vorige subparagraaf.

2.4.3.3 Golfhoogte

Aangezien de golfenergie evenredig is met het kwadraat van de golfhoogte, kan een schatter voor de golfhoogte over een frequentieband worden afgeleid uit de bandenergie. De volgende formule wordt hiervoor gebruikt:

$$H = 4\sqrt{M_0}$$

waar M_0 is gedefinieerd over de gewenste frequentieband met gebruikmaking van het 10 mHz energiedichtheidsspectrum.

2.4.3.4 Golfperiode

De golfperiode over een specifieke frequentieband is gedefinieerd als de reciproke van het gewogen gemiddelde van de frequentie over de band. Twee verschillende golfperiodes worden gegeven:

$$\text{gemiddelde periode} = \sqrt{\frac{M_0}{M_2}}$$

$$\text{min eerste moment periode} = \frac{M_{-1}}{M_0}$$

waarbij de momenten van het 10 mHz energiedichtheidsspectrum worden gebruikt. In geval de noemer in één van beide bovenstaande uitdrukkingen nul is, wordt de waarde voor de golfperiode op foutcode gezet.

2.4.4 Berekenende parameters

De volgende parameters worden berekend gedurende de spectrale hoogteverwerkingsfase. Merk op dat de grenzen van de intervallen hieronder meetellen. De eenheid voor golfhoogte is cm, energiedichtheid wordt gegeven in cm^2/s , energie in cm^2 , periode in s en frequentie in mHz. De parameters in frequentiebanden tot 1000 mHz kunnen alleen worden berekend voor sensoren met een bemonsteringsfrequentie $SR = 2$ Hz. De Wavec en de Directional Waverider voldoen niet aan deze eis aangezien hun bemonsteringsfrequentie 1.28 Hz bedraagt.

- $C_{zz5}(i)$, $i \in [0,100]$ 5 mHz energiedichtheidsspectrum ${}_5C_{zz}(f)$. $C_{zz5}(i) = {}_5C_{zz}(f)$ met $f = i * 5$ mHz, $f \in [0,500]$ mHz
- $C_{zz5_M}(i)$, $i \in [0,200]$ 5 mHz energiedichtheidsspectrum ${}_5C_{zz}(f)$. $C_{zz5_M}(i) = {}_5C_{zz}(f)$ met $f = i * 5$ mHz, $f \in [0,1000]$ mHz
- $C_{zz10}(i)$, $i \in [0,50]$ 10 mHz energiedichtheidsspectrum ${}_{10}C_{zz}(f)$. $C_{zz10}(i) = {}_{10}C_{zz}(f)$ met $f = i * 10$ mHz, $f \in [0,500]$ mHz
- $C_{zz10_M}(i)$, $i \in [0,100]$ 10 mHz energiedichtheidsspectrum ${}_{10}C_{zz}(f)$. $C_{zz10_M}(i) = {}_{10}C_{zz}(f)$ met $f = i * 10$ mHz, $f \in [0,1000]$ mHz
- M0 Bandenergie uit ${}_{10}C_{zz}(f)$ in het bereik $f \in [30,500]$ mHz
- Hm0 Significante golfhoogte uit M0
- M0_M Bandenergie uit ${}_{10}C_{zz}(f)$ in het bereik $f \in [30,1000]$ mHz
- Hm0_M Significante golfhoogte uit M0_M
- Tm02 Gemiddelde periode uit M0 en M2 in het bereik $f \in [30,500]$ mHz
- Tm02_M Gemiddelde periode uit M0 en M2 in het bereik $f \in [30,1000]$ mHz
- TE0 Bandenergie uit ${}_{10}C_{zz}(f)$ in het bereik $f \in [500,1000]$ mHz
- TE1 Bandenergie uit ${}_{10}C_{zz}(f)$ in het bereik $f \in [200,500]$ mHz
- TE1_M Bandenergie uit ${}_{10}C_{zz}(f)$ in het bereik $f \in [200,1000]$ mHz
- TE2 Bandenergie uit ${}_{10}C_{zz}(f)$ in het bereik $f \in [100,200]$ mHz
- TE3 Bandenergie uit ${}_{10}C_{zz}(f)$ in het bereik $f \in [30,100]$ mHz
- HTE3 Golfhoogte uit TE3
- Fp Frequentie f waar ${}_{10}C_{zz}(f)$ zijn maximum heeft in het bereik $f \in [30,500]$ mHz
- Fp_M Frequentie f waar ${}_{10}C_{zz}(f)$ zijn maximum heeft in het bereik $f \in [30,1000]$ mHz

- HS7 Golfhoogte uit bandenergie uit ${}_5C_{zz}(f)$ in het bereik $f \in [30,142.5]$ mHz¹
- Tm-10 Min-eerste momentperiode uit M_{-1} en M_0 in het bereik $f \in [30,500]$ mHz
- Tm-10_M Min-eerste momentperiode uit M_{-1} en M_0 in het bereik $f \in [30,1000]$ mHz
- Ndlr_H Kwaliteitsparameter: aantal geldige deelreeksen
- AV10_H Theoretische aantal vrijheidsgraden van het energiedichtheidspectrum (= 4 * Ndlr_H)

2.5 Spectrale richtingsverwerking

2.5.1 Introductie

De gegevens over zowel de verticale als de horizontale beweging worden geanalyseerd in het frequentiedomein om de richtingsparameters te verkrijgen. De spectrale verwerking van de verticale beweging is reeds in detail beschreven in het voorgaande hoofdstuk, dit hoofdstuk richt zich op de spectrale richtingsverwerking. Uit de auto-, co- en quad-spectra (zie paragraaf 2.5.2) worden vier typen parameters berekend:

1. Fourier-coëfficiënten (paragraaf 2.5.3),
2. Richtingsspectra (paragraaf 2.5.5),
3. Richtingsspectrumparameters (paragraaf 2.5.6),
4. Bandparameters (paragraaf 2.5.7).

2.5.2 Samenstelling van auto-, co- en quad-spectra

In totaal worden negen spectra samengesteld: drie auto-spectra, drie co-spectra en drie quad-spectra. De spectra worden bepaald analoog aan het energiedichtheidspectrum in paragraaf 2.4.2 en zullen worden aangeduid met C_{zz} , C_{xx} , C_{yy} , C_{zx} , C_{zy} , C_{xy} , Q_{zx} , Q_{zy} en Q_{xy} met x en y die de twee orthogonale componenten van de horizontale beweging aangeven en z die de verticale beweging aangeeft. Slechts acht van de spectra worden gebruikt voor de berekening van de richtingsparameters, Q_{xy} wordt niet gebruikt.

2.5.2.1 Deelreeksamenstelling, cosinus-tapering en Fourier-transformatie

Om de auto-, co- en quad-spectra te verkrijgen wordt elk van de drie signalen (x, y, en z) verwerkt op precies dezelfde manier als beschreven in paragraaf 2.4.2.1. De resulterende geldige deelreeksen worden daarna getaperd met een cosinus zoals beschreven in paragraaf 2.4.2.2 en Fourier-getransformeerd zoals in paragraaf 2.4.2.3, resulterend in de drie spectra: FZ, FX and FY.

2.5.2.2 De 5 mHz auto-, co- en quad-spectra

Gegevens in de verticale richting en in de twee horizontale richtingen zijn nodig om spectrale richtingsverwerking te kunnen doen. Zelfs als de gegevens slechts in één richting ontbreken kan de richtingsverwerking niet plaatsvinden. Hieruit vloeit voort dat alleen groepen geldige

¹ Deze specifieke golfhoogteparameter wordt berekend over 1/7^{de} van het 1000 mHz spectrum. De ondergrens van deze band wordt op 30 mHz gesteld aangezien de sensoren beneden 30 mHz niet gedefinieerd zijn. De bovengrens van 1000/7 mHz wordt afgerond op 142.5 mHz. De golfhoogteparameter wordt berekend met de volgende formule:

$$HS7 = 4 \sqrt{\frac{1}{2} C_{zz}(l) \Delta f + \Delta f \sum_{f=l+\Delta f}^h f^n C_{zz}(f)}$$

waar $C_{zz}(h)$ de energiedichtheid is bij $h = 140$ mHz (het interval 137.5-142.5 mHz) en $C_{zz}(l)$ de energiedichtheid bij $l = 30$ mHz. Merk op dat in dit specifieke geval het 5 mHz resolutie energiedichtheidspectrum wordt gebruikt.

deelreeksen kunnen worden gebruikt, waarbij een groep gedefinieerd is als een combinatie van drie deelreeksen (één in elke richting en in tijd overeenkomstig).

De auto-spectra worden samengesteld overeenkomstig aan paragraaf 2.4.2.4 (resultierend in de spectra ${}_5C_{zz}$, ${}_5C_{xx}$ en ${}_5C_{yy}$ met spectrale componenten ${}_5C_{zz}(f)$, ${}_5C_{xx}(f)$ en ${}_5C_{yy}(f)$), maar in plaats van te normeren over het aantal geldige deelreeksen, wordt er genormeerd over het aantal groepen n van geldige deelreeksen. SR is de bemonsteringsfrequentie en N het aantal datapunten binnen een deelreeks:

$${}_5C_{zz}(f) = \frac{1}{nN} \frac{2}{SR} \sum_{i=1}^n \operatorname{Re}(iFZ_f) \operatorname{RE}(iFZ_f) + \operatorname{Im}(iFZ_f) \operatorname{Im}(iFZ_f)$$

$${}_5C_{xx}(f) = \frac{1}{nN} \frac{2}{SR} \sum_{i=1}^n \operatorname{Re}(iFZ_f) \operatorname{RE}(iFZ_f) + \operatorname{Im}(iFZ_f) \operatorname{Im}(iFZ_f)$$

$${}_5C_{yy}(f) = \frac{1}{nN} \frac{2}{SR} \sum_{i=1}^n \operatorname{Re}(iFZ_f) \operatorname{RE}(iFZ_f) + \operatorname{Im}(iFZ_f) \operatorname{Im}(iFZ_f)$$

De drie co-spectra ${}_5C_{xy}$ worden analoog geconstrueerd (normerend over het aantal geldige groepen n):

$${}_5C_{zx}(f) = \frac{1}{nN} \frac{2}{SR} \sum_{i=1}^n \operatorname{Re}(iFZ_f) \operatorname{RE}(iFZ_f) + \operatorname{Im}(iFZ_f) \operatorname{Im}(iFZ_f)$$

$${}_5C_{zy}(f) = \frac{1}{nN} \frac{2}{SR} \sum_{i=1}^n \operatorname{Re}(iFZ_f) \operatorname{RE}(iFZ_f) + \operatorname{Im}(iFZ_f) \operatorname{Im}(iFZ_f)$$

$${}_5C_{xy}(f) = \frac{1}{nN} \frac{2}{SR} \sum_{i=1}^n \operatorname{Re}(iFZ_f) \operatorname{RE}(iFZ_f) + \operatorname{Im}(iFZ_f) \operatorname{Im}(iFZ_f)$$

De twee quad-spectra ${}_5Q_{zx}$ en ${}_5Q_{zy}$ worden beschreven met de volgende formules (normerend over het aantal geldige groepen n):

$${}_5Q_{zx}(f) = \frac{1}{nN} \frac{2}{SR} \sum_{i=1}^n \operatorname{Im}(iFZ_f) \operatorname{Re}(iFX_f) - \operatorname{Im}(iFX_f) \operatorname{Re}(iFZ_f)$$

$${}_5Q_{zy}(f) = \frac{1}{nN} \frac{2}{SR} \sum_{i=1}^n \operatorname{Im}(iFZ_f) \operatorname{Re}(iFX_f) - \operatorname{Im}(iFX_f) \operatorname{Re}(iFZ_f)$$

Merk op dat het quad-spectrum ${}_5Q_{xy}$ niet wordt gebruikt.

2.5.2.3 Correctiefilters

De benodigde correctiefilters voor de spectrale hoogteverwerking zijn beschreven in paragraaf 2.4.2.5, maar voor de spectrale richtingsverwerking moeten alle of de meeste (afhankelijk van het sensortype: Wavec of Directional Waverider) van de auto-, co- en quad-spectra worden gecorrigeerd.

De correcties op de verschillende auto-, co- en quad-spectra van de Wavec worden hieronder beschreven (Merk op dat ${}_5C_{xx}$, ${}_5C_{yy}$ en ${}_5C_{xy}$ onveranderd blijven en dat ${}_5Q_{xy}$ niet gebruikt wordt), met de factoren H_f , R_f en I_f zoals beschreven in paragraaf 2.4.2.5:

$${}_5C_{zz}^c(f) = {}_5C_{zz}(f)H_f$$

$${}_5C_{zx}^c(f) = {}_5C_{zx}(f)R_f - {}_5Q_{zx}(f)I_f$$

$${}_5C_{zy}^c(f) = {}_5C_{zy}(f)R_f - {}_5Q_{zy}(f)I_f$$

$${}_5Q_{zx}^c(f) = {}_5Q_{zx}(f)R_f + {}_5C_{zx}(f)I_f$$

$${}_5Q_{zy}^c(f) = {}_5Q_{zy}(f)R_f + {}_5C_{zy}(f)I_f$$

Heave filtercorrectie voor de Directional Waverider wordt bereikt door alle elementen van de drie auto-, drie co- en twee quad-spectra te vermenigvuldigen met dezelfde correctiefactor als beschreven in paragraaf 2.4.2.5. Vanaf heden zal het superscript c dat de gecorrigeerde spectra aangeeft worden weggelaten.

2.5.2.4 De 10 mHz spectra

Uit de 5 mHz resolutie spectra worden de 10 mHz resolutie spectra verkregen analoog aan paragraaf 2.4.2.6. Deze 10 mHz spectra zullen worden aangegeven met het subscript 10.

2.5.3 Fourier-coëfficiënten

Het is niet mogelijk de complete richtingsenergieverdeling van de golven te reconstrueren uit de boeigegevens. Het is echter wel mogelijk om de eerste vier Fourier-coëfficiënten van de richtingsenergieverdeling te berekenen, die gebruikt worden om de hoofdrichting, spreiding, scheefheid en slankheid van de richtingsenergieverdeling te bepalen. Deze eerste vier Fourier-coëfficiënten van het richtingsenergieverdelings-spectrum kunnen direct worden berekend uit de acht auto-, co- en quad-spectra:

$$A_1(f) = \frac{Q_{zx}(f)}{W(f)C_{zz}(f)}$$

$$A_2(f) = \frac{C_{xx}(f) - C_{yy}(f)}{C_{xx}(f) + C_{yy}(f)}$$

$$B_1(f) = \frac{Q_{zy}(f)}{W(f)C_{zz}(f)}$$

$$B_2(f) = \frac{2C_{xy}(f)}{C_{xx}(f) + C_{yy}(f)}$$

waarbij $W(f)$ het golfgetal is. Merk op dat de spectra van de aldus verkregen Fourier-coëfficiënten dezelfde resolutie hebben als de auto-, co- en quad-spectra waaruit ze afgeleid worden (5 of 10 mHz).

2.5.4 Gecentreerde fourier-coëfficiënten

Gecentreerde Fourier-coëfficiënten worden gebruikt om de spreiding, scheefheid en slankheid van de richtingsverdeling te berekenen en worden gedefinieerd door:

$$m_1(f) = \sqrt{(A_1(f))^2 + (B_1(f))^2}$$

$$m_2(f) = A_2(f) \cos 2\theta_m(f) + B_2(f) \sin 2\theta_m(f)$$

$$n_1 = 0$$

$$n_2(f) = B_2(f) \cos 2\theta_m(f) - A_2(f) \sin 2\theta_m(f)$$

De coëfficiënten zijn gecentreerd rond de richting $\theta_m(f)$, welke *niet* de nautische hoofdrichting $\theta_0(f)$ is (zie paragraaf 2.5.5.1). Merk op dat de gecentreerde Fourier-coëfficiënten alleen bestaan als de normale Fourier-coëfficiënten (zie voorgaande subparagraaf) kunnen worden bepaald.

2.5.5 Richtingsspectra

Er worden twee richtingsspectra bepaald tijdens de spectrale richtingsverwerking:

1. Het hoofdrichtingsspectrum,
2. Het richtings spreidingspectrum.

Let op het verschil tussen deze parameters (die functies van de frequentie zijn) en de gemiddelde hoofdrichting en gemiddelde spreiding als richtingsspectrumparameters en als bandparameters. Beide spectra worden uit de 10 mHz spectra berekend.

2.5.5.1 Hoofdrichtingsspectrum

De laagste Fourier-coëfficiënten bepalen een hoek die kan worden beschouwd als de hoofdrichting. Dit hoofdrichtingsspectrum is zo gedefinieerd dat een 0°-hoek aangeeft dat de golven zich oostwaarts van de sensor af bewegen en een 90°-hoek noordwaarts bewegende golven aangeeft:

$$\tan \theta_m(f) = \frac{B_1(f)}{A_1(f)}$$

Echter, volgens de nautische conventie is de golf richting de richting vanwaar de golven zich naar de sensor toe bewegen, waarbij een 0°-hoek aangeeft dat de golven uit het noorden komen en een 90°-hoek uit het oosten komende golven aangeeft.

Het nautische hoofdrichtingsspectrum $\theta_0(f) \in [0^\circ; 360^\circ]$ wordt gegeven door:

$$\tan \theta_0(f) = \frac{-A_1(f)}{-B_1(f)}$$

Om de singulariteit bij $B_1(f) = 0$ kwijt te raken kan de uitdrukking herschreven worden met een sinus, wat oplevert:

$$\sin \theta_0(f) = \frac{-A_1(f)}{\sqrt{(A_1(f))^2 + (B_1(f))^2}}$$

De tekens van de Fourier-coëfficiënten $A_1(f)$ en $B_1(f)$ bepalen het interval waarin $\theta_0(f)$ gevonden wordt (grenzen aangegeven met rechte haken worden meegerekend, die aangegeven met punthaken niet). Zie Tabel 2 en Tabel 3:

Tabel 2 $\theta_0(f)$ -gebied bepaald door het teken van $A_1(f)$

Teken $A_1(f)$	van	bereik van $\theta_0(f)$	$\theta_0(f)$	als	$B_1(f)$
positief		$[180^\circ, 360^\circ)$	270°		
negatief		$[0^\circ, 180^\circ)$	90°		

Tabel 3 $\theta_0(f)$ -gebied bepaald door het teken van $B_1(f)$

Teken $B_1(f)$	van	bereik van $\theta_0(f)$	$\theta_0(f)$	als	$B_1(f)$
positief		$[90^\circ, 270^\circ)$	180°		
negatief		$[0^\circ, 90^\circ) \cup [270^\circ, 0^\circ, 360^\circ)$	0°		

In geval $A_1(f)$ en $B_1(f)$ allebei nul zijn wordt $\theta_0(f)$ op foutcode gezet.

De aldus verkregen hoek is zodanig gedefinieerd dat golven die een hoek van 0° hebben vanaf het magnetische noorden komen. Om de kleine afwijking tussen de magnetische polen en de werkelijke polen te compenseren, wordt er een θ_0 -correctiehoek $\delta\theta$ bij $\theta_0(f)$ opgeteld. De resulterende $\theta_0(f)$ wordt geconverteerd naar het gebied $[0^\circ, 360^\circ)$. De grootte van de correctie $\delta\theta$ en zijn jaarlijks variatie hangt af van de lokatie van de sensor en kan op kaarten of in tabellen gevonden worden.

2.5.5.2 Richtingsspreidingspectrum

Het richtingsspreidingspectrum $\sigma(f)$ wordt berekend volgens:

$$\sigma(f) = \sqrt{2(1 - m_1(f))}$$

waar $m_1(f)$ de gecentreerde Fourier-coëfficiënt rond de hoofdrichting $\theta_m(f)$ is zoals gedefinieerd in paragraaf 2.5.4 is. Als $m_1(f) \geq 1$ of als $A_1(f)$ of $B_1(f)$ niet kunnen worden bepaald wordt $\sigma(f)$ op foutcode gezet. De richtingsspreiding wordt verkregen in radialen en moet voor omrekening naar graden vermenigvuldigd worden met een factor $180 / \pi$.

2.5.6 Richtingsspectrumparameters

Er zijn twee types richtingsspectrumparameters:

1. Gemiddelde hoofdrichtingen,
2. Gemiddelde spreiding.

De richtingsspectrumparameters worden berekend uit de 10 mHz spectra.

2.5.6.1 Gemiddelde hoofdrichting

De richtingsspectrumparameters bevatten twee gemiddelde hoofdrichtingen, één in de band [30, 500] mHz en de andere in de band [30, 100] mHz. De berekening van de gemiddelde hoofdrichting wordt besproken in paragraaf 2.5.7.4.

2.5.6.2 Gemiddelde spreiding

Van de richtingsspectrumparameters wordt de gemiddelde spreiding berekend in de band [30, 500] mHz. De precieze definitie wordt gegeven in paragraaf 2.5.7.5.

2.5.7 Bandparameters

Over verscheidene frequentiebanden worden de golfhoogte, het aantal vrijheidsgraden van de energiedichtheid, de gemiddelde hoofdrichting, de gemiddelde spreiding, de gemiddelde scheefheid, de gemiddelde slankheid en de gemiddelde frequentie berekend. Tabel 4 geeft een lijst van die frequentiebanden, terwijl de berekening van de verschillende bandparameters wordt besproken in de subparagrafen hieronder. De in de formules van de bandparameters gebruikte definities worden gegeven in paragraaf 2.5.7.1.

Tabel 4 Frequentiebanden

Bandnaam	Ondergrens (mHz)	Bovengrens (mHz)	Resolutie (mHz)
B0	30	500	5
B1	200	500	5
B2	100	200	5
B3	30	100	5
B4	$(f_{\max} - \Delta f), f_{\max} \in [30, 500]$	$(f_{\max} + \Delta f), f_{\max} \in [30, 500]$	5
G1	30	45	5
G2	45	60	5
G3	60	85	5
G4	85	100	5
G5	100	125	5
G6	125	165	5
G7	165	200	5
G8	200	250	5
G9	250	335	5
G10	335	500	5
-	30	500	10
-	30	100	10

Merk op dat in de bepaling van de grenzen van de band B4 f_{\max} gedefinieerd is als de frequentie met de hoogste energiedichtheid in het bereik [30, 500] mHz en Δf de resolutie van de spectra is.

2.5.7.1 Definities

Om de bandparameters voor de hierboven gedefinieerde frequentiebanden te berekenen worden de volgende definities gebruikt, waar Δf de resolutie van de spectra in H_z , f de frequentie in H_z , en l en h de onder- respectievelijk de bovengrens van de frequentie-band aangeven. De Fourier-coëfficiënten A_1 , A_2 , B_1 en B_2 worden aangegeven met X_n . Een horizontaal streepje boven een parameter geeft aan dat dit een gemiddelde waarde is:

Het n^e moment:

$$M_n = \Delta f \left[\frac{1}{2} l^n C_{zz}(l) + \sum_{f=l+\Delta f}^{h-\Delta f} f^n C_{zz}(f) + \frac{1}{2} h^n C_{zz}(h) \right]$$

Totaal van het kwadraat van de energie:

$$S = (\Delta f)_{zz}^2(l) + \sum_{f=l+\Delta f}^{h-\Delta f} C_{zz}^2(f) + \frac{1}{2} C_{zz}^2(h)$$

Gemiddelde Fourier-coëfficiënten:

$$\bar{X}_n = \Delta f \frac{\frac{1}{2} X_n(l) C_{zz}(l) + \sum_{f=l+\Delta f}^{h-\Delta f} X_n(f) C_{zz}(f) + \frac{1}{2} X_n(h) C_{zz}(h)}{M_0}$$

Gemiddelde gecentreerde Fourier-coëfficiënten:

$$\bar{m}_1 = \sqrt{\bar{A}_1^2 + \bar{B}_1^2}$$

$$\bar{m}_2 = \bar{A}_2 \cos 2\theta_m + \bar{B}_2 \sin 2\theta_m$$

$$\bar{n}_2 = \bar{B}_2 \cos 2\theta_m - \bar{A}_2 \sin 2\theta_m$$

met θ_m zoals in paragraaf 2.5.5.1.

2.5.7.2 Golfhoogte

Zoals vermeld in paragraaf 2.4.3.3, kan de golfhoogte per frequentieband bepaald worden door:

$$H = 4\sqrt{M_0}$$

2.5.7.3 Vrijheidsgraden van de energiedichtheid

Het aantal vrijheidsgraden van de energiedichtheid per frequentieband wordt gedefinieerd door:

$$N = \frac{M_0^2}{S} 2n(1-x)$$

waar n het aantal geldige groepen is en x de taperfractie zoals gedefinieerd in paragraaf 2.2.3.

2.5.7.4 Gemiddelde hoofdrichting

De gemiddelde hoofdrichting van de energiedichtheidsverdeling per frequentieband is gedefinieerd als de hoek opgespannen door de gemiddelde Fourier-coëfficiënten:

$$\tan \bar{\theta}_0 = \frac{-\bar{A}_1}{-\bar{B}_1}$$

Het interval waarin de hoek gevonden kan worden wordt bepaald zoals in paragraaf 2.5.5.1. De compensatie voor de afwijking tussen de magnetische en de echte polen wordt uitgevoerd zoals beschreven is in paragraaf 2.5.5.1. De resulterende hoek wordt vervolgens geconverteerd naar het interval $[0^\circ, 360^\circ)$.

Merk op dat de hoek niet berekend kan worden als \bar{A}_1 en \bar{B}_2 beiden nul zijn, in welk geval de hoek op foutcode wordt gezet.

2.5.7.5 Gemiddelde spreiding

De gemiddelde spreiding van de energiedichtheidsverdeling per frequentieband wordt berekend met behulp van de gecentreerde Fourier-coëfficiënten:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{2(1 - \bar{m}_1)}$$

Als \bar{A}_1 of \bar{B}_1 niet bepaald kan worden of als $\bar{m}_1 \geq 1$, dan wordt de gemiddelde spreiding op foutcode gezet. Merk op dat de spreiding gegeven is in radialen en om geconverteerd te worden naar graden vermenigvuldigd moet worden met $180 / \pi$.

2.5.7.6 Gemiddelde scheefheid

De gemiddelde scheefheid of asymmetrie is gedefinieerd als:

$$\bar{\gamma} = \frac{-\bar{n}_2}{\left[\frac{1}{2}(1 - \bar{m}_2)\right]^{3/2}}$$

In geval \bar{A}_1 of \bar{B}_1 niet bepaald kunnen worden of beide nul zijn, of in geval $\bar{m}_1 \geq 1$, wordt de gemiddelde scheefheid op foutcode gezet.

Merk op dat het teken van de scheefheid aangeeft welke kant het asymmetrische uiteinde van de verdeling uitwijst. De nautische definitie van de hoofdrichting impliceert een omdraaiing van de draairichting en daarom geeft de scheefheid in het nautische coördinatenstelsel een richting aan die tegengesteld is aan waar het asymmetrische uiteinde heen wijst.

2.5.7.7 Gemiddelde slankheid

De gemiddelde slankheid of kurtosis van de verdeling per frequentieband wordt gegeven door:

$$\bar{\sigma} = \frac{6 - 8\bar{m}_1 + 2\bar{m}_2}{(2(1 - \bar{m}_1))^2}$$

In geval \bar{A}_1 of \bar{B}_1 niet bepaald kunnen worden of beide nul zijn, of in geval $\bar{m}_1 \geq 1$, wordt de gemiddelde slankheid op foutcode gezet.

2.5.7.8 Gemiddelde frequentie

De gemiddelde frequentie per band is gedefinieerd als het gewogen gemiddelde over de band:

$$F = \frac{M_1}{M_0}$$

2.5.8 Berekenende parameters

De volgende parameters worden berekend tijdens de spectrale richtingsverwerkingsfase. De eenheden van de berekenende parameters zijn: energie wordt uitgedrukt in cm^2 , golfhoogte in cm, frequentie in Hz, periode in s, richting in $^\circ$ (graden).

Richtingsspectra

- $Th010(i)$, $i \in [3,50]$ Hoofdrichtingsspectrum $\theta_0(f)$ uit 10 mHz spectra $Th010(i) = \theta_0(f)$ met $f = i * 10$ mHz, $f \in [30,500]$ mHz
- $S0bh10(i)$, $i \in [3,50]$ Richtingsspreidingspectrum $\sigma(f)$ uit 10 mHz spectra $S0bh10(i) = \sigma(f)$ met $f = i * 10$ mHz, $f \in [30,500]$ mHz

Fourier coëfficiënten

- $A1_5(i)$, $i \in [0,100]$ Spectrum van Fourier-coëfficiënten $A_1(f)$ uit 5 mHz spectra $A1_5(i) = A_1(f)$ met $f = i * 5$ mHz, $f \in [0,500]$ mHz
- $A2_5(i)$, $i \in [0,100]$ Spectrum van Fourier-coëfficiënten $A_2(f)$ uit 5 mHz spectra $A2_5(i) = A_2(f)$ met $f = i * 5$ mHz, $f \in [0,500]$ mHz
- $B1_5(i)$, $i \in [0,100]$ Spectrum van Fourier-coëfficiënten $B_1(f)$ uit 5 mHz spectra $B1_5(i) = B_1(f)$ met $f = i * 5$ mHz, $f \in [0,500]$ mHz
- $B2_5(i)$, $i \in [0,100]$ Spectrum van Fourier-coëfficiënten $B_2(f)$ uit 5 mHz spectra $B2_5(i) = B_2(f)$ met $f = i * 5$ mHz, $f \in [0,500]$ mHz
- $W_5(i)$, $i \in [0,100]$ Golfgetal $W(f)$ uit 5 mHz spectra $W_5(i) = W(f)$ met $f = i * 5$ mHz, $f \in [0,500]$ mHz

Richtingsspectrumparameters

- $Th0$ Gemiddelde hoofdrichting $\bar{\theta}_0$ uit 10 mHz spectra in het bereik $f \in [30,500]$ mHz
- $S0bh$ Gemiddelde spreiding $\bar{\sigma}$ uit 10 mHz spectra in het bereik $f \in [30,500]$ mHz
- $Th3$ Gemiddelde hoofdrichting $\bar{\theta}_0$ uit 10 mHz spectra in het bereik $f \in [30,500]$ mHz
- DL_index Golfgetal $DL_index = W(f)$ bij $f = 100$ mHz uit 5 mHz spectra

Bandparameters (over alle banden B0 - B4 en G1 - G10)²

- $Hm0_..$ Golfhoogte H uit 5 mHz spectra
- $Ndfe_..$ Aantal vrijheidsgraden N van de energiedichtheid uit 5 mHz spectra
- $Th0_..$ Gemiddelde hoofdrichting $\bar{\theta}_0$ uit 5 mHz spectra
- $S0bh_..$ Gemiddelde spreiding $\bar{\sigma}$ uit 5 mHz spectra
- $G1_..$ Gemiddelde scheefheid $\bar{\gamma}$ uit 5 mHz spectra
- $G2_..$ Gemiddelde slankheid $\bar{\delta}$ uit 5 mHz spectra

² De twee puntjes in de parameter naam staan voor de naam van de band (zie tabel 6.3). Met de $Hm0$ als voorbeeld: er bestaan 15 $Hm0$ bandparameters met namen $Hm0_B0$, $Hm0_B1$, $Hm0_B2$, $Hm0_3$, $Hm0_B4$, $Hm0_G1$, $Hm0_G2$, $Hm0_G3$, $Hm0_G4$, $Hm0_G5$, $Hm0_G6$, $Hm0_G7$, $Hm0_G8$, $Hm0_G9$, $Hm0_G10$.

- $Fm01_{..}$ Gemiddelde frequentie F uit 5 mHz spectra

Kwaliteitsparameters

- $Ndlr_H$ Aantal geldige deelreeksen van het signaal dat de verticale beweging aangeeft.
- $Ndlr_R$ Aantal geldige groepen deelreeksen
- $AV10_R$ Aantal vrijheidsgraden van de richtingsspectra ($= 4 * Ndlr_R$)

2.6 Uitvoerberichtdefinitie

Dit hoofdstuk beschrijft de uitvoer van de golfverwerking. De golfinformatie wordt beschikbaar gesteld op drie niveaus: op niveau 0 worden de ruwe gegevens, meestal gebruikt voor inspectie van de sensoren en voor onderzoek, geleverd, de basisinformatie voor de berekening van de karakteristieke golfparameters wordt beschikbaar gesteld op niveau 1, terwijl op niveau 2 de geschatte parameters voor operationeel gebruik en lange termijn opslag worden gegeven. De informatie die op elk niveau verstrekt wordt staat beschreven in de volgende paragrafen.

2.6.1 Niveau 0

Niveau 0 levert de ruwe gegevens in 20-minuten-blokken, die bestaan uit:

Voor golfhoogtesensoren:

- Monsters van het verticale signaal.

Voor golfhoogte-/richtingssensoren:

- Monsters van het verticale signaal,
- Monsters van het oost-west horizontale signaal,
- Monsters van het noord-zuid horizontale signaal.

2.6.2 Niveau 1

Niveau 1 verstrekt de basisinformatie nodig voor de berekening van de karakteristieke parameters die bestaat uit:

Voor golfhoogtesensoren:

- $C_{zz5}(i)$, $i \in [0,100]$,
- $C_{zz5_M}(i)$, $i \in [0,200]$,
- $WTBH(i)$, $i \in [1, AG]$,
- $WTBT(i)$, $i \in [1, AG]$,
- AG

Voor golfhoogte-/richtingssensoren:

- $C_{zz5}(i)$, $i \in [0,100]$,
- $WTBH(i)$, $i \in [1, AG]$,
- $WTBT(i)$, $i \in [1, AG]$,
- AG
- $A1_5(i)$, $i \in [0,100]$
- $A2_5(i)$, $i \in [0,100]$
- $B1_5(i)$, $i \in [0,100]$

- $B2_5(i)$, $i \in [0,100]$
- $W_5(i)$, $i \in [0,100]$

2.6.3 Niveau 2

Niveau 2 geeft de geschatte parameters, welke zijn:

Voor golfhoogtesensoren:

- $C_{zz10}(i)$, $i \in [0,50]$,
- $C_{zz10_M}(i)$, $i \in [0,100]$,
- $M0$,
- $Hm0$
- $M0_M$,
- $Hm0_M$,
- $Tm02$,
- $Tm02_M$,
- $TE0$,
- $TE1$,
- $TE1_M$,
- $TE2$,
- $TE3$,
- $HTE3$,
- Fp ,
- Fp_M ,
- $HS7$,
- $Tm-10$,
- $Tm-10_M$,
- $AV10_H$,
- AG ,
- $Hmax$,
- $H1/50$,
- $H1/10$,
- $H1/3$,
- GGH ,
- $SPGH$,
- $Tmax$,
- $THmax$,
- $T1/3$,
- $TH1/3$,
- GGT ,
- $SPGT$,
- HCM ,
- Nwt_zP ,
- $Ndlr_H$,
- Ngd_zP ,
- Nu_z ,
- Nv_z ,
- Nd_z ,
- Ni_z .

Voor golfhoogte-/richtingssensoren:

- $C_{zz10}(i)$, $i \in [0,50]$,
- $M0$,
- $Hm0$,
- $Tm02$,
- $TE1$,
- $TE2$,
- $TE3$,
- $HTE3$,
- Fp ,
- $HS7$,
- $Tm - 10$,
- $AV10_H$,
- AG ,
- $H\ max$,
- $H1 / 50$,
- $H1 / 10$,
- $H1 / 3$,
- GGH ,
- $SPGH$,
- $T\ max$,
- $TH\ max$,
- $T1 / 3$,
- $TH1 / 3$,
- GGT ,
- $SPGT$,
- HCM ,
- Nwt_zP ,
- $TH010(i)$, $i \in [3,50]$
- $S0bh10(i)$, $i \in [3,50]$
- $Th0$,
- $S0bh$,
- $Th3$,
- $AV10_R$,
- Dl_index ,
- $Ndlr_H$,
- Ngd_zP ,
- Nu_z ,
- Nv_z ,
- Nd_z ,
- Ni_z .
- $Ndlr_R$,
- Ngd_xP ,
- Ngd_yP ,
- Nu_x ,
- Nv_x ,
- Nd_x ,
- Ni_x ,

- Nu_y ,
- Nv_y ,
- Nd_y ,
- Ni_y ,

De volgende parameters worden geleverd in de banden B0-B4 en G1-G10:

- $Hm0_{...}$,
- $Ndfe_{...}$,
- $Th0_{...}$,
- $S0bh_{...}$,
- $G1_{...}$,
- $G2_{...}$,
- $Fm01_{...}$

3 BEGRIPPEN EN AFKORTINGEN

3.1 Afkortingen

Afkorting	Verklaring
CET	Central European Time, tijdzone overeenkomend met UTC+1 (wintertijd).
GMT	Greenwich Mean Time, tijdzone gebaseerd op de tijd op de 0-graden meridiaan die door Greenwich (Engeland) loopt. GMT is nagenoeg gelijk aan UTC. UTC is echter een atoomtijd, terwijl GMT een astronomische tijd is. GMT wordt elke 5 jaar gelijk gesteld aan UTC.
MET	Middle European Time (wintertijd), om de tijdzone in Europese landen aan te geven. MET = UTC+1 (wintertijd).
RMI	RWS-Meetnet Infrastructuur.
RWS	Rijkswaterstaat.
SESAM	SEnsor-Signaal Aanpassings Module voor hydrologische, huishoudelijke info en overige sensoren. Deze converteert het uitgangssignaal van één of meerdere sensoren naar een standaard bericht.
UTC	Coordinated Universal Time, de wereldwijde standaard voor tijd en datum. (Zie ook GMT).

3.2 Begrippen

Begrip	Verklaring
Directional Waverider	Golfmeetboei voor het meten van golfhoogte, golfrichting en watertemperatuur.
Grootheid	Een waarneembaar verschijnsel en verzamelnaam voor: <ul style="list-style-type: none"> fysische grootheid, wiskundige grootheid, huishoudelijke informatie, klepstanden informatie.
Inwinning & Verwerking	Onderdeel van RMI; levert de primaire invoer van Validatie.
Meetnet	Een systeem, inclusief sensoren, data-acquisitie-apparatuur en datacommunicatie-infrastructuur, voor het meten, verzamelen, converteren, verwerken, opslaan en distribueren van meetgegevens.
Parameter	De definitie in het meetnet van een kenmerk van een grootheid. Een parameterwaarde wordt volgens een gedefinieerde berekening over een bepaald tijdsinterval bepaald uit metingen van dezelfde grootheid of, in het geval van een afgeleide parameterwaarde, bepaald uit metingen van verschillende grootheden. N.B: Voor huishoudelijke info en klepstanden zijn ook parameters gedefinieerd.
Parameterwaarde	Een waarde uit een (parameter-)waardereeks die volgens een gedefinieerde berekening over een bepaald tijdsinterval wordt bepaald uit metingen van dezelfde grootheid of, in het geval van een afgeleide parameterwaarde, wordt berekend uit andere parameterwaarden.

Begrip	Verklaring
Sensor	Een instrument voor de kwantitatieve bepaling van grootheden. Een 0-sensor is een niet-standaard sensor waarvan de signalen alleen voor testdoeleinden gebruikt worden.
Verwerken	Het uitvoeren van conversies en controles op gegevens vanaf de ontvangst van sensorsignalen tot de uitgifte van waarnemingen aan Distributie.
Verzamelen	Het samenbrengen en/of transporteren van meetwaarden en/of waarnemingen.
Waarde	Onderdeel van een waarneming; kwantitatieve weergave van een parameter.
Waarneming	<p>Het resultaat van meting en verwerking in een meetnet waarin de gebruikers zijn geïnteresseerd. Een waarneming bestaat uit:</p> <ul style="list-style-type: none">• parameterwaarde;• tijdskenmerk;• kwaliteitskenmerk van de parameterwaarde;• lokatiecode;• parametercode;• additioneel kenmerk. <p>Onderscheiden worden verder:</p> <ul style="list-style-type: none">• afgeleide waarneming;• berekende waarneming;• geconverteerde waarneming;• bijgegiste waarneming. <p>NB: Huishoudelijke info en klepstanden worden ook in de vorm van waarnemingen aan de gebruiker gepresenteerd.</p>
Wavec	Golfmeetboei voor het meten van golfhoogte, golfrichting en watertemperatuur.
Waverider	Golfmeetboei voor het meten van golfhoogte.
Wiskundige grootheid	Een door de wiskunde gedefinieerde uitdrukking, bijvoorbeeld gemiddelde en standaardafwijking.

4 REFERENTIES

- [1] De Rijkswaterstaat Standaard voor Hydrologische en Meteorologische gegevens, versie 2.0, november 2005;
- [2] De Rijkswaterstaat Standaard voor Hydrologische en Meteorologische gegevens, versie 1.2, juli 1999;
- [3] Functie definitie RWS Meetnet Infrastructuur, Logica, BV.PS9747, Versie 1.0, 24 november 1992.