

Rapportage golfmetingen IJsselmeergebied 2001-2002

Validatie en documentatie meetseizoen 2001-2002

12 december 2002



Rapportage golfmetingen IJsselmeergebied 2001-2002

Validatie en documentatie meetseizoen 2001-2002

12 december 2002

Werkdocument 2002.191X

Auteur: M. Bottema

Inhoudsopgave

1	Inleiding	12
1.1	Algemeen	12
1.2	Belang van golfmetingen	12
1.3	Doelstelling	13
1.4	Projectorganisatie	14
1.5	Relaties met andere projecten	14
1.6	Leeswijzer	15
2	Beschrijving meetlocaties	17
2.1	Meetopstellingen	17
2.2	Instrumentatie	19
2.3	Inwinning	22
2.4	Onderhoud van de meetopstellingen	23
2.5	Beschrijving van de ruwe dagbestanden	24
2.6	Verwerking van de meetgegevens	25
3	Beschikbare meetgegevens en betrouwbaarheid	32
4	Validatie van windgegevens	39
4.1	Belang van goede windmetingen	39
4.2	Inventarisatie van gegevens	39
4.3	Methode kwaliteitscontrole windgegevens	43
4.4	Belangrijke instrumentgegevens	43
4.5	Validatie van de windrichting	44
4.6	Validatie van de windsnelheid	47
4.7	Validatie van wind; overige zaken	52
4.8	Conclusies en aanbevelingen	54
5	Overige gegevens	56
5.1	Waterstandsmetingen IJsselmeer	56
5.2	Waterstandsmetingen Slotermeer	58
5.3	Golfoplopmetingen	60
5.4	Temperatuurmetingen	60
6	Validatie van golfgegevens	62
6.1	Meetproblemen bij golfmetingen	62
6.1.1	Meetproblemen golfmetingen; voorkeurswaarden capstaven	62
6.1.2	Meetproblemen golfmetingen; invloed vervuiling en algenaangroei	65
6.1.3	Meetproblemen golfmetingen; verloop in de metingen	66
6.1.4	Meetproblemen golfmetingen; te korte meetinstrumenten	69
6.1.5	Meetproblemen golfmetingen; frequentiebereik	71
6.1.6	Meetproblemen golfmetingen; overige problemen	72
6.2	Meetproblemen; golfoploop	72
6.3	Validatie golfgegevens; methodiek	73
6.3.1	Tussentijdse validatie golfmetingen	74
6.3.2	Validatie golfmetingen voor stormseizoenverslag	75
6.3.3	Validatie golfmetingen; toekomstvisie	75
6.4	Validatie golfgegevens; resultaten	76
6.4.1	Resultaten validatie golfmetingen; FL2	77

6.4.2	Resultaten validatie golfmetingen; FL9	78
6.4.3	Resultaten validatie golfmetingen; FL5	79
6.4.4	Resultaten validatie golfmetingen; FL25	80
6.4.5	Resultaten validatie golfmetingen; FL26	81
6.4.6	Resultaten validatie golfmetingen; SL29	82
6.5	Validatie golfgegevens; samenvatting en conclusies	83
7	Golfklimatologie en toepassingen	86
7.1	Golfhoogteklimatologie	86
7.2	Golfperiodeklimatologie	89
7.3	Golfsteilheid	91
7.4	Golfgroeilimiet	93
7.5	Validatie van het golfmodel SWAN	95
7.6	Ruwheid van het wateroppervlak	98
7.7	Interpretatie van de windsnelheidsverhoudingen	102
7.8	Golfklimatologie en toepassingen; conclusies en aanbevelingen	108
8	Beschrijving stormperiodes	111
8.1	Algemene beschrijving stormseizoen 2001-2002	111
8.2	Stormperiode 8-9 november 2001	112
8.3	De storm van 28 december 2001	114
8.4	Stormperiode 19-26 februari 2002	115
8.5	Stormperiode 6-19 maart 2002	118
8.6	Dagelijkse gang, algenaangroei en capstaaf testen	119
8.7	Samenvatting en conclusies	122
9	Conclusies en aanbevelingen	124
9.1	Conclusies	124
9.2	Overwegingen en aanbevelingen	130
	Referenties	132
	BIJLAGEN	

Naast de auteur hebben diverse mensen een steentje bijgedragen aan het tot stand komen van dit stormseizoenverslag.

Allereerst wil ik mijn voorganger Dénes Beyer noemen, die tot november 2000 het RIZA-project 'Golfmetingen IJsselmeergebied' heeft getrokken en in velerlei opzicht de weg heeft geëffend om een stormseizoenverslag in de huidige opzet mogelijk te maken.

Bij RDIJ hebben met name Ed van der Goes (datalevering) en Remco Kleine (instrumentatie) in kader van het RDIJ-project 'Regionaal Golvenmeetnet' zeer waardevolle bijdragen geleverd aan dit project. Daarnaast een woord van dank voor Charlotte Franken-Koenjer (tot voor kort projectleider golvenmeetnet), Yasmine Panhuijsen-Hout (huidige projectleider), Cees Roozenburg (onderhoudstochten), Liset de Jongh (EXCEL-overzichten van de inhoud van alle onderhoudsverslagen) en Eric Regeling (voor de inbreng die hij als opdrachtgever leverde). Tenslotte mogen ook de prettige samenwerking met RDIJ en het enthousiasme van alle betrokken niet onvermeld blijven.

Binnen RIZA/WSH hebben ook Hans de Waal en Ellen Claessens nog de nodige ideeën ingebracht.

Tot een speciaal woord van dank voor fotostudio Alexander in Almere, die in samenspraak met Remco Kleine een aantal foto's in Bijlage B tegen vergoeding van de onkosten ter beschikking heeft gesteld en door de levering van een groot aantal andere digitale foto's in belangrijke mate heeft bijgedragen aan het beschikbare beeldmateriaal van onderhoudstochten.

Tot slot volgt hier nog de bronvermelding van een aantal illustraties

- Foto voorplaat (26/2/2002; Rotterdamse Hoek): Ed van der Goes
- Figuur 2.1: Ed van der Goes
- Figuur 2.3: Ed van der Goes
- aanzet tot Figuur 3.1-3.3: Ed van der Goes
- Foto 1, 3, 4, 6, 9, 14 (Bijlage B): fotostudio Alexander (Almere)
- Foto 11: M. Bottema
- Foto 13, 14, 15: Ed van der Goes
- Overige foto's: RDIJ/ANM (o.a. Ed van der Goes / Remco Kleine / Cees Roozenburg)

Dit rapport is het jaarlijkse product van het in opdracht van de Regionale Directie IJsselmeergebied (RDIJ) uitgevoerde project Golfmetingen IJsselmeergebied. Dit rapport bevat (i) documentatie bij de metingen, (ii) validatieresultaten van de wind- en golfgegevens, (iii) een overzicht en beschrijving van 'stormperiodes', (iv) een beschrijving van de lokale golfklimatologie op de meetlocaties en (v) enkele toepassingen.

Allereerst een korte karakteristiek van het seizoen 2001-2002:

Dit seizoen kenmerkte zich door hoge meerpeilen, zeer veel dagen met harde of stormachtige wind, en uitzonderlijk veel golfploopdata. Zware stormen bleven ook dit seizoen uit, maar de storm van 26/2/2002 zorgde toch voor een waardevolle uitbreiding van het databereik van de golfgroeilimietstudie. Qua kwantiteit waren de metingen dit seizoen zonder meer goed (< 20% uitval). De betrouwbaarheid van de data is duidelijk beter dan in voorgaande seizoenen al liggen er nog diverse verbeterpunten.

Een algemene inleiding op dit rapport is gegeven in Hoofdstuk 1. In Hoofdstuk 2 volgt een beschrijving van de zeven meetlocaties (par. 2.1), de instrumentatie (2.2), de gegevensinwinning (2.3), het onderhoud van de opstellingen (2.4), de databestanden (2.5) en de dataverwerking (par. 2.6).

Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de beschikbaarheid en betrouwbaarheid van de gegevens. In de balkenschema's in dat hoofdstuk worden de niet direct betrouwbare/buikbare data met arceringen aangegeven.

Wind is cruciaal om golfgroei over meren te voorspellen. De validatie van windgegevens komt aan bod in Hoofdstuk 4. De eerste paragrafen bieden vooral documentatie. Paragraaf 4.5 geeft de resultaten van de windrichtingsvalidatie en enkele correcties (Tabel 4.2). De windsnelheidsvalidatie volgt in par. 4.6. Onbetrouwbare gegevens zijn gegeven in Tabel 4.3. De rest kon worden gebruikt om windsnelheidsverhoudingen tussen de locaties te bepalen en het windklimaat aldaar te vergelijken (Tabel 4.4).

Hoofdstuk 5 geeft de offsets (Table 5.1 and 5.2) om de gemeten – relatieve – waterstanden om te rekenen naar waterstanden t.o.v. NAP. Ook enkele temperatuurmetingen worden kort besproken.

Hoofdstuk 6 is gewijd aan de validatie van de golfdata. In par. 6.1 en 6.2 zijn diverse meetproblemen besproken: voorkeurswaarden, algenaangroei, verloop, lengte/plaatsing van meetinstrumenten, etc.. In par. 6.3 en 6.4 komen de validatiemethode en -resultaten aan bod. Uit vergelijking van opeenvolgende 3-maands-periodes bleek dat buiten het algenseizoen (mei-september) de meeste data betrouwbaar zijn. Bij SL29 geldt een klein voorbehoud vanwege (gerepareerde) ijsschade, bij FL2 een wat groter voorbehoud vanwege de lage golfsteilheid (zie ook par. 7.3), en bij FL9 eveneens een wat groter voorbehoud omdat daar soms het gehele meetinstrument in de golven verdween.

Hoofdstuk 7 is dit seizoen uitgebreid: naast golfklimatologie komen diverse toepassingen aan bod, alsmede een verdere interpretatie van de data.

In Hoofdstuk 8 worden vervolgens vier stormperiodes en enkele andere interessante cases besproken. Tot slot volgen de conclusies en aanbevelingen in Hoofdstuk 9. Drie zaken die (nog) meer aandacht zouden moeten krijgen zijn documentatie, kwaliteitsborging en de keuze van de instrumentatie.

De bijlagen geven nog een overzicht van verwerkingsprogrammatuur (A), alsmede foto's (B), en diverse in Hoofdstuk 8 besproken grafieken (C-D-E-F-G).

.....

This report is the yearly product of RIZA-project 'Wave measurements of the Lake IJssel area' ('Golfmetingen IJsselmeergebied'), which is commissioned by the Regional Directorate IJsselmeer area (RDIJ) of Rijkswaterstaat in the Netherlands. It aims to provide (i) documentation of the measurements, (ii) validation results of the wind and wave measurements, (iii) an inventory and description of windy periods, (iv) a description of local wave climatology and (v) a description of some applications.

First of all a brief characteristic of the present season (2001-2002) is given:

This season was characterised by high water tables, several days with strong to gale force winds and an exceptional amount of wave run-up data. Severe storms did not occur but the 9 Beaufort gale of 26 February 2002 yielded a valuable extension of the wave-growth-limit data set. As for the quantity of data, this season was excellent (< 20% missing data). The reliability of the data is much better than in previous years, but there are still areas of improvement.

A general introduction is given in Chapter 1. Next, in Chapter 2, a description is given of the seven experimental sites (see section 2.1), the instrumentation (2.2), data collection (2.3), instrument maintenance (2.4), data files (2.5) and data processing (section 2.6). The site coordinates, instrument types and water depth (with respect to the Dutch NAP datum) are given in Table 2.1 and Figure 2.1; some input for data processing is given in Table 2.3 and 2.4.

Chapter 3 gives an overview of the availability and quality of the data. In the graphs, hatched areas correspond to unreliable or unsuitable data, or data that need corrections.

Wind is essential to predict wave growth over lakes. Chapter 4 presents the validation of wind data. Some documentation is given in section 4.2-4.4. The validation of wind direction produced a number of corrections (section 4.5; Table 4.2). Wind speeds are validated in section 4.6. Most data were reliable (except those in Table 4.3) and can be used to calculate wind speed ratios to compare wind climates at each site (Table 4.4).

In Chapter 5, offsets are presented (Table 5.1 and 5.2) to convert the instrument output to water levels with respect to the NAP datum. Also, some water temperature data are briefly presented.

The wave data validation is discussed extensively in Chapter 6. Some instrumental problems are discussed in sections 6.1 and 6.2: preferential values of the capacitance wires, the influence of algae, instrumental drift, the effect of the wires being too short, and the choice of the frequency or spectral integration range. Validation methods and results are discussed in section 6.3 and 6.4 respectively. Comparison of consecutive 3-month periods showed problems due to algae in the summer months, whereas most winter data (Oct.-April) seemed reliable. However, the SL29 are expected to have a slightly reduced reliability due to (repairs following) ice damage. This is also true for FL2 (where the wave steepness was rather low, see section 7.3) and FL9 (where at times, the full 3-meter-capacitance wire was submerged).

Chapter 7 has been extended this year: Besides wave climatology, a number of applications is discussed. Also, more attention is given to the interpretation of the data. In Chapter 8, some data of interesting (windy) periods are presented and discussed in detail. Finally, conclusions and recommendations are presented in Chapter 9.

The Appendices ('Bijlagen') discuss the data processing software (A), and give some pictures (B), as well as a large number of data graphs (C-D-E-F).

Lijst met symbolen

C_D :	weerstandscoefficiënt (verg. 7.4; $(u_* / U)^2$), samen met z_o een maat voor de ruwheid van het wateroppervlak
d :	Algemene aanduiding waterdiepte (m)
f :	Algemene aanduiding frequentie (Hz)
f_{\min} :	Ondergrens van frequentiebereik waarover wordt geïntegreerd voor de bepaling van de spectrale golfhoogte- en golfperiodematen (H_{m0} , T_{m-10} , T_{m01} , T_{m02})
f_{\max} :	Bovengrens van frequentiebereik waarover wordt geïntegreerd voor de bepaling van de spectrale golfhoogte- en golfperiodematen (H_{m0} , T_{m-10} , T_{m01} , T_{m02})
f_p :	Piekfrequentie (in Hz ; $1/T_p$)
f_s :	Samplefrequentie (bij FL25 8 Hz; op overige locaties 4 Hz)
g :	gravitatieversnelling (9.81 m/s ²)
GF :	Vlaagfactor (U_{\max}/U_{10} , verhouding maximale vlaag tov gemiddelde wind; (par. 4.7 / verg. 4.2))
h_{lBL} :	Dikte van interne grenslaag nabij land-water-overgang (verg. 7.8)
$H_{1/3}$:	Significante golfhoogte, bepaald als het gemiddelde van het hoogste 1/3 deel van de golven
$H_{1/10}$:	Gemiddelde van het hoogste 1/10 deel van de golven
$H_{1/50}$:	Gemiddelde van het hoogste 1/50 deel van de golven
H_{m0} :	Spectrale significante golfhoogte, bepaald uit het nulde moment van het energiespectrum, volgens $H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$
H_{gem} :	Gemiddelde golfhoogte in een meetreeks
H_{\max} :	Maximale golfhoogte in een meetreeks
H_s :	Significante golfhoogte
κ :	Von Kármán constante in logaritmisch windprofiel (0.4)
L :	algemene aanduiding golflengte (m)
L_{Tm02} :	Golflengte gebaseerd op golfperiode T_{m02}

m_n : n-de spectrale moment, gedefinieerd als $m_n = \int f^n E(f) df$

SPGH: Standaardafwijking van de golfhoogte, gedefinieerd als

$$SPGH = \sqrt{\frac{\sum_i^N (H_i - H_{gem})^2}{N - 1}} \quad \text{met } N \text{ is het aantal golven}$$

SPGT: Standaardafwijking van de golfperiode, gedefinieerd als

$$SPGT = \sqrt{\frac{\sum_i^N (T_i - T_{gem})^2}{N - 1}} \quad \text{met } N \text{ is het aantal golven}$$

σ :	algemene maat voor spreiding in data (één standaarddeviatie)
σ_u :	Standaarddeviatie van de momentane windsnelheid (par. 4.7)
$T_{1/3}$:	Gemiddelde van het hoogste 1/3 deel van de golfperiodes
T_{gem} :	Gemiddelde golfperiode in een meetreeks
$T_{H1/3}$:	Gemiddelde van de golfperiodes, horend bij de golven die worden gevormd door $H_{1/3}$.
T_{Hmax} :	Golfperiode van de maximale golfhoogte H_{max} .
T_{m-10} :	Spectrale gemiddelde periode ('energieperiode'), bepaald uit de spectrale momenten m_{-1} en m_0 ($T_{m-10} = m_{-1} / m_0$)
T_{m01} :	Spectrale gemiddelde periode ('gemiddelde periode'), bepaald uit het nulde en eerste moment van het energiespectrum volgens $T_{m01} = m_0 / m_1$
T_{m02} :	Spectrale gemiddelde periode (~ 'nuldoorgangsperiode'), bepaald uit het nulde en tweede moment van het energiespectrum volgens $T_{m02} = \sqrt{m_0 / m_2}$
T_{max} :	Maximale golfperiode in een meetreeks
T_p :	Piekperiode van het energiespectrum
T_u :	Turbulentie-intensiteit σ_u / U_{10} : relatieve vlagrigheid van de wind (par. 4.7 / verg. 4.3)
u_* :	wrijvingssnelheid in logaritmisch windprofiel (maat voor turbulente schuifspanning)
U :	Algemene aanduiding voor windsnelheid
U_{10} :	Gemeten windsnelheid op 10 meter hoogte (10-minuten- of uurgemiddelde)
U_3 :	idem op 3 meter hoogte
U_{ow} :	Open-water-wind (methode Bak en Vlag (1999) in par. 7.7)
U_p :	of U_{pot} : Potentiële wind (verg. 4.1 en Wieringa en Rijkoort, 1983): Als U_{10} , maar met gedeeltelijke beschuttings- en landschapscorrectie (U_p is een U_{10} waarbij de directe omgeving een z_o van 0.03 meter heeft)
U_{max} :	Maximale 1-seconden vlag op 10-meter hoogte (gedurende 10-minuten of 1 uur.
x :	strijklengte (m of km)
Y_{top} :	Verticale afstand tussen top van meetinstrument en stilwaterniveau.
Ψ :	Stabiliteitscorrectie logaritmisch windprofiel (ivm thermische opbouw atmosfeer)
z :	algemene (meet)hoogteaanduiding (m)
z_o :	Aerodynamische ruwheidslengte (m); zie Wieringa en Rijkoort (1983)
z_o^+ :	Grootste van twee ruwheidslengtes (m)
$z_{2\%}$:	Golfoploophoogte in meters die door 2% van de inkomende golven wordt overschreden

1 Inleiding

1.1 Algemeen

In dit werkdocument wordt een overzicht gegeven van de golfmetingen in het IJsselmeer in het meetseizoen 2001-2002. Het betreft de periode 1 juli 2001 tot en met 30 juni 2002. In de huidige opzet worden in opdracht van de Regionale Directie IJsselmeergebied (RDIJ) golven gemeten op vijf locaties in het IJsselmeer. Op twee locaties wordt tevens wind gemeten; nabij één van de locaties wordt bovendien de golfoploop op de dijk gemeten. Daarnaast worden golfmetingen in het Slotermeer uitgevoerd. Er is daar sprake van één meetlocatie, waar zowel golven als wind worden gemeten.

Dit verslag is de derde rapportage over de golfmetingen in het IJsselmeergebied. Het is de bedoeling dat dergelijke rapportages jaarlijks uitkomen. Eerder zijn al verslagen uitgebracht over de meetseizoenen 1997-1998 (Beyer en Van der Goes, 2000) en 2000-2001 (Bottema, 2002). Deze rapportage volgt het zelfde stramien als laatstgenoemde rapportage en is feitelijk een actualisering en uitbreiding daarvan. Van het seizoen 1998-1999 is nog geen rapportage uitgebracht, terwijl de rapportage van het seizoen 1999-2000 op dit moment wordt uitgevoerd door Alkyon Hydraulic Consultancy & Research.

In het eerste verslag (Beyer en Van der Goes, 2000) is veel nadruk gelegd op de beschrijving van de meetopstellingen en de resultaten. Later (Bottema, 2002) is het besef gegroeid dat de kwaliteit, continuïteit en consistentie van zowel de windmetingen als de golfmetingen meer aandacht moeten krijgen. In feite zullen de metingen moeten worden 'gevalideerd', zoals ook een model kan worden gevalideerd door het met betrouwbare metingen te vergelijken.

1.2 Belang van golfmetingen

In de Wet op de Waterkering staat aangegeven dat de primaire waterkeringen elke vijf jaar opnieuw getoetst moeten worden. Hiertoe worden nieuwe hydraulische randvoorwaarden bepaald in de vorm van waterstanden, golfkarakteristieken en hun kans van optreden. Deze informatie wordt opgenomen in het Randvoorwaardenboek. Het eerstvolgende Randvoorwaardenboek zal uitkomen in 2006. Het RIZA is verantwoordelijk voor het bepalen van de randvoorwaarden voor de zoete wateren. Hieronder valt ook het IJsselmeer. Hiervoor is al enige tijd het programma HYDRA_M (Westphal en Hartman, 1999; Blaakman en Lisman, 1999) beschikbaar waarin voor het IJsselmeergebied ook golfinformatie is opgenomen. Andere toepassingsgebieden zijn het aanleveren van golfkarakteristieken ten behoeve van bijvoorbeeld natuurontwikkelingsprojecten, constructies in het water zoals een slibdepot en de beroeps- en recreatieve scheepvaart. Tevens wordt golfinformatie gebruikt voor de Waarschuwingsdienst Dijken IJsselmeergebied (WDIJ), waarbij dijkbeheerders worden gewaarschuwd in geval van bedreiging van waterkeringen door hoge waterstanden en/of golven.

Het IJsselmeergebied wordt gekenmerkt door een vrij vlakke bodem met enkele oude getijgeulen. Het is vrij ondiep met een gemiddelde bodemligging van 4 à 5 meter onder NAP. In tegenstelling tot een kustsituatie is er geen sprake van deining en zijn de golven bepaald door de wind. Strijklengtes waarover de golven kunnen groeien variëren van enkele honderden meters tot tientallen kilometers. In extreme situaties worden de golven sterk bepaald door de aanwezige bodemdiepte. In dit verband wordt ook wel gesproken over de golfgroeilimiet op ondiep water (de Waal, 2002).

Indien golfinformatie nodig is, wordt deze vrijwel altijd bepaald met rekenmodellen zoals HISWA (Holthuisen et al., 1989) en SWAN (Booij et al., 1999); voor smalle wateren worden soms ook golfgroeikrommes gebruikt (Bretschneider, CERC, 1973). Validatie van deze modellen aan de hand van gebiedseigen metingen is van essentieel belang. Metingen op meerdere locaties zijn noodzakelijk om de betrouwbaarheid van het model en van de metingen zelf te vergroten. Van groot belang zijn gegevens over stormcondities, in het bijzonder bij zeer extreme stormen (ontwerpcondities). Dit betekent dat gedurende meerdere jaren gemeten moet worden om de kans op extreme gebeurtenissen gedurende de meetperiode te vergroten. Doordat er in het IJsselmeergebied zeer weinig goede golfmetingen beschikbaar zijn, is het belang van de metingen nog groter.

Het bovenstaande betekent niet dat alleen maar onder extreme omstandigheden gemeten dient te worden. Juist metingen onder minder extreme omstandigheden kunnen namelijk aanknopingspunten bieden om de fysische formuleringen in modellen te verbeteren. Dat hangt onder meer samen met het feit dat het IJsselmeer bij relatief zwakke wind en lage golven beschouwd kan worden als 'diep' water, terwijl het 'ondiepe' karakter sterker wordt naarmate de wind en golfhoogte toenemen. Door hiervan gebruik te maken kunnen zowel de 'diep-water-processen' als de 'ondiepe-water-processen' in golfmodellen getoetst worden. Het achterliggende idee is dat het wenselijk is niet alleen de einduitkomst van een model te toetsen, maar ook de bouwstenen daarvan: de fysische processen in een model. Door ook de bouwstenen op grondige wijze te toetsen wordt het vertrouwen in het model als geheel vergroot, en wordt de kans kleiner dat het model foute uitkomsten geeft in ontwerpcondities, zoals bij de bepaling van hydraulische randvoorwaarden.

Daarnaast zijn metingen ook van groot belang voor het vergroten van het inzicht in het fysische gedrag van het watersysteem in het algemeen.

1.3 Doelstelling

De algemene doelstelling van het golfmetingenproject luidt:

Het verzamelen en uitwerken van kwalitatief goede en goed gedocumenteerde golf- en windmetingen onder diverse (storm-) omstandigheden, zowel op diverse locaties in het IJsselmeer als in het Slotermeer.

Voor de metingen is onderscheid te maken in verschillende onderwerpen:

1. golven op korte strijklengten
2. golven op lange strijklengten
3. golven na breken op een ondiep hellend voorland
4. golfoploop op de dijk
5. ruimtelijke verdeling van de wind boven open water
6. bepalen van de golfgroeilimiet op ondiep water

De eerste vijf items worden gerealiseerd met behulp van een aantal meetopstellingen in het IJsselmeer. Hierop wordt in hoofdstuk 2 nader ingegaan.

Het laatste punt is relevant omdat verwacht wordt dat tijdens ontwerpcondities de golven op het IJsselmeer dieptegelimiteerd zullen zijn. Het meten van dieptebepaalde golven op ondiepe (bijna-) horizontale bodem is onder gewone, operationele, omstandigheden niet in het IJsselmeer te realiseren. Sinds september 1999 is hiervoor een meetpaal in het Slotermeer (Friesland) operationeel.

Daarnaast is het belangrijk nog even aan te stippen welke doelen nagestreefd worden met het schrijven van dit stormseizoenverslag:

- documentatie bij de metingen (inwinning en verwerking)
- validatie van gemeten golf- en windgegevens; gegevens uitsplitsen in goedgekeurd en niet goedgekeurd.
- beschrijving van stormsituaties
- beschrijving van golfklimatologie en – voor de eerste keer – beschrijving van enkele toepassingen waarbij de huidige meetgegevens ingezet kunnen worden (zie Hoofdstk 7 van dit rapport)

1.4 Projectorganisatie

Opdrachtgever voor de metingen is Rijkswaterstaat / Regionale Directie IJsselmeergebied (RDIJ). De metingen worden uitgevoerd door RDIJ, afdeling PAM (voorheen ANM). Tot voor kort was drs.ing. C.H.M. Franken-Koenjer daarbij projectleider; sinds oktober 2002 is haar rol overgenomen door Y.M. Panhuijsen-Hout.

Ing. R.S.E. Kleine heeft gedurende de gehele periode de technische uitvoering verzorgd. De inwinning, het gegevensbeheer en de gegevensverwerking is verzorgd door E.R.F. van der Goes.

Opdrachtnemer is Rijkswaterstaat/RIZA, afdeling WSH. De begeleiding en uitwerking van de metingen is uitgevoerd door dr. M. Bottema. Ook deze rapportage is door hem verzorgd.

1.5 Relaties met andere projecten

Er zijn diverse relaties aan te geven met andere projecten.

Zoals reeds hierboven is aangegeven, zijn de metingen noodzakelijk bij het verifiëren en verder verbeteren van golfmodellen, zoals HISWA en het spectrale golfmodel SWAN. Bij RIZA/WSH loopt het project 'Beheer en Onderhoud SWAN', waarbij onder andere een aantal vergelijkingen met metingen zijn uitgevoerd (Bottema en Beyer, 2002; Bottema et al., 2002). Daarnaast zijn in opdracht van het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), in het kader van het project SWAN-fysica-plus (ALKYON & RIZA, 2002), de nodige verbeteringen aan het golvenmodel SWAN getest. Zodra de verbeteringen geïmplementeerd zijn in een nieuwe SWAN-versie is ook een nieuwe modelvalidatie met behulp van de huidige golfmetingen weer aan de orde.

Het RIKZ is ook betrokken bij golfmetingen, namelijk bij Petten en in de Westerschelde. Verder zijn metingen in de (oostelijke) Waddenzee gepland (RIKZ, 2002; Groeneweg en Van Dongeren, 2002; Hoekstra en Hoitink, 2002). Gestreefd wordt om zoveel mogelijk gebruik te maken van elkaars ervaringen bij het uitvoeren en verwerken van metingen.

Op het gebied van de golfoploop zijn er relaties met de Dienst Weg- en Waterbouwkunde (DWW). In opdracht van DWW is enige jaren terug een

formulering voor de berekening van golfploop en -overslag gereed gekomen (Van der Meer, 1997). Op dit moment is DWW (ir. R. 't Hart) in opdracht van RDIJ bezig met een verificatie van deze golfploopformulering door gebruik te maken van een deel van de bij Rotterdamse Hoek uitgevoerde golfplooppmetingen.

Ook de golfontwikkeling op ondiepe voorlanden blijft een actueel thema. De metingen bij Frigol zijn hierbij van nut, aangezien hier de golfontwikkeling van diep naar ondiep water wordt gevolgd. Daarnaast zijn de metingen bij Frigol nuttig voor het testen van de golfbrekkingsformuleringen in modellen zoals SWAN.

Bij scheepvaarttoepassingen is er eveneens vraag naar golfgegevens en windgegevens. Om die reden overweegt RDIJ de plaatsing van een meetpaal midden in het IJsselmeergebied die *on-line* golf- en windgegevens zou moeten leveren.

Ook het KNMI overweegt het uitvoeren van windmetingen op het IJsselmeer. In samenwerking met RIKZ en RIZA loopt daar het uitgebreide HYDRA-project (www.knmi.nl/samenw/hydra) dat een betere beschrijving van het ruimtelijke windveld én van de extremenstatistiek tot doel heeft. Parallel hiermee loopt bij RIZA een intern windonderzoek (Waal, 2000b). De windmetingen bij FL2, FL26 en SL29 zouden zeker hun nut kunnen hebben bij bovenstaande onderzoeken, namelijk door bij te dragen aan een betere beschrijving van de wind boven open water, en door bij te dragen aan de toetsing van nog te ontwikkelen windmodellen (de 'downscalingmodule' bij het door het KNMI ontwikkelde weervoorspellingsmodel X-HIRLAM).

Daarnaast is het nog de moeite het Nautilus-project van RIKZ te noemen. In het kader van dit project wordt onder andere gewerkt aan de modellering van de "wind-drag" boven open water (Radder, 2001; Makin, 2002). Deze wrijvings-kracht tussen lucht en water speelt een cruciale rol bij de modellering van wind boven meren, en van de golven, opwaaiing en stroming in die meren. Tenslotte leveren de golfmetingen informatie over de gemiddelde waterstand tijdens stormsituaties. Deze kunnen behulpzaam zijn bij verificatie van water-bewegingsmodellen, zoals WAQUA (Bak en Vlag, 1999).

1.6 Leeswijzer

Allereerst worden in hoofdstuk 2 de meetlocaties besproken. Hierbij wordt ook ingegaan op de manier waarop wordt gemeten.

Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 een overzicht gegeven van de beschikbare meetgegevens, uitgesplitst naar locatie en sensor. De metingen worden hier ook voorzien van een indicatief kwaliteitslabel. Tenslotte worden de redenen van uitval kort besproken.

In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op de windgegevens, en de kwaliteit daarvan. Er wordt een kort overzicht gegeven van beschikbare gegevensbronnen, de kwaliteitsborgingsmethodiek wordt belicht, en vervolgens komt de eigenlijke validatie van de windgegevens aan bod. De validatie van de gemeten windrichting en windsnelheid wordt daarbij in aparte paragrafen belicht. Ook wordt ingegaan op de vraag in hoeverre KNMI-gegevens gebruikt kunnen worden om gaten in onze meetreeks op te vullen.

Hoofdstuk 5 belicht kort de overige beschikbare meetgegevens: waterstands- en temperatuurmetingen.

In hoofdstuk 6 wordt ingegaan op de validatie van de golfgegevens. Eerst worden de meest voorkomende meetproblemen belicht. Vervolgens worden de methodes van kwaliteitscontrole (zowel kort na de inwinning als op een later tijdstip) besproken. Tenslotte wordt per meetpaal de kwaliteit van de golfmetingen doorgelicht, onder andere door het stormseizoen op te knippen

in enkele deelperiodes, en door te toetsen of de resultaten van die deelperiodes geen grote en/of systematische verschillen vertonen.

In hoofdstuk 7 worden enkele geaggregeerde golfgegevens gepresenteerd, een eerste aanzet naar een golfklimatologie-rapportage. Daarnaast komen een aantal toepassingen aan bod, alsmede een nadere analyse (en interpretatie) van de gemeten golf- en windgegevens.

In hoofdstuk 8 wordt een aantal interessante meetsituaties doorgelicht. Allereerst wordt een algemene impressie van het stormseizoen gegeven. Vervolgens wordt een viertal stormperiodes nader besproken. Daarna komen ook een aantal andere interessante cases aan bod.

Tenslotte besluit hoofdstuk 9 met een overzicht van de voornaamste conclusies en aanbevelingen uit dit rapport.

In bijlage A wordt een overzicht gegeven van de verwerkings- en presentatie-programmatuur in MATLAB (The Mathworks, 1998) zoals deze nu bestaat. In bijlage B zijn enkele foto's opgenomen van de meetlocaties. In de bijlagen C tot en met G zijn de figuren opgenomen van de meetdagen die in hoofdstuk 8 zijn besproken.

2 Beschrijving meetlocaties

In het meetseizoen 2001-2002 zijn op zes locaties golven gemeten, op drie hiervan ook wind. Daarnaast wordt op één locatie de golfploop op de dijk gemeten. In dit hoofdstuk worden de meetlocaties en het meetproces beschreven.

2.1 Meetopstellingen

Bij de locatiekeuze voor de meetopstellingen is allereerst rekening met de te meten verschijnselen. Zo zijn de twee meetlocaties bij Enkhuizen toegesneden op golfgroei bij korte strijklengte en de meetlocaties bij Gaasterland op de overgang van diep naar ondiep water. De meetlocatie op het Slotermeer is specifiek toegesneden op het bestuderen van golfgroei op (zeer) ondiep water, de 'golfgroeilimiet' (Waal, 2002)

De keuze van meetlocaties was bij de start van het meetproject beperkt doordat gebruik gemaakt moest worden van walstations voor het opslaan van de ingewonnen data; het GSM-net was toen nog niet landelijk dekkend. Het gebruik van walstations maakte het noodzakelijk binnen enkele kilometers van de kust te meten; bij grotere afstanden zou de dataverbinding onbetrouwbaar worden. Dit is tevens de reden waarom de gegevens niet rechtstreeks van de meetpaal naar Lelystad konden worden verstuurd.

Op dit moment wordt er bij drie meetpalen (en de golfploopbaak) nog gebruik gemaakt van walstations. De overige meetpalen worden met GSM ingewonnen, en kunnen dus zonder tussenkomst van een walstation naar Lelystad worden overgehaald.

In de huidige situatie worden op vier hoofdlocaties golfmetingen gedaan. Zie ook het onderstaande overzicht: Achter het kopje 'wind' staan de richtingen waarbij de onder het kopje 'doel' genoemde verschijnselen het beste tot uiting komen. Met name (zuid)westenwind is interessant omdat de ontwikkeling van de golven dan volledig te volgen is: van FL25 naar FL26, en via FL2 en FL9 naar de dijk resp. naar een ondiep voorland. Op de meeste locaties is het echter zo dat alle windrichtingen wel interessante resultaten opleveren. De door RDIJ ingewonnen windgegevens kunnen nog worden aangevuld met KNMI-gegevens van Wijdenes en – tot mei 2002 – Stavoren-Haven. Op deze wijze is het mogelijk een betere indruk te krijgen van de ruimtelijke variatie van het windveld.

Hoofdlocatie: GOLMET (Rotterdamse Hoek)

Doel:	meten van de golfploop op de dijk, relateren van golfploop aan golven en wind op enige afstand van de dijk, meten van golven, vooral op lange strijklengte.
Wind:	vooral westelijk en zuidwestelijk
Locaties:	FL2: golven en wind dijk: golfploop
Inwinning:	Walstation (GOLMET)

Hoofdlocatie: FRIGOL (Gaasterland; zuidkust van Friesland)

Doel: meten van de golven in hun ontwikkeling van diep naar ondiep water,
meten van golven op lange strijklengte

Wind: vooral (zuid)westelijk

Locaties: FL9: golven
FL5: golven

Inwinning: Walstation (FRIGOL)

Hoofdlocatie: Enkhuizen

Doel: meten van de golfgroei voor korte strijklengtes;
meten van golven na middellange strijklengte en de bijbehorende wind.

Wind: met name (zuid)westelijk.

Locaties: FL25: golven
FL26: golven en wind

Inwinning: GSM

Hoofdlocatie: Slotermeer

Doel: meten van de zgn. golfgroeilimiet op (zeer) ondiep water met de bijbehorende wind

Wind: alle richtingen, met licht accent op (zuid)westelijk.

Locaties: SL29: golven en wind

Inwinning: GSM

De locatiecoördinaten (Parijse coördinaten: x,y=(0,0) komt overeen met Parijs), bodemligging (t.o.v. NAP) en enkele verdere specificaties van de meetopstellingen zijn gegeven in onderstaande tabellen. Tabel 2.1 geeft de huidige locatiecoördinaten. Alle eerdere coördinaten van de periode 1997-2001 zijn gegeven in eerdere rapportages (Beyer & v.d. Goes, 2000; Bottema, 2002).

In Bijlage B zijn foto's van alle meetpalen opgenomen.

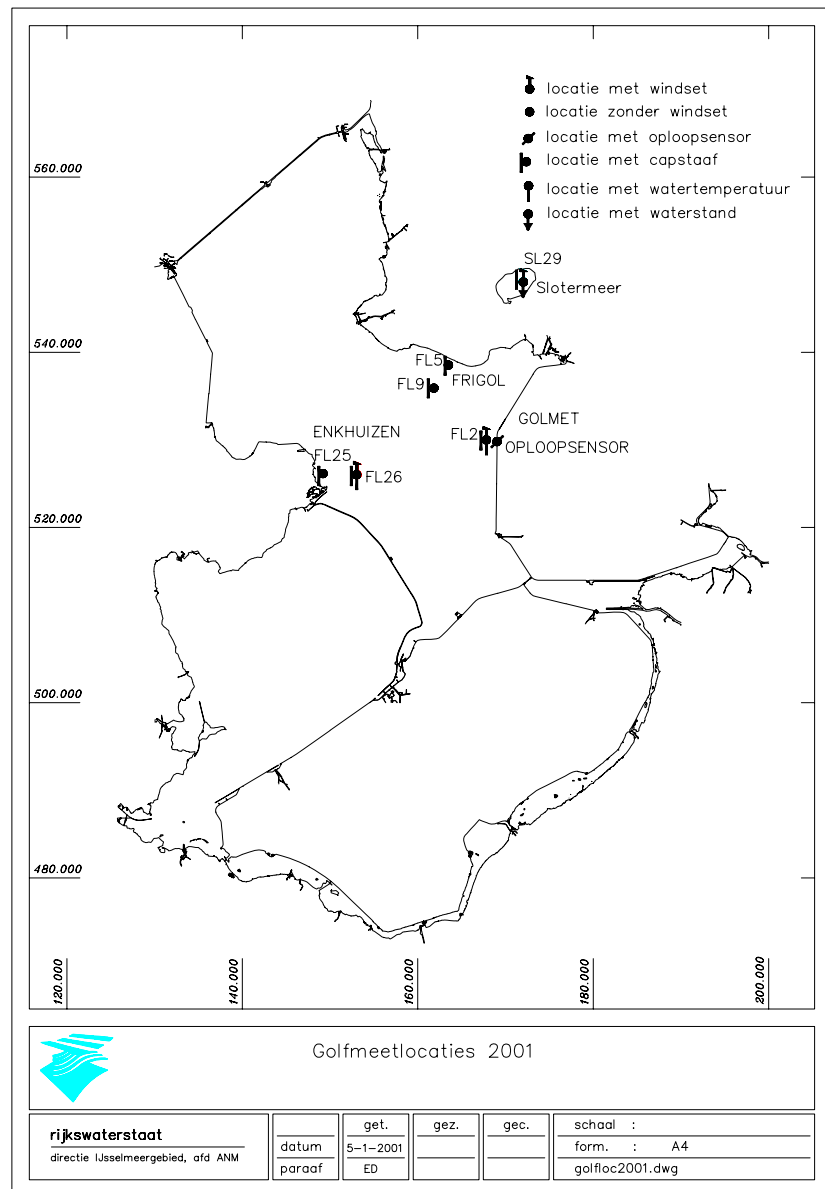
Tabel 2.1 Meetlocaties IJsselmeer; m.i.v. maart 2001

	Locatie	Wind	Instrument	RD X (m)	RD Y (m)	bodem (m)
GOLMET	FL2	ja	5m-capstaaf	167850	530021	4.43
	RDH	nee	oploopbaak	±169000	±530000	n.v.t.
FRIGOL	FL9	nee	3m-capstaaf	161766	535919	4.18
	FL5	nee	3m-capstaaf	163391	538780	1.95
Enkhuizen	FL25	nee	3m-capstaaf	148997	525997	2.68
	FL26	ja	3m-capstaaf	152990	526011	5.50
Slotermeer	SL29	ja	3m-capstaaf	172496	548506	2.14

In Tabel 2.1 is ook de bodemligging t.o.v. NAP gegeven. Bij de IJsselmeer-meetlocaties is het nieuwste RDIJ-bodemrooster gebruikt (uit 1999; resolutie 40 meter). De meest recente lodingen (Cees Roozenburg, april 2001) wijken maximaal 0.2 m van het bodemgrid af, behalve bij FL5. Daar geeft het bodemrooster een diepte van NAP-1.95 m en de loding een diepte van NAP-1.6 m). Feitelijk is op dit moment onvoldoende duidelijk wat de échte bodemdiepte bij FL5 is, te meer omdat juist hier de golven sterk diepte-gelimiteerd zijn. De bodemdiepte bij SL29 is NAP - 2.14 m. Dit komt overeen met een gemiddelde waterdiepte van ruim 1.6 meter omdat het gemiddelde meerpeil van het Slotermeer ongeveer NAP - 50 cm is. Bij SL29 waren overigens alleen

gegevens van één recente puntmeting (Cees Roozenburg, april 2001) beschikbaar. Een bodemrooster ontbreekt tot nu toe.
De onderlinge ligging van de meetlocaties is gegeven in Figuur 2.1.

Figuur 2.1 Golfmeetlocaties IJsselmeer
2001-2002



Als aanvulling op Figuur 2.1 zijn hier ook nog de coördinaten van de meest relevante KNMI-stations gegeven:

Berkhout:	127350 517350
Wijdenes:	140525 516175
Stavoren (beschikbaar vanaf dec. 1999)	154725 545250
Stavoren-Haven (beschikbaar tot 23/4/2002)	152850 544400

2.2 Instrumentatie

Golven

De golven op het IJsselmeer zijn erg kort. Daardoor is het niet goed mogelijk deze golven met een boei te meten¹. Daarom is gekozen voor vaste meetpalen

¹ Noot: Met de nieuwste generatie boeien is dit intussen wellicht wel mogelijk.

en meetinstrumenten. Het meten van golven wordt op deze manier gerealiseerd door de momentane waterstand met een voldoende hoge frequentie te meten. Een korte beschrijving van de instrumenten is hieronder en in het onderhoudsplan (Kleine, 2000) te vinden.

Sinds maart 2001 wordt overal gemeten met 'Multicap DC11' capaciteitsdraden (capacitance wires). In dit rapport worden de instrumenten ook vaak met de term '*capstaven*' aangeduid. Het instrument bestaat uit een met teflon gecoate draad (staaf) en een metalen massabuis (zie Bijlage B, foto 11-13). Het water fungeert als diëlectricum tussen de twee 'condensatorplaten' waarbij de gemeten capaciteit afhangt van de momentane waterstand. De uitvoer van de capstaaf (en de daaraan verbonden meetversterker) is een spanning in millivolt. Vooraf is door ijking de relatie vastgesteld tussen deze spanning en de lengte van de staaf die onder water staat ². Deze relatie is in de datalogger opgenomen. De uitvoer van de datalogger is een waterstand in centimeters ten opzichte van de basis van de capstaaf ³. De omrekening naar een waterstand in meters ten opzichte van NAP is opgenomen in de verwerkings-programmatuur. De gehanteerde inwinfrequentie is 4 Hz ⁴, behalve bij de FL25. Daar is de strijk-lengte bij westenwind korter dan één kilometer. De golven zijn dan zo kort dat een inwinfrequentie van 4 Hz onvoldoende werd bevonden; derhalve wordt op de FL25 met 8 Hz gemeten. De standaard lengte van een capstaaf is drie meter; bij de FL2 wordt sinds maart 2001 echter met een vijf meter lange capstaaf gemeten. Dit omdat bij extreme stormen de hoogste (individuele) golven bij FL2 (en waarschijnlijk ook elders) hoger dan 3 meter zouden kunnen worden.

Wind

Drie van de meetpalen zijn uitgerust met een windset. De windsnelheid wordt gemeten met een cupanemometer (Mierij meteo type 403), met een resolutie van ongeveer 16 pulsen voor elke meter windweg. De responslengte is volgens de fabrieksspecificaties ongeveer 2.9 meter, de aanloopsnelheid maximaal 0.5 m/s. De windrichting wordt gemeten met een type 508 windvaan van Mierij Meteo. De resolutie van de vaan is 1.4°, de responslengte is onbekend. De meetpalen met windset zijn de FL2 bij Rotterdamse Hoek (Golmet), de FL26 bij Enkhuizen en de SL29 in het Sloterveer. De wind wordt gemeten op 10 m hoogte (Bijlage B, foto 1, 6, 7); op de FL2 wordt tevens de windsnelheid op 3 m hoogte gemeten (Bijlage B, foto 1, linksonder). De wind wordt elke seconde geregistreerd, terwijl 10-minuten gemiddeldes worden opgeslagen. Tevens wordt elke 10 minuten de maximale 1-seconde waarde opgeslagen. In de praktijk blijkt het nauwelijks te doen om de windvaan met een kompas uit te richten (de meetpaal bevat te veel ijzer). Meestal wordt de vaan daarom uitgericht door de vaanoutput met de windrichting van de (vaste) vaan op het onderhoudsschip te vergelijken of door de vaan uit te richten op een vast punt op de wal. Achteraf wordt de windrichting dan geverifieerd door vergelijking met KNMI-gegevens en met uitkomsten van de andere meetpalen.

Golfoploop

² Om evt. verloop in de calibratie tijdig te detecteren moet de capstaaf-calibratie om de maand in het veld geverifieerd worden (Kleine, 2000). Dergelijke 'capstaaf testen' worden besproken in par. 6.1.3.

³ Bij benadering, o.a. omdat de staaf en massabuis niet altijd exact even lang zijn.

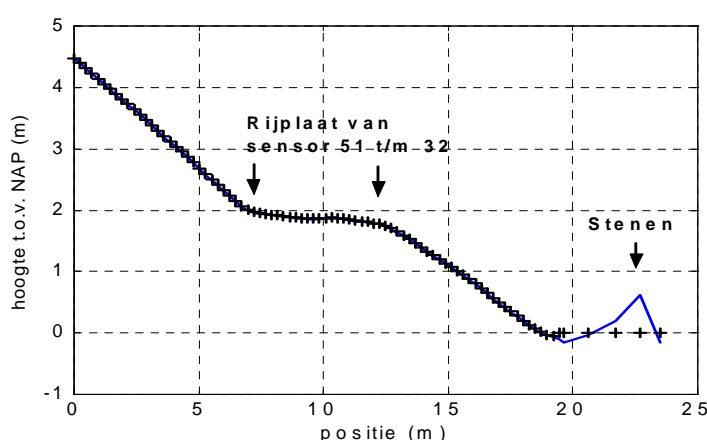
⁴ De responstijd van zowel capstaven als stappenbaken ligt in de orde van millisecondes; wat aanmerkelijk korter is dan het sampleinterval van 0.25 sec.

De golfoploop wordt geregistreerd met een buis volgens het principe van een stappenbaak. De oploopbaakbaak is aangebracht op het profiel van de dijk en bestaat uit twee delen die zijn gekoppeld met een zgn. DATEC-kastje. De totale baak heeft 80 sensoren met een onderlinge afstand van 20 cm. De hoogte van de sensoren boven het oppervlak van de dijk bedraagt ongeveer 7 cm (Bottema, 2002 noemde per abuis 7 mm). De inwinfrequentie is 4 Hz, net als voor de inkomende golven op de FL2.

Net als bij een gewone stappenbaak wordt het nummer geregistreerd van de hoogste sensor die op zeker moment nat is. Dit wordt vertaald in een (sensor-) niveau ten opzichte van NAP. De werkelijke golfoploop is dan het verschil tussen dit sensorniveau en de gemiddelde waterstand. In tegenstelling tot een capstaaf is een oploopbaak een discreet instrument. Instrumentverloop is hierdoor niet aan de orde, wel een (klein) resolutie-effect door de eindige afstand tussen de sensoren.

Hieronder is het profiel van de dijk bij Rotterdamse Hoek weergegeven samen met de meetsensoren. Zie ook foto 2 en foto 13-15 in Bijlage B.

Figuur 2.2 Profiel dijk Rotterdamse Hoek



Drukmetingen

Bij de SL29 (Slotermeer) is het relatief moeilijk om aan waterstanden te komen waarmee de door de capstaaf gemeten waterstand geverifieerd kan worden. Daarom wordt de gemiddelde waterstand ter plekke gemeten, en wel met een druksensor. Het betreft een PDCR910 sensor van 'Druck' met automatische compensatie voor de (wisselende) atmosferische druk. In de praktijk ligt de nauwkeurigheid van het instrument rond 5 mm. De calibratiefunctie is in de logger ingebouwd. In het door RDIJ aan RIZA geleverde databestand is de druk al omgerekend naar een waterstand t.o.v. NAP, en wel in centimeters.

Temperatuurmetingen

De thermische opbouw van de atmosfeer kan een significante invloed hebben op de golfgroei (zie Young, 1998, en de daarin geciteerde referenties). Een cruciaal gegeven om deze opbouw te kwantificeren is het lucht-water-temperatuurverschil ⁵.

Sinds december 2000 wordt op de FL26 de gemiddelde watertemperatuur gemeten op 1.2 m diepte met een Campbell-107 temperatuursensor. De onnauwkeurigheid van de sensor is maximaal 0.5K, waarvan het grootste deel is toe te schrijven aan de linearisatie van de calibratiekromme.

⁵ Omdat windprofielen boven een glad oppervlak moeilijk te analyseren zijn (te weinig verschil tussen de wind op bijv. 3 en 10 meter) zou een directe meting van de turbulente warmte- en impulsfluxen nóg waardevoller zijn.

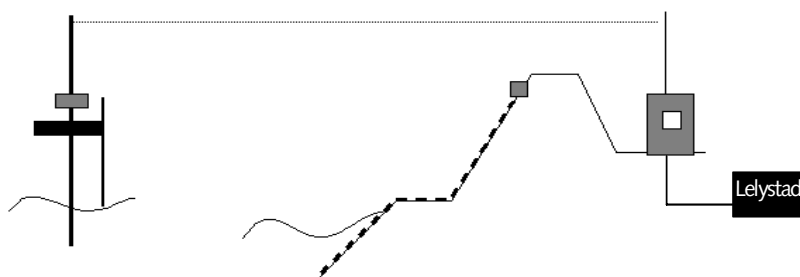
Er zijn nog geen aparte luchttemperatuursensoren geïnstalleerd. Wel is standaard een temperatuursensor geïnstalleerd in elk dataloggerkastje. Een redelijke schatting van de luchttemperatuur is zo echter alleen mogelijk bij voldoende zwakke instraling (zon!) en bij voldoende sterke wind.

2.3 Inwinning

Op elk van de meetpalen (en bij de oploopbaak) worden golfgegevens en evt meteogegevens ingewonnen en in een datalogger opgeslagen. Ook worden de tijd, accuspanning en temperatuur opgeslagen. Vervolgens worden de loggergegevens met telemetrie (zenders) overgezonden naar het walstation. Alleen bij de oploopsensor is de datalogger direct verbonden met het walstation. In alle gevallen worden de kloktijden van de datalogger en van de inwin-PC regelmatig gelijk gezet, zodat de loggers op tijd blijven lopen. De klokken van de inwin-PC's worden dagelijks gelijk gezet, en wel met behulp van een DGPS-ontvanger.

Op het walstation worden de gegevens per dag en per locatie in één file opgeslagen. Op afstand kan via een telefoonverbinding met het walstation contact worden gemaakt en kunnen desgewenst de opgeslagen daggegevens worden overgehaald. Tevens kan via de PC op het walstation contact gemaakt worden met de meetpaal om online de werking van de sensoren te controleren. Schematisch is dit weergegeven in Figuur 2.3.

.....
Figuur 2.3 Schema golfmeetopstelling
Golmet



De data-inwinning op het walstation wordt tijdelijk stopgezet als vanuit Lelystad bestanden worden opgehaald. De opslag op de dataloggers gaat gewoon door, maar de opslagcapaciteit aldaar is beperkt (meestal ongeveer 2 uur data). Om verlies van data tijdens het ophalen van bestanden, of na eventuele computerstoringen, te voorkomen is een 'watchdog' geïnstalleerd die na 20 minuten de PC van het walstation herstart; de inwinning wordt dan automatisch hervat. Zodoende kan vanuit Lelystad maximaal 20 minuten worden ingebeld om data van een walstation over te halen. Deze tijd is (juist) voldoende om een dagbestand over te halen. Voor het overhalen van grote aantallen bestanden is het praktischer de harde schijf van de PC van het walstation te wisselen, en deze in Lelystad uit te lezen.

Dit seizoen hadden twee locaties (Golmet en Frigol) nog een eigen walstation. Bij Golmet bevindt zich dit in het huisje van het Waterschap Zuiderzeeland, vlak achter de dijk bij Rotterdamse Hoek. Bij Frigol is het een container op een recreatieterrein (Bijlage B, foto 10). Bij FL25, FL26 en SL29 worden geen walstations meer gebruikt. Hier worden de data ingewonnen met behulp van een GSM-module. Via het mobiele telefoonnet worden de data rechtstreeks overgehaald naar Lelystad.

2.4 Onderhoud van de meetopstellingen

Onderhoud van de meetopstelling is cruciaal. Het golfmetingenproject is immers een langlopend project waarbij het de bedoeling is dat ook data worden ingewonnen tijdens zeldzame gebeurtenissen (zwarte stormen). Ook controle van de werking van de meetopstellingen is cruciaal. Deels gebeurt dit door elke paar dagen contact te maken met de meetpalen (via GSM of de walstations) en te controleren of de inwinning nog loopt. Ook worden regelmatig (idealiter: wekelijks) verwerkingsverslagen gemaakt. Daarbij worden per meetpaal het aantal databestanden, de grootte daarvan en (globaal) de inhoud daarvan geverifieerd. Eventuele bijzonderheden worden gerapporteerd en ook wordt gecontroleerd of er nog voldoende schijfruimte is om de gegevens op te slaan.

Bij het eigenlijke onderhoud kan nog onderscheid worden gemaakt tussen groot onderhoud en klein onderhoud. Groot onderhoud – een grondige opknapbeurt van de meetpalen en een revisie van de apparatuur – heeft voor het laatst plaatsgevonden na de korte ijsperiode van januari 2001. Een andere vorm van groot onderhoud vindt plaats op de windsets. Sinds 1999 worden de windsets aan het einde van de calibratietermijn (één jaar) vervangen. De oude sets worden opnieuw gecalibreerd. In een enkel geval bleken al problemen op te treden vóór het einde van de calibratietermijn (zie Hoofdstuk 4).

Tabel 2.2 Kort overzicht onderhoudstochten van het seizoen 2001-2002

datum	Locatie/meetcode : RDH of FL../SL ..							opmerkingen
	RDH	2	5	9	25	26	29	
17/7/01					x	x		FL25: 2 stekkers logger los; $T_w=18.2^{\circ}\text{C}$
18/7/01		x		x				
19/7/01			x					
25/7/01							x	waterstand Woudsend NAP – 52 cm
21/8/01		x	x	x				windset FL2 verv.; capst.steun FL9 weg
22/8/01							x	zekering + windvaan vervangen
23/8/01					x	x		capstaaf FL25; FL26 nylonring weg
25/9/01							x	nylonring capstaaf ook hier verwijderd
26/9/01			x	x				
27/9/01		x						
28/9/01					x	x		capstaaftest uitgevoerd op FL25, FL26
24/10/01					x	x		FL25 nieuwe logger: op:2775 af: 3615
25/10/01		x						capstaaftest uitgevoerd
1/11/01							x	capstaaf vrij vuil; Woudsend NAP-52
9/11/01			x	x				beide vrij vuil; capstaaftesten gedaan
27/11/01							x	nieuwe windsnelheidsmeter
28/11/01	x	x	x	x				capst. schoon; capstaaftesten FL5/FL9
29/11/01					x			capstaaftest uitgevoerd
30/11/01						x		FL26: nieuwe windsnelheidsmeter
18/12/01					x	x		FL26: idem; FL25: nylonring capst. weg
19/12/01						x		modem+windsetelektronica vervangen
20/12/01						x		communicatieapp. nog steeds defect
10/1/02							x	
22/1/02						x		FL26 opnieuw geplaatst na aanvaring
28/1/02					x			windkracht 7-8: geen onderhoud FL26
29/1/02			x	x				niet aangelegd i.v.m. harde wind
1/2/02							x	capstaaf SL29 rechtgebogen (ijsschade)
18/2/02							x	waterstand Woudsend NAP – 50 cm
21/2/02			x	x				
1/3/02		x	x		x	x		geen capstaaftesten ivm hoogwater
21/3/02		x	x	x				geen capstaaftesten ivm 60 cm golven

22/3/02		x	x	capst.test gedaan; capstaven matig vuil
26/3/02				x capstaaf vrij vuil; Woudsend NAP-48
17/4/02	x	x		reparatie oscillator capstaaf FL9
22/4/02				x
23/4/02	x		x	wind FL2 nu direct op logger
24/4/02		x		af:capst1858/oscill2119;op3671/ 2999
21/6/02				x af:capst2506/oscill2507;op3672/ 2119

Voor het 'klein onderhoud' aan de meetpalen zijn circa 10 onderhoudstochten per meetpaal per jaar gepland ⁶ (Koenjer, 2000). Bij eventuele storingen worden extra tochten gemaakt. De standaard werkzaamheden zijn vastgelegd in het onderhoudsplan (Kleine, 2000). Het RIZA-RDIJ golfmetingenoverleg is vaak vlak voor een serie onderhoudstochten gepland, zodat de werklíst aangescherpt en geactualiseerd kan worden. Belangrijke werkzaamheden bij onderhoudstochten zijn het controleren van de energievoorziening, de (elektrische) verbindingen en de werking van de datalogger. De golfmeet-instrumenten komen uiteraard ook aan bod: de soms ruwe veldomstandigheden maken regelmatige controles noodzakelijk. Daarnaast moeten de capstaven regelmatig worden schoongemaakt vanwege algengroei. Tot slot moet door middel van veldcalibraties ("capstaaftesten") regelmatig worden getest of de calibratie niet is verlopen.

Tabel 2.2 geeft een lijst van dagen waarop onderhoudstochten of storingstochten zijn uitgevoerd. Van alle tochten wordt een uitvoeringsverslag opgesteld (zie Kleine, 2000) met een opgave van de verrichte werkzaamheden. Bij wisselingen, reparaties, en aanpassingen (bijv. andere meethoogte) van instrumenten is dit soort informatie cruciaal. Enkele steekwoorden uit de uitvoeringsverslagen zijn opgenomen in Tabel 2.2; de getallen (bijv. "2775") verwijzen naar de RDIJ-registratienummers van de betreffende instrumenten. De informatie achter de steekwoorden wordt in iets meer detail besproken in de hoofdstukken 4 tot en met 6. Uit Tabel 2.2 blijkt ook dat in sommige gevallen de instrumenten niet of niet goed werkten. Zo was er bij SL29 sprake van ijsschade en bij FL26 van een aanvaring ⁷. In Hoofdstuk 3 is meer informatie te vinden over deze problemen, en over de werking van de meetpalen in het algemeen. In de daarop volgende hoofdstukken wordt ook ingegaan op zaken als instrumentwisselingen en aanpassingen aan de instrumentatie en/of loggersoftware.

2.5 Beschrijving van de ruwe dagbestanden

Per locatie wordt per dag één bestand gemaakt, met hierin alle geregistreerde gegevens. Dit betekent dat hierin de golf-, wind- en loggerinformatie staat, alsmede de eventuele druk- en temperatuurgegevens. Voor de GSM-meetpalen gebeurt dit in Lelystad, anders gebeurt dit op de walstations.

Hieronder is een fragment van een recent dagbestand van de FL2 getoond:

```

1,286.9
2,154,1210
1,283
122,12.39,338.2,10.79
5,13.97,15.11,337,14.78,12.83,18.8,-6999
1,286.1
1,308.9

```

⁶ Sinds april 2002 is het reguliere onderhoud in de maanden mei-juli vervallen ; alleen bij storingen wordt dan nog uitgevaren.

⁷ Van beide zaken zijn helaas geen foto's beschikbaar.

1,330.2
 1,361.7
 122,13.19,338.2,11.11
 1,366.6

De eerste regel geeft de capstaaf-output in centimeters (nog niet omgerekend naar waterstand t.o.v. NAP). Bij de oploopbaak zou het tweede getal een geheel getal zijn: het sensornummer. De tweede regel is de *tijdregel* (verschijnt elke minuut) met *tijdcode*, dagnummer en tijd (12h10). De vierde regel komt alleen bij FL2, FL26 en SL29 voor en bevat de *windcode* en de momentane windsnelheid en –richting op 10 meter hoogte; bij FL2 is daaraan ook de snelheid op 3 meter hoogte toegevoegd. Dat de capstaafregel vier keer vaker voorkomt dan de windregel heeft te maken met de inwinfrequenties (4 Hz resp. 1 Hz).

De vijfde regel tenslotte is de *loggerregel*, die elke tien minuten verschijnt. Deze bevat de *loggercode*, accuspanning en als derde getal een dummy (FL9) of de door de datalogger gemeten luchttemperatuur (bij de andere meetpalen ⁸). Bij de SL29 volgen daarop de gemiddelde windrichting en de maximale resp. de over tien minuten gemiddelde windsnelheid op 10 meter. Het laatste (7^e) getal geeft de door de druksensor gemeten waterstand weer. Met symbolen kunnen we de loggerregel van SL29 als volgt weergeven:

loggercode, Volts, Tlogger, windr, U_{max}, U₁₀, drukwatst

Bij FL2 en FL26 is sinds maart 2001 resp. december 2000 de opbouw als volgt:

loggercode, Volts, Tlogger, windr, U₁₀, (U₃), U_{max}, Twater/dummy

Daarbij komt de 3-meter-windsnelheid U₃ alleen bij FL2 voor. Het laatste getal is bij FL2 een dummy, bij FL26 de watertemperatuur. Bij FL2 is dat dus het 8^e getal, bij FL26 het 7^e.

Tabel 2.3 Loggercode, tijdcode en windcode gedurende stormseizoen 2001-2002

	Locatie	vanaf	tot	loggercode	tijdcode	windcode
GOLMET	FL2	1/7/01	30/6/02	5	2	122
	RDH	1/7/01	30/6/02	5	4	-
FRIGOL	FL9	1/7/01	30/6/02	5	3	-
	FL5	1/7/01	30/6/02	5	55	-
Enkhuizen	FL25	1/7/01	30/6/02	5	25	-
	FL26	1/7/01	30/6/02	5	26	122
Slotermeer	SL29	1/7/01	30/6/02	5	29	122

De loggercode, tijdcode en windcode zijn essentiële invoergegevens voor de verwerkingsprogrammatuur. Vooral in eerdere seizoenen werden de codes nogal eens veranderd bij wisselingen van instrumenten en van logger-programmatuur. Daarom zijn de codes voor het stormseizoen 2001-2002 in Tabel 2.3 op een rijtje gezet.

2.6 Verwerking van de meetgegevens

In deze paragraaf wordt uitgelegd hoe de ruwe door RDIJ aangeleverde dagbestanden (zie vorige paragraaf) worden omgezet naar bestanden met verwerkte wind- en golfddata. De beschrijving van de loggersoftware valt buiten het bestek van dit rapport. Verder zal de beschrijving zich vooral richten op de bepaling van diverse golf- en windparameters. Een meer documenterende beschrijving van de verwerkingssoftware is te vinden in Bijlage A.

⁸ Bij FL5 is de temperatuur enkele jaren geleden met 100 verhoogd om te voorkomen dat de ruwe-data-bestanden van FL5 met die van FL9 werden verwisseld en/of vermengd (een probleem dat zich vooral rond 1997/1998 wel eens voordeed).

In grote lijnen bestaat de verwerking van golfgegevens uit de volgende verwerkingsslagen:

- (1) ELEKTRONISCHE BEWERKING MEETSIGNAAL
- (2) BEWERKINGEN DOOR DATALOGGERSOFTWARE
- (3) AANMAKEN DAGBESTANDEN OP INWIN-PC
- =====
- (4) OPSPLITSEN DAGBESTANDEN MET RUWE DATA
- (5) CORRECTIES EN STATISTISCHE BEWERKINGEN OP GOLFSIGNAAL
- (6) GRAFISCHE WEERGAVE VAN DE RESULTATEN
- (7) AANMAKEN OVERZICHTSBESTANDEN MET VERWERKTE DATA

De eerste drie verwerkingsslagen worden uitgevoerd door RDIJ; het resultaat is een set dagbestanden met ruwe data (waterstanden, wind, etc.). Na de derde verwerkingsslag kan een denkbeeldige lijn worden getrokken; vanaf hier worden niet alleen de eindresultaten maar ook de *tussenresultaten* bewaard. Hier begint ook de verwerking door het RIZA.

Het is belangrijk ook de eerste drie, door RDIJ uitgevoerde, verwerkingsslagen te belichten. Van deze slagen wordt namelijk alleen het *eindresultaat* bewaard, de dagbestanden. Als achteraf de initiële verwerking fout blijkt te zijn geweest kunnen alle resultaten als verloren worden beschouwd, tenzij de initiële verwerking (op papier) in alle details gereproduceerd en alsnog correct uitgevoerd kan worden. Ook de geloofwaardigheid van de overige (niet evident foute) metingen kan ernstig te lijden hebben onder dergelijke incidenten. Om die reden is een *goede, volledige documentatie van de eerste drie verwerkingsslagen uiterst belangrijk*.

Goede documentatie van latere verwerkingsslagen is ook belangrijk. Hier bestaat echter altijd nog de mogelijkheid de verwerking opnieuw uit te voeren, in ieder geval zolang de ruwe dagbestanden bewaard blijven. Een beschrijving van alle verwerkingsstappen volgt hieronder.

Stap 1-3: Verwerking data door RDIJ - algemeen

Het is niet de bedoeling in dit verslag de hele door RDIJ uitgevoerde dataverwerking te documenteren. Wel wordt hier een impressie gegeven van het soort bewerkingen.

Stap 1: Elektronische bewerking meetsignaal

De uitvoer van een meetinstrument bestaat in het algemeen uit een uitgangsstroom, uitgangsspanning of een aantal pulsen. Soms sluit deze uitvoer niet aan bij het door een datalogger gewenste ingangssignaal ⁹. De aangeboden spanning kan bijvoorbeeld erg groot of erg klein zijn. In dat geval moeten *meetversterkers* zorgen dat het juiste spanningsbereik aan de

⁹ Voorbeeld: Bij een te hoge ingangsspanning, bijvoorbeeld groter dan 2.5 V, geeft een datalogger vaak uitzonderingswaarden (bijv. -6999). Bij FL9 gebeurde dat in het huidige seizoen zeer regelmatig, namelijk als de golven (bijna) tot aan de top van de capstaaf kwamen (zie ook par. 6.1.4).

datalogger wordt aangeboden. Meetversterkers en andere elektronica zorgen feitelijk voor een (analoge) bewerking van het meetsignaal en dienen derhalve gedocumenteerd te worden.

Stap 2: Bewerkingen door dataloggersoftware

De loggersoftware moet het aan de logger aangebodeningangssignaal converteren naar een uitvoergrootte, bijvoorbeeld een waterstand (in cm), een windsnelheid, of een windrichting. Dit alles gebeurt met behulp van vooraf / apart bepaalde calibratiefuncties voor elk instrument. In vorige seizoenen (zie bijv. Bottema, 2002) is meermalen twijfel gerezen over de implementatie van de calibratiefunctie; dit seizoen zijn er overigens geen echte twijfels. Het is cruciaal dat niet alleen de calibratiebestanden bewaard worden, maar ook de logger-software waarin de calibratiegegevens (al dan niet correct) zijn opgenomen.

Stap 3: Aanmaken dagbestanden op inwin-PC

De op de datalogger verzamelde gegevens worden door de inwin-PC (bij RDIJ of op een walstation) opgevraagd en in één dagbestand verzameld. Soms bevat het dagbestand een klein aantal data van een vorige of volgende meetdag (daggrens niet exact 24h; voorbeelden in Hoofdstuk 3); in zeldzame gevallen komen nog oudere gegevens in een dagbestand terecht. Ook zijn dit seizoen met name bij FL2 een aantal gevallen bekend van een onjuiste datering van gegevens (zie Hoofdstuk 3).

Stap 4-7: Verwerking data door RIZA - algemeen

De verwerking bij het RIZA gebeurt met MATLAB-scripts die zijn beschreven in Bijlage A bij dit rapport. De oorspronkelijke versie daarvan is van het RIKZ afkomstig; de meeste aanpassingen zijn al verricht door ir. D. Beyer. Om deze scripts is een door de gebruiker aan te passen opstartscript (*startverwerkdagen20012002.m*) gebouwd waarin de te verwerken meetpalen, de te verwerken periode en de te maken verwerkingsslagen worden gespecificeerd. De verwerkingsscripts zelf behoeven dan alleen nog aanpassing bij onderhoud en actualisering.

Stap 4: Opsplitsen dagbestanden met ruwe data

De beschikbare verwerkingssoftware voor golven gaat uit van éénkolomsbestanden met bijvoorbeeld 20 minuten data. In de dagbestanden met ruwe data staan echter allerlei data door elkaar heen. De eerste verwerkingsslag is daarom het opsplitsen van de bestanden met ruwe data.

Bij het opsplitsen van de dagbestanden wordt het script *funcmaakglwd20012002.m* gebruikt. De invoer van het script bestaat uit de meetpaalcode, de datum, en enkele vlaggen die aangeven of en hoe de wind- en golvenbestanden aangemaakt moeten worden. Vervolgens worden uitvoerdirectories gedefinieerd, alsmede gewenste lengte van de datablokken (20 minuten) en de loggercodes en tijdscode (Tabel 2.3) die nodig zijn voor verdere verwerking.

De bulk van de gegevens in een dagbestand bestaat uit momentane waterstanden, hier betiteld als 'golfgegevens'. Elke keer als 20 minuten zijn verstreken (dit blijkt uit de loggertijd die uit de tijdregel wordt gelezen) worden de golfgegevens van het 20-minutenblok weggeschreven naar een apart bestand (voorbeeld: 9^e blok 5/7/2001 van FL25: 25010705.009). Per meetpaal en meetdag wordt een aparte directory aangemaakt ¹⁰. Deze bevat dan alle

¹⁰ Met kleine overschrijdingen van de datumgrens (van 24h) gaat de programmatuur goed om. Bij grote overschrijdingen moeten golven-datablokken

(72) 20-minuten datablokken in een etmaal. Meestal bevatten de datablokken de 'originele data'. Evident foute waarden (ver buiten het instrumentbereik) worden echter automatisch vervangen door de direct daarvoor gemeten waarden.

De luchttemperatuur en evt. watertemperatuur worden uit de loggerregel overgenomen en in een apart bestand (bijv. 25010705.tmp) gezet. Dit bestand bestaat – idealiter – uit 144 regels (één regel voor elke 10 minuten) en uit vier kolommen: dagnummer, tijd, lucht- en evt. watertemperatuur.

Voor SL29 worden de metingen van de druksensor op soortgelijke manier weggeschreven. Het resulterende bestand (bijv. 29010705.drk) bestaat uit drie kolommen; de derde kolom geeft de waterstand t.o.v. NAP in centimeters.

Bij het wegschrijven van de windgegevens worden de gegevens van de loggerregel *niet* gebruikt en wel om de volgende redenen:

- de loggerregel valt vaak vlak ná de tijdsregel; in de praktijk loopt de weggeschreven wind zo 10 minuten achter op de golven.
- de samenstelling van de loggerregel verandert af en toe; bij FL2 en FL26 is in eerdere seizoenen tevens sprake geweest van foute loggersoftware (en loggerregels).

Om deze redenen worden de in het dagbestand beschikbare ruwe windmetingen gebruikt. Elke keer als 10 minuten (loggertijd) zijn verstreken wordt de wind vectorieel gemiddeld en weggeschreven. De windgegevens van de loggerregel zijn overigens ook vectorieel gemiddeld. Vorig seizoen is ook een optie toegevoegd om *scalair* te kunnen middelen. Dit om tijdens periodes met een defecte windvaan toch nog bruikbare windsnelheidsgegevens te hebben.

Het resulterende windbestand (bijv. 29010705.wnd) bestaat uit 7 kolommen (dag, tijd, windrichting, max. 10-meter-wind, gemiddelde 10-meter-wind, *turbulentie-intensiteit*¹¹) en – idealiter – 144 regels. Het bestand van FL2 telt één kolom meer: de 7^e kolom geeft de gemiddelde windsnelheid op 3 meter hoogte; de laatste (nu 8^e) kolom wederom de turbulentie-intensiteit.

Tot slot wordt dit seizoen voor het eerst informatie weggeschreven in een *logbestand* bijvoorbeeld: 29010705.log. Dit bestand geeft een samenvatting van de sleutelinformatie uit het ruwe-data-bestand, en vooral uit de loggerregels daarvan. Het bestand bevat een tabel waarin voor elk 20-minutenblok zaken zijn geprint als: datum, tijdstip, tijd- logger- en windcode, accuspanning, en ruwe waterstands- golven- wind- en temperatuurinformatie. De logbestanden kunnen zeer bruikbaar zijn bij het monitoren van recentelijk ingewonnen data (door RDIJ), en ze kunnen de kwaliteitsborging van grote hoeveelheden data aanzienlijk verbeteren en versnellen (zie het aantal nieuwe scripts in Bijlage A, dat nu al gebruik maakt van deze logbestanden).

Het splitsen van een dagbestand kost ongeveer 7 minuten op een PC met Pentium 550 MHz processor. Dit is aanzienlijk sneller dan splitsen met het Campbellprogramma SPLIT (zie Beyer en van der Goes, 2000), ook als rekening wordt gehouden met de verschillende PC-snelheden. Dit laatste programma wordt incidenteel nog gebruikt door RDIJ. Het is de bedoeling ook daar het programma funcmaakglwd.m draaiende te krijgen.

handmatig naar de goede directory worden verplaatst en is het aan te raden ook de andere bestanden (wind, temperatuur, etc.) op hun inhoud te controleren.

¹¹ Dit seizoen bevatten de windbestanden op de laatste kolom een *extra* variabele: de turbulentie-intensiteit: een maat voor de relatieve vlagerigheid van de wind (zie paragraaf 4.7)

Stap 5: Correcties en statistische bewerking golfsignaal

De eigenlijke statistische bewerking van het golfsignaal gaat uit van de in de vorige verwerkingsslag aangemaakte datablokken van 20 minuten. De resultaten van een meetdag worden vastgelegd in zgn. *gs-bestanden*: verzamelbestanden waarin voor elk 20-minutenblok 176 posities zijn gereserveerd voor gemiddelde golfparameters, golfspectra en meta- of achtergrondinformatie. Bij elk verwerkt 20-minuten blok wordt een plaatje op het beeldscherm getoond; visuele inspectie is dus direct mogelijk. De naam van de gebruikte scripts zijn *funcgolfini20012002.m* en *golven20012002.m*. Voor golfoploop worden de scripts *opysmini.m* en *oplysm.m* gebruikt.

Met de gegevens uit *funcgolfini20012002.m* wordt in *golven20012002.m* allereerst het gevraagde datablok opgezocht en geopend.

Allereerst wordt nagegaan of er redenen zijn de data *niet* te verwerken. Dat kan zijn bij ongeldige stappenbaakoutput (kleiner dan nul of groter dan aantal sensoren) of bij een zeer zwak signaal. In het laatste geval loopt de programmatuur soms vast, wat lastig is bij geautomatiseerde verwerking. Daarna worden evt. correcties toegepast. Meestal gaat het om een omrekening van een waterhoogte langs een instrument naar een waterstand t.o.v. NAP; soms is er ook sprake van een correctie vanwege kennelijke fouten in de gebruikte loggerfunctie (zie ook Hoofdstuk 6).

Vervolgens wordt het signaal opgedeeld in deelintervallen. Hier zijn deze 100 seconden lang. Wijkt de gemiddelde waterstand van zo'n deelinterval meer dan 3cm af van het 20-minutengemiddelde, dan wordt een waterstands-correctie toegepast. In plaats van aan een 20-minuten-waterstand worden de golven dan gerelateerd aan een waterstand *per deelinterval*.

Vervolgens worden voor het hele 20-minuten-blok golven gedefinieerd (begrensd door even óf oneven nuldoorgangen); van elke golf wordt de periode en de hoogte vastgesteld. Vervolgens worden hiervan gemiddeldes, extremen en percentielwaarden bepaald, alsmede de significante golfhoogte en -periode.

Voor elk deelinterval van 100 s wordt ook een Fouriertransformatie (FFT) toegepast. Het golfspectrum volgt dan uit middeling van de deelrealisaties. Uit het spectrum worden de spectrale momenten m_{-1} , m_0 , m_1 en m_2 bepaald, en daaruit worden dan weer de golfhoogte- en golfperiodematen H_{m0} , T_{m-10} , T_{m01} en T_{m02} bepaald (zie symbolenlijst voor definities van dit alles).

Tenslotte wordt van dit alles een plaatje op het scherm getoond, terwijl de resultaten worden weggeschreven naar een *gs*-uitvoerbestand (zie boven).

De verwerking van het oploopsignaal is relatief eenvoudig. Eerst worden in *oplysm.m* de sensornummers van de oploopbaak gekoppeld aan het dijkprofiel. Vervolgens wordt het ruwe signaal ingelezen. Eventuele uitschieters (meer dan 65 cm waterstandsverschil in 0.25 sec.) worden uitgefilterd. Vervolgens wordt bekeken of meer dan 50 golven het niveau van 50 cm boven NAP overschrijden. Bij minder dan 50 'oplopen' wordt het referentieniveau in stappen van 10 cm verlaagd, echter niet lager dan 20 cm boven NAP. De verwerking stopt als het aantal oplopen dan nog steeds kleiner is dan 50. Als het aantal oplopen wél voldoende is worden de gemiddelde en maximale oploophoogte bepaald, alsmede de percentielwaarden. Ook worden de resultaten in een figuur vertoond. De figuur bevat ook enkele golfgegevens van FL2; deze worden uit het *gs*-bestand van FL2 ingelezen. Dit betekent dat de verwerking van golfoploopdata pas kan plaatsvinden ná de verwerking van de golfdata van FL2.

Vooraf bij de golfdata is het belangrijk zaken als het gebruikte frequentiebereik vast te leggen. Bij jonge golven (tot enkele decimeters hoog; periode tot 3

seconden) blijken de spectrale golfperiodes T_{m01} en T_{m02} namelijk gevoelig te zijn voor het frequentiebereik waarover zij zijn bepaald (Bottema en Beyer, 2002). In paragraaf 6.1.4 van dit rapport wordt dit punt nader onderzocht. Voor het moment wordt volstaan met de constatering dat het cruciaal is dit frequentiebereik te documenteren, hetgeen dan ook gedaan is in Tabel 2.4. Merk op dat bij FL25 en SL29 voorzien is in het meten van jonge golven, en dat daarom ook het frequentiebereik is aangepast.

Tabel 2.4 Relevante gegevens voor de verwerking van golfddata.

	FL2	RDH	FL5	FL9	FL25	FL26	SL29
samplefrequentie f_s (Hz)	4	4	4	4	8	4	4
max. freq. uit FFT, f_+ (Hz)	2	-	2	2	4	2	2
samplenduurtijd T (min)	20	20	20	20	20	20	20
duur deelreeks t (sec)	100	-	100	100	100	100	100
freq. resolutie df (Hz)	0.01	-	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
min. freq. f_{\min} (Hz)	0.03	-	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
max. freq. f_{\max} (Hz)	1.0	-	1.0	1.0	1.5	1.0	1.5
VGS: min. periode golven (sec)	1.0	-	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0

Een paar zaken uit Tabel 2.5 behoeven nog wat toelichting. Allereerst de minimale en maximale frequentie f_{\min} en f_{\max} . Het betreft hier de grenzen van het integratiebereik dat gebruikt wordt bij de bepaling van de spectrale momenten m_n , en van golfperiodematen zoals T_{m01} . VGS is de minimale periode die een individuele golf moet hebben om als golf aangemerkt te worden; dit is relevant voor o.a. de significante golfhoogte en -periode. De frequentieresolutie df is hier omgekeerd evenredig aan de duur van de deelreeks. De spectra resultaten in de gs-bestanden hebben de in Tabel 2.4 getoonde frequentieresolutie. Het getoonde bereik in de gs-bestanden wijkt af van dat in Tabel 2.4: 0.01 tot en met 1.0 Hz.

Stap 6: Grafische weergave van de resultaten

Voor de grafische weergave van de resultaten zijn diverse scripts beschikbaar. Hieronder volgt een kort overzicht van de belangrijkste scripts ¹²:

- golfini.m / golven.m : golfsignaal en golfparameters: één meetpaal, één datablok
- golfhisto2.m : histogrammen momentane waterstand: één locatie, één of meerdere datablokken
- m106ysm.m : dagoverzicht golven, waterstand en wind: één locatie
- s001ysm.m : golfspectra: één locatie
- overz_ysm5slm.m: dagoverzicht golven en waterstanden: alle meetpalen
- vglwind6.m: overzicht wind: alle meetpalen; één of meer dagen
- vgltemperaturen6.m: overzicht lucht- en watertemperaturen: alle meetpalen; één of meer dagen

Stap 7: Aanmaken overzichtsbestanden met verwerkte data

Dit is een relatief eenvoudige verwerkingsslag. Op het ogenblik worden alleen golfgegevens (uit de gs-bestanden) en windgegevens (uit de wnd-bestanden) ingelezen, en in één tabelbestand (*.tbx) samengevoegd. Daarbij wordt er per dag en per meetpaal één bestand met 72 regels (en evenzoveel 20-minutenblokken) aangemaakt. De golfgegevens worden rechtstreeks overgenomen uit de gs-bestanden. De windgegevens zijn (vectorieel) omgerekend tot uurgemiddeldes, in plaats van tienminutengemiddeldes ¹³. Daarnaast worden nog eventuele correcties toegepast (zie ook Hoofdstuk 4; vastgelegd in het hulpprogramma *getwind.m*).

¹² Details worden in Bijlage A gegeven, waar ook de maatwerk-scripts aan bod komen.

¹³ De keuze voor uurgemiddeldes berust op twee zaken. Allereerst heeft het golfveld een zekere insteltijd nodig. Daarnaast willen 10-minuten-gemiddelden nog wel eens fluctueren (vooral bij vlagerige wind). Uurgemiddeldes zijn stabiel en bovendien een algemeen aanvaarde meteorologische middelingsduur.

3 Beschikbare meetgegevens en betrouwbaarheid

Aan het eind van dit hoofdstuk zal in zes balkenschema's (Figuur 3.1) een overzicht worden gegeven van de beschikbare meetgegevens. Hierin is de beschikbaarheid van meetgegevens per dag en per locatie aangegeven. Daarbij is onderscheid gemaakt in golven, windrichting en windsnelheid. Elk balkenschema geeft een periode van twee maanden weer. In de balkenschema's is ook aangegeven of het op of rond het IJsselmeer hard gewaaid heeft (wind > 10 en >15 m/s). Van een volle storm (wind > 21 m/s) was alleen sprake op 26/2/2002 en 9/3/2002. Ook is aangegeven of de gegevens bruikbaar en betrouwbaar zijn¹⁴. In de volgende hoofdstukken wordt nader ingegaan op de betrouwbaarheid van de metingen. Hier wordt volstaan met een overall-indicatie. De legenda van de tabellen is als volgt:

	Beschikbaar
	Deels beschikbaar
	Niet beschikbaar
	Beschikbaar, maar onbetrouwbaar
	Deels beschikbaar, maar onbetrouwbaar
	Beschikbaar maar onbruikbaar
	Deels beschikbaar; onbruikbaar
	Beschikbaar, correctie nodig
	Deels beschikbaar, correctie nodig
	Onbekend

Hieronder wordt de beschikbaarheid besproken, waarbij ook wordt ingegaan op oorzaken van het ontbreken van data.

Algemeen:

Een overall-overzicht van de beschikbaarheid van de data is hieronder gegeven. De beschikbaarheid is per kwartaal aangegeven. Daarnaast bevat de tabel een aparte categorie met harde-wind-data (wind > 15 m/s).

Tabel 3.1 Beschikbaarheid bruikbare golfddata per meetpaal, ter indicatie

	FL2	DIJK	FL5	FL9	FL25	FL26	SL29
1e kwartaal	98%	0%	96%	97%	58%	93%	95%
2e kwartaal	97%	1%	99%	96%	95%	76%	95%
3e kwartaal	94%	36%	89%	71%	98%	72%	92%
4e kwartaal	99%	2%	91%	74%	68%	86%	84%
> 15 m/s	99%	47%	92%	84%	79%	87%	93%
TOTAAL	97%	9%	94%	84%	80%	82%	92%

¹⁴ Bruikbaar: de metingen geven tenminste enige informatie over wind/golfcondities. Betrouwbaar is strenger: de kwaliteit van de metingen moet dan ook voldoende zijn.

De beschikbaarheid van de golfoploopdata in Tabel 3.1 valt in de meeste kwartalen extreem laag uit. Dat komt omdat alleen dagen met voldoende (analyseerbare) oploop zijn meegeteld; het percentage aanwezige oploopbestanden is aanzienlijk groter (64-99%).

De beschikbaarheid van de golfdata is beter dan in enig voorgaand seizoen. In voorgaande seizoenen was de beschikbaarheid al goed te noemen als van de meeste palen ca. 60-70% van de data beschikbaar was, en van één of twee palen ruim 80%. Dit seizoen lag de beschikbaarheid bij *alle* meetopstellingen boven de 80%. Bij FL2 was de beschikbaarheid zelfs 97%. Deze percentages zijn betrokken op alle meetdagen van het seizoen. Een vergelijkbaar beschikbaarheidspercentage wordt gevonden als alleen dagen met minimaal 15 m/s wind (harde wind) worden meegeteld. De betrouwbaarheid van de meetdata is nog niet altijd in orde. Hieronder zullen per meetpaal de oorzaken van het ontbreken of niet betrouwbaar zijn van de data worden besproken.

FL2

Dit seizoen was er erg weinig uitval bij FL2. De uitval die er was concentreerde zich in de maanden december en januari. In deze maanden waren er diverse dagen waarop de *.DAT-bestanden foute datumaanduidingen bevatten¹⁵ (dagnummers die niet overeenkwamen met de bestandsnaam). In september 2002 bleek dat er al die tijd een probleem met de datalogger was geweest: tijdens stroomonderbrekingen (bij onderhoud of lege accu's) werd de tijd van de logger gewist. In alle gevallen nam de logger de juiste tijd weer over tijdens het dagelijkse inbellen, rond middernacht.

Op de kwaliteit van het golvensignaal wordt ingegaan in Hoofdstuk 6 (details aldaar). Vanaf eind mei 2002 hebben de metingen het label "onbetrouwbaar" gekregen vanwege tekenen van vervuiling (algenaangroei). Daarnaast was er een aantal dagen waarop het meetsignaal verdacht was omdat de gemeten momentane waterstand hoger kwam dan de top van het meetinstrument. Deze dagen zijn in Figuur 3.1 met een "^" aangegeven. Op 28 september was er sprake van een kortdurende elektronische storing, op de overige dagen was er sprake van een combinatie van hoge meerpeilen en stormachtige wind. Tot slot waren er diverse dagen waarop de zgn. voorkeurswaarden van het meetinstrument (par. 6.1.1) meetfouten kunnen hebben veroorzaakt. Omdat het hier om een groot aantal kortdurende zwakke-wind-situaties gaat zijn de bijbehorende dagen niet als onbetrouwbaar aangeduid.

Op de kwaliteit van de windmetingen wordt ingegaan in Hoofdstuk 4. In de periode tot 28 juli bleek de windvaan van FL2 niet helemaal goed uitgericht te zijn zodat een windrichtingscorrectie van ruim 10° nodig bleek (Tabel 4.2). Daarna waren alle winddata enkele weken lang onbruikbaar door een gesprongen zekering, vermoedelijk als gevolg van zwaar onweer op de avond van 27 juli. Tot slot waren de windsnelheden tijdens de wintermaanden op diverse dagen onbetrouwbaar: op willekeurige momenten werd de windsnelheid ineens veel te hoog (2 à 3 keer te hoog). Pas aan het eind van het meetseizoen (mei 2002) kon de oorzaak van het probleem worden opgespoord: "kritische" elektronica in de meetversterker van de windset.

Dijk

De oploopbaak is lange tijd (bijna een jaar lang) defect geweest, zodat deze uitsluitend uitzonderingswaarden gaf. Na de laatste reparatie, eind november 2001 heeft de oploopbaak echter uitstekend gefunctioneerd. Na alle reparaties was er een groot aantal dagen met zowel hoge meerpeilen als harde wind.

¹⁵ Bij verwerking zijn bestanden met verdachte dateringen extra goed gecontroleerd. Gegevens met een foute datering zijn weggezet en niet in de verwerking en analyse van golf-, wind- en temperatuurdata meegenomen.

Hierdoor, en door het uiteindelijk toch nog goed functioneren van de oploopbaak, is uiteindelijk een zeer groot aantal dagen (ca. 47) met analyseerbare golfoploop beschikbaar gekomen, vermoedelijk ongeveer evenveel als in de *drie* voorgaande seizoenen samen.

FL5

Bij FL5 was nagenoeg alle uitval toe te schrijven aan problemen bij het walstation. Begin september 2001 'hing' de wal-PC enkele dagen. Medio maart is de stroomtoevoer van het walstation onderbroken zodat de data van enkele meetdagen verloren gingen. Helaas stond er die dagen juist een stormachtige oostenwind: een zeldzame situatie die het meten waard was geweest. Vanaf 27 maart is er tenslotte twee weken uitval geweest omdat het walstation verplaatst moest worden.

Meetproblemen waren er relatief weinig bij FL5. Rond 9 januari is er mogelijk sprake geweest van enig (drijf?)ijs. In de stormachtige periode van eind februari en begin maart kwam het af en toe voor dat de momentane waterstand hoger was dan de top van de capstaaf; dergelijke verdachte gevallen zijn met een "^" aangegeven. In sommige gevallen, in ieder geval 28/2/02 en 9/3/02, moet rekening worden gehouden met gemiddelde waterstanden die verdacht hoog zijn. De reden is dat de bovenkant van de capstaaf in die periode lek is geraakt, zodat er bij sterke golfslag water in de massabuis van de capstaaf terecht kon komen.

FL9

Bij FL9 was het uitvalpercentage wat groter dan bij FL5. FL9 had dan ook niet allen te maken met de hierboven beschreven walstation-problemen maar ook met problemen op de meetpaal zelf. Zo veroorzaakte een eind maart (2002) defect geraakte capstaaf 2 weken dataverlies in de maand april. Daarnaast zorgden zenderproblemen voor tamelijk veel uitval in de maand januari. Op tal van dagen sloegen bij FL9 de golven over de top van de capstaaf heen (^) terwijl het meetsignaal tegelijkertijd diverse uitzonderingswaarden (-6999) bevatte. Op sommige dagen gebeurde dit alles zo vaak dat de meetdag als onbetrouwbaar moest worden aangeduid omdat de golfhoogtematen $H_{1/3}$ en H_{m0} uit de pas gingen lopen. Tot slot (par. 6.4.2) zijn er aanwijzingen dat in het zomerhalfjaar de golfhoogtes te laag kunnen uitvallen door algenaangroei. Het lukte echter niet om specifieke dagen met algenproblemen aan te wijzen.

FL25

Ook dit seizoen verliep de inwinning het minst goed bij FL25. Dataopslagproblemen tussen 5 en 18 juli droegen hier in belangrijke mate toe bij, alsmede het feit dat tot 23 augustus geen enkel dagbestand compleet was door een te klein geheugen van de datalogger. Tot 20 september was de datumgrens in de bestanden overigens 33 minuten te laat (0h33) wat enig ongemak bij de verwerking opleverde: één 20-minuten datablok (van 0h-0h20) kwam namelijk steeds in de verkeerde directory terecht. Daarna verliep de inwinning lange tijd goed, met slechts af en toe 1 à 2 dagen uitval door communicatie-problemen (met FL25) en PC/netwerkproblemen (binnen RDIJ). Medio april traden echter modemproblemen op, gevolgd door een opgeblazen datalogger. Hierdoor gingen bijna drie weken data verloren. Na medio mei was er wederom slechts sprake van incidentele uitval.

De meetproblemen door vervuiling en algen bleken bij FL25 zodanig te zijn dat vrijwel het hele zomerhalfjaar als onbetrouwbaar aangeduid moest worden. Tot oktober 2001 kwamen daar nog meetfouten door voorkeurswaarden van de FL25-capstaaf (par. 6.1.1) bij. Tot slot zijn enkele data in de eerste week van januari onbetrouwbaar vanwege duidelijke tekenen van aanvriezing.

FL26

Bij FL26 was het percentage beschikbare data niet veel hoger dan bij FL25. Modemproblemen gevolgd door een aanvaring rond kerst zorgden bij elkaar voor ruim 6 weken uitval. Daarnaast ontbraken op enkele losse dagen (delen van de) databestanden door incidentele communicatieproblemen (met FL26) en PC/netwerkproblemen (binnen RDIJ). Verder was tussen 21/1/02 en 16/3/02 de datumgrens in de ruwe-data-bestanden veel te vroeg (rond 22h ipv 24h), waardoor bij de verwerking tal van 20-minuten-datablokken in de verkeerde directory (één dag na de meetdag) terecht kwamen.

Meetfouten deden zich bij FL26 vooral in de eerste maanden van het meetseizoen voor (jul.-sept. 2001), en wel door een combinatie van algen (meetdagen aangeduid als onbetrouwbaar) en – tot 23/8 – voorkeurswaarden van de gebruikte capstaaf. Daarnaast gebeurde het op enkele dagen dat golven over de top van het meetinstrument heensloegen, zie de “^” - markeringen.

De windsnelheidsmetingen waren tot aan de aanvaring een fors deel van de tijd onbetrouwbaar. Net als bij FL2 hing dit samen met “kritische” elektronica van de meetversterker van de windset. De windrichtingsmetingen waren dit seizoen betrouwbaar. Ook de noodzakelijke windrichtingscorrecties bleven beperkt; ze waren telkens kleiner dan 10°.

SL29

Net als bij de andere GSM-palen (FL25 en FL26) was er bij SL29 af en toe incidentele uitval. Verder was er begin januari uitval door ijsgang (1 week), en in de 2^e helft van juni door communicatieproblemen met de meetpaal (ruim 1 week uitval). Tot slot lag tot medio september de datumgrens in de bestanden te ver van middernacht (rond 23h20), net als bij FL25.

De golfddata van het zomerhalfjaar zijn relatief onbetrouwbaar, net als bij FL25. Tot eind september 2001 waren er meetfouten door zowel algen als voorkeurswaarden. Ook vanaf mei 2002 zijn er enkele aanwijzingen voor algenaangroei. Ook in het winterhalfjaar zijn er dagen met onbetrouwbare golfddata. Na wat kwakkelweer in december kwam er begin januari bijna twee weken lang vast ijs. Op 16 januari raakte de capstaaf gedeukt toen het laatste ijs – na een week lichte dooi – in beweging kwam. Op 1 februari werd de capstaaf provisorisch rechtgebogen; eind juni werd de beschadigde capstaaf vervangen. Vanwege de capstaafbeschadiging kreeg de periode van 15/1/02 tot 1/2/02 het label “onbetrouwbaar”. De periode 1/2/02 tot 21/6/02 (rechtgebogen capstaaf) kreeg grotendeels het label “betrouwbaar” al zijn kleine meetfouten (tot 10%) in die periode niet helemaal uit te sluiten.

De waterstandsmetingen hebben het label “onbetrouwbaar” als sprake is van grote verschillen (>10cm) tussen de capstaaf- en druksensorwaterstanden. In de zomer treden zulke verschillen vooral op tijdens algenperiodes, in de winter tijdens vorstweer (bevroren druksensor). Een geval apart is 28 december toen verschillen tussen capstaaf- en druksensorwaterstanden samenvielen met sterk niet-lineaire golven bij storm (zie beschrijving 28/12 in Hoofdstuk 8).

Wat de windmetingen betreft: ook bij SL29 brandde een zekering van de windset door (8/8/2001, bij onweer?). Op 22 augustus zijn de zekering en windvaan vervangen. De nieuwe vaan werd echter niet goed uitgericht (te zwakke wind bij plaatsing) want achteraf bleek een windrichtingscorrectie van bijna 25° nodig (zie Figuur 3.1 en Tabel 4.2). Op 25 september lijkt de windrichting softwarematig te zijn aangepast zodat de correctie grotendeels verviel (voor details, zie par. 4.5). Daarna bleven problemen uit tot eind april toen de vaan defect raakte: de staart bleek te zijn afgewaaid. Van 29/4 tot 21/6 zijn de windrichtingsmetingen daardoor nauwelijks bruikbaar. Door het vectorieel middelen van de wind zijn ook de windsnelheidsmetingen over die periode niet geheel betrouwbaar al lijken de fouten op het eerste gezicht erg mee te vallen.

EXCEL BLAD 1

EXCEL BLAD 3

4 Validatie van windgegevens

Windgegevens zijn cruciaal bij de interpretatie van golfmetingen op meren. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de validatie van de gemeten wind. Toepassingen en de interpretatie van de windgegevens komen in Hoofdstuk 7 aan bod. In dit hoofdstuk zal allereerst het belang van goede windgegevens worden belicht (paragraaf 4.1). In paragraaf 4.2 volgt een inventarisatie van beschikbare windgegevens. De methode van kwaliteitscontrole wordt daarna besproken in paragraaf 4.3. De daarop volgende paragraaf geeft nog enkele relevante gegevens over (onderhoud en aanpassingen aan) de instrumentatie. Vervolgens komen de resultaten aan bod in de paragrafen 4.5 (windrichting), 4.6 (10-meter-windsnelheid) en 4.7 (overige zaken). De belangrijkste bevindingen worden nog eens samengevat in paragraaf 4.8.

4.1 Belang van goede windmetingen

Bij golfmetingen is een goed interpretatiekader bijzonder belangrijk. Een voorbeeld: het pure feit dat “FL2 wel eens golven van zo’n 1.5 meter heeft” maakt ons weinig wijzer. Met een ononderbroken, meerjarige meetreeks kan in elk geval een *kans* aan een dergelijke gebeurtenis worden gekoppeld. Zo’n meetreeks is er echter nog niet. Het beste alternatief is het koppelen van de golfgegevens aan de drijvende kracht, de wind. Elke fout in de gebruikte wind heeft echter gevolgen voor de interpretatie van de golfdata (zie voorbeeld hieronder). Representatieve en nauwkeurige windmetingen zijn daarom cruciaal in dit project.

Een eerste indicatie van de gewenste nauwkeurigheid van de windgegevens kan nu al worden gegeven. Zo blijkt uit figuur 3 in Bottema en Beyer (2002) en uit hoofdstuk 6 van het vorige golfmetingenrapport (Bottema, 2002) dat bij een niet al te sterke wind en relatief diep water de golfhoogte ruwweg evenredig is met de windsnelheid¹⁶. Een fout van 10% in de gemeten windsnelheid levert dan ook ongeveer 10% (interpretatie-)fout in de golfhoogte, die dan bijvoorbeeld niet aan een 10 m/s maar aan een 11 m/s wind wordt gekoppeld. Aan de randen van beschutte gebieden (op de locatie FL2 bijv. bij ZO-wind), wanneer de wind schuin aflagig is, kan 30° verschil in windrichting overeenkomen met 50% verschil in golfhoogte (Bottema 2002; hoofdstuk 7). Om (interpretatie-)fouten in de golfhoogte beperkt te houden tot maximaal 10% moet de windrichting (in die situatie) dus binnen 6° bekend zijn.

4.2 Inventarisatie van gegevens

Bij de beschikbare windgegevens kan onderscheid worden gemaakt tussen door RDIJ gemeten gegevens en door anderen gemeten (referentie-)gegevens.

De door RDIJ gemeten gegevens zijn beschikbaar op drie meetpalen: FL2, FL26 en SL29. Gedurende het stormseizoen 2001-2002 waren op alle drie de

¹⁶ Ook de golfgroeikromme van Kahma en Calkoen (1992) geeft bij vaste strijklengte een golfhoogte die in eerste benadering evenredig is met de windsnelheid ($H_{m0} \sim U_{10}^{1.1}$)

locaties 1-seconde samples van de op 10 meter gemeten windsnelheid en windrichting beschikbaar. Op FL2 zijn daarnaast ook windsnelheidsgegevens op 3 meter hoogte beschikbaar. In het verwerkingsproces (zie paragraaf 2.6) worden de 1-seconde-samples geaggregeerd tot 10-minuten-gemiddelden.

Een tweede gegevensbron bestaat uit gegevens uit de KIS-klimatologische database van het KNMI. Deze worden eens per maand gestuurd aan Ebo Kasemier (RIZA/WSE). De auteur voegt deze bestanden samen tot kwartaalbestanden (het tot 2001 gehanteerde dataformaat) met de naam "rwsJJMMX". Daarbij staat JJ voor jaar, MM voor (begin-)maand en X = a/b/c voor Schiphol, Stavoren en De Bilt.

Het bestand voor Schiphol bestaat uit regels met stationscode, datum, tijd (hele uren), windrichting en windsnelheid. De windrichting is afgerond op een veelvoud van 10°; de windsnelheid is uurgemiddeld en gegeven in hele m/s en vermenigvuldigd met 10. Merk op dat de tijden zijn gegeven in GMT; in het huidige project wordt gewerkt met MET = GMT – 1 uur.

Het bestand voor Stavoren (coördinaten 154725 545250) heeft dezelfde opbouw maar bevat 6 kolommen; de 6^e kolom bevat de luchttemperatuur. Het bestand voor De Bilt bevat alleen gegevens van de globale straling.

Een derde gegevensbron vormen de gegevens die in het kader van de WDIJ (Waarschuwingdienst Dijken IJsselmeergebied) worden ingewonnen via het MFPS-presentatiesysteem. Het gaat zowel om waterstanden uit het MSW (Monitoring Systeem Water) als om 10-minuten windgegevens van het KNMI. De laatste betreft ruwe (niet geverifieerde of gecorrigeerde) windgegevens van de stations Wijdenes, Berkhout, Stavoren-Haven en Stavoren, die per modem rechtstreeks worden overgehaald van de betreffende stations (dus niet via De Bilt). MFPS schrijft alle gegevens naar tijdelijke bestanden; elk bestand bevat voor 8 etmalen gegevens van één variabele van één meetstation; de tijden zijn gegeven in MET. De bestanden worden in principe wekelijks overgehaald naar RIZA/WSH, waar ze worden geconverteerd naar hetzelfde formaat als de windbestanden van de golfmeetpalen. Ook worden dan overzichtsplots gemaakt van wind en waterstanden zodat interessante meetdagen eruit kunnen worden gepikt.

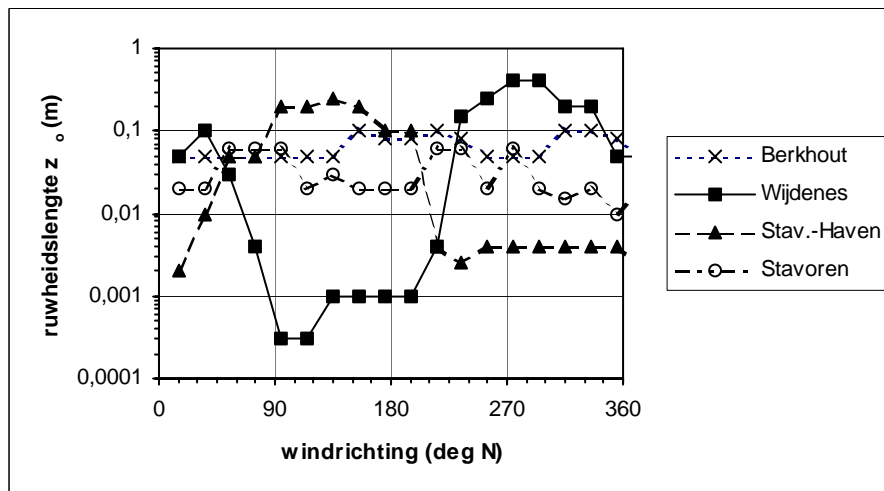
Het grote voordeel van deze gegevensbron is dat deze windgegevens levert die *direct* beschikbaar zijn, vaak zelfs nog vóór de golfmeetbestanden. Bovendien wordt de toepassing hier niet bemoeilijkt door afrondingen. Een nadeel is dat alleen data vanaf november 2000 beschikbaar zijn.

Een vierde gegevensbron bestaat uit de bestanden met zgn. potentiële wind uit het HYDRA-project. Deze kunnen via de KNMI-website (www.knmi.nl/samenw/hydra) worden gedownload. De bestanden zijn gebaseerd op bovengenoemde KNMI-KIS-windgegevens, en aangevuld met kwaliteitscodes. De windsnelheden zijn afgeronde KNMI-KIS-waarden, waarop nog een beschuttingscorrectie is toegepast. Het voordeel van deze gegevensbron is dat eventuele gaten in de vorige bron kunnen worden opgevuld. Bovendien levert de HYDRA-site niet alleen gegevens van Stavoren maar ook gegevens van andere stations in/bij het IJsselmeergebied (Berkhout, Wijdenes, Stavoren-Haven).

Een nadeel van de HYDRA-gegevens is dat het potentiële wind betreft, m.a.w. winden voor een zo goed mogelijke KNMI-opstelling (vlak grasland zonder obstakels rondom). Voor dit rapport zijn echter vooral de open-water-windsnelheden van belang. Bij aanlandige wind blijken de *ruwe* (niet de potentiële) windsnelheden van Wijdenes en Stavoren-Haven een redelijke benadering van de open-water-wind te geven (Bottema, 2002). Helaas is het

station Stavoren-Haven in april 2002 opgeheven. Hiermee is een zeer waardevolle bron van windgegevens verloren gegaan. Voor het hier beoogde gebruik van de HYDRA-bestanden is het van groot belang de omrekeningsfactoren van ruwe naar potentiële wind te kennen. Voor de stations Berkhout, Wijdenes, Stavoren-haven en Stavoren heeft Verkaik (2001) recentelijk ruwheidslengtes en (daaruit afgeleid) beschuttingsfactoren als functie van de windrichting bepaald. De ruwheidslengte z_o is door Verkaik bepaald met de zogenaamde vlaagmethode (Wieringa en Rijkoort, 1983). Aldus bepaalde ruwheden zijn een goede maat voor de aërodynamische ruwheid van het bovenwindse terrein, én een goede indicatie voor de aanwezigheid van bovenwindse obstakels. Figuur 4.1 geeft een overzicht van de ruwheden voor elk van de stations. Merk op dat een logaritmische schaal is gebruikt omdat de ruwheidslengtes sterk variëren.

Figuur 4.1 Ruwheidslengte als functie van windrichting, voor KNMI-stations nabij IJsselmeer-



Berkhout en Stavoren zijn echte landstations. De ruwheidslengtes liggen daar bij alle windrichtingen tussen 0.01 en 0.1 meter. Deze waarden horen bij een (zeer) open tot ruwweg open landschap (Wieringa en Rijkoort, 1983). Stavoren-Haven en Wijdenes hebben bij aflandige wind met ruwheden tot 0.25 resp. 0.4 meter te maken; waarden die horen bij een tamelijk ruw landschap. Bij aanlandige wind is z_o in de orde van 0.001 meter. Deze waarde is wat groter dan de door Wieringa en Rijkoort (1983) gehanteerde waarde voor grote wateroppervlakken (0.0002 m), maar nog altijd kleiner dan de waarde voor extreem glad landoppervlak (0.005 m). We kunnen derhalve concluderen dat Wijdenes voor windrichtingen tussen 75° en 215° (oosten- tot zuidenwind) een redelijk goede open-water-wind heeft. Bij Stavoren-Haven is dat tussen 215° en 360° het geval, dus voor vrijwel alle westelijke windrichtingen. Alleen bij noordoostenwind (15°-75°) heeft geen van de stations een bruikbare open-water-wind.

De verhouding tussen potentiële wind U_p en de werkelijk gemeten wind op 10 meter hoogte, U_{10} , kan (zie ook verg. 3.14 in Wieringa en Rijkoort, 1983) worden bepaald uit:

$$(4.1) \quad U_p = U_{10} * 0.764 * \ln(60/z_o) / \ln(10/z_o)$$

De 'exposure factor' EF is hier gedefinieerd als U_{10}/U_p . Merk op dat bij $z_o = 0.03$ meter de EF (per definitie) gelijk aan één is. Met verg. 4.1 en Figuur 4.1 kan voor 18 windrichtingen de EF van elk station op eenvoudige wijze worden bepaald. Vervolgens kunnen de EF-waarden lineair worden geïnterpoleerd naar elke gewenste windrichting. Met deze EF-waarden zijn de potentiële winden uit de HYDRA-bestanden teruggerekend naar de gemeten winden. Uit

vergelijking met de (in hele m/s gegeven) KIS-gegevens blijkt dat dit terugrekenen goed werkt, behoudens kleine afrondfouten van circa 0.1 m/s.

4.3 Methode kwaliteitscontrole windgegevens

Bij de kwaliteitscontrole van de windgegevens kan onderscheid worden gemaakt tussen de regelmatige controles gedurende het stormseizoen, en controles achteraf, bijvoorbeeld bij het opmaken van dit rapport. In beide gevallen gaat het om controles van verwerkte gegevens; de controle van de bestanden met ruwe data berust in principe bij RDIJ/ANM.

De tussentijdse controles werken als volgt. Tijdens een controledag worden van zoveel mogelijk meetpalen (FL2, FL26, SL29) gegevens verwerkt. Met MFPS worden ook recente KNMI-gegevens opgehaald en geconverteerd. De gemeten windsnelheden worden vervolgens in één grafiek geplot, samen met de KNMI-gegevens. Hetzelfde gebeurt voor de windrichtingen. Beide grafieken worden op kwalitatieve wijze beoordeeld:

- is overal het tijdsverloop van de windsnelheid vergelijkbaar?
- zijn de windsnelheidsverschillen verklaarbaar (uit land-water-overgangen, dagelijkse gang, weersystemen)?
- is het windrichtingsverloop op elk station vergelijkbaar?
- zijn er systematische verschillen? Hoe groot?

De uitkomsten van dergelijke controles zijn een kwalitatief oordeel over de windsnelheid (goed/verdacht/fout) en een globaal oordeel over de windrichting. Een eventuele windrichtingsbias van 10° of meer wordt op deze wijze vrijwel steeds onderkend.

Bij een overall-controle wordt een grote hoeveelheid data van de meetpalen en het KNMI verwerkt, bijvoorbeeld de gegevens van een compleet stormseizoen. Eerst volgt per maand een visuele controle; de opzet daarvan is hetzelfde als voor de hierboven beschreven tussentijdse controles. Dagen en periodes met defecte instrumenten kunnen zo eenvoudig worden geïdentificeerd. Ook kan zo nog eens worden gecontroleerd of alle gegevens op de juiste manier zijn weggeschreven.

De problemen met het uitrusten van de windvaan (par. 2.4) maken het noodzakelijk de windrichting nader te verifiëren. Dit gebeurt door de daggemiddelde windrichtingsverschillen¹⁷ tussen meetpaal en KNMI-station (Stavoren) uit te zetten als functie van de tijd (het dagnummer). Systematische verschillen duiden dan op een niet goed uitgerichte windvaan. Plotselinge sprongen kunnen duiden op het opnieuw plaatsen of opnieuw uitrusten van een windvaan, óf op een softwarematige correctie.

Bij de windsnelheid worden per windrichting windsnelheidsverhoudingen van de meetpalen onderling bepaald. Ook worden verhoudingen bepaald tussen (i) de uurgemiddelde wind op de meetpalen en (ii) de KNMI-stations. Alle windsnelheidsverhoudingen worden gecontroleerd op plausibiliteit (fysische verklaarbaarheid). Verdere controles zijn mogelijk door bovenstaande procedure te herhalen voor verschillende meetperiodes, zodat de data voor en na een instrumentwisseling kunnen worden bekeken.

4.4 Belangrijke instrumentgegevens

Problemen met instrumenten, instrumentwisselingen en – in mindere mate – instrumentcorrecties worden vaak vermeld in de uitvoeringsverslagen die na

¹⁷ In navolging van Verkaik (2001) wordt uurlijks de verschilhoek $\Delta\theta = \theta_{\text{meetpaal}} - \theta_{\text{KNMI}}$ bepaald, en wordt $\sin(\Delta\theta)$ gemiddeld. Zo worden problemen met de discontinuïteit rond de Noordrichting vermeden. Er wordt gewerkt met daggemiddelde richtingen (bij tenminste 5 m/s wind) om de hoeveelheid data en de spreiding daarin hanteerbaar te maken.

onderhoudstochten worden gemaakt. Bij de validatie van windgegevens zijn uitvoeringsverslagen daarom een belangrijke bron van informatie. Tabel 4.1 geeft een indruk van de belangrijkste bevindingen. Het moet worden benadrukt dat de gegevens uit de uitvoeringsverslagen niet nader zijn geverifieerd, en dat ook niet geheel zeker is dat alle relevante zaken (denk aan softwarematige windrichtingscorrecties) in uitvoeringsverslagen zijn vastgelegd. De gegevens in Tabel 4.1 zijn daarom uitsluitend ter indicatie.

Tabel 4.1 Belangrijkste gegevens m.b.t. wind uit de uitvoeringsverslagen, ter indicatie

paal	datum	Tijd	Opmerkingen
FL2	21/8/01	10h	nieuwe vaan/cup: (2756/1154 wordt 2461/1997) + zekering
FL26	30/11/01		nieuwe cupanemometer (op: 2058, af: 2191)
FL26	18/12/01		nieuwe cupanemometer (op: 2836, af: 2058)
FL26	22/1/02		paal met zelfde apparatuur opnieuw geplaatst (na aanvaring)
SL29	22/8/01	11h30	nieuwe zekering + vervanging: vaan 2333 wordt 2059
SL29	27/11/01		nieuwe cupanemometer (op: 1154, af: 2826)
SL29	10/1/02		cup/vaan 1154/2059 zou vervangen zijn ???
SL29	21/6/02		vervanging cup/vaan 1154/2059 door 588/587

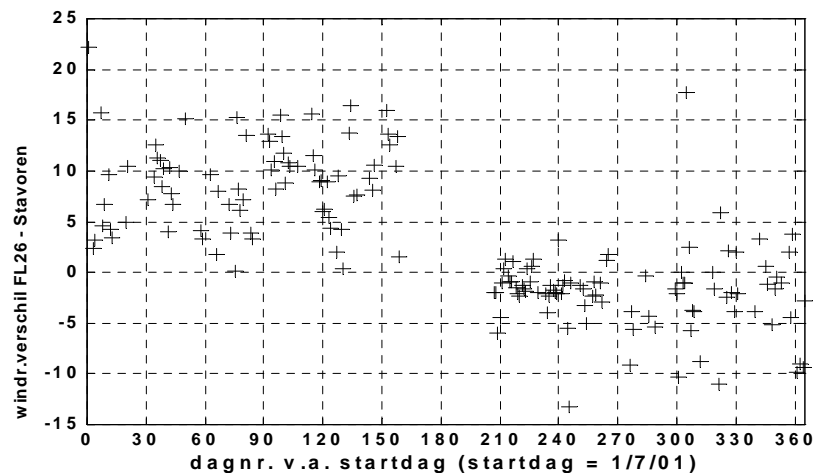
De nummers bij vaan/cup (cup=windsnelheidsmeter) zijn RDIJ-registratie-nummers. Merk op dat instrumenten na revisie en evt. reparaties (in de zomer) soms opnieuw worden gebruikt. Zo zijn de nieuwe instrumenten van FL2 een jaar eerder op FL26 gebruikt. Een vorig jaar op SL29 gebruikte windvaan (2059) werd daar dit jaar – na reparatie – opnieuw ingezet. Periodes waarin de instrumenten niet goed hebben gefunctioneerd en softwarematige aanpassingen (van de windrichting) worden niet altijd goed gedocumenteerd in de uitvoeringsverslagen van de onderhoudstochten. Om zicht te krijgen op deze zaken moeten de winddata worden onderzocht. Dit zal gebeuren in de volgende paragrafen.

4.5 Validatie van de windrichting

In Hoofdstuk 2 is al opgemerkt dat het moeilijk is de wind vanen exact ten opzichte van het Noorden uit te richten. Vaak blijken achteraf kleine correcties nodig te zijn. In deze paragraaf wordt ingegaan op het afleiden van deze windrichtingscorrecties, en op de validatie van windrichtingsgegevens in bredere zin. Bij het afleiden van windrichtingscorrecties wordt gebruik gemaakt van KNMI-gegevens van nabijgelegen stations. Ook bij tussentijdse controles van de windrichting wordt gebruik gemaakt van KNMI-gegevens. Hier wordt het windrichtingsverschil tussen de meetpaal en een KNMI-referentiestation echter over een langere periode (weken tot maanden) bekeken. Uit vorige analyses (Bottema, 2002) bleek dat Stavoren (154725 545250) een geschikt referentiestation is. Deze keuze zal hier dan ook gehandhaafd worden.

In Figuur 4.2 is het verschil tussen de windrichting op de meetlocatie FL26 en het KNMI-station Stavoren getoond. De resultaten zijn geplot als functie van een dagnummer, waarbij het dagnummer 1 overeenkomt met 1/7/2001 en het nummer 365 met 30/6/2002. Om te voorkomen dat situaties met slecht gedefinieerde windrichtingen te zwaar meetellen zijn uitsluitend dagen meegenomen waarbij tenminste 6 uur lang een windsnelheid van minimaal 6 m/s stond. Omwille van de leesbaarheid zijn in de figuur de daggemiddelde windsnelheden weergegeven.

.....
Figuur 4.2 Daggemiddeld windrichtingsverschil tussen FL26 en Stavoren, voor dag 1 t/m dag 365 (1/7/01 t/m 30/6/02).



Bovenstaande figuur toont rond dag 180 (eind december 2001) een trendbreuk en een periode zonder data. De afwezigheid van data hangt samen met modemproblemen, gevolgd door een aanvaring. Op 21 januari was de meetpaal weer rechtgezet en was alle apparatuur weer opnieuw geïnstalleerd. De grafiek laat zien dat het toen goed is gelukt de vaan op het Noorden uit te richten: voor de aanvaring was de gemiddelde afwijking in de windrichting iets minder dan 10° , erna ongeveer -2° .

Een belangrijk punt is de spreiding in de windrichtingsverschillen van Figuur 4.2. De standaarddeviatie rond het gemiddelde windrichtingsverschil (voor óf na de aanvaring) bedraagt circa 6° . Deze spreiding maakt het feitelijk onmogelijk om op basis van slechts één dag metingen (of minder) een voldoende nauwkeurige windrichtingscorrectie vast te stellen¹⁸. Een enkele keer komen echte “uitbijters” voor en kan het windrichtingsverschil tussen een meetpaal en Stavoren meer dan 15° afwijken van het algemene beeld. In een aantal gevallen zijn deze gevallen te herleiden tot situaties met een sterk inhomogeen windveld door langs- of overtrekkende lagedrukgebieden, fronten met een scherpe windsprong of (in het zomerseizoen mogelijk ook) zeewindsituaties.

Voor de stations FL2 en SL29 is een soortgelijke analyse uitgevoerd als voor FL26. Al met al komen we (door vergelijking met Stavoren) op de volgende set windrichtingscorrecties voor het stormseizoen 2001/2002:

.....
Tabel 4.2 Toe te passen windrichtingscorrecties; per meetpaal per periode

paal	van	t/m	waarde	corr.	Opmerkingen
FL2	19/3/01	27/7/01		-12°	waarde vorig seizoen voldoet nog
FL2	27/7/01	21/8/01	-999		zekering defect (waarschijnlijk blikseminslag)
FL2	21/8/01			-5°	m.i.v. 10h; na vervanging windvaan
FL26	19/5/01	31/12/01		-7°	waarde vorig seizoen voldoet nog
FL26	1/1/02			$+2^\circ$	na herstel schade aanvaring
SL29	1/7/01	7/8/01		11°	waarde vorig seizoen niet meer adequaat
SL29	8/8/01	22/8/01	-999		zekering defect (tot 22/8; 11h30)
SL29	22/8/01	24/9/01		24°	nieuwe vaan (kennelijk niet goed uitgericht)
SL29	25/9/01	9/1/02		5°	aanpassing dataloggersoftware ?
SL29	10/1/02	28/4/02		2°	nieuwe windvaan
SL29	29/4/02	21/6/02	-999		vaan onbetrouwbaar (staart afgewaaid)

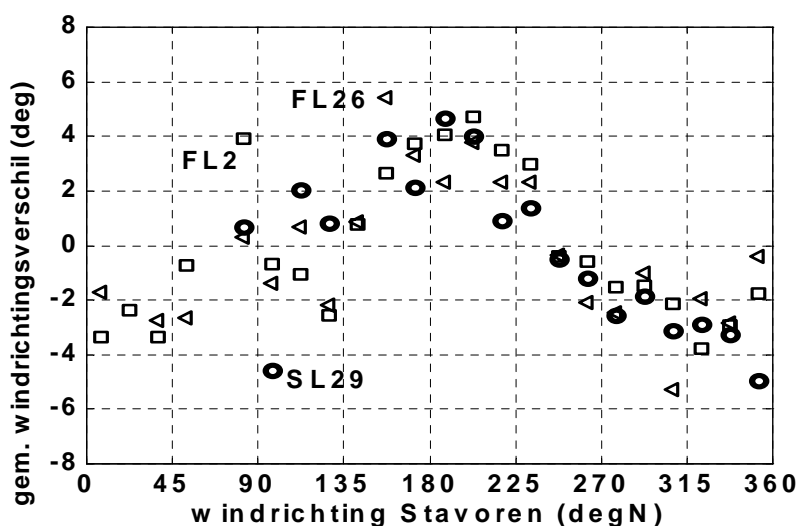
¹⁸ De fout in de windrichting zou minder dan 6° moeten zijn, zie paragraaf 4.1.

De (on)nauwkeurigheid (1σ) in bovenstaande correcties is ongeveer 1° à 2° (afhankelijk van de lengte van de periode). Bij FL2 en FL26 zijn de correcties uit het seizoen 2000-2001 (Bottema, 2002) gehandhaafd tot de eerstvolgende instrumentwisseling omdat deze correcties nog goed bleken te voldoen (fout niet meer dan 2°). Bij SL29 is de windvaan in augustus 2001 niet goed uitgericht, vermoedelijk als gevolg van te zwakke wind tijdens de plaatsing. Uit de metingen blijkt dat er rond de eerstvolgende onderhoudsdag (25/9/2001) een softwarematige (?) correctie moet hebben plaatsgevonden. Deze correctie is echter niet in de uitvoeringsverslagen vermeld.

Overigens hoeven correcties kleiner dan 5° strikt genomen niet te worden toegepast; de ruwe metingen hadden het voordeel van de twijfel kunnen krijgen. Omdat er toch al windrichtingscorrecties moesten worden toegepast is er echter voor gekozen ook de kleine correcties mee te nemen.

Het gebruik van windrichtingscorrecties op basis van de wind te Stavoren betekent niet dat windrichtingsmetingen op de golfmeetlocaties nu overbodig zijn. Uit de spreiding in Figuur 4.2 blijkt dat zelfs gemiddeld over een dag de windrichtingen op een meetpaal en te Stavoren significant kunnen verschillen. Bij kortere middelingstijden (10 minuten of een uur) zijn die verschillen naar verwachting nog aanzienlijk groter, zeker bij kleinschalige stormvelden.

Figuur 4.3 Windrichting op FL26 (losse driehoekjes), Slotmeer (cirkels) en FL2 (vierkantjes) minus windrichting te Stavoren.



Na toepassing van de windrichtingscorrecties uit Tabel 4.2 is op geen van de meetpalen meer sprake van een *systematische* windrichtingsafwijking als functie van de tijd. Wel blijkt uit Figuur 4.3 dat er nog sprake is van een kleine windrichtingsafwijking als functie van de windrichting. De afwijking vertoont echter hetzelfde verloop voor alle meetpalen (vierkant = FL2, driehoek = FL26, cirkel = SL29). Dit suggereert dat de afwijkingen in feite bij het referentiestation – Stavoren – optreden. Mogelijk zijn er daar toch nog factoren (obstakels op enige afstand?) die de stroming enigszins kunnen verstoren. Een andere voorzichtige conclusie die kan worden getrokken is dat de windvannen van FL2, FL26 en SL29 kennelijk niet worden beïnvloed door andere onderdelen van de meetopstelling. Of deze conclusie ook geldt voor de windsnelheid is nu nog niet te zeggen.

4.6 Validatie van de windsnelheid

Validatie van de windsnelheid is zo mogelijk nog belangrijker dan validatie van de windrichting. De ruimtelijke variaties in de windsnelheid zijn namelijk relatief groot. Windsnelheden op de KNMI-stations kunnen daarom niet zomaar worden gebruikt voor de meetpalen. Deze paragraaf bestaat uit twee delen: een inventarisatie van bruikbare periodes (i), en de eigenlijke validatie van de windsnelheidsgegevens (ii).

Bij FL2 zijn er drie periodes met onbruikbare windgegevens. De eerste periode bestrijkt 27/7/2001 tot 21/8/2001. In de avond van de 27^e was er sprake van zwaar onweer en is een zekering van de meetversterker doorgeslagen, vermoedelijk door blikseminslag in de nabijheid. In de middag van 21 augustus waren de defecte instrumenten weer vervangen. De tweede periode loopt van 5/12/2001 tot en met 23/1/2002. Ditmaal waren de windsnelheidsgegevens onbruikbaar door het in het vorige rapport al besproken "overflowverschijnsel" (Bottema, 2002). Figuur 4.4 geeft een voorbeeld van "overflow"; het fenomeen zal daar ook nader besproken worden. Ook van 13 tot en met 17 februari was er sprake van onbruikbare data door "overflow". Gelukkig woei het op het merendeel van de dagen met "overflow" niet erg hard. Een uitzondering was 28 december 2001 (windkracht 8 ; windsnelheid: 19 m/s) maar juist op deze dag traden de overflowproblemen niet op. Al met al komt het verlies aan data door de overflowproblemen niet al te hard aan.

Ook bij FL26 zijn veel gegevens onbruikbaar door het "overflowprobleem". Bij FL26 betreft het de periodes 16-27 september en 23 oktober tot 20 december. De gegevens van 20 december tot 23 januari ontbreken ook; dit hangt samen met modemproblemen, gevolgd door een aanvaring rond de kerst.

Bij SL29 traden geen overflowproblemen op. Toch zijn ook hier twee periodes buiten beschouwing gelaten. Van 8 tot 22 augustus 2001 leverden de instrumenten slechts dummywaarden omdat een zekering was doorgeslagen (wederom blikseminslag?). Van 29 april tot 22 juni was er sprake van een defect geraakte windvaan. Met de normale vectoriële middelingsprocedure zijn de windsnelheidsgegevens daardoor minder betrouwbaar; scalair middelen zou eventueel nog wel een alternatief zijn.

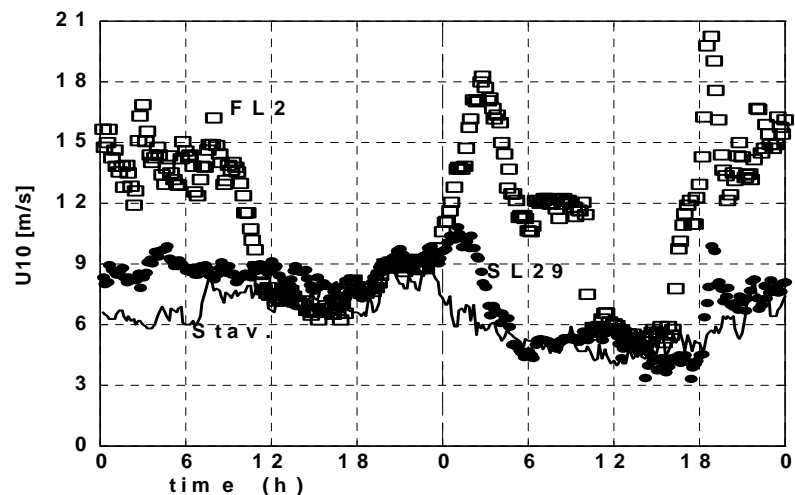
In Tabel 4.3 is nog eens op een rijtje gezet welke windsnelheidsmetingen buiten beschouwing zijn gelaten.

Tabel 4.3 Windsnelheid: buiten beschouwing gelaten periodes

paal	van	t/m	Opmerkingen / reden
FL2	27/7/01	21/8/01	zekering defect (bliksemschade?); windset uitgevallen
FL2	5/12/01	23/1/02	m.u.v. 28/12/01: overflow windsnelheidsmeter (Figuur 4.4)
FL2	12/2/02	17/2/02	overflow windsnelheidsmeter (zie voorbeeld Figuur 4.4)
FL26	16/9/01	27/9/01	overflow windsnelheidsmeter (zie voorbeeld Figuur 4.4)
FL26	23/10/01	19/12/01	overflow windsnelheidsmeter (zie voorbeeld Figuur 4.4)
FL26	20/12/01	21/1/02	algehele uitval: modemproblemen; daarna aanvaring
SL29	8/8/01	21/8/01	zekering defect (bliksemschade?); windset uitgevallen
SL29	29/4/02	21/6/02	windvaan defect (staart vaan afgewaaid)

Daarnaast kan er natuurlijk sprake zijn van algehele uitval van de meetpaal, zie het dataoverzicht in hoofdstuk 3.

Figuur 4.4 "Overflow" in de windsnelheid van FL2: Windsnelheid FL2 (vierkant), SL29 (gevulde cirkel) en Stavoren (lijn). Periode: 17/1 en 18/1 2002. Windrichting: ZZW, op de 18° tijdelijk WZW.



Figuur 4.4 illustreert het begrip "overflow". In de figuur is te zien dat de windsnelheid op FL2 in vrij korte tijd ongeveer twee keer zo groot wordt als de windsnelheid op de andere locaties; soms wordt de snelheid nóg hoger. Inspectie van detailregistraties (bijv. van 8/11/01) laat zien dat de overflow letterlijk van het ene op het andere moment kan ontstaan, en ook weer wegvallen. Dit verklaart waarom in Figuur 4.4 een deel van de FL2-metingen wel te hoog is, maar niet een factor twee.

Het verschijnsel "overflow" heeft ons geruime tijd parten gespeeld (bij FL26 in elk geval sinds december 2000). Het aanpakken van het probleem is bemoeilijkt door het onvoorspelbare optreden van de overflow, en door het feit dat de overflow niet aan (slijtage van) een specifiek instrument was gekoppeld. Zo lieten goede instrumenten het ineens afweten op FL26 (en later ook op FL2), terwijl "foute" instrumenten het op SL29 ineens weer goed deden. De eerder geopperde verklaring van een mechanisch/optisch probleem (Bottema, 2002) is hierdoor minder waarschijnlijk geworden. Uiteindelijk is min of meer door toeval de oplossing gevonden. Het probleem trad namelijk niet meer op toen de anemometer niet werd gekoppeld aan de meetversterker voor de windset, maar rechtstreeks aan de datalogger. Bij FL26 heeft deze ingreep eind januari plaatsgevonden, bij de overige stations in april/mei.

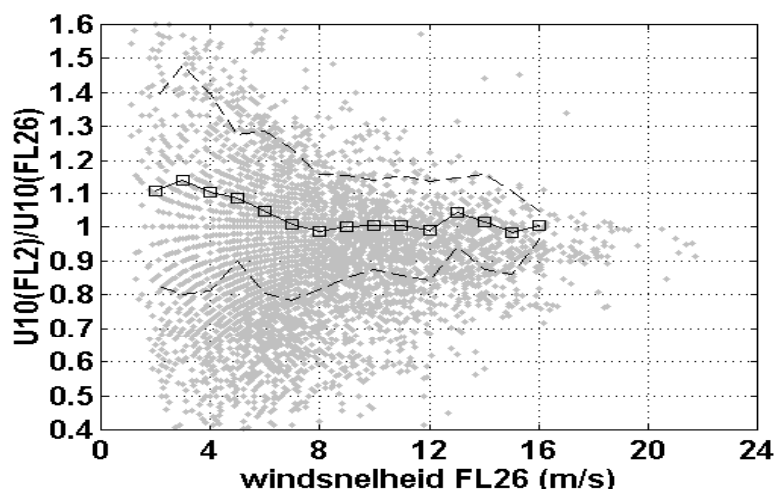
De winddata die wel betrouwbaar waren, zijn gebruikt voor een validatie van de windsnelheid. Een en ander op basis van een windsnelheidsvergelijking tussen meetpalen onderling, en tussen (i) de meetpalen en (ii) de KNMI-stations. Bij dergelijke vergelijkingen moet bedacht worden dat de atmosferische stabiliteit (dagelijkse gang) de windsnelheid fors kan beïnvloeden, vooral bij lage windsnelheden. Zie Figuur 4.5.

Figuur 4.5 toont de windsnelheidsverhouding tussen de locaties FL2 en FL26 bij westelijke wind. Hoe hoger de windsnelheid, hoe kleiner de spreiding in de data (de stippellijnen komen overeen met 1σ). De doorgetrokken lijn met vierkantjes geeft de gemiddelde windsnelheidsverhouding $U_{10}(FL2)/U_{10}(FL26)$ weer (voor windrichtingen van 240° tot 310°). Voor windsnelheden kleiner dan 8 m/s neemt de spreiding in de data duidelijk toe; ook de gemiddelde windsnelheidsverhouding is dan niet constant meer.

Voor andere locaties zijn soortgelijke plots te maken. In sommige gevallen – bijvoorbeeld als de windsnelheidsverhouding van SL29 en FL2 geplot wordt (Bottema, 2002) – is er ook een duidelijk verschil te zien tussen nachtelijke data en overdag-data. In de huidige plot ligt dit onderscheid niet zo scherp omdat

de landinvloeden op de locatie FL26 relatief zwak zijn. Stabiele condities met relatief weinig wind hebben daar dan ook een minder sterke koppeling met de nachtelijke uren.

Figuur 4.5 Windsnelheidsverhouding $U_{10}(FL2)/U_{10}(FL26)$ als functie van de windsnelheid op FL26, voor windrichtingen tussen 250° en 310°.



Al met al blijkt uit Figuur 4.5 blijkt dat de windsnelheid minimaal 8 m/s moet zijn voor een stabiele windsnelheidsverhouding. De windsnelheidsgrens moet echter worden verlaagd om ook bij oostenwind windsnelheids-verhoudingen te kunnen bepalen. Daarom wordt hieronder telkens uitgegaan van een minimale snelheid van 6 m/s op de (alle) te vergelijken locaties.

Tabel 4.4 geeft een overzicht van de belangrijkste windsnelheidsverhoudingen (voor het hele stormseizoen 2001-2002) als functie van de windrichting.

Tabel 4.4 Windsnelheidsverhoudingen als functie van de windrichting (voor windsnelheden > 6 m/s)

$U_{10}(loc1)/U_{10}(loc2)$							
loc. 1	FL26	SL29	SL29	FL2	FL2	FL2	FI2
loc. 2	FL2	FL2	FL26	Berkhout	Wijdenes	St.-Haven	Stavoren
windrichting (°)							
10	1,20>	0,85	0,70<	1,14	1,13	0,91	0,97
30	1,08	0,82	0,75<	1,11	(1,22)	1,06	1,11
50	1,29>	0,87	0,72<	1,08	1,08	1,19	1,14
70	(1,30)	0,96	0,76	1,03	0,89	1,21>	1,20
90	1,19<	0,92	0,75	1,05	0,84	1,29	1,15
110	1,15	1,02	0,92	1,03	0,88	1,24	1,05
130	1,21	0,97	0,79	1,10	0,91	1,22	1,05
150	1,18	0,94	0,80	1,10	0,86	1,16	1,00
170	1,12	0,87	0,85	1,28	0,92	1,17	1,08
190	1,08	0,94	0,89	1,33	0,97	1,30	1,14
210	1,04	0,93	0,91	1,28	1,06	1,08	1,30
230	1,04	0,93	0,90	1,12	1,24	0,95	1,15
250	1,01	0,96	0,97	1,14	1,44	0,96	1,10
270	0,99>	0,95	0,99	1,13	1,49	0,97	1,17
290	0,97	0,94	0,95	1,31	1,73	0,97	1,07
310	0,96	0,84	0,89	1,47	1,61	0,98	1,06
330	1,08	0,81	0,78	1,39	1,53	0,90	0,99
350	1,22	0,82	0,79	1,26	1,17	0,86	0,95

De onzekerheden in de verhoudingsgetallen zijn rond 1% voor een brede sector met zuidwestelijke winden, iets hoger voor noordwestelijke winden, en

meest 2% tot 4% voor oostelijke richtingen; getallen met hogere onzekerheden zijn tussen haakjes geplaatst. Soms bleken de getallen fors (ruim 10%) af te wijken van die van het vorige seizoen. Dit is met "<" of ">"-tekens aangegeven. Duidelijke systematische afwijkingen zijn er niet op één uitzondering na: bij FL26 lijken de windsnelheden wat hoger te zijn dan in het vorige seizoen. De toevallige afwijkingen – en wellicht ook de systematische afwijkingen – zijn toe te schrijven aan het feit dat het vorige seizoen bij FL26 minder dan 50% bruikbare windgegevens opleverde.

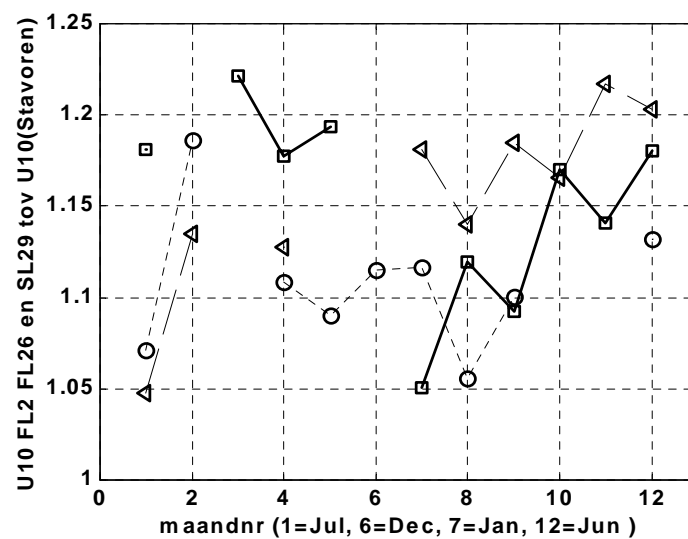
In het vorige rapport (Bottema, 2002) zijn enkele vuistregels gegeven om te beoordelen of de gemeten windsnelheidsverhoudingen plausibel zijn:

- de spreidingsmaat (o.b.v. 1σ) voor een windsnelheidsverhouding op basis van twee 'losse' uurgemiddeldes (elke paal één) ligt rond 10%.
- bij westenwind waait het op FL2 even hard tot iets (ca. 10%) harder dan op FL26, bij oostenwind een stuk (rond 25%) zachter.
- op SL29 waait het in de regel iets (0-20%) minder dan op FL2 en FL26
- bij zuidoostenwind waait het op Wijdenes vrijwel even hard als op FL26.
- bij westenwind (225°-315°) waait het op Stavoren-Haven en FL2 vrijwel even hard.
- bij ZO-wind en NNW-wind zijn Stavoren en FL2 goed vergelijkbaar.

De huidige windsnelheidsverhoudingen zijn getoetst aan de hand van bovenstaande vuistregels. Ook is nog eens expliciet gekeken of de windsnelheidsverhoudingen verklaarbaar zijn aan de hand van bijvoorbeeld strijklengteverschillen. Uit beide controles bleek dat het overgrote deel van de huidige windsnelheidsverhoudingen plausibel is. Uit de controles bleek ook wanneer welk station een goede schatting van de "open-water-wind" kon leveren. Zo bleek dat Wijdenes en Stavoren Haven nogal 'open' liggen bij zuidoosten resp. (noord)westenwind (aanlandige wind), en dat Stavoren relatief open ligt bij noordnoordwesten wind. De locatie FL2 ligt meestal 'open'; bij oostenwind (aflandig) ligt deze locatie echter nogal beschut.

In het begin van het meetproject (tot 2000) bleven windsets soms te lang op de meetpalen zitten, wat de kans op meetfouten door slijtage niet denkbeeldig maakt. Ook daarna is het gebeurd dat instrumenten nog tijdens de geldigheids-periode van de calibratie (1 jaar) defect raakten. Daarom is het van belang elk seizoen de gemeten wind met de wind op KNMI-stations te vergelijken, zoals in Tabel 4.4. Zulke vergelijkingen zouden ook gedurende het seizoen kunnen plaatsvinden (na instrumentwisselingen, of maandelijks zoals in Figuur 4.6).

.....
Figuur 4.6 Windsnelheidsverhoudingen FL2 (vierkantjes), FL26 (driehoekjes) en SL29 (cirkels) vs. Stavoren, als functie van het maandnummer, voor windrichtingen tussen 230° en 280°, bij windsnelheden groter dan 6 m/s.



Figuur 4.6 geeft de verhoudingen van de windsnelheden van FL2, FL26 resp. SL29 ten opzichte van Stavoren bij (zuid)westenwind, gemiddeld per maand (1=juli, 6=december, 12=juni). Een systematische daling van het verhoudingsgetal zou kunnen duiden op het (steeds erger) aanlopen van een meetinstrument. Van dergelijke dalende trends lijkt hier geen sprake te zijn. Wel is er sprake van forse (deels toevallige) variaties. Hier moet bedacht worden dat de meetpunten in de grafiek gebaseerd zijn op weinig gegevens (één maand) en een relatief brede windrichtingssector. Daarnaast kunnen ruimtelijke variaties in het windveld (de Wadden hebben nèt even enkele dagen harde wind, de rest van het land niet) de windsnelheidsverhoudingen in de grafiek scheef trekken.

Al met al is uit bovenstaande analyse moeilijk vast te stellen of er sprake is van instrumentslijtage en van verloop in de gemeten windsnelheden. Bij FL2 bestaat echter nog de mogelijkheid de op 10 meter en de op 3 meter hoogte gemeten wind te vergelijken. Op deze wijze is een toets op eventueel instrumentverloop mogelijk zonder alle complicaties ten gevolge van (in de tijd wisselende) variaties in het ruimtelijk windveld. De vergelijking tussen de 3-meter- en 10-meter-wind zal in onderstaande paragraaf aan bod komen.

4.7 Validatie van wind; overige zaken

Drie zaken komen in deze paragraaf kort aan bod: de verhouding tussen de 3-meter en 10-meter-wind op FL2, de vlagfactor (verhouding tussen maximale vlag en gemiddelde wind) en de zgn. turbulentie-intensiteit.

Allereerst de verhouding tussen de 3-meter en 10-meter-wind. Op FL2 wordt niet alleen op 10 meter hoogte gemeten (windsnelheid: U_{10}) maar ook op 3 meter hoogte (windsnelheid: U_3). Het lag in de bedoeling zo een indruk te krijgen van het verticale windprofiel, en van de aërodynamische ruwheid van het (golvende) wateroppervlak. Het bleek echter dat de meetpaal teveel invloed had op de stroming ter plekke van de 3-meter-sensor (Bottema, 2002). Een analyse van het windprofiel bleek derhalve niet zinvol.

De verhouding U_3/U_{10} is echter nog wel bruikbaar om eventuele meetproblemen te detecteren. Als één sensor aanloopt zal de windsnelheidsverhouding immers veranderen. Ter controle zijn de resultaten van het huidige seizoen vergeleken met die van het seizoen 2000-2001 (Bottema, 2002). Ook zijn de eerste en tweede helft van dit seizoen vergeleken (periode voor resp. na 31/12/2001). Het bleek dat vanaf januari 2002, de verhouding U_3/U_{10} bij lage windsnelheden (< 4-5 m/s) enkele procenten hoger uitviel. Hieruit is af te leiden dat in het jaar 2002 de 10-meter-windsnelheidssensor op FL2 *mogelijk* iets is gaan aanlopen. De effecten beperken zich echter tot (zeer) zwakke wind.

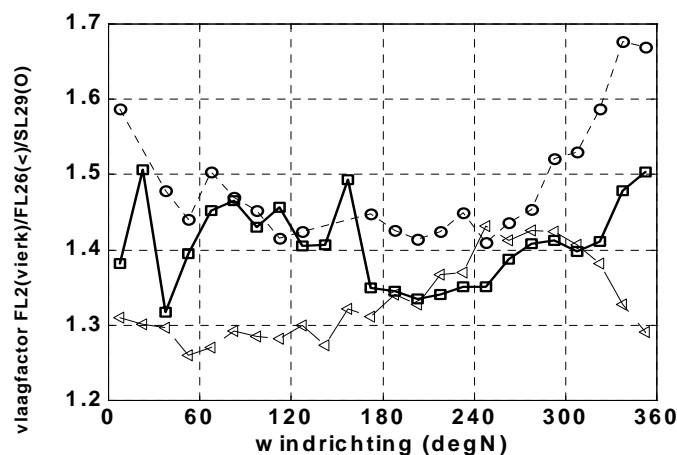
Ook in de vorige paragraaf was vanaf januari 2002 sprake van relatief lage 10-meter-windsnelheden bij FL2. Daar ging het echter om relatief sterke wind (> 6 m/s); hierboven ging het juist om zwakke wind (< 5 m/s). Daarom wordt vermoed dat FL2 in de eerste maanden van 2002 werkelijk relatief lage windsnelheden had. Anders gezegd: kennelijk was er in de eerste maanden van 2002 relatief vaak sprake van ruimtelijk variabele windvelden waarbij de meeste wind ten noordwesten van FL2 optrad.

Het tweede thema van deze paragraaf is de zogenaamde vlagfactor of 'gust factor' (GF), de verhouding tussen de maximaal gemeten wind en de gemiddelde wind:

$$(4.2) \quad GF = U_{\max} / U_{10}$$

Tot nu toe is deze vlagfactor nog niet in de analyse betrokken. We willen echter de ruwheid van het wateroppervlak kunnen bepalen, ondanks het feit dat de 3-meter-wind op FL2 te dicht op de meetpaal staat voor een betrouwbaar windprofiel (Bottema, 2002). Een goed alternatief voor windprofielanalyse is het afleiden van ruwheden uit gemeten vlagfactoren (Wieringa en Rijkoort, 1983).

Figuur 4.7 Gemiddelde vlagfactoren U_{\max}/U_{10} als functie van de windrichting voor FL2 (vierk.), FL26 (driehoek) en SL29 (cirkel), voor windsnelheden $U_{10} > 6$ m/s



Figuur 4.7 geeft een indruk van de gemiddeld gemeten vlagfactoren GF als functie van de windrichting. Het betreft telkens vlagfactoren op uurbasis, 10-minuten-vlagfactoren zijn ca. 10% lager (Wieringa en Rijkoort, 1983). Bij FL2 en FL26 levert aanlandige wind gemiddelde vlagfactoren van ca. 1.3 op. Bij aflandige wind is de vlagfactor hoger en GF ~1.4. Bij SL29 is GF voor alle windrichtingen relatief hoog: ruim 1.4 bij aanlandige wind, rond 1.6 bij aflandige wind. Uit de getallen is goed te zien dat de vlagfactor toeneemt naarmate het bovenstroomse terrein ruwer is (en de strijklengte over water korter). De spreiding in de vlagfactoren ligt in de orde van 0.1 (één standaarddeviatie). Op de interpretatie en het gebruik van de vlagfactoren zal nader worden ingegaan in Hoofdstuk 7 (Par. 7.6). Hier volstaan we met de opmerking dat de gemeten vlagfactoren ook kunnen worden gebruikt voor kwaliteitsborging: bij extreem hoge of extreem lage vlagfactoren ($GF > 2$ resp. $GF < 1.1$) moet in elk geval worden nagegaan wat de oorzaak is van dergelijke hoge resp. lage waarden.

Tot slot wordt een alternatieve maat voor de vlagfactor besproken, de turbulentie-intensiteit T_u :

$$(4.3) \quad T_u = \sigma_u / U_{10}$$

Bij aanlandige wind variëren de T_u -waarden van 9%-11% bij FL26 en FL2 tot 12% bij SL29. Bij aflandige wind zijn de gemiddelde T_u -waarden ca. 13% bij FL26 en FL2, en ca. 17% bij SL29. Wieringa en Rijkoort (1983, p. 59) geven voor de ruwheidslengte z_0 richtwaarden van 0.0002 m boven open water en 0.03-0.1 m voor land, over open terrein¹⁹. Voor de turbulentie-intensiteit T_u gelden richtwaarden van ~8% voor open water en 16% over open terrein. Al met al ogen de huidige waarden van de turbulentie-intensiteit plausibel. Voor een nadere interpretatie wordt wederom naar Hoofdstuk 7 verwezen.

¹⁹ Zie Figuur 4.1 voor werkelijk gemeten waarden van z_0 rond het IJsselmeer.

4.8 Conclusies en aanbevelingen

In paragraaf 4.1 werd het belang van goede windmetingen aangegeven. Ook is aangegeven dat de windsnelheid en windrichting binnen 10% resp. 6° bekend moeten zijn om de (interpretatie)fout in de golfdata te beperken tot 10% of minder. Paragraaf 4.2 bevat een inventarisatie van beschikbare windgegevens en KNMI-data. De methodiek voor kwaliteitscontroles komt vervolgens aan bod in paragraaf 4.3; informatie m.b.t. instrumentwisselingen, -correcties, enz.

wordt gegeven in paragraaf 4.4. De resultaten van de windrichtings- en windsnelheidsvalidatie zijn besproken in de paragrafen 4.5, 4.6 en 4.7. De belangrijkste bevindingen uit die paragrafen zijn:

- 1) Windrichtingscorrecties zijn nodig zolang de windvane niet exact op het Noorden kunnen worden uitgericht.
- 2) Windrichtingscorrecties op basis van een vergelijking tussen meetpaal- en KNMI-data gedurende tenminste enkele maanden hebben de voorkeur. *In klimatologische zin* leidt deze aanpak tot goede resultaten (Figuur 4.3). Op een tijdschaal van uren of dagen kunnen de gemeten en KNMI-windrichting nog fors verschillen; zie ook de spreiding in de data van Figuur 4.2.
- 3) In één geval (SL29) lijkt sprake te zijn geweest van een niet gedocumenteerde softwarematige windrichtingscorrecties. Dergelijke incidenten moeten voortaan voorkomen worden.
- 4) Uit de analyses blijkt dat de windrichtingen op 10-meter hoogte niet worden verstoord door de meetpaalconstructie. Het gebruikte KNMI-referentie-station (Stavoren) zou wel last kunnen hebben van een kleine windrichtingsverstoring (ca. 3°, afhankelijk van de windrichting).
- 5) Ook dit seizoen had FL26 last van 'overflow'-problemen (Figuur 4.4) waarbij de gemeten windsnelheid uren- of dagenlang 2 tot 3 keer te hoge waarden geeft. In de winter kreeg ook FL2 problemen. Na lang zoeken werden de oorzaak (meetversterkers van de windset) en oplossing van het probleem gevonden.
- 6) Bij de vergelijking van de wind op twee stations moeten de windsnelheidsverhoudingen bij voldoende hoge windsnelheid worden bepaald. Hier is een ondergrens van 6 m/s gebruikt; waar mogelijk wordt een hogere grens (8 m/s) aanbevolen. Bij te lage ondergrenzen kunnen zowel toevallige als systematische fouten fors toenemen (Figuur 4.5).
- 7) Bovengenoemde windsnelheidsverhoudingen blijken niet alleen van dag op dag, maar ook over langere periodes significant (tot 15%) te variëren (Figuur 4.6). Blijkbaar kunnen er periodes met significante ruimtelijke windvariaties optreden ("de Afsluitdijk kreeg wel een tik van stormdepressies mee, Lelystad veel minder").
- 8) Bovengenoemde variaties in het windsnelheidsveld maken de detectie van meetproblemen erg lastig. Een alternatief is alleen beschikbaar bij de locatie FL2. Uit analyse van het tijdsverloop van de verhouding van de 3-meter en 10-meter-wind U_3/U_{10} bleek dat de anemometer op 10 meter hoogte *mogelijk* iets is gaan aanlopen. Het effect treedt overigens alleen op bij lage windsnelheden (tot 4 à 5 m/s).
- 9) Dit seizoen zijn voor de eerste maal ook twee turbulentie-parameters in de analyse meegenomen, de vlagfactor GF en de turbulentie-intensiteit T_u (par. 4.7). De gemiddeld gemeten turbulentie-intensiteit bleek goed te sporen met de richtwaarden van Wieringa en Rijkooft (1983) en is opgenomen in de standaard-tabeluitvoer zodat deze parameter kan worden meegenomen bij de analyse van golfgegevens.

Op het gedrag en het gebruik van de laagfactorgegevens zal nader worden ingegaan in Hoofdstuk 7 (par. 7.6).

5 Overige gegevens

Naast wind zijn er een aantal andere hulpgegevens die nodig zijn bij de interpretatie van golfgegevens. In dit hoofdstuk wordt achtereenvolgens ingegaan op waterstandsmetingen voor het IJsselmeer (i), waterstandsmetingen voor het Slotermeer (ii), golfoploopmetingen (iii) en temperatuurmetingen (iv).

5.1 Waterstandsmetingen IJsselmeer

Referentiemetingen van de waterstand zijn cruciaal in het huidige meetproject. De huidige capstaafoutput is niet een waterstand ten opzichte van een absoluut referentieniveau (NAP) maar een relatieve waterstand, ruwweg ten opzichte van de onderkant van het instrument. Om waterstanden t.o.v. NAP te verkrijgen moet een offset in rekening worden gebracht. Op dit moment moet RIZA deze offset zelf zien te bepalen. Nadelen hiervan zijn:

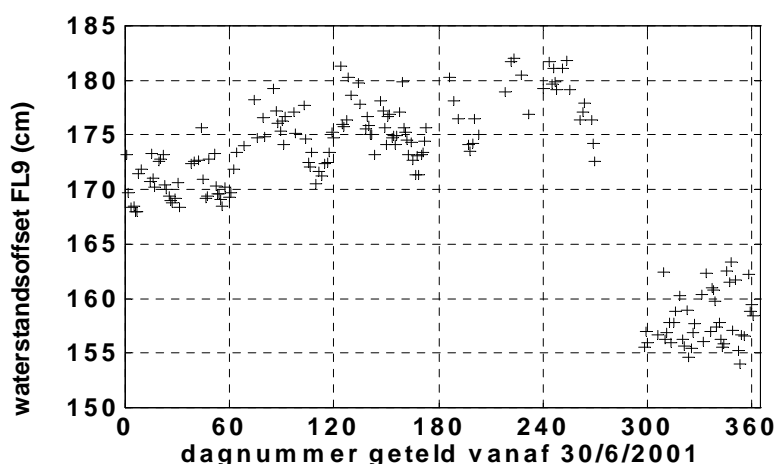
- door het ontbreken van een vaste referentie is verloop in de calibratie van het instrument moeilijk te detecteren.
- evt. foutieve waterstanden t.g.v. algengroei zijn moeilijk aan te tonen.

In eerdere seizoenen was ook de omslachtigheid een probleem: eerst moesten de data worden verwerkt met een voorlopige offset, daarna met een definitieve. Voor dit punt is intussen een oplossing gevonden.

Hieronder wordt kort ingegaan op de bepaling van bovengenoemde offsets. Vervolgens wordt per meetpaal een overzicht gegeven van de in rekening gebrachte offsets (Tabel 5.1). Daarna wordt het meerpeilverloop gedurende het stormseizoen kort besproken. Tot slot volgen nog enkele aanbevelingen.

De offsets zijn bepaald door de gegevens uit de sinds juli 2001 gemaakte logbestanden (zie Hoofdstuk 2 en Bijlage A) te combineren met meerpeil- en waterstandsinformatie uit het Monitoring Systeem Water (MSW, uit de MFPS-bestanden). Figuur 5.1 geeft een voorbeeld van de resultaten:

Figuur 5.1 Verloop van de waterstandsoffset voor FL9 (in cm) gedurende het stormseizoen 2001-2002



Uit Figuur 5.1 blijkt dat FL9 gedurende de eerste 8 maanden van het stormseizoen een offset van 170-180 cm had. Daarna raakte de capstaaf

defect; na vervanging van de capstaaf kwam de offset rond 157 cm uit. Daarbij is de spreiding rond het gemiddelde (1σ) 2 à 3 cm. De spreiding is daarmee iets groter dan verwacht want de geplotte waarden zijn daggemiddeldes voor rustige dagen met verwaarloosbare opwaaiingseffecten²⁰. Verder valt in de grafiek op dat de offset in de eerste 8 maanden geleidelijk toeneemt. Vermoedelijk hangt dit samen met verloop in de capstaafmetingen, een punt dat in Hoofdstuk 6 nader aan de orde zal komen.

De offsets voor de overige meetpalen in het IJsselmeer zijn op soortgelijke wijze vastgesteld. Hieruit komen weinig nieuwe zaken naar voren. Slechts drie zaken zijn de moeite van het vermelden waard:

- FL2 kende een relatief sterk verloop in de offset (7% in 12 maanden tijd) én een relatief grote spreiding in de offsetwaarden (ruim 5 cm).
- FL5 en vooral FL25 hadden 4/5 januari 2002 een 10-20 cm verhoogde offset ten gevolge van ijsvorming.

De resulterende offsets zijn samengevat in Tabel 5.1; bij alle waarden hoort een onnauwkeurigheid van maximaal 5 cm. Uiteraard zijn de offsets ook in de dataverwerkingsprogramatuur ingebracht. De gemeten waterstand t.o.v. NAP volgt door de instrumentoutput (omgerekend naar meters) te verminderen met de in bovenstaande tabel gegeven offset.

Tabel 5.1 Gehanteerde offsets om relatieve door RDIJ geleverde waterstanden om te rekenen naar waterstanden t.o.v. NAP

paal	Ingangsdatum	Tijd	Offset	Opmerkingen
FL2	31/5/01	10h	2.95	oude offset mei/juni 2001 voldoet nog
FL2	1/9/00		3.04	voldoet beste van okt01-apr02
FL5	1/3/01		1.71-0.42	waarde vorig seizoen met correctie ²¹
FL5	29/11/01		1.32	herzien i.v.m. verloop
FL9	1/3/01		1.75	waarde vorig seizoen voldoet nog
FL9	24/4/02		1.57	nieuwe capstaaf
FL25	1/3/01		1.50	waarde vorig seizoen voldoet nog
FL25	29/11/01		1.56	herzien i.v.m. verloop
FL26	1/3/01		1.58	waarde vorig seizoen voldoet nog
FL26	23/8/01		1.51	capstaaf bij onderhoud verhangen?
FL26	29/9/01		1.58	capstaaf terug op goede hoogte?
FL26	22/1/02		1.58	na aanvaring en terugplaatsing meetpaal

Bij vergelijking met Tabel 2.3 blijkt dat niet alle ingangsdata in Tabel 5.1 overeenkomen met onderhoudsdata. De reden ligt in het feit dat de veranderingen in de offsets vaak niet samenvielen met onderhoudsdagen (als het instrument werd verhangen of vervangen) maar geleidelijk verliepen. De ingangsdata werden in zo'n geval vooral bepaald door het tijdstip waarop de oude offsets te onnauwkeurig werden bevonden.

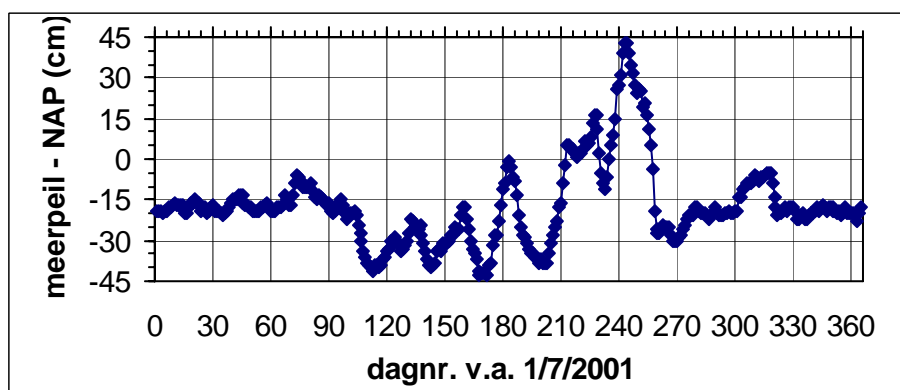
Kennis van de meerpeilen en locale waterstanden is ook van belang voor de interpretatie van de golfgegevens. Figuur 5.2 geeft het verloop van het standaard IJsselmeer-meerpeil gedurende het stormseizoen 2001-2002 (dag 1

²⁰ Preciezer gezegd: Alleen die dagen zijn meegenomen waarin de waterstanden op de IJsselmeer-MSW-stations onderling minder dan 6 cm verschilden gedurende 8 uur of meer.

²¹ De in het vorige verslag (Bottema, 2002) gerapporteerde offset van 1.71m bleek fout te zijn en moet 42 cm lager zijn. De waterstanden in de verwerkte resultaten zijn overigens wel in orde.

is 1/7/2001; dag 365 is 30/6/2002), zoals dat op routinematige wijze door RDIJ wordt bepaald.

.....
Figuur 5.2 Verloop van het IJsselmeer-
meerpeil gedurende het stormseizoen 2001-
2002



Het gemiddelde meerpeil over het seizoen 2001-2002 is NAP – 17 cm. In de zomermaanden (april-sept.; streefpeil NAP – 20 cm) zijn de variaties niet al te groot. In de wintermaanden zijn de meerpeilvariaties echter fors: het meerpeil varieert tussen NAP – 43 cm (medio dec.; iets onder het streefpeil van NAP – 40 cm) en NAP + 43 cm (28 feb. en 1 maart). Het is lastig het meerpeil als continue variabele mee te nemen in de analyse omdat er al twee onafhankelijke variabelen zijn: windsnelheid en windrichting. Het is daarom praktischer uit te gaan van meerpeilklassen. Bij FL5 lijken 3 klassen voldoende om de (interpretatie-)fout in H_{m0} binnen 10% te houden; bij de overige palen lijken 1 à 2 klassen voldoende²².

Aanbevelingen:

- 1) Het wordt sterk aanbevolen ervoor te zorgen dat de meetinstrumenten op een vaste hoogte aan de meetpaal bevestigd worden (en vooral blijven!), en de output te presenteren als waterstanden t.o.v. NAP. Alleen zo is het mogelijk de invloed van algenaangroei of een eventueel verloop in een instrument tijdig te detecteren.
- 2) Bij de interpretatie van golfgegevens lijkt het wenselijk rekening te houden met meerpeilvariaties. Dat geldt voor alle locaties en in het bijzonder voor FL5.

5.2 Waterstandsmetingen Slotermeer

In het volgende wordt kort ingegaan op de omrekening van druksensor-gegevens naar waterstanden t.o.v. NAP, waterstandsvariaties gedurende het stormseizoen, en een vergelijking tussen druksensor- en capstaafgegevens.

De druksensor bij SL29 is bedoeld als vaste, nauwkeurige referentie voor de waterstand. Deze is nodig omdat bij storm de golven op het Slotermeer

²² De bijbehorende argumentatie is als volgt. In het meest ongunstige geval zijn de golven volledig dieptegelimiteerd en evenredig met de waterdiepte. Fouten in de waterdiepte werken dan direct door in de (voorspelde) golfhoogte. Bij een meerpeilbereik van –43 tot +43 cm t.o.v. NAP varieert de waterdiepte bij FL5 met een factor 1.6 (van 1.5 tot 2.4 m). De overige locaties zijn minder kritisch, bij FL2 varieert de diepte bijv. met een factor 1.23 (4.0 tot 4.9m). Opwaaiing is in beide gevallen verwaarloosd. Als we 10% verschil in de waterdiepte nog net aanvaardbaar vinden kan het dieptebereik per klasse een factor 1.2 zijn. Bij FL5 zijn dan 2 à 3 klassen nodig, elders 1 à 2 klassen.

dieptegelimiteerd zijn – onnauwkeurigheden in waterstand of bodemdiepte werken dan direct door in de (analyse van) golfresultaten.

RDII levert de output van de druksensor in centimeters. Eind 2000 is de opstelling ingemeten en sindsdien zijn de waterstanden t.o.v. NAP gegeven. Op de druksensormetingen hoeft derhalve geen offset (meer) in mindering worden gebracht.

De druksensors hebben dit seizoen meestal goed gewerkt. Bevriezing bleek het grootste probleem te zijn. Dit leverde kortdurende uitval op 14-16, 19-22 en 30-31 december 2001. Van 2-10 januari 2002 was er sprake van min of meer continue uitval door bevriezing; daarna was er nog één kortdurend incident op 16 februari 2002.

Uit de druksensormetingen blijkt dat de waterstandsstandsvariaties bij SL29 veel kleiner zijn dan op het IJsselmeer. De maandgemiddelde waterstanden waren globaal NAP – 54 cm in het zomerhalfjaar en NAP – 47 à 52 cm in de wintermaanden. De maandminima waren vrijwel steeds circa NAP – 57 cm. De maandmaxima waren vaak relatief wat hoger, onder andere door zware regenval. Zo werden op 17 september, 8-9 november en 26 februari-3 maart waterstanden van resp. 41, 39 en 30-40 cm onder NAP gehaald. Daarmee varieerden de waterdieptes op SL29 tussen 1.57 m en 1.84 m, met een gemiddelde diepte van ca. 1.62 m.

Ook dit seizoen zijn de capstaaf- en druksensormetingen weer uitgebreid vergeleken. Dit is noodzakelijk omdat de capstaaf niet is ingemeten. Net als bij de IJsselmeer-meetpalen moet een offset in rekening worden gebracht om de capstaafoutput om te rekenen naar waterstanden ten opzichte van NAP. Ook bij SL29 is de offset dit seizoen semi-geautomatiseerd vastgesteld, met behulp van de logbestanden. Winderige dagen (meer dan 6 m/s) zijn bij de offsetbepaling buiten beschouwing gelaten. De resulterende offsets zijn weergegeven in Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Offsets om relatieve capstaafwaterstanden om te rekenen naar waterstanden t.o.v. NAP

paal	Ingangsdatum	Tijd	Offset	Opmerkingen
SL29	4/4/01		1.44	voldoet tot 4/1/02
SL29	1/2/02	11h	1.71	na reparatie ijschade
SL29	21/6/02		1.96	voorlopig, na vervanging capstaaf

De eerste offset voldoet goed tot begin januari 2002. Daarna trad een korte vorstperiode op. Na afloop daarvan, toen op de 15^e de laatste ijsrestanten in beweging kwamen, raakte de capstaaf beschadigd. Vanaf de onderhoudsdag van 1 februari bleek een nieuwe offset nodig, mede door reparatie ("uitdeuken") van de capstaaf. Op 21 juni werd de gerepareerde capstaaf vervangen en vanaf die dag is wederom een nieuwe offset nodig.

Uit de vergelijking van de capstaaf- en druksensormetingen volgen nog enkele resultaten die de moeite van het vermelden waard zijn. Een bemoedigend resultaat is dat in de meeste gevallen de capstaaf- en druksensormetingen uitstekend overeenkwamen, en de gemeten waterstanden verschilden zelden meer dan 5 cm. In de periode juli-sept. 2001 weken de capstaafmetingen echter duidelijk af van de druksensorwaarden. De capstaafwaterstanden vertoonden nogal wat schommelingen op korte en lange tijdschaal (1-24h) die in het geheel niet terug te vinden waren in de druksensormetingen. Ook waren op 10-11 juli, 11-12 aug, 10-12 sept. de capstaafwaterstanden veel (10-20 cm) hoger dan de druksensorwaarden. Vermoedelijk hangt e.e.a. samen met vervuiling van de capstaaf door algen. Van 16 januari tot 1 februari waren de capstaafwaterstanden systematisch te hoog door de al eerder genoemde ijschade aan de capstaaf. Tot slot zijn er nog twee gevallen met incidenteel te

hoge waterstanden. Tijdens de storm van 28 december bleken de capstaafwaterstanden ca. 15 cm hoger uit te komen dan de druksensorwaterstanden. Een verklaring is niet gevonden al viel het op dat tijdens de storm de golven sterk niet-lineair (trogvormig) waren. Ook op de 3^e januari waren de capstaafwaterstanden relatief hoog. Ditmaal was aanvriezing de vermoedelijke oorzaak.

5.3 Golfploopmetingen

Bij golfploop bestaan de huidige activiteiten tot nu toe vooral uit tussentijdse verwerking van de gegevens, en de daarbij horende controles (lopende het seizoen). Enkele ideeën voor tussentijdse controles komen aan bod in Hoofdstuk 6 van de vorige meetrapportage (Bottema, 2002). Voorbeelden van golfploopmetingen worden getoond in de bijlagen. Daarnaast wordt in Hoofdstuk 3 een overzicht van beschikbare data gegeven; dit seizoen bleek de "oogst" tamelijk goed.

Een methodiek voor een uitgebreide golfploopvalidatie achteraf, analoog aan de golfmetingenvalidatie van Hoofdstuk 6, is nog niet uitgedacht. Hierbij moet bedacht worden dat ook dit seizoen prioriteit is gegeven aan de analyse van golf- en windmetingen. Hier liggen namelijk nog tal van verbeterpunten, alsmede een aantal nog niet uitgewerkte toepassingen.

Intussen zijn er ook een aantal relevante externe ontwikkelingen. DWW zal namelijk een aantal golfploopmetingen uit eerdere seizoenen laten analyseren. Aangezien golfploop bij uitstek een kerntaak van DWW is ligt het voor de hand om een validatiemethodiek voor golfploop mede te baseren op de nog te rapporteren bevindingen van DWW.

5.4 Temperatuurmetingen

Sinds de zomer van 2000 wordt in het kader van het huidige golfmetingenproject ook de watertemperatuur gemeten. Dit omdat de temperatuuropbouw van de atmosfeer een significante invloed kan hebben op de schuifspanning die lucht (wind) op water uitoefent, en daarmee op de golfgroei (zie par 2.2 en Young, 1998). Een cruciaal gegeven om deze invloed te kwantificeren is warmteflux van lucht naar water (of omgekeerd). Als deze flux onbekend is kan het lucht-water-temperatuurverschil gebruikt worden, mits dit voldoende nauwkeurig bekend is (zeg binnen 0.2 °C)

In deze paragraaf wordt achtereenvolgens ingegaan op de volgende zaken:

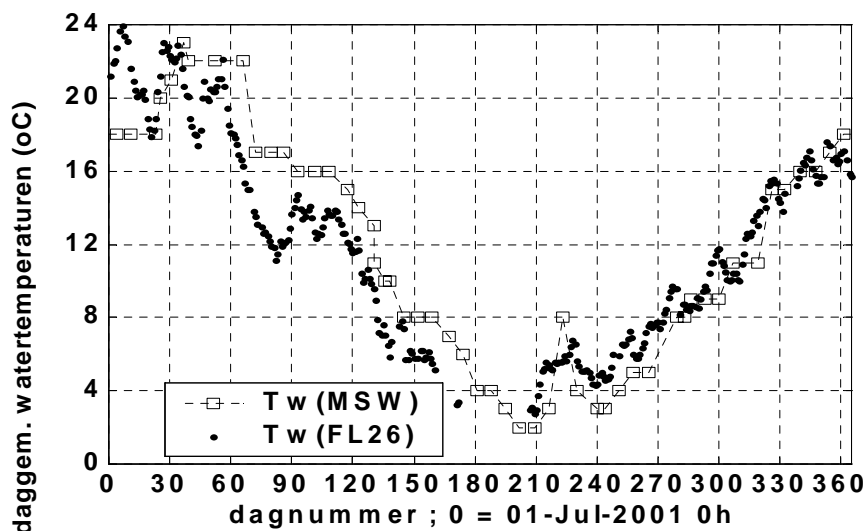
- beschikbare temperatuurgegevens
- betrouwbaarheid temperatuurgegevens
- analyse temperatuurgegevens – resultaten
- conclusies en aanbevelingen

De volgende gegevens zijn beschikbaar of eenvoudig te achterhalen:

- luchttemperaturen op de golfmeetpalen (gemeten in de meetkast, met een sensor die in de logger is gemonteerd)
- op 1.2 meter diepte gemeten watertemperaturen (FL26; v.a. nov. 2000).
- IJsselmeer-watertemperatuur (hoogstwaarschijnlijk van Houtrib-Noord) uit de tekst-pagina's van het MFPS (weersverwachting IJsselmeer voor Waarschuwingdienst Dijken IJsselmeergebied).
- maandgemiddelde luchttemperaturen op het KNMI-station Stavoren
- incidenteel (bij zeer warm zomerweer): watertemperatuurkaarten Nederland, van het Infocentrum Binnenwateren.

Figuur 5.3 Watertemperaturen FL26 (punten) en MFPS/MSW-Houtrib (vierkantjes) gedurende het seizoen 2001/2002 (dag 1 = 1/7/01; dag 365 = 30/6/02).

In de rapportage over het seizoen 2000-2001 (Bottema, 2002) is uitgebreid op de betrouwbaarheid van de metingen ingegaan. Met name de luchttemperatuurmetingen zijn nog niet betrouwbaar. De luchttemperatuurmetingen op de meetpalen zijn gemiddeld duidelijk te hoog, vermoedelijk doordat de opstelling gevoelig is voor instraling. De watertemperaturen van het seizoen 2001-2002 zijn weergegeven in Figuur 5.3.



Het watertemperatuurverloop in Figuur 5.3 oogt plausibel in relatie tot het weersverloop (juli/aug meest warm, sept. vrij koel, oktober en eind jan. begin feb. extreem zacht). In het vorige seizoen bleek echter dat zowel de FL26- als de MSW-watertemperatuur nog onvoldoende nauwkeurig / betrouwbaar waren (voor uitleg/onderbouwing, zie Bottema, 2002). De soms forse verschillen – tot ruim 5°C – tussen MSW- en FL26-temperaturen in Figuur 5.3 suggereren dat die conclusie ook voor dit seizoen geldig is.

De aanbevelingen zijn in grote lijnen hetzelfde als de aanbevelingen van de vorige rapportage (Bottema, 2002). Voor de volledigheid zijn die aanbevelingen hieronder nog eens in ongewijzigde vorm weergegeven:

- 1) De opstelling voor het meten van de luchttemperatuur moet worden verbeterd: de temperatuurmeter moet goed geventileerd zijn én goed afgeschermd van straling.
- 2) Watertemperaturen moeten op twee IJsselmeerlocaties en eventueel ook op het Slotermeer gemeten worden. Door onderlinge vergelijking kan dan in ieder geval verloop van de sensoren gedetecteerd worden.
- 3) Ook de referentiegegevens behoeven aandacht: op dit moment zijn de beschikbare lucht- en watertemperatuurgegevens uit andere bronnen (o.a. MFPS) onvoldoende bruikbaar.
- 4) Bij de interpretatie van de resultaten moet in het late voorjaar en de zomer wellicht rekening gehouden worden met een niet representatieve watertemperatuurmeting t.g.v. een warme toplaag.
- 5) De warmtefluxen kunnen zo groot zijn (incl. verdamping ruwweg 250 W/m²; Bottema, 2002) dat bij de interpretatie van wind- en golfgroeigegevens niet te snel moet worden uitgegaan van een thermisch neutrale atmosfeer, ook niet bij relatief sterke wind.
- 6) Temperatuurmetingen zijn wellicht overbodig zodra sonische windmeters worden gebruikt – deze leveren namelijk ook warmtefluxen. Zie ook Hoofdstuk 9.

6 Validatie van golfgegevens

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de validatie van de gemeten golfgegevens. De golfgegevens zijn ingewonnen met capstaven, de oploopgegevens met een oploopbaak (zie ook Hoofdstuk 2). De beperkingen van beide instrumenttypes komen aan bod in paragraaf 6.1 resp. 6.2. In paragraaf 6.3 worden enkele validatiemethodieken besproken. In paragraaf 6.4 worden per meetpaal de validatieresultaten besproken. Een samenvatting van de voornaamste resultaten en conclusies volgt in paragraaf 6.5.

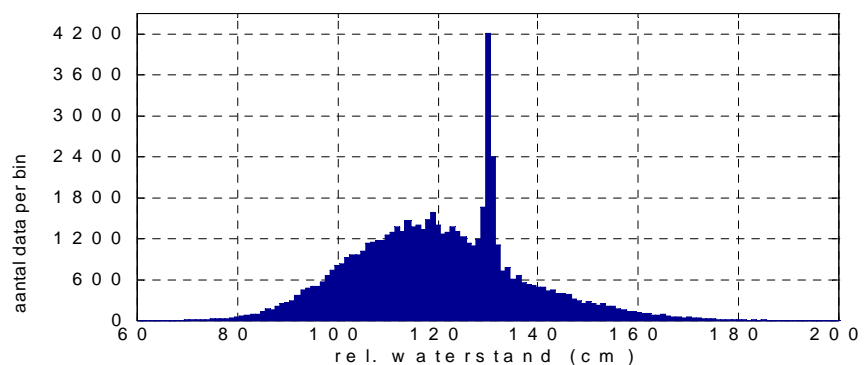
6.1 Meetproblemen bij golfmetingen

Een eerste foutenbron bij capstaafmetingen ligt in de *voorkeurswaarden* ter hoogte van de verbindingstukken (steunen) tussen de massabuis en de daarmee verbonden capacitatieve draad/staaf. Foto 3, 11, 12 en 13 in Bijlage B laten deze steunen duidelijk zien. Een tweede belangrijke foutenbron, algengroei, wordt besproken in paragraaf 6.1.2. In de daarop volgende paragraaf (6.1.3), komen meetfouten ten gevolge van instrumentverloop aan de orde. De overige geconstateerde meetproblemen met capstaven komen aan bod in paragraaf 6.1.4. Tenslotte volgt in paragraaf 6.1.5 een algemene beschouwing over het te gebruiken integratiebereik bij het bepalen van spectrale golfhoogte- en golfperiodematen zoals H_{m0} en T_{m01} .

6.1.1 Meetproblemen golfmetingen; voorkeurswaarden capstaven

In het vorige meetseizoen (2000-2001) werden afwijkingen in histogrammen van de momentane waterstand ontdekt. Normaal zouden zulke histogrammen klokvormig (net als een normale of Gaussische verdeling) moeten zijn of – bij bijna brekende golven – iets scheefgetrokken. In de betreffende histogrammen kwamen echter plotselinge pieken voor. Onderstaande figuur geeft een voorbeeld van zo'n histogram. De figuur, en een uitgebreide analyse, zijn ook te vinden in de vorige meetrapportage (Bottema, 2002)

Figuur 6.1 Histogram van de momentane waterstand (FL2; 6/9/2000; 6-10 h MET). X-as: waterstand in cm t.o.v. basis capstaaf. Y-as: aantal data per bin (breedte: 1 cm).

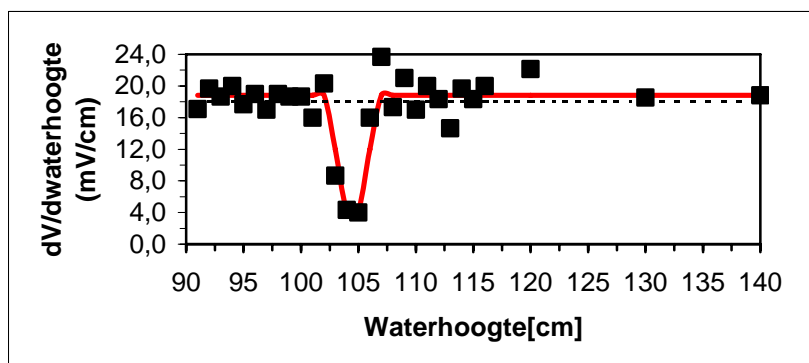


In bovenstaand voorbeeld is er sprake van een sterke piek, die circa 8% van alle data bevat. Bij verdere analyses viel op dat de meetpalen met capstaven elk vaste voorkeurswaarden hadden, én dat de voorkeurswaarden vaste tussenafstanden hadden. De tussenafstanden (rond 50 cm) kwamen telkens overeen met de afstanden tussen de steunen die de wit gecoate 'capstaafdraad'

verbinden met de zgn. massabuis (zie Foto 11 in Bijlage B). Deze steunen eindigen in een metalen ring met daarin een nylon ring die zorgt dat de capstaaf vastgeklemd blijft in de steun. Vanaf augustus 2001 zijn bij diverse palen steunen en/of ringen verwijderd. Na verwijderen van een steun of ring verdween ook steeds de bijbehorende voorkeurswaarde. Zo werd duidelijk dat de capstaafsteunen en de voorkeurswaarden iets met elkaar te maken moesten hebben.

Uit analyse van de calibratiefunctie bleek hoe de capstaafsteunen voor voorkeurswaarden konden zorgen. Het bleek dat ter plekke van de steunen de calibratiefunctie haperde: ter plekke van de capstaafsteun bleek de helling van de calibratiefunctie aanzienlijk kleiner te zijn dan elders. Onderstaande grafiek geeft een voorbeeld van dit gedrag:

Figuur 6.2 Helling van een capstaaf-ijklijn als functie van de verticale positie, Onderbroken lijn: gemiddelde helling. Doorgetrokken lijn: bij foutschatting gebruikte functie.



De hierboven getoonde niet-lineaire calibratiekromme is cruciaal om het effect van voorkeurswaarden bij capstaafsteunen te kwantificeren. De methodiek en foutschatting komen uitgebreid aan bod in de vorige rapportage (Bottema, 2002). Hier worden alleen de belangrijkste bevindingen samengevat.

- veruit de sterkste meetfouten treden op als de capstaafsteun precies op de waterspiegel ligt. Bij (werkelijke) golfhoogtes van 10, 20 en 30 cm wordt H_{m0} dan resp. 15%, 8% en 5% onderschat. Vooral van kleine golven wordt de golfhoogte dus onderschat.
- De fouten nemen snel af naarmate de capstaafsteun verder van de waterspiegel verwijderd is: significante fouten lijken vooral voor te komen als de steun minder dan ca. 6 cm van de waterlijn ligt. Steunen op meer dan 12 cm van de waterlijn geven helemaal geen onderschatting van H_{m0} meer, wel soms een lichte overschatting (<3%).

Beide bevindingen zijn slechts bedoeld om een globale indruk van de meetfouten te geven. De reden is dat detailcalibraties zoals in Figuur 4.2 tot nu toe slechts voor één capstaaf zijn uitgevoerd²³, en dat de gebruikte capstaven qua uitvoering (dikte en afstand van steunen) iets kunnen verschillen.

Er bestaan drie remedies voor het voorkeurswaardenprobleem (Bottema, 2002)

- steunen voldoende ver van de waterspiegel plaatsen
- een detailcalibratie in de loggerfunctie verwerken
- steunen of ringen verwijderen

De eerste remedie heeft haken en ogen omdat de meerpeilen te veel fluctueren.

De tweede remedie lijkt aantrekkelijk maar is gevoelig voor bijwerkingen. Al bij 2% verloop²⁴ in de calibratie kunnen veronderstelde en werkelijke positie van

²³ Normaal gesproken wordt gecalibreerd met een afstand van 10 cm tussen de meetpunten.

²⁴ Het werkelijke verloop is vaak nog groter, zie par. 6.1.3.

de steun verschillen, zodat de correctie op de verkeerde positie wordt toegepast.

De laatste remedie is nu op diverse meetpalen toegepast. Het verwijderen van de gehele capstaafsteun bleek het meest effectief maar vaak werd de verstoring al tot een acceptabel niveau teruggebracht door alleen de nylonring in de capstaafsteun weg te snijden. Verwijderen van teveel ringen/steunen is echter af te raden. Dit kan namelijk leiden tot trillingen of vervorming van de capstaaf, met moeilijk te detecteren meetfouten als gevolg.

Hierboven is aangegeven dat dit seizoen een begin is gemaakt met het oplossen van het voorkeurswaardenprobleem. Op een deel van de locaties en gedurende een deel van het seizoen deed het probleem zich dus nog wel voor. In het volgende zal worden aangegeven waar en wanneer significante meetfouten kunnen zijn ontstaan ten gevolge van voorkeurswaarden. Eerst zal echter een overzicht worden gegeven van de uit histogrammen afgeleide posities van de voorkeurswaarden, zie Tabel 6.1:

Tabel 6.1 Posities van capstaafvoorkeurswaarden, per meetpaal, per periode (voor zover gedetecteerd in histogrammen, ter indicatie)

paal	vanaf	posities ²⁵ gedetecteerde voorkeurswaarden (cm)	Opmerkingen
FL2	<1/7/01	ca. 302/350	
FL2	ca. 21/9/01	265/310/360/407/457	nieuwe waarden i.v.m. verloop
FL5	nov. 01	ca. 74/136/206	t/m okt01 max. 5% lager door verloop
FL5	21/2/02	?/-/206/270	nylonring op 136 cm verwijderd
FL9	<1/7/01	ca. 133/195	
FL9	21/8/01	- / 197 -> 203	steun 133 cm weg, verloop 2 ^e steun
FL9	24/4/02	- / ca. 203	nwe capstaaf; steun waterspiegel al weg
FL25	<1/7/01	ca. 137	slecht detecteerbaar: lage golven / algen
FL25	18/12/01	- / 185 / 232	nylonring 137 cm verwijderd
FL26	<1/7/01	ca. 145	slecht detecteerbaar: lage golven / algen
FL26	23/8/01	100 / 194	nylonring 145 cm verwijderd
FL26	18/12/01	?	steun 145 cm en ring 100 cm verwijderd
FL26	22/1/02	107/210	nieuwe capstaaf ivm aanvaring dec01
SL29	<1/7/01	ca. 100	slecht detecteerbaar: lage golven / algen
SL29	25/9/01	-	nylonring waterlijn (~99 cm) verwijderd
SL29	14/1/02	123	nieuwe voork.waarde t.g.v. ijsschade
SL29	1/2/02	-/150/188	na rechtbuigen capstaaf
SL29	21/6/02	-	nwe capstaaf; ring bij waterspiegel weg

Het aantal in Tabel 6.1 genoemde voorkeurswaarden wisselt sterk. Dit hangt o.a. samen met de opgetreden golfcondities: hoe hoger de golven, hoe meer voorkeurswaarden gedetecteerd kunnen worden. Daarnaast heeft verwijdering van capstaafsteunen of -ringen invloed op het aantal voorkeurswaarden, de verdwenen waarden zijn met een '-' aangegeven. Tenslotte wordt meermalen een opmerking over instrumentverloop gemaakt; dit punt komt in paragraaf 6.1.3 aan de orde.

Het inventariseren van voorkeurswaarden is noodzakelijk, maar feitelijk willen we weten wanneer daadwerkelijk meetfouten zijn opgetreden. Daarom zijn de

²⁵ De posities zijn ruwweg t.o.v. de onderkant van de capstaaf. Tabel 5.1 en 5.2 kunnen gebruikt worden voor een omrekening naar waterstanden t.o.v. NAP.

periodes geïnventariseerd waarin de golfhoogtes kleiner dan 30 cm waren en de waterstanden binnen 5 cm van een capstaafsteun lagen.

Met name bij FL2 kunnen voorkeurswaarden meetfouten hebben veroorzaakt. Dit komt mede omdat het hele seizoen geen capstaafsteunen of –ringen zijn verwijderd²⁶. De meest kritische periodes liggen rond 29/7 en 23/8, in de 3^e week van zowel september als oktober, in de 2^e helft van november, medio en eind december, medio januari, en in de 2^e en laatste week van maart. Daarnaast zijn er nog enkele losse dagen met een forse kans op meetfouten. In alle situaties was sprake van lage golfhoogtes (< 30 cm). Aanlandige winden (uit ZW) waren daarbij ondervertegenwoordigd, wat ook wel te verwachten viel.

Bij FL9 zijn meetfouten door voorkeurswaarden naar verwachting zeldzaam, mede door het tijdig verwijderen van de capstaafsteun op 133 cm. Bij FL5 is het vooral de gunstige plaatsing van de capstaafsteun die de problemen beperkt heeft. Alleen rond 10/9 en 30/12, en in de 1^e helft van februari, zijn er enkele kritische dagen.

Bij FL25 is te verwachten dat er tot de 2^e week van oktober bijna voortdurend sprake was van meetfouten. Daarna traden slechts op enkele dagen problemen op. Dat kwam door gunstiger waterstanden (winterpeil), én door verwijdering van een capstaafring, het laatste op 18 december. Bij FL26 was op 23/8 al een capstaafring verwijderd. Daardoor waren alleen juli en de eerste weken van augustus gevoelig voor meetfouten. Bij SL29 trad een soortgelijk beeld op: vóór verwijdering van een capstaafring (op 25/9) waren de resultaten gevoelig voor meetfouten, daarna niet meer.

Samenvattend kan gezegd worden dat bij golfhoogtes tot 30 cm, FL2 het hele seizoen 2001-2002 kans had op meetfouten en (onderschatting van) H_{m0} door het effect van voorkeurswaarden. Bij FL25, FL26 en SL29 blijven zulke fouten voornamelijk beperkt tot de eerste maanden van dit seizoen (jul.-sept. 2001); FL5 en FL9 lijken het hele seizoen redelijk vrij te blijven van fouten door voorkeurswaarden.

6.1.2 Meetproblemen golfmetingen; invloed vervuiling en algenaangroei

In de maanden mei tot en met september kunnen vooral de instrumenten op de FL25, FL26 en SL29 last hebben van vervuiling en/of algenaangroei (zie Bijlage B, foto 11-14). Uit metingen tijdens onderhoudsdagen blijkt dat vervuiling de gemeten golfhoogte sterk kan beïnvloeden: de gemeten H_{m0} voor en na een poetsbeurt (of instrumentvervanging) kan tientallen procenten verschillen (zie voorbeeld Bijlage G). Het aantal onderhoudstochten en poetsbeurten is echter beperkt. Daarnaast helpt een poetsbeurt maar een beperkte tijd: rond twee weken en soms maar enkele dagen. Dit alles maakt dat algendetecatie van groot belang is. Sinds het najaar van 2001 wordt daarom op de uitvoeringsverslagen van de onderhoudstochten aangegeven in hoeverre de meetinstrumenten vervuild waren. Vanwege de beperkte frequentie van visuele inspecties zijn we echter toch nog aangewezen op een criterium op basis van het meetsignaal.

In het vorige seizoen zijn de spectra, histogrammen en integrale golfparameters van met name SL29 en FL25 uitgebreid gescreend om tot een definitie van een algendetectiecriterium te komen. Uiteindelijk bood alleen de golfperiodemaat $T_{H1/3}$ – de periode van de 33 % hoogste golven – voldoende

²⁶ De capstaaf van FL2 stond het hele seizoen op de nominatie vervangen te worden. De nieuwe FL2-capstaaf zou een oscillatie-unit krijgen die op 500 kHz i.p.v. 33 kHz werkte. De verhoogde frequentie zou algengroei moeten afremmen. Er kwam echter maar geen acceptabel resultaat (een rechte lijn) uit de calibratie.

aanknopingspunten voor een algendetectiecriterium. Dit leidde tot het volgende resultaat:

$$(6.1) \quad T_{H1/3} > 1.2 * T_{m01} \quad \text{én} \quad T_{H1/3} > T_p$$

Onder normale omstandigheden ligt $T_{H1/3}$ tussen de gemiddelde periode T_{m01} en de piekperiode T_p in. Bij een vervuilde capstaaf neemt de verhouding $T_{H1/3}/T_{m01}$ toe. Dit kan als volgt geïnterpreteerd worden. Bij een vervuilde capstaaf passeert slechts af en toe een extra hoge golf waarvan het meetsignaal niet door algen wordt gedempt; in de regel 'heeft het golfsignaal moeite om van de waterspiegel los te komen'²⁷. De verhouding $T_{H1/3}/T_{m01}$ neemt dan toe omdat bovengenoemde extra hoge golven – die slechts af en toe doorkomen – bij $T_{H1/3}$ relatief zwaar meetellen²⁸. Het tweede deelcriterium is toegevoegd om het detectiecriterium ook in gemengde golfvelden te kunnen detecteren. Bij FL25 komen namelijk nogal eens tweepiekige spectra voor waarbij de verhouding T_{m01}/T_p veel lager ligt dan gewoonlijk.

Waar en wanneer speelde het algenprobleem nu het meeste op? Uit de onderhoudsrapporten blijkt dat in de periode december 2001 tot medio maart 2002 alle meetpalen 'schoon' werden bevonden. Algenproblemen zijn dan niet te verwachten. Op basis van de verwerkte metingen en bovenstaand algencriterium komen een aantal kritische periodes en meetlocaties naar voren. Een globale beschrijving volgt hieronder, zie ook Figuur 3.1. De locatie FL25 leek dit seizoen het meest gevoelig voor vervuiling te zijn. Tot 6/10/01 en vanaf 15/5/02 waren op de meeste dagen overduidelijke tekenen van vervuiling te zien. Bij SL29 waren tot oktober 2001 ook evidente tekenen van vervuiling. Ook vanaf eind maart 2002 waren er wat tekenen van vervuiling, maar deze waren niet eenduidig. Zo bleef de capstaafwaterstand na maart 2002 goed sporen met druksensor-metingen; tot september 2001 was juist sprake van vrij grote verschillen. Bij FL26 gaven de registraties tot oktober 2001 periodiek tekenen van vervuiling; daarna leken weinig problemen op te treden. Bij FL2 gaf alleen juni 2002 duidelijke tekenen van vervuiling. Dit hangt samen met het feit dat de meeste meetpalen tussen 24/4/02 en 15/8/02 niet zijn schoongemaakt vanwege een dit jaar ingevoerde zomerstop in het onderhoud. Bij FL5 en FL9 hadden algen geen zichtbare invloed op de metingen, ondanks de soms vuile capstaven (foto 14; Bijlage B).

Tot slot moet worden opgemerkt dat het huidige algendetectiecriterium slechts een aanzet is. Nadere analyse van data uit het vorige meetseizoen (Bottema, 2002) suggereerde dat het criterium niet *alle* situaties met vervuilde meetinstrumenten en onderschatte golfhoogtes kon detecteren. Een strenger detectiecriterium zou echter leiden tot het verwerpen van teveel data die betrouwbaar zijn maar de schijn tegen hebben. Het huidige algencriterium geeft dus niet zozeer een garantie op het kunnen selecteren van volledige betrouwbare data maar eerder een indicatie van dagen met (fors) vervuilde meetinstrumenten.

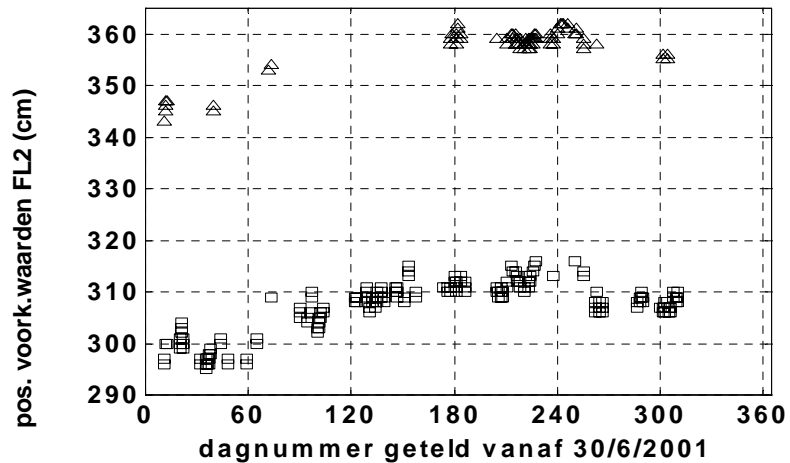
6.1.3 Meetproblemen golfmetingen; verloop in de metingen

In tegenstelling tot een stappenbaak is een capstaaf is een analoog instrument dat potentieel gevoelig is voor verloop. In het vorige seizoen is al tot 5 %

²⁷ Soms tonen de histogrammen dan ook een relatief grote en smalle piek ter hoogte van de waterspiegel.

²⁸ Ook bij schone meetinstrumenten blijkt dat bij rustig weer en zeer lage golven $T_{H1/3}$ vaak relatief hoog is. Wellicht dat ook hier een klein aantal wat grotere golven tot relatief grote $T_{H1/3}$ -waarden leidt.

Figuur 6.3 Positie van twee capstaaf-voorkeurswaarden van FL2 als functie van de meetdag (1=1/7/01; 365 = 30/6/02).



In de figuur is te zien dat de positie van de onderste voorkeurswaarde toeneemt van 297 cm rond 1/8/01 tot ca. 313 cm in februari en begin maart 2002, een toename van ruim 5%. De positie van de tweede voorkeurswaarde verschuift van 345 naar 360 cm. Bij FL5 verschuift de belangrijkste voorkeurswaarde van 127 cm (juli 2001) naar 137 cm (feb. 2002), een toename van bijna 8%. Bij FL9 blijft de toename beperkt tot 4% (van 195 naar 203 cm). Het verloop in de waterstandsoffset is daar relatief groot (6%; Figuur 5.1). Hierbij moet echter bedacht worden dat het niet exact op dezelfde hoogte terughangen van de capstaaf (tijdens onderhoud) al gauw enkele centimeters afwijking in de offset kan veroorzaken. Bij FL25, FL26 en SL29 bleek instrumentverloop veel moeilijker te detecteren. Dat komt omdat de voorkeurswaarden daar moeilijker zijn op te sporen, deels door de lagere golfhoogtes, deels door het verwijderen van capstaafsteunen (zie par. 6.1.2).

Een opvallend kenmerk van het verloop is dat het tot nu toe steeds om en geleidelijke toename van de meetwaarden ging²⁹. Poetsbeurten op onderhoudsdagen blijken niet tot veranderingen in de voorkeurswaarden te leiden. Vervuiling heeft blijkbaar weinig invloed op het waargenomen verloop. Ook is er geen sprake van duidelijke seizoens- of dag-tot-dag-variaties die zouden kunnen duiden op verloop door variaties in de temperatuur of de geleidendheid van het water. Volgens de capstaaffabrikant zouden variaties in temperatuur en geleidendheid echter geen rol mogen spelen. Bij gebrek aan andere verklaringen voor het verloop lijkt het nu het meest voor de hand te liggen de oorzaak van het verloop te zoeken in veroudering van de capstaaf, de oscillatorunit en/of de verbindingen daartussen.

²⁹ De enige waargenomen uitzondering is de in Figuur 6.3 getoonde sprong rond dag 258 (15/3/02). De sprong valt niet samen met onderhoud of enig bijzonder weersverschijnsel; een verklaring is daarom nog niet gevonden.

De hierboven beschreven problemen met instrumentverloop roepen nog een andere, meer fundamentele vraag op: *is de in het laboratorium uitgevoerde calibratie wel representatief voor de veldsituatie?* Om deze vraag te beantwoorden zijn allereerst de waterstandsoffsets in de maand maart 2002 gemonitord. De meerpeilen daalden in deze maand van NAP+43 cm naar NAP-30cm. Een foute calibratiefactor zou direct aan het licht komen door een verloop in de offsets. Bij FL5, FL25 en SL29 kwam inderdaad een zwak verloop aan het licht dat mogelijk zou kunnen wijzen op een iets te lage calibratiefactor, wat uiteindelijk leidt tot een licht onderschatte golfhoogte. Bij FL9 en FL26 was juist sprake van een mogelijk iets (tot 5%) te hoge calibratiefactor en golfhoogte. Vanwege de scatter in de offsets (Figuur 5.1) zijn deze getallen erg onzeker; afwijkingen kleiner dan zo'n 10% zijn op deze wijze eigenlijk nauwelijks te detecteren. Bovendien gelden de getallen voor een beperkte periode: maart 2002. Daarom is de representativiteit van de laboratoriumcalibratie ook getest aan de hand van calibraties in het veld (capstaaftesten). Enkele voorbeeldregistraties van capstaaftesten zijn opgenomen in Bijlage G. De interpretatie van de testresultaten blijkt vaak lastig te zijn, zelfs als dit gebeurt op basis van over enkele golfperiodes (15 sec.) gemiddelde waterstanden. Ten gevolge van activiteiten aan/bij de capstaaf (bijv. bewegingen van het onderhoudsschip) zijn er vaak allerlei waterstandsschommelingen. Verder wordt een capstaaf na schoonmaak vaak direct van het dek in verhoogde stand gezet, zodat één helft van de capstaaftest verloren gaat. Tabel 6.2 geeft een overzicht van de resultaten van de capstaaftesten van het seizoen 2001-2002.

Tabel 6.2 Resultaten van de in het seizoen 2001-2002 uitgevoerde capstaaftesten (veldcalibraties)

paal	datum	opgelegde capstaaf- verpl. (cm)	gemeten verplaatsing capstaaf (cm)	Opmerkingen
FL2	25/10/01	+25	27-/28+	
FL5	9/11/01	+40	36-/40+	buiig, sterke waterst.variaties
FL5	28/11/01	+40	38-/40+	
FL5	22/3/02	+50?	46-/42+	moet opgelegde verpl. niet 40 zijn?
FL5	17/4/02	+50?	40-/40+	moet opgelegde verpl. niet 40 zijn?
FL9	9/11/01	+25	27-/26+	geleid. toenemende waterst.
FL9	28/11/01	+50	-/52+	capstaaftest direct na schoonmaak
FL25	23/8/01	+18	52cm	fout in opgegeven verplaatsing?
FL25	28/9/01	+25	-/28+?	
FL25	29/11/01	+25	-/47+	capstaaftest direct na schoonmaak
FL25	18/12/01	+50	48-/48+	
FL25	22/3/02	+50	48-/48+	
FL26	28/9/01	+26	31-/30+	
FL26	30/11/01	+50	(48-)/48+	test bijna direct na schoonmaak
FL26	18/12/01	+50	48-/48+	
FL26	22/3/02	+50	53-/53+	
FL26	23/4/02	+50	45-/-	
SL29	22/8/01	+30	25-/24+	rommelig uitgevoerde test
SL29	1/11/01	+25	24+/25-	uitstekend uitgevoerde test
SL29	27/11/01	+25	26+/25-	uitstekend uitgevoerde test
SL29	26/3/02	?	-/26+	capstaaftest niet gerapporteerd
SL29	22/4/02	?	22-/20-/40+	capstaaftest niet gerapporteerd

Uit de tabel blijkt dat het aantal uitgevoerde testen per meetpaal sterk verschilt. Ook valt op dat van januari tot medio maart 2002 geen testen zijn uitgevoerd. Dit kwam doordat op de onderhoudsdagen toen telkens óf sprake was van te sterke golfslag, óf van te hoge waterstanden om de capstaaf los te kunnen maken.

De resultaten van de capstaaf testen ogen goed: meestal komen de gemeten en opgelegde waterstandsverschillen goed overeen. Bij de tests met kleine capstaaf-verplaatsingen (25 of 30 cm, in het begin van het seizoen) zijn de verschillen tussen opgegeven en gemeten verplaatsing soms relatief groot. Een afleesfout van 1 cm (of een 'hikje' van 1 cm bij een capstaafsteun) leidt echter al tot 4% afwijking. Daarom zijn later de capstaafverplaatsingen zoveel mogelijk op 50 cm vastgesteld. Alleen bij SL29 en FL5 stuitte dit op praktische bezwaren. Daar zijn in de tests verplaatsingen van 25 resp. 40 cm gehanteerd. In een enkel geval is overigens vergeten een capstaafverplaatsing op te geven, of lijkt sprake te zijn van een fout in de opgegeven verplaatsing (bij FL5 en FL25).

De onnauwkeurigheden in de capstaaf tests lijken te groot te zijn om op basis van één test kleine afwijkingen (<10%) ten opzichte van de capstaafcalibratie te detecteren. Sommige afwijkingen blijken zich echter systematisch voor te doen. Zo zijn er bij FL9 ca. 5% te hoge waterstandsverschillen (en golfhoogtes), terwijl na oktober 2001 de waarden bij FL25 juist ca. 5% te laag zijn. Beide trends lijken plausibel omdat ze ook al naar voren kwamen uit de eerder in deze paragraaf besproken analyse van meerpeilen en waterstanden gedurende maart 2002.

Tot slot viel op dat na plaatsing van de capstaaf in een verhoogde positie de waterstanden soms nog enkele centimeters door bleven dalen, in een tijdsbestek van ca. 2 minuten. Dit is vreemd want een capstaaf kan niet geleidelijk omhoog kruipen. Bij controles op calibraties (in het laboratorium) kwam echter een zelfde verschijnsel naar voren: bij dalende waterstand waren de meetwaarden hoger dan bij stijgende waterstand met een maximaal verschil in de orde van 15 cm als alleen de voet van de capstaaf in het water stond. Kennelijk heeft zelfs een dun (nog niet verdampt) waterfilmje op de capstaaf invloed op de meetwaarden. Deze fout kan van belang worden als de tijdschaal van de golven in dezelfde orde ligt als de droogtijd van de capstaaf, d.w.z. enkele minuten. Bij langzame waterstandsschommelingen zou bovenstaande fout dus een rol kunnen spelen, bij de huidige golfmetingen hoogstwaarschijnlijk niet.

Al met al zijn de belangrijkste resultaten en conclusies uit deze paragraaf:

- de meeste capstaven vertonen een geleidelijk verloop (rond 5% toename in waterstanden per jaar)
- de golfhoogtes bij FL9 kunnen dit seizoen licht (ca. 5%) overschat zijn, die van FL25 licht (ca. 5%) onderschat, vooral na oktober 2001
- kleine meetfouten (tot ca. 7%) zijn nauwelijks met de huidige controletechnieken op te sporen. Een garantie op nauwkeuriger resultaten (fout zeker < 5%) lijkt niet haalbaar door meer controles achteraf, wellicht wel door betere (handhaving van) meetprocedures.

6.1.4 Meetproblemen golfmetingen; te korte meetinstrumenten

Dit seizoen was er een fors aantal dagen waarop de golven op één of meer locaties over de top van de capstaaf heengeslagen moeten zijn. Hierbij is uitgaan van de ruwe meetwaarden (voorzover die groter zijn dan de lengte van het meetinstrument); bij windkracht 7 of meer wordt namelijk vrijwel nooit uitgevaren voor onderhoud. Onderstaand overzicht geeft een indruk van de periodes waarin het probleem zich voordeed:

- FL2: vooral 28/12, 23/2, 26/2 en 9/3; op 5 dgn tussen 27/1 en 22/2.
- FL5: op 9 dagen tussen 11/2/02 en 9/3/02, vooral 26/2/02
- FL9: o.a. 11/7, 8/9, 28/12, *dertig* (30!) dagen tussen 27/1 en 11/3
- FL25: vooral 21/2, bijna op 8/11, 14/2, 20/2, 14/3 en 15/3
- FL26: 8/11, op 8 dagen tussen 18/2 en 10/3, vooral 26/2 en 9/3
- SL29: geen problemen

Uit het overzicht blijkt dat er bij elke IJsselmeer-meetpaal wel eens golven over de top van de capstaaf zijn heengeslagen. Bij FL9 was dit zelfs op 33 dagen het geval. Dat het probleem zich juist dit seizoen voordoet hangt samen met een combinatie van hoge meerpeilen (Figuur 5.2) en stormachtig weer in met name februari. Daarnaast lijkt het er op dat sommige capstaven erg laag zijn ingehangen (hoe hoger de offset in Tabel 5.1, hoe lager de capstaaf is ingehangen).

Het grote aantal dagen en meetpalen waarop er golven over de top van het golfmeetinstrument sloegen maakt het noodzakelijk om niet het probleem te constateren, maar ook een foutschatting te maken. Dit is gedaan met een klein aantal data van één meetpaal (FL9); de foutschatting is derhalve puur indicatief. De foutanalyse is gemaakt als functie van de variabele Y_{top}/H_{m0} waarbij Y_{top} de verticale afstand tussen de top van de capstaaf en het stilwaterniveau is, en H_{m0} de golfhoogte. In de datablokken met testdata was de maximale golfhoogte H_{max} gemiddeld bijna twee (1.9) keer zo groot als H_{m0} . Tabel 6.3 geeft een overzicht van de fouten:

Tabel 6.3 Indicatie van meetfouten als golven over de top van een capstaaf heenslaan, als functie van Y_{top}/H_{m0} (Y_{top} is vert. afstand tussen top capstaaf en stilwaterniveau).

Y_{top}/H_{m0}	aard van meetfouten
>1.25	geen effect
1-1.25	top golfhoogteverdeling vakt af, alleen effect op H_{max} en $H_{1/50}$ (< 10%)
0.75-1	golfhoogteverdeling raakt vervormd als op ondiep water; H_{max} tot 25% te laag maar effect op H_{m0} en $H_{1/3}$ is nog kleiner dan 3%
0.5-0.75	tot ca. 30% fout in H_{max} t/m $H_{1/10}$; $H_{1/3}$ gaat afwijken van H_{m0} ; H_{m0} tot 8% te laag, $H_{1/3}$ tot 14% te laag.
<0.5	forse fouten in alle parameters, uiteindelijk ook in de golfperiodematen (m.n. T_{m-10})

Aanvankelijk blijven de meetfouten dus beperkt tot de top van de golfhoogteverdeling en parameters als H_{max} en $H_{1/50}$. Daarna treden de meetfouten in steeds meer golfhoogteparameters op, en in allerlaatste instantie ook in de golfperiodes.

Hoe erg zijn nu de meetfouten die dit seizoen bij de meetpalen zijn opgetreden? Bij FL25 zijn de meetfouten waarschijnlijk verwaarloosbaar geweest, Y_{top}/H_{m0} kwam daar niet lager dan 1.3. Bij FL2 zullen de fouten tot H_{max} en $H_{1/50}$ beperkt zijn gebleven, Y_{top}/H_{m0} kwam daar op 26/2 en 9/3 tot 1.0. Bij FL5 en FL26 daalde Y_{top}/H_{m0} op die dagen tot ca. 0.85. De fout in H_{m0} zal beperkt zijn gebleven maar de golfhoogteverdeling zal sterk vervormd zijn geweest. Bij FL9 is een foutschatting moeilijk omdat er telkens uitzonderingswaarden (-6999) optraden als de golven over het meetinstrument heensloegen³⁰. Waarschijnlijk is Y_{top}/H_{m0} op tal van dagen 0.8 geweest; op 26/2 en 9/3 daalde Y_{top}/H_{m0} zelfs tot 0.7. In die situatie zal er bijna elke minuut wel een golf over de top van de capstaaf heen zijn geslagen. Al met al vielen de fouten in veelgebruikte golfparameters (H_{m0}) waarschijnlijk wel mee. Dat is geen reden om geen actie te ondernemen want in de o.a. voor scheepvaartzoneringen te gebruiken golfparameters $H_{1/10}$ en $H_{1/50}$ zijn wel fouten opgetreden. Bovendien bemoeilijken de vervormde golfhoogteverdelingen tussentijdse kwaliteitscontroles, die vaak plaatsvinden door visuele inspectie van het meetsignaal. Bij FL5 werden die kwaliteitscontroles ook bemoeilijkt door overschatting van de waterstand in situaties waar golven over de capstaaftop heensloegen. Zo was er op 26/2 even sprake van een

³⁰ De uitzonderingswaarden van -6999 verklaren wellicht ook waarom het gemeten capstaafsignaal nooit boven de 293 cm uitkwam. Gegeven het feit dat bij FL9 de meetwaarden iets *overschat* werden (par. 6.1.3) is het nl. vreemd dat de top van de capstaaf *minder* lijkt te zijn dan 3 meter.

stilwaterniveau *boven* de top van de capstaaf – normaal gesproken zou een dergelijk fysisch onrealistisch meetresultaat direct worden verworpen. De oorzaak van het te hoge meetsignaal lag vermoedelijk in het feit dat – al dan niet door overslaande golven – de massabuis van de capstaaf lekgeraakt. Bij FL9 was er een sterke correlatie tussen overslaande golven, en het optreden van uitzonderingswaarden (-6999) in het meetsignaal. Mogelijk hebben de overslaande golven er ook toe bijgedragen dat de capstaaf van FL9 uiteindelijk (eind maart 2002) helemaal defect raakte.

6.1.5 Meetproblemen golfmetingen; frequentiebereik

Bij de bepaling van integrale golfparameters H_{m0} , T_p , T_{m-10} , T_{m01} en T_{m02} uit golfspectra is het belangrijk het juiste frequentiebereik (of spectrale integratiebereik) te kiezen. Tabel 2.4 in Hoofdstuk 2 geeft per meetpaal een overzicht van het gebruikte frequentiebereik, dat begrensd wordt door een minimale en maximale frequentie, resp. f_{min} en f_{max} .

Zowel van de locaties FL26 en SL29 zijn enkele maanden data geanalyseerd om na te gaan hoe gevoelig de diverse golfparameters zijn voor de keuze van f_{max} . De fouten bleken sterk af te hangen van de waarde van f_{max} , en van de golfperiode. Hoe kleiner de golfperiode en f_{max} zijn, hoe groter de fouten. Tabel 6.4 geeft een indruk van de meetfouten als een maximale frequentie f_{max} van 1 Hz wordt gebruikt. Deze f_{max} -waarde wordt op de meeste meetpalen gehanteerd. Alleen op FL25 en SL29 wordt een verhoogde f_{max} gebruikt.

Tabel 6.4 Minimaal vereiste piekperiode T_p (in sec) om te garanderen dat meetfouten bij een gegeven integratiebereik ($f_{max} = 1$ Hz) binnen 2%, 5%, 10% of 20% blijven; ter indicatie

meetfout in:	H_{m0}	T_{m-10}	T_{m01}	T_{m02}
waarde:				
2%	2.5 sec	2.7 sec	-	-
5%	2.0 sec	2.1 sec	3.0 sec	-
10%	1.5 sec	1.6 sec	2.1 sec	3.0 sec
20%	1.15 sec	1.2 sec	1.3 sec	1.6 sec

Overigens geeft een te lage waarde van de frequentie f_{max} een te lage waarde van H_{m0} , maar juist een te hoge waarde voor de golfperiodematen T_{m-10} , T_{m01} en T_{m02} . Verder blijkt dat bij $f_{max} = 1$ Hz de golfhoogtes binnen 5-10% kunnen worden bepaald zolang de piekperiode T_p groter is dan 1.5 à 2 sec. In de praktijk betekent dit dat de fouten in H_{m0} acceptabel blijven zolang de gemeten golfhoogtes groter zijn dan 10 à 20 cm. Voor de golfperiode T_{m-10} geldt een soortgelijk verhaal. De golfperiodematen T_{m01} en T_{m02} zijn een stuk gevoeliger voor de keuze van het spectrale integratiebereik. Bij $f_{max} = 1$ Hz moeten de piekperiode en golfhoogte minimaal 2-3 sec. en 0.3-0.6 m zijn om de fouten in T_{m01} en T_{m02} binnen 5-10% te houden. Bij korte strijklengtes zijn dergelijke golfhoogtes nauwelijks haalbaar, zelfs niet bij harde wind. Vandaar dat het spectrale integratiebereik vergroot is op locaties waar dit probleem vaak speelt: op FL25 en SL29 is f_{max} verhoogd tot 1.5 Hz. Bij $f_{max} = 1.5$ Hz kunnen ook korte en kleine golven nog goed worden geanalyseerd. H_{m0} en T_{m-10} kunnen dan nog binnen 5-10% bepaald worden bij piekperiodes en golfhoogtes van 1 sec en 0.07 meter. Bij T_{m01} en T_{m02} kan dat vanaf T_p - en H_{m0} -waarden van 1-2 sec en 0.1-0.3 meter. Dat maakt het mogelijk om in ieder geval vanaf krachtige wind T_{m01} en T_{m02} betrouwbaar te bepalen. Overigens is het in alle gevallen verstandig om f_{max} niet groter te laten worden dan ca. 0.3 keer de samplefrequentie f_s . Bij frequenties groter dan ca. $0.3 \cdot f_s$ blijkt het spectrum namelijk beïnvloed te worden te worden door aliasing³¹.

³¹ “Vouweffect”. Eventueel aanwezige golfcomponenten met een frequentie groter dan $0.5 \cdot f_s$ worden dan door de eindige monsterfrequentie geïnterpreteerd als

Ook de keuze van de ondergrens f_{\min} van het spectrale integratiebereik heeft aandacht. In theorie zou er geen golfenergie meer aanwezig moeten zijn bij frequenties ruim boven de piekfrequentie f_p ($\approx 1/T_p$). In de praktijk blijken de golfspectra wel degelijk laagfrequente energie te bevatten. Deze kan vooral aan waterstandsschommelingen met een tijdschaal van enkele minuten worden toegeschreven³². In de dataverwerking wordt voor zulke schommelingen gecorrigeerd zodra de amplitude groter dan 3 cm wordt. Uit inspectie van gemeten spectra blijkt dat de laagfrequente spectrale dichtheid toch nog waarden tot $10^{-3} \text{ m}^2/\text{Hz}$ blijkt te kunnen halen, bij FL5 en FL9 zelfs nog iets hoger. Ter vergelijking: bij golfhoogtes van 4 cm en 1.2 meter ligt de spectrale dichtheid bij de piekfrequentie f_p ($1/T_p$) in de orde van 10^{-3} resp. $1 \text{ m}^2/\text{Hz}$. Overigens was alleen de golfperiodemaat T_{m-10} gevoelig voor de hierboven beschreven laagfrequente bijdragen. In situaties met lage golfhoogtes en/of sterke waterstandsschommelingen kan de fout in T_{m-10} oplopen tot +10%. De fouten in T_{m01} en T_{m02} bleken erg klein, evenals de fout in de golfhoogte H_{m0} .

Al met al kan geconcludeerd worden dat het huidige spectrale integratiebereik redelijk goed voldoet voor de bepaling van de golfhoogte. Voor de golfperiodematen liggen de zaken lastiger. T_{m01} en T_{m02} zijn vooral gevoelig voor wat er bij hoge frequenties gebeurt, en daarmee voor de keuze van f_{\max} . De periodemaat T_{m-10} is juist weer relatief gevoelig voor laagfrequente processen zodat waterstandsschommelingen hier fouten kunnen veroorzaken. In de toekomst zou – via een kleine wijziging in de verwerkingssoftware – ook voor schommelingen kleiner dan 3 cm gecorrigeerd moeten worden, zodat de golfperiode T_{m-10} vaker gebruikt kan worden. In dit verslag zullen nog vooral resultaten van de piekperiode T_p worden gepresenteerd.

6.1.6 Meetproblemen golfmetingen; overige problemen

Over de overige meetproblemen kunnen we kort zijn. Bij FL9 komen nogal eens uitzonderingswaarden (-6999), bij FL2 en FL5 een enkele keer. Bij FL5 en FL9 hangen de waarden vooral samen met golven die over de top van het meetinstrument heenslaan; bij FL2 was geen oorzaak te ontdekken. Het valt aan te bevelen om te controleren of de uitgangsspanning van de capstaaf niet buiten het spanningsbereik valt dat door de logger wordt toegelaten, wellicht is dit een oorzaak van de problemen.

In zeer zeldzame gevallen lijkt er ook sprake te zijn van elektronische storingen. Zo leek er op 28/9 bij FL2 korte tijd sprake te zijn van een abnormaal hoge accuspanning. Verder gebeurt het heel af en toe dat 's nachts de gemeten waterstand bij SL29 gedurende enkele minuten een twintigtal centimeters inzakt. De oorzaak is onduidelijk; mogelijk gaat het om een elektronische storing.

6.2 Meetproblemen; golfoploop

De bij Rotterdamse Hoek gebruikte oploopbaak werkt volgens het stappenbaakprincipe. In eerdere jaren zijn ook golven met stappenbaken gemeten (voor nadere informatie, zie o.a. Beyer & v.d. Goes, 2000; Bottema, 2002). Sinds maart 2001 is dat niet meer het geval. Daarom worden hier alleen

golven met een frequentie kleiner dan $0.5 \cdot f_s$. Hierdoor kan het spectrum vervuild raken met golfcomponenten met frequenties groter dan $0.5 \cdot f_s$.

³² Ook is onderzocht of de eindige middelingstijd (20 minuten) invloed had, bijvoorbeeld door versmering van het spectrum. Dergelijke effecten konden echter niet gedetecteerd worden bij de huidige frequentieresolutie ($df = 0.01 \text{ Hz}$).

die stappenbaak-metproblemen besproken die verband houden met de huidige golfoplopmetingen.

Een eerste meetprobleem bestaat uit incidenteel voorkomende 'losse' uitschieters. De oploopbaak is een discreet instrument dat het rangnummer van de hoogste sensor uit een reeks natte sensoren registreert. Door spatwater en elektronische storingen kunnen ook sensoren boven de waterspiegel geactiveerd worden. Elektronica in het meetinstrument moet dit voorkomen. Bij de huidige oploopbaak lijkt dit niet altijd te gebeuren. Daarom worden meetwaarden waarbij de oploophoogte binnen 0.25 seconde meer dan 65 cm verandert ook als uitschieter gekenmerkt. Een rangnummer groter dan 80 wordt hoe dan ook als uitschieter gekenmerkt omdat het aantal sensorwaarden slechts 80 is. Dergelijke 'onrealistische waarden' worden direct al door de huidige meetprogrammatuur uitgefilterd³³.

Soms is er ook sprake van permanente uitschieters. Zo produceerde de oploopbaak in het najaar van 2001 lange tijd een waarde van 255. In feite is de oploopbaak tot eind november 2001 defect geweest. Daarnaast was de oploopbaak ook defect in de maand mei 2002.

Een derde potentieel probleem hangt samen met defecte sensoren in de baak, waardoor sensoren ofwel systematisch meetellen, ofwel systematisch worden overgeslagen. Bij de oploopbaak zijn dergelijke problemen nog niet geconstateerd. Overigens zijn dit soort problemen eenvoudig te detecteren door regelmatig histogrammen te maken van de meetwaarden (sensornummers) van de oploopbaak.

Een laatste punt van aandacht is algenaangroei. Vooral bij de golfmetingen kan algenaangroei tot forse meetfouten leiden. Algen groei bij de oploopbaak heeft tot nu toe nauwelijks aandacht gekregen. Er vindt ook geen maandelijks schoonmaak van de oploopbaak plaats, terwijl dat wel gebeurt bij de andere golfmeetinstrumenten. Anderzijds zijn algenproblemen tot nu toe nog niet 'spontaan' uit de metingen naar voren gekomen. Dat komt mede door het geringe aantal beschikbare data tot nu toe, en het feit dat die data vooral het winterhalfjaar betreffen.

6.3 Validatie golfgegevens; methodiek

Hieronder wordt ingegaan op methoden van validatie van golfgegevens:

- bij tussentijdse controles
- bij het maken van een stormseizoenverslag
- in de toekomst

Voordat we alle validatieslagen bespreken is het goed eerst nog even alle verwerkingsslagen uit Hoofdstuk 2 nog eens op een rijtje te zetten:

- 1-MEETELEKTRONICA: van uitgangsspanning meetinstrument naar ingangsspanning datalogger
- 2-LOGGERFUNCTIE: van ingangsspanning datalogger naar (een maat voor de) momentane waterstand
- 3-progr. INWIN-PC: verzamelt de loggeruitvoer in een dagbestand
- 4-SPLITSEN (matlab): splitst dagbestand in datablokken (waterstanden)
- 5-GOLVEN (matlab): berekent golfparameters en spectra (naar gs-bestand)
- 6-GS2TABEL (matlab): zet gs-bestand om in tabel
- 7-VERZAMEL (matlab): maakt verzameltabel voor golfklimatologie

De voorbewerkingen vinden plaats bij RDIJ, de MATLAB-bewerkingen bij RIZA. In de 3^e t/m 7^e verwerkingsslag wordt steeds een product gemaakt dat zich

³³ De uitschieter wordt dan vervangen door de vorige meetwaarde.

leent voor inspectie (validatie). Soms betreft dat een visuele inspectie van een bestand (stap 3 en 6), meestal zijn er scripts om de data in grafiek uit te zetten. Voor elke verwerkingsfase zijn grafieken beschikbaar om de (golf)data te valideren. Zie ook de volgende subparagrafen.

6.3.1 Tussentijdse validatie golfmetingen

Voorafgaand aan elk golfmetingenoverleg wordt in de regel voor elke meetpaal een tussentijdse validatie uitgevoerd. Daarbij komt het volgende aan bod³⁴:

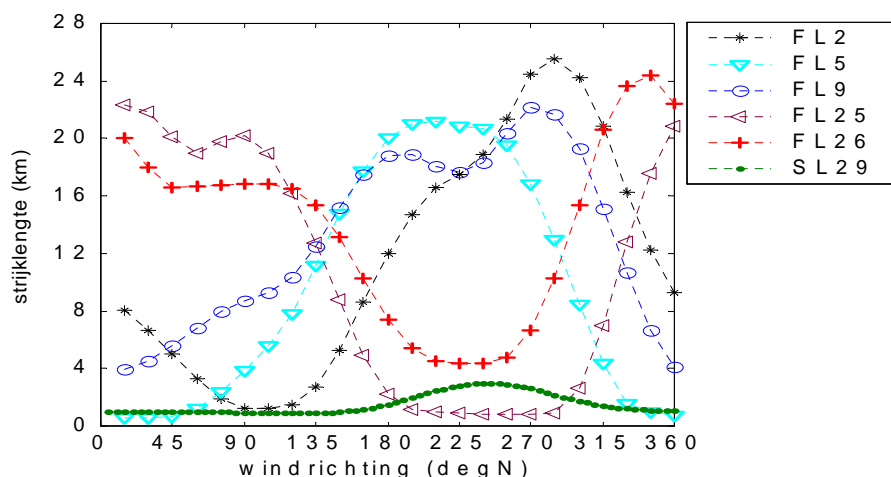
Dagbestanden: RDIJ zorgt in principe wekelijks voor verwerkingsverslagen. De databestanden worden visueel geïnspecteerd en er wordt gekeken of ze compleet zijn. De sinds kort aangemaakte logbestanden moeten zo'n visuele inspectie vereenvoudigen. De hoeveelheid data kan met de volgende richtlijnen beoordeeld worden. De capstaafbestanden van FL2, FL5, FL9, FL25, FL26 en SL29 zijn (nagenoeg) compleet als ze resp. 4.8 MB, 2.9 MB, 2.9 MB, 6.0 MB, 4.5 MB en 4.3 MB groot zijn³⁵. Bij de oploopbaak bevatten bestanden van 1706 KB meestal alleen nullen, en bestanden groter dan 1800 KB vooral uitzonderingswaarden. De tussenliggende bestanden zijn meestal bruikbaar.

Datablokken: De scripts *golffhisto..m* geven een histogram van de waarden in één of meer datablokken. Zodoende kan het bereik van data geverifieerd worden, en kunnen de data worden geïnspecteerd op zaken als uitbijters, voorkeurswaarden, 'hangende waarden' (staggers), etc. Het script *golfsignaal.m*

plot de momentane waterstand en kan gebruikt worden om een capstaafteest (veldcalibratie) nader te bekijken.

Gs-bestanden: De scripts *m106ysm.m* en *overz_ysm5slm.m* geven resp. een dagoverzicht van golven en wind per meetpaal en een overzicht van de golven op alle meetpalen. Zo kan worden bekeken of (i) het verloop van golven en wind spoort en (ii) of het golfverloop op alle meetpalen consistent is. Bij zo'n vergelijking van golfhoogtes van verschillende meetpalen kan – gegeven de windrichting – onderstaande figuur als indicatief richtsnoer dienen.

Figuur 6.4 Effectieve strijklengte (km) als functie van de windrichting voor elk van de zes meetpalen.



Bij niet te sterke wind (tot 10 à 15 m/s) mag verwacht worden dat de paal met de grootste 'effectieve strijklengte' (definitie in Holthuisen, 1980) de grootste

³⁴ Voorbeeldgrafieken worden in de bijlagen gegeven, niet in deze paragraaf.

³⁵ De grootte van de bestanden is ter indicatie en hangt samen met de samplefrequentie (bij FL25 is dat 8 Hz i.p.v. 4 Hz) en het al dan niet meten van wind

golfhoogte heeft. Zo kan worden nagegaan of een gemeten golfhoogte 'uit de toon valt' ten opzichte van de golfhoogte op andere meetpalen. In de toekomst zal Figuur 6.4 vervangen moeten worden door een gemeten en gevalideerde golfhoogteklimateologie waartoe Hoofdstuk 7 een aanzet geeft. Het script *verz_rdh.m* vergelijkt golfmetingen op FL2 met oplooppmetingen bij Rotterdamse Hoek. Het script *s001ysm.m* plot een serie golfspectra (per locatie) die geïnspecteerd kunnen worden op ruis en verdachte pieken. Golfsignalen, golfparameters en spectra worden ook geplotted in een filmpje dat wordt afgedraaid bij het aanmaken van de gs-bestanden (*funcgolfini.m* en *golven.m*)

Tabelbestanden: Visuele inspectie is mogelijk bij tussentijdse controles.

Al met al behelst een tussentijdse controle dus:

- controle van de dagbestanden (op grootte en inhoud)
- controle van de 20-minuten-datablokken (histogram etc.)
- controle tijdens dataverwerking via 'filmpje'/animatie
- controle verwerkte data via spectra en dagoverzichten

6.3.2 Validatie golfmetingen voor stormseizoenverslag

Voor dit verslag zijn (vrijwel) alle beschikbare data verwerkt. Vanwege de hoeveelheid data gebeurt de controle van de inhoud van de dagbestanden en datablokken steekproefsgewijs. Hetzelfde geldt voor de spectra en de bij verwerking getoonde 'filmpjes' (zie boven). De steekproef wordt voor elke meetpaal ruwweg om de week uitgevoerd: zowel stormdagen, rustige dagen als onderhoudsdagen komen daarbij aan bod.

Van de verwerkte data worden met het script *meerdagsplot1paalysm.m* maandoverzichten gemaakt voor elke meetpaal. Het maken van dagoverzichten (zie boven) zou immers te arbeidsintensief zijn. Op de maandoverzichtsplots worden de volgende visuele controles uitgevoerd:

- plausible waarden van / verhoudingen tussen H_{m0} , $H_{1/3}$ en H_{max} ?
- idem voor de golfperiodematen T_p , T_{m01} en $T_{H1/3}$
- plausible waarden voor de waterstand (en bij SL29 de druksensor)
- verloop van wind, golven en waterstand consistent?
- zijn er trendbreuken in de reeks?

Een essentieel element van de sinds 2001 gevolgde aanpak is de validatie van *golfklimatologie*. Eerst worden – per meetpaal – alle verwerkte golfdata samengebracht in een verzameltabel. Daarop volgt een visuele inspectie, door bijvoorbeeld – gegeven de windrichting – de golfhoogte uit te zetten als functie van de windsnelheid. Een geschikt windrichtingsbereik (met weinig variatie in H_{m0}) kan met Figuur 6.4 worden bepaald.

Een eerste validatiestap bestaat uit de analyse van evt. uitbijters. Vervolgens is het belangrijk de data op te splitsen in verschillende periodes, en de resultaten te vergelijken. Systematische verschillen tussen de periodes kunnen dan duiden op problemen i.v.m. instrumentwisseling (bij sprongen) of op instrumentverloop (bij consistente trends)..

Overigens zouden verschillen tussen meetperiodes ook kunnen samenhangen met reële (toevallige of fysische) oorzaken. De kans op toevallige verschillen wordt echter verkleind door voldoende grote samples (periodes) te kiezen. Het effect van systematische (seizoens-)verschillen door bijvoorbeeld thermische stabiliteitseffecten lijkt klein te zijn (Bottema, 2002).

6.3.3 Validatie golfmetingen; toekomstvisie

De validatie van golfgegevens kan verfijnd worden vanaf het moment dat er een gevalideerde golfklimatologie voor elke meetpaal beschikbaar komt. In dat

geval zouden data direct bij verwerking al het label 'verdacht' kunnen krijgen als de golfparameters teveel afwijken van een uit de golfklimatologie bepaalde richtwaarde. Hoeveel 'teveel' is hangt af van de spreiding in de metingen; een complete golfklimatologie zou hiervan een indicatie moeten geven. Als teveel data verdacht zijn is een nadere analyse nodig. Het label 'verdacht' kan namelijk direct samenhangen met een foute meting, maar ook met een foute windrichting of windsnelheid, of (bij vergelijking van meerdere meetpalen) met een foute meting op één of meer andere meetpalen.

Daarnaast is het ook van belang validatiemechanismen in vroege stadia van verwerking in te bouwen, op het moment dat alleen RDIJ nog over de data beschikt. Mede daarom wordt nu bij het splitsen van de dagbestanden (verwerkingsslag 4 uit het begin van par 6.3) een logbestand met sleutel informatie uit het dagbestand aangemaakt. De sinds augustus 2001 weer uitgevoerde veldcalibraties (capstaaf testen) zijn een goede eerste stap om elektronica, loggersoftware en verwerkingsprogrammatuur periodiek te controleren. Vanwege instrumentverloop en de kans op instrumentbeschadigingen in het veld zou echter veel meer aandacht moeten worden gegeven aan *nacalibraties*. Tot slot kan worden overwogen om de datalogger en/of de inwin-PC verdachte en/of evident foute data te laten signaleren, en de data (of kenmerken daarvan) weg te schrijven in een speciaal bestand (bijv. *.ERR)

6.4 Validatie golfgegevens; resultaten

In deze paragraaf wordt per meetpaal de validatie van de golfgegevens belicht. In de subparagrafen wordt o.a. het volgende gemeld en/of besproken

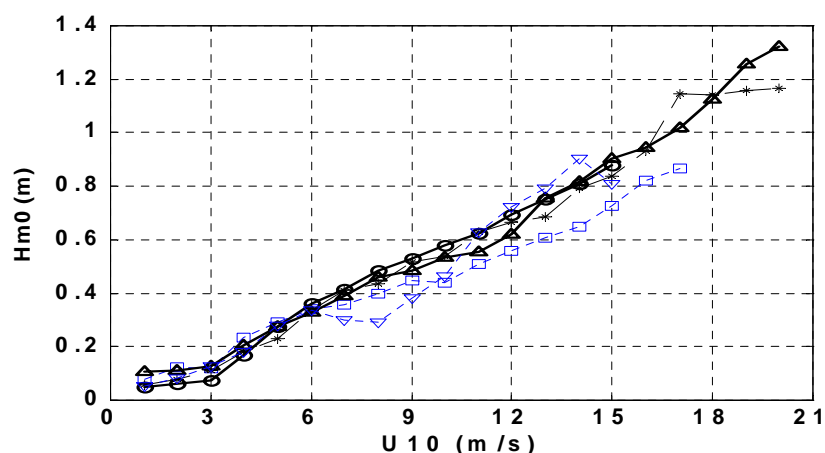
- relevante instrumentatiegegevens
- verwachte effect van meetproblemen
- validatieresultaten

Een belangrijk onderdeel van de validatie is de vergelijking van de gemeten "golfklimatologie" voor opeenvolgende twee- of driemaandsperiodes. Van oktober tot april zijn tweemaandsperiodes gebruikt. Gedurende december en januari leverden FL2 en FL26 geen van beide een bruikbare referentiewind. In die maanden is daarom de wind van Stavoren-Haven als referentie gebruikt. Tenzij anders vermeld wordt hierna van de volgende periodes uitgegaan:

- | | |
|---------------------------|------------------------------------|
| 1) 1/7/2001 – 30/9/2001 | (... ; vierkantje) |
| 2) 1/10/2001 – 30/11/2001 | (__ ; cirkel) |
| 3) 1/12/2001 – 31/1/2002 | (- - ; sterretje) |
| 4) 1/2/2002 – 31/3/2002 | (__ ; driehoek met punt omhoog) |
| 5) 1/4/2002 – 30/6/2002 | (... ; driehoek met punt omlaag) |

De hierboven genoemde symbolen en lijntypes horen bij de grafieken die in de volgende subparagrafen worden besproken. Figuur 6.5 is daarvan een eerste voorbeeld:

.....
 Figuur 6.5 FL2: Golfhoogte H_{m0}
 (gemiddelde uit puntenwolk) als functie van
 de windsnelheid bij Stavoren (dec/jan) en
 FL2 (overige maanden). Windrichtingsbereik:
 240 ° - 300 °. Zie tekst voor legenda.



6.4.1 Resultaten validatie golfmetingen; FL2

Figuur 6.5 geeft voor westelijke windrichtingen de golfhoogte als functie van de windsnelheid, voor de vijf eerder genoemde twee- en driemaandsperiodes. Het betreft telkens gemiddelden uit een (niet getoonde) puntenwolk van 20-minuten-waarden. De spreiding (1σ) in die puntenwolk was 3-12 cm, behalve van april-juni 2002 toen de spreiding wat groter was. De onzekerheid van de in Figuur 6.5 getoonde punten is bij de uiteinden van het databereik ca. 2 keer kleiner, in het midden tot 10 keer kleiner. De onzekerheden kunnen ietwat hobbeligheid in de grafiek veroorzaken. Bij (zeer) harde wind zijn de golven dieptegelimiteerd en kan de spreiding in de golfhoogtes samenhangen met de opgetreden waterstanden. De spreiding in de opgetreden waterstanden is echter groot en het voert te ver alle gegevens afzonderlijk te analyseren. Daarom worden nu alleen enkele gemiddelde waterstanden bij westenwind gegeven, puur ter indicatie. Bij zwakke wind waren deze ca. 25 cm onder NAP, bij de hoogste windsnelheden ca. 30 cm boven NAP. In de 4^e periode (feb/mrt 2002) waren de gemiddelde waterstanden ca. 20 cm hoger dan de hiervoor genoemde.

De golfhoogtes uit de drie middelste periodes komen goed overeen (i.h.a. minder dan 5% afwijking van het gemiddelde over de drie periodes); dit betreft gegevens uit het winterhalfjaar. Ook de overeenkomst met de golfklimatologie van het vorige winterseizoen was goed (gemiddeld tot 5% verschil t.o.v. Hoofdstuk 7 in Bottema, 2002). De golfhoogtes uit het zomerhalfjaar (1^e en 5^e periode) komen soms relatief laag uit. Vooral in juni 2003 hangt dit vermoedelijk samen met algengroei én met het feit dat het huidige algendeteciecriterium niet bij alle algensituaties "aanslaat" (voor beide punten: zie par. 6.1.2). Bij de piekperiode T_p was er geen sprake van onderscheid tussen zomer en winter en kwamen de data prima overeen met die van het vorige seizoen.

Uit verdere controles m.b.v. scatterplots kwamen geen uitschieters naar voren, wel een aantal data die duidelijk aan de randen van de puntenwolk lagen. Alleen vanaf 30 mei 2002 ging het om een substantieel aantal data (op meerdere dagen te lage golfhoogtes door algen). Op 6/12, 29/12, 14/3 en 15/3 kwamen ook enkele uren met nogal lage golven voor; op 24/12 was juist sprake van hogere golven.

Tot slot kan worden opgemerkt dat er dit seizoen op FL2 geen instrumentwisselingen of instrumentmodificaties zijn geweest op FL2. Het laatste heeft tot gevolg dat verspreid over het hele seizoen meetfouten door capstaafvoorkeurswaarden kunnen zijn opgetreden.

Samengevat kan het volgende geconcludeerd worden:

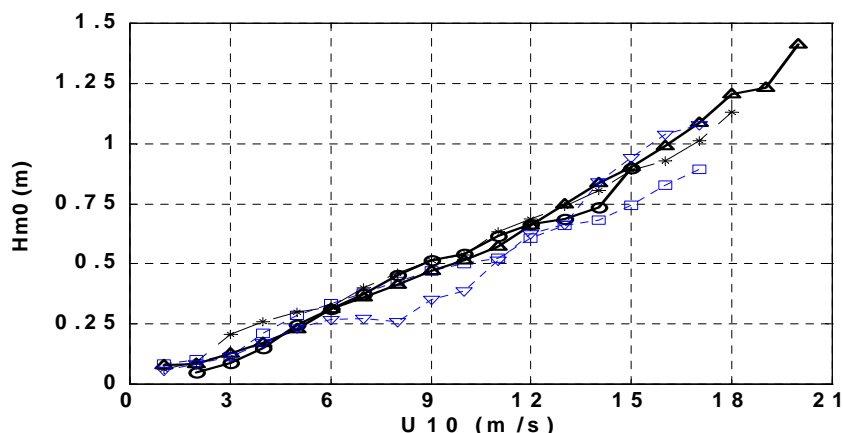
Gedurende het winterhalfjaar lijken de golfdata van FL2 betrouwbaar en in overeenstemming met metingen van de vorige winter. In de zomer kunnen de gemeten golfhoogtes soms lager uitvallen en daardoor meer spreiding vertonen. Vermoedelijk komt dit omdat niet alle gevallen met door algen vervuilde capstaven afdoende gedetecteerd konden worden.

6.4.2 Resultaten validatie golfmetingen; FL9

Bij FL9 is de overgang van de voorlaatste naar de laatste meetperiode verlegd van 1/4/2002 naar 24/4/2002. Dit omdat op laatstgenoemde datum een in maart 2002 defect geraakte capstaaf is vervangen. Voor de vijf meetperiodes zijn de gemiddelde golfhoogtes bij zuidwestenwind weergegeven in Figuur 6.6. De lijntypes en symbolen van de 5 periodes zijn dezelfde als in de vorige paragraaf. De waterstanden bij ZW-wind waren het hoogst in de 4^e periode: bij alle windsnelheden gemiddeld ca. 20 cm boven NAP. In de 3^e periode lagen de waterstanden iets lager, in de overige periodes veel lager (ca. 10-25 cm onder NAP bij harde resp. zwakke wind).

Kwalitatief gezien vertoont Figuur 6.6 overeenkomsten met Figuur 6.5: ook hier is er weinig verschil tussen de drie winterperiodes en concentreren eventuele afwijkingen zich in het zomerhalfjaar. De afwijkingen van de eerste periode zijn volledig toe te schrijven aan de zeer winderige 11^e juli (2001). Zowel H_{m0} als T_p waren die dag aan de lage kant, al is niet precies duidelijk waarom. In de vijfde periode (april-juni 2002) waren alleen de golfhoogtes te laag. Dit kan wijzen op de invloed van algen, vooral omdat de afwijkingen zich concentreerden in juni. De algendetectedrempel uit par. 6.1.2 is echter vrijwel nooit gehaald en ook vorig seizoen is er op FL9 geen merkbare invloed van algen geweest. Kennelijk is de vervuiling dit seizoen net niet ernstig genoeg geweest om tot een overschrijding van het algendetecieercriterium te leiden.

Figuur 6.6 FL9: Golfhoogte H_{m0} (gemiddelde uit puntenwolk) als functie van de windsnelheid bij Stavoren (dec/jan) en FL2 (overige maanden). Windrichtingsbereik: 170° - 260°. Zie tekst vorige pagina(s) voor legenda.



Ook bij FL9 zijn de huidige data vergeleken met die van het vorige seizoen. De overeenkomst tussen de huidige data en het seizoen 2000-2001 is wederom (zeer) goed. Wel viel op dat dit seizoen de gemiddelde golfhoogtes ca. 3% lager waren. Dit is verrassend om twee redenen: Ten eerste hadden we uit par. 6.1.3 meerdere indicaties dat de golfhoogtes op FL9 dit seizoen juist enkele procenten overschat werden. Ten tweede is tot nu toe steeds sprake geweest van een positief instrumentverloop (par. 6.1.3): de huidige capstaaf zit sinds maart 2001 op de FL9-paal en hoe langer een capstaaf op de paal zit, hoe groter de kans dat de golfhoogte overschat wordt.

Een punt van aandacht is het feit dat op diverse dagen golven over de top van de capstaaf heensloegen (par. 6.1.4). Hoewel de data in Figuur 6.6 plausibel

ogen is het toch zaak de bij harde wind verkregen data op kritische wijze te analyseren en gebruiken. Overige meetfouten (voorkeurswaarden) en uitschieters in H_{m0} of T_p bleken zeldzaam te zijn. Alleen de data van 16/1 en 17/1 en 21/3 behoeven enige aandacht vanwege evt. beschuttingseffecten bij Stavoren-Haven resp. ruimtelijke windvariaties door een golf in een koufront.

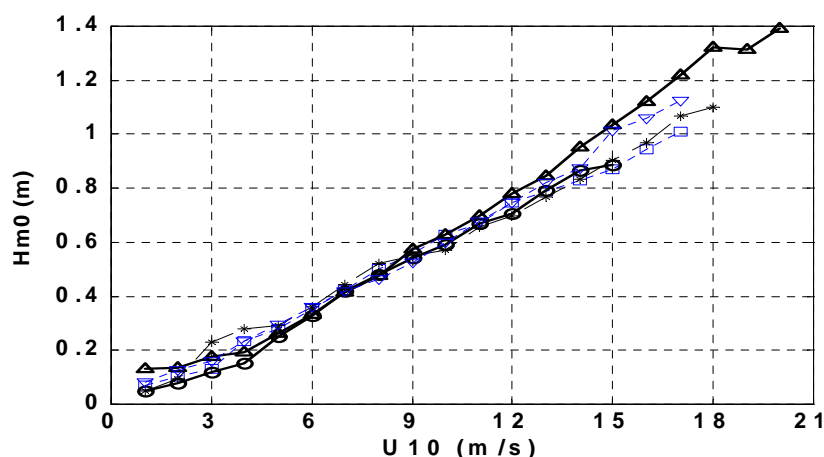
Samengevat:

Ook de golfdata van FL9 ogen betrouwbaar, althans voor het winterhalfjaar. Bij harde-wind-condities is enig wantrouwen gepast omdat het vaak voorkwam dat golven over de top van de capstaaf heensloegen. Daarnaast bleek dat meetfouten door algen 's zomers ook bij FL9 kunnen voorkomen. Het is onduidelijk of de huidige golfhoogtes licht (tot 5%) overschat worden (indicaties par. 6.1.3) of juist iets onderschat (vergelijking met data seizoen 2000-2001). De kans is groot dat de (winter)data van zowel het vorige als het huidige seizoen betrouwbaar zijn, maar het kan niet geheel worden uitgesloten dat de golfhoogtedata uit het seizoen 2000-2001 5-10% te hoog zijn.

6.4.3 Resultaten validatie golfmetingen; FL5

De resultaten voor FL5 zijn weergegeven in Figuur 6.7. Bij hoge windsnelheden wijken de resultaten van de 4^e en 5^e periode duidelijk af van de resultaten van eerdere periodes. De golfhoogtes zijn dan duidelijk hoger, ook vergeleken met de golfhoogtes van het vorige seizoen (toen ca. 1.0 m bij een windsnelheid van 20 m/s). In de 4^e periode (feb/mrt 2002) zullen de waterstanden ongetwijfeld hebben bijgedragen aan de hoge golven. Ter indicatie: de waterstanden bij ZW-wind waren toen gemiddeld iets boven NAP bij zwakke wind en ca. 40 cm boven NAP bij stormachtige wind. Dat is ca. 40 cm hoger dan de gemiddelde waterstanden in de rest van het seizoen 2001-2002. In de 5^e periode (april-juni 2002) was bij harde wind ook sprake van relatief hoge golven. Dit bleek terug te voeren op twee situaties: 29 april en 14 mei. Beide situaties kenmerkten zich door vrij sterk fluctuerende wind en/of waterstanden.

Figuur 6.7 FL5: Golfhoogte H_{m0} (gemiddelde uit puntenwolk) als functie van de windsnelheid bij Stavoren (dec/jan) en FL2 (overige maanden). Windrichtingsbereik: 170° - 260°. Zie tekst pag. 72 voor legenda.



Vergelijking met data van FL9 levert plausibele resultaten: vergelijkbare golfhoogtes voor zwakke en matige wind, en 10-20% lagere golfhoogtes bij FL5 voor hogere windsnelheden. Dat de verschillen niet groter zijn geworden dan 20% hangt samen met de relatief hoge waterstanden op dagen met stormachtige ZW-wind.

Voor het overige is er weinig te melden. Meetfouten door algen of voorkeurswaarden kwamen weinig voor. Echte uitschieters kwamen evenmin voor al waren de golfhoogtes van 21/3 relatief laag en die van 22/3 juist vrij hoog. In paragraaf 6.1.3 werd het instrumentverloop op 8% geschat. Dit verloop komt echter niet uit de huidige resultaten naar voren.

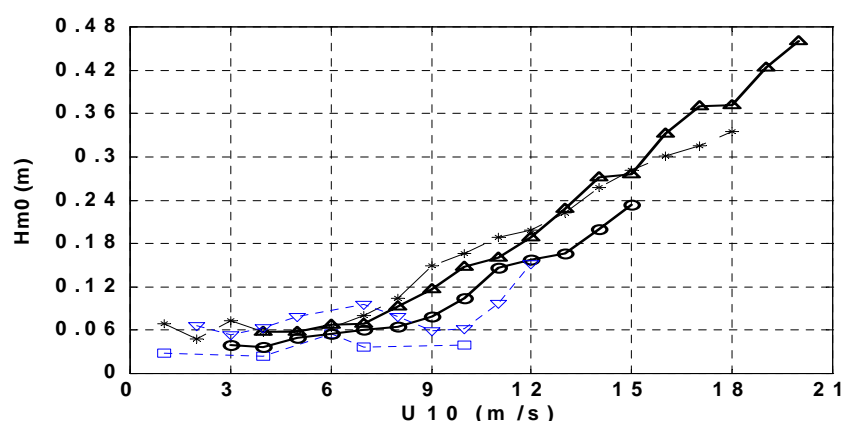
Al met al kan het volgende geconcludeerd worden:

FL5 komt in alle opzichten goed door de validatie. Wel moet bij de analyse rekening worden gehouden met de sterk wisselende meerpeilen en waterstanden gedurende dit seizoen.

6.4.4 Resultaten validatie golfmetingen; FL25

Bij FL25 is net als bij FL2 en FL5 de standaard-periodeindeling van het begin van par. 6.4 aangehouden. De golfvalidatie bij FL25 bleek echter lastig uitvoerbaar te zijn. Validatie bij aanlandige (NO-) wind heeft het voordeel van goed meetbare (voldoende hoge) golven maar het nadeel van een beperkt aantal beschikbare data. Bij validatie bij afluiddige (ZW-) wind zijn er data in overvloed. De interpretatie van de gegevens wordt echter bemoeilijkt door de lage golfhoogtes, door de aanwezigheid van gemengde golfvelden, en door analyseproblemen³⁶. Uiteindelijk is toch voor validatie bij ZW-wind gekozen omdat de interesse vooral naar harde-wind-situaties uitgaat. De resultaten zijn getoond in Figuur 6.8.

Figuur 6.8 FL25: Golfhoogte H_{m0} (gemiddelde uit puntenwolk) als functie van de windsnelheid bij Stavoren (dec/jan) en FL2 (overige maanden). Windrichtingsbereik: 220° - 260°. Zie tekst pag. 72 voor legenda.



Uit de figuur blijkt dat er tussen de periodes nog tamelijk grote verschillen in de golfhoogte H_{m0} optreden. In het zomerhalfjaar ontbreken harde-wind-data en zijn de golfhoogtes rond 10m/s nogal laag. Het eerste lijkt samen te hangen met uitval, het tweede met vervuiling door algen, die zowel in de 1^e periode (tot okt. 2001) als de 5^e periode (vanaf april 2002) veelvuldig optrad. Daarnaast was de 1^e periode vrijwel voortdurend gevoelig voor meetfouten door capstaaf-voorkeurswaarden doordat de waterstand dicht bij een capstaafsteun lag. De zeer lage golfhoogtes van de 1^e meetperiode suggereren dat deze meetfouten inderdaad zijn opgetreden. Ook in het winterseizoen verschilden de meetresultaten uit de drie periodes nog zichtbaar. Opvallend was dat de verschillen van Figuur 6.8 vergelijkbaar waren met de verschillen die bij zowel H_{m0} als T_p van FL26 gevonden werden. Dit suggereert dat de verschillen vooral zijn toe te schrijven aan (systematische) inhomogeniteiten in het windveld. Het feit dat de verschillen in Figuur 6.8 consistent zijn met variaties in de windsnelheidsverhoudingen van Figuur 4.6

³⁶ Bij windsnelheden kleiner dan ca. 5 m/s komt de piekperiode T_p onder 1 sec. en wordt niet meer gedetecteerd via de huidige analyseprocedure.

bevestigt dit vermoeden. Overigens komen de gemiddelde winterresultaten redelijk goed overeen met de gegevens uit het vorige seizoen. Dat betekent dat achteraf gezien de resultaten van FL25 over het winterhalfjaar 2000-2001 nog redelijk bruikbaar zijn.

Een punt van aandacht is het vrij concave verloop van de golfgroeikrommes in Figuur 6.8. In lijn hiermee neemt de windsnelheidsverhouding $U(FL26)/U(FL2)$ af naarmate de wind zwakker wordt, al dan niet ten gevolge van thermische stabiliteitseffecten. De afname van $U(FL26)/U(FL2)$ (zie Figuur 4.6) is echter onvoldoende om het concave verloop in Figuur 6.8 te verklaren. Het is te betreuren dat geen lokale windinformatie voor FL25 beschikbaar is omdat deze informatie wellicht het concave verloop in Figuur 6.8 kan verklaren.

Tot slot zij opgemerkt dat uit de analyse van scatterplots geen uitbijters naar voren zijn gekomen. Wel zijn de golfhoogtes in de ochtend van 21/2 erg hoog, vermoedelijk door een inhomogeen windveld (meer wind bij FL26).

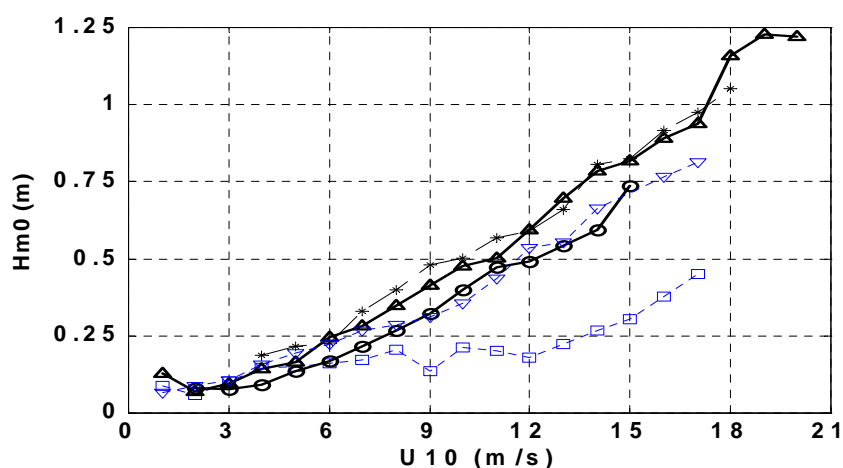
Samengevat:

Het bleek lastig de meetresultaten van FL25 te valideren. De resultaten voor het winterhalfjaar zijn echter acceptabel: tussen de periodes zijn meer verschillen dan bij de andere meetpalen maar de verschillen zijn verklaarbaar. De resultaten sporen ook goed met die van het vorige meetseizoen (2000-2001) zodat die resultaten uiteindelijk betrouwbaarder blijken dan in eerste instantie ingeschat. Een punt van aandacht is het sterk concave verloop van de FL25-golfgroeikromme waarvoor nog geen verklaring is gevonden.

6.4.5 Resultaten validatie golfmetingen; FL26

De resultaten voor FL26 zijn weergegeven in Figuur 6.9. Net als bij FL25 zijn de golfhoogtes in de 3^e en 4^e periode (dec. 2001- mrt. 2002) hoger dan in de 2^e periode (okt./nov. 2001). De verklaring ligt – zoals in de vorige subparagraaf al aangegeven – hoogstwaarschijnlijk in het systematisch optreden van inhomogene windvelden. Door die inhomogene windvelden is het moeilijk uit te maken of de aanvaring van eind december 2001 wel of geen trendbreuk in de metingen heeft veroorzaakt. Vermoedelijk is die trendbreuk er niet want de betrouwbaar (algenvrij) ogende 5^e periode (vanaf april 2001) komt goed overeen met de 2^e periode (okt./nov. 2001). De eerste periode wijkt overigens wel duidelijk af van de andere periodes. Hier zijn – in tegenstelling tot de 5^e periode – wel duidelijke tekenen van algenaangroei gesignaleerd (par. 6.1.2).

Figuur 6.9 FL26: Golfhoogte H_{m0} (gemiddelde uit puntenwolk) als functie van de windsnelheid bij Stavoren (dec/jan) en FL2 (overige maanden). Windrichtingsbereik: 220° - 260°. Zie tekst pag. 72 voor legenda.



Voor het overige zijn er weinig problemen gesignaleerd. Uitbijters zijn niet geconstateerd en door het tijdig aanpassen van een capstaafsteun (23/8/2001) komen evt. effecten van voorkeurswaarden alleen in juli en augustus voor.

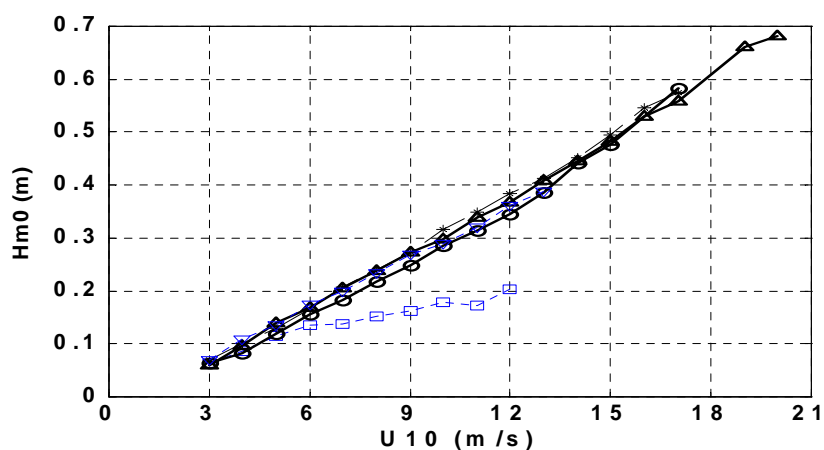
Samengevat:

Een meetonderbreking t.g.v een aanvaring eind december 2001 maakt dat validatie bij FL26 nog belangrijker is dan bij de andere meetpalen. De begin 2002 vaak voorkomende inhomogene windvelden bleken zo'n validatie te bemoeilijken. Toch lijken de (winterhalfjaar-)metingen van FL26 betrouwbaar.

6.4.6 Resultaten validatie golfmetingen; SL29

Vanwege ijsschade in januari is voor SL29 een iets afwijkende periode-indeling gehanteerd: december is van de 3^e naar de 2^e periode verplaatst zodat de 3^e periode alleen januari 2002 omvat. Eind juni is een nieuwe capstaaf geplaatst maar hiermee is bij de periode-indeling geen rekening mee gehouden. Enkele validatieresultaten worden getoond in Figuur 6.10. De overeenkomst tussen de verschillende periodes is aanzienlijk beter dan in het vorige seizoen. Alleen de gemeten golfhoogtes van de 1^e periode (tot okt. 2001) wijken sterk af: in deze periode zijn er aanwijzingen voor forse vervuiling door algen (par. 6.1.3). Bovendien kunnen fouten door voorkeurswaarden hebben bijgedragen aan de onderschatting van de golfhoogte in de 1^e periode. In de overige periodes komen geen fouten door voorkeurswaarden meer voor. Kans op meetfouten door algen is er alleen nog in de 5^e periode, wanneer er soms sprake is van overigens niet eenduidige aanwijzingen voor algenaangroei. Een punt van aandacht is nog de ijsschade die in januari is opgetreden. De metingen van de 3^e periode zijn verkregen met een verbogen capstaaf; de metingen van de 4^e en 5^e periode zijn verkregen met een provisorisch rechtgebogen capstaaf. De meetfouten van de verbogen resp. rechtgebogen capstaaf lijken echter beperkt te blijven tot maximaal 10%: het verschil in golfhoogte tussen de 2^e periode en de 3^e resp. 4^e periode. Daarmee zijn de meetfouten door ijsschade nauwelijks groter dan de natuurlijke golfhoogtevariëaties. Derhalve zijn de meetfouten plausibel, maar niet hard aantoonbaar.

Figuur 6.10 SL29: Golfhoogte H_{m0} (gemiddelde uit puntenwolk) als functie van de windsnelheid bij SL29. Windrichtingsbereik: 220° - 270°. Zie tekst pag. 72 en 77 voor legenda.



Een belangrijk punt is de vergelijking van de huidige data met die van het vorige seizoen, 2000-2001. Er waren immers grote twijfels over met name de kwaliteit van de golfhoogtedata van het vorige seizoen (Bottema, 2002). Het blijkt dat de winterdata van het vorige seizoen goed overeenkomen met de huidige data van de 2^e periode van dit seizoen (okt./nov. 2001). Daarmee blijken de golfhoogtes en golfperiodes uit het winterhalfjaar van 2000-2001 alsnog betrouwbaar te zijn. Er zijn echter twee uitzonderingen op het bovenstaande:

- voor niet al te harde wind (tot 12 m/s) blijkt de golfperiode T_{m-10} van het seizoen 2000-2001 verdacht hoog te zijn, hoger dan de T_p van 2000-2001, 20% hoger dan de T_{m-10} van dit seizoen (die wel in orde is), en bijna even hoog als de T_{m-10} van FL26 (waar de strijklengte aanzienlijk langer is). De oorzaak van de onbetrouwbare T_{m-10} van het vorige seizoen is nog niet gevonden maar moet vermoedelijk óf in laagfrequente elektronische storingen óf in het effect van voorkeurswaarden (zie Bottema, 2002; p. 58) worden gezocht.
- bij stormachtige wind zijn de golfhoogtes dit seizoen ca. 10% hoger dan in het seizoen 2000-2001. Dit moet niet aan meetfouten worden toegeschreven maar aan de relatief hoge waterstanden tijdens de dit seizoen opgetreden stormen. Dit seizoen was de gemiddelde waterstand bij SL29 ca. 50 cm onder NAP bij zwakke wind en ca. 30 cm onder NAP tijdens stormachtige wind.

Ook bij SL29 zijn scatterplots geanalyseerd maar uitbijters bleken zeldzaam. De golfhoogtes van 3/1 bleken opvallend laag door aanvriezing en op 29/4 en 14/5 kwamen af en toe relatief hoge golven voor. Dat laatste hing vermoedelijk samen met de sterke waterstandsschommelingen die op die dagen optraden.

Al met al kunnen de resultaten voor SL29 als volgt worden samengevat: *De SL29-metingen voor het winterhalfjaar 2001-2002 ogen betrouwbaar, ondanks ijsschade aan de capstaaf. De ijsschade leidt tot een mogelijke overschatting van de golfhoogte van maximaal 10%. Ook een deel van de metingen uit het vorige seizoen (okt.-dec. 2000) blijkt achteraf betrouwbare golfhoogtes op te leveren. De golfperiodemaat T_{m-10} uit die periode leek echter tot 20% te hoog te zijn. Tot slot bleek dat het tijdens stormcondities belangrijk is uit te gaan van de werkelijke (i.p.v. aangenomen) waterstand.*

6.5 Validatie golfgegevens; samenvatting en conclusies

In dit hoofdstuk zijn achtereenvolgens behandeld:

- meetproblemen bij golfmetingen
- meetproblemen bij golfplopmetingen
- validatiemethodiek
- validatieresultaten – per meetpaal

In paragraaf 6.1 is een aantal meetproblemen bij golfmetingen belicht. Allereerst is ingegaan op voorkeurswaarden in de capstaafmetingen (par. 6.1.1). Deze hangen samen met kleine verstoringen in de calibratiefunctie, ter hoogte van de 'capstaafsteunen' (de verbindingsstukken op foto 11-13 in Bijlage B). Significante meetfouten (>10%) treden vooral op bij kleine golfhoogtes ($H_{m0} < 15$ cm) en als de steun vlak bij de waterspiegel ligt. Verwijderen van (delen van) capstaafsteunen bleek overigens een probaat middel tegen voorkeurswaarden.

Algenaangroei kan leiden tot tientallen procenten onderschatting van de golfhoogte. In paragraaf 6.1.2 wordt een voorlopig algendetectiecriterium gegeven, alsmede een overzicht van "kritische" periodes. De meeste problemen traden op bij FL25, SL29 en FL26; in het winterhalfjaar (oktober-april) traden nagenoeg geen problemen op.

Verder bleek er op de meeste locaties sprake te zijn van verloop in de capstaafmetingen (par. 6.1.3); per jaar was er telkens ca. 5% toename in de gemeten waterstanden. Daarom is met periodieke veldcalibraties ("capstaaftesten") getest in hoeverre de laboratoriumcalibratie nog voldoet.

Het bleek echter dat de capstaaftesten te onnauwkeurig zijn om kleine meetfouten (tot ca. 7%) te detecteren.

In paragraaf 6.1.4 is geschat wat het effect is van te korte meetinstrumenten. Dit seizoen is het namelijk op elke IJsselmeerlocatie wel voorgekomen dat golven (bijna) over de top van het meetinstrument heensloegen, bij FL9 zelfs op 35 dagen. De fouten in H_{m0} en de golfperiodes bleken erg mee te vallen, de fouten in extreme golfhoogtes (H_{max} , $H_{1/50}$, etc.) bleken wel significant. In paragraaf 6.1.5 wordt het gekozen frequentiebereik (zie Tabel 2.4) nog eens onder de loep genomen. Het belangrijkste resultaat is dat de golfperiodes T_{m01} en T_{m02} met de huidige instellingen alleen nauwkeurig bepaald kunnen worden bij goed ontwikkelde golven (H_{m0} minimaal in de orde van 0.3 m). Tot slot komen in paragraaf 6.1.6 enkele 'losse' meetproblemen kort aan bod.

In paragraaf 6.2 worden enkele meetproblemen bij de golfploopmetingen kort besproken; in paragraaf 6.3 komen de validatiemethodieken aan bod. De resultaten van de validatie worden besproken in paragraaf 6.4. De belangrijkste resultaten zijn, per meetpaal:

- 1) In het winterhalfjaar lijken de golfmetingen van FL2 in overeenstemming met data van de vorige winter (2000-2001). In het zomerhalfjaar is de gemeten golfhoogte af en toe "te laag", vermoedelijk door niet afdoende gedetecteerde algen.
- 2) Voor FL9 gelden soortgelijke conclusies. Bij harde-wind-condities is enig wantrouwen echter gepast omdat de golven zeer vaak over de top van de capstaaf heensloegen.
- 3) FL5 komt goed door de validatie. Wel moet bij de analyse rekening worden gehouden met de sterk wisselende waterstanden (en meerpeilen) gedurende het seizoen. De algenaangroei lijkt ook 's zomers beperkt te blijven, dat is althans wat de data suggereren.
- 4) FL25 kwam goed door de validatie, al bleek deze lastig uitvoerbaar (zie par. 6.4.4). In het zomerseizoen lijkt FL25 erg gevoelig voor algenaangroei te zijn. Een ander aandachtspunt is het merkwaardig concave verloop van de golfgroei-kromme (fig. 6.8).
- 5) Bij FL26 is geen trendbreuk opgetreden door de aanvaring van december 2001; de data van het winterhalfjaar zijn betrouwbaar. Voor de zomerdata geldt dat niet; met name in de zomer van 2001 was er sprake van onderschatte golfhoogtes door algenaangroei.
- 6) De SL29-metingen voor het winterhalfjaar 2001-2002 zijn min of meer betrouwbaar, ondanks ijsschade aan de capstaaf. De ijsschade leidt tot een mogelijke overschatting van de golfhoogte van maximaal 10%. Ook een deel van de metingen uit het vorige seizoen (okt.-dec. 2000) blijkt achteraf betrouwbare golfhoogtes op te leveren. Sommige golfperiodematen (T_{m-10}) van die periode leken echter tot 20% te hoog te zijn. Tot slot bleek dat het tijdens stormcondities belangrijk is uit te gaan van de werkelijke (i.p.v. aangenomen) waterstand.

Daarnaast zijn er nog enkele algemene conclusies en aanbevelingen:

- 1) Uit vergelijking met meetgegevens blijkt dat de golfhoogtedata uit beide winterperiodes goed overeenkomen. In beide seizoenen zijn de golfhoogtedata uit het zomerhalfjaar soms veel lager dan de winterdata (zie grafieken par. 6.4). Bovendien komen de zomerdata uit opeenvolgende seizoenen *niet* goed overeen. Dit alles suggereert dat het huidige algendetectiecriterium nog niet goed genoeg is. Daarom moeten meetfouten door algenaangroei aandacht blijven krijgen, bijvoorbeeld door te werken aan een beter detectiecriterium.
- 2) Er moet opnieuw beoordeeld worden of de huidige capstaven de juiste lengte hebben en op de juiste hoogte zijn opgehangen. Dit vanwege het grote aantal dagen/locaties waarop golven over de top van de

capstaaf heensloegen. Daarnaast blijken er diverse andere haken en ogen blijken te zitten aan capstaafmetingen (par. 6.1). Dat betekent niet dat capstaven bij voorbaat als inferieur instrument worden gezien, wel dat het wenselijk is de op dit moment beschikbare meettechnieken grondig te evalueren en daaruit het beste alternatief te kiezen.

- 3) In dit hoofdstuk zijn diverse controles beschreven om meetfouten aan te tonen; zie voor resultaten met name par. 6.1.3 en par. 6.4. Uit de controleresultaten blijkt dat meetfouten kleiner dan 10% nauwelijks zijn aan te tonen. Controles achteraf zijn daarom onvoldoende om de uiteindelijke meetfouten tot minder dan 10% te beperken. Daarom moet er niet alleen aandacht zijn voor controles achteraf, maar ook voor een waterdichte kwaliteitsborging (incl. documentatie) vooraf.
- 4) Hierboven is het belang van goede documentatie al aangegeven. Binnen de context van dit hoofdstuk moet dan vooral gedacht worden aan het goed documenteren van modificaties aan instrumenten, elektronica en logegrsoftware, en aan het goed documenteren van de resultaten van veldcalibraties (capstaaftesten), in combinatie met de resultaten van de voor betreffende capstaaf uitgevoerde laboratoriumcalibraties (incl. nacalibraties).

7 Golfklimatologie en toepassingen

In dit hoofdstuk wordt kort ingegaan op de “klimatologie” van de golven zoals die gedurende het winterhalfjaar oktober 2001 - april 2002 gemeten is³⁷.

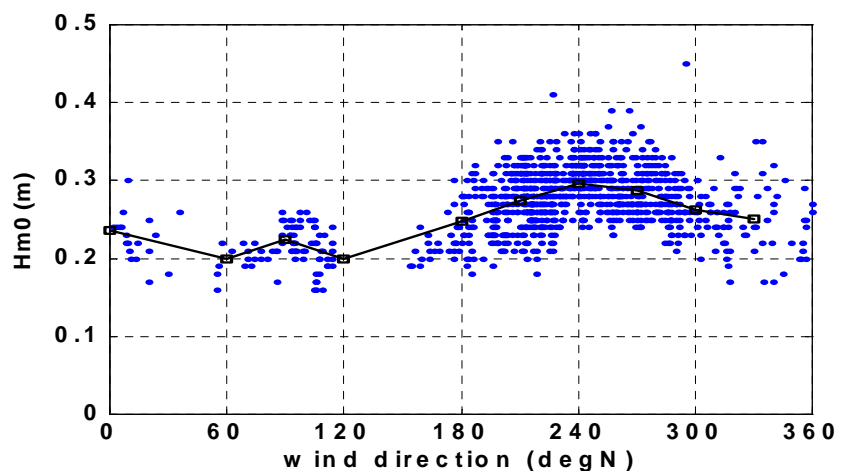
Daarnaast wordt kort ingegaan op enkele toepassingen.

In paragraaf 7.1 komt de klimatologie van de golfhoogte H_{m0} aan bod, in paragraaf 7.2 de klimatologie van de piekperiode T_p . Gezien de bevindingen van paragraaf 6.1.5 is besloten dit seizoen nog geen klimatologie van andere golfperiodematen te presenteren, tenzij die verbonden is met specifieke toepassingen. Eén van die toepassingen is het gebruik van golfsteilheidsdata, die worden gepresenteerd in paragraaf 7.3. In paragraaf 7.4 wordt kort ingegaan op de golfgroeilimiet op ondiep water (de reden waarom op het Slotermeer golven worden gemeten), in paragraaf 7.5 op de validatie van het golfmodel SWAN. In paragraaf 7.6 wordt vervolgens ingegaan op de ruwheid van het wateroppervlak en de drag coëfficiënt C_D , die zowel in waterbewegingsmodellen (WAQUA) als golfmodellen (SWAN) gebruikt wordt. In paragraaf 7.7 wordt daarna ingegaan op ruimtelijke variatie van wind. Tot slot volgen in paragraaf 7.8 een samenvatting en enkele conclusies.

7.1 Golfhoogteklimatologie

De basis van de hieronder te presenteren golfklimatologie bestaat uit puntenwolkgrafieken van het onderstaande type:

Figuur 7.1 SL29: Golfhoogte H_{m0} (20-minuten-waarden) als functie van de windrichting, bij een windsnelheid tussen 9 en 11 m/s. Gemiddelde waarden: vierkantjes verbonden door zwarte lijn.



De bijna 1200 losse punten komen overeen met evenzoveel 20-minuten-datablokken van de meetpaal SL29; de met rechte lijnen verbonden vierkantjes geven het gemiddelde per 30° windrichtingsinterval. Het aantal uitbijters buiten de puntenwolk (visueel beoordeeld) is in deze grafiek erg klein; bij de andere meetpalen ligt het aantal uitbijters in de orde van 10 à 20. Meestal hangen de uitbijters samen met een sterk variabel windveld, hetzij in de tijd, hetzij ruimtelijk.

³⁷ Data uit het zomerhalfjaar (mei-sept.) zijn niet opgenomen in de golfklimatologie omdat deze data meetfouten door niet afdoende gedetecteerde algen kunnen bevatten.

Voor de klimatologie worden alle meetpunten (uit Figuur 7.1 en soortgelijke grafieken) verdeeld over windrichtings- en windsnelheidsklassen, en vervolgens gemiddeld. In onderstaande tabellen wordt voor de windrichting een klassenbreedte van 30° gehanteerd. Resultaten worden gepresenteerd voor twee windsnelheden: 10 m/s en 16 m/s (eigenlijk 9-11 en 15-17 m/s). Onder de 10 m/s is vooral bij aflandige wind de golfperiode vaak slecht gedefinieerd. Boven de 16 m/s zijn slechts voor een zeer smal windrichtingsbereik data beschikbaar en wordt het moeilijk nog van een klimatologie te spreken³⁸.

Voor de klassengemiddeldes zijn altijd minimaal zes 20-minuten-datablokken gebruikt. De best gevulde klassen bevatten 50 tot 500 datablokken (bij 16 resp. 10 m/s). Binnen een klasse ligt de relatieve spreiding in H_{m0} (één standaarddeviatie gedeeld door gemiddelde) in de orde van 17% bij vrij krachtige wind (10 m/s) en 11% bij harde wind (16 m/s). Overigens bleek zelfs een drastische verkleining van het windsnelheidsinterval (bijv. van 9-11 m/s naar 9.8-10.2 m/s) de spreiding maar marginaal te verkleinen. Uit eerder onderzoek (Bottema et al., 2002) bleek ook dat een langere middelingstijd (60 i.p.v. 20 minuten) nauwelijks invloed had op de spreiding in de data³⁹. Dit alles wijst er op dat er behalve windrichting en windsnelheid nog andere (fysische) factoren moeten zijn met een significante invloed op de golfhoogte: waterstand (in dit rapport waar mogelijk meegenomen/besproken), vlagerigheid van de wind, thermische stabiliteitseffecten (zie par. 4.6 en 8.6) en luchtdichtheid.

Vanwege het grote aantal data is de onzekerheid in de klimatologische gemiddeldes overigens aanzienlijk kleiner dan de hierboven aangegeven 11-17%. Globaal gesproken kan verwacht worden dat de foutreductie ligt in de orde van een factor 3 in een dunbezaaide delen van de puntenwolk tot maximaal een factor 10 in zeer dikbezaaide delen. Tabel 7.1 geeft een overzicht van de gemiddelde golfhoogtes als functie van de windrichting, bij een windsnelheid van 10 m/s.

Tabel 7.1 Gemiddelde van golfhoogte H_{m0} als functie van de windrichting bij een windsnelheid (FL2 voor IJsselmeerlocaties, SL29 voor Slotermeer) van 9-11 m/s.

	FL2	FL5	FL9	FL25	FL26	SL29
betrouwbaarheid	+	+	+	+	+	(+)
windrichting (°)						
0	0,48	0,13	0,41	0,41	0,73>	0,24>
30	0,46					
60	0,33<	0,08<		0,51	0,68	0,20
90	0,35			0,58<	0,78	0,20
120						0,20
150	0,41	0,57>	0,65	0,36	0,62	
180	0,47<	0,60>	0,66	0,25	0,53	0,25
210	0,55	0,65	0,69	0,15	0,46	0,27
240	0,57	0,58	0,66	0,15	0,45	0,30
270	0,55	0,46	0,58	0,17>	0,52>	0,29

³⁸ Een groot deel van de ‘echte’ stormsituaties met wind boven 17 m/s (windkracht 8 of meer) wordt in Hoofdstuk 8 besproken; zie ook de grafieken in bijlage C-G.

³⁹ Het feit dat de spreiding in 60-minuten-data nog steeds onverminderd groot is heeft als gevolg dat bij een case study op basis van één of enkele uren data (bijv. voor validatie van het golfmodel SWAN) toevallige variaties nog relatief grote fouten kunnen veroorzaken. Bottema et al. (2002) bevelen daarom aan bij modelvalidatie niet uitsluitend van case studies uit te gaan.

300	0,55	0,37	0,55	0,22	0,64>	0,26
330	0,56	0,25	0,51	0,33	0,81>	0,25>

De < en > symbolen in de tabel geven aan welke waarden duidelijk afwijken van die van het vorige seizoen (tenminste 10% én 5 cm verschil). Twee mogelijke oorzaken voor de afwijkingen zijn het beperkte aantal data waarop de gemiddeldes gebaseerd zijn (bij oostenwind) en het feit dat de golfhoogtes in Tabel 7.1 dit seizoen minder gevoelig zijn voor de effecten van voorkeurswaarden (bij golfhoogtes kleiner dan ca. 20 cm leiden voorkeurswaarden tot onderschatting van H_{m0}). Daarnaast waren bij FL26 de golfhoogtes bij westen- tot noordenwind bijna 20% hoger dan in het vorige seizoen. Dit komt deels door de schrijfwijze van de data van januari 2002 zijn helemaal niet meegenomen.

De +, en (+) -symbolen op de eerste regel van Tabel 7.1 geven een subjectief oordeel van de betrouwbaarheid van de gegevens op basis van de resultaten uit het vorige hoofdstuk. SL29 is aangeduid als niet volledig betrouwbaar omdat de data van februari-april 2002 zijn gemeten met een provisorisch gerepareerde capstaaf. De data van januari 2002 zijn helemaal niet meegenomen.

Tabel 7.2 geeft de gemiddelde golfhoogtes bij een windsnelheid van 16 m/s en bij relatief hoge waterstanden⁴⁰. De gehanteerde minimale waterstanden voor de aanduiding 'hoog' zijn daarbij NAP + 20 cm op het IJsselmeer en NAP – 40 cm op het Slotermeer. Bij 16 m/s wind komt dat ruwweg overeen met de mediane waterstanden bij FL2/FL5/FL9 resp. SL29.

Tabel 7.2 Gemiddelde van golfhoogte H_{m0} als functie van de windrichting bij een windsnelheid (FL2 voor IJsselmeerlocaties, SL29 voor Slotermeer) van 15-17 m/s en bij relatief hoge waterstanden.

	FL2	FL5	FL9	FL25	FL26	SL29
betrouwbaarheid	+	+	(+)	+	+	(+)
windrichting (°)						
210	0,95	1,17>				
240	1,04	1,16	1,24>	(0,27)		0,54
270	0,96	0,93	1,09	0,31	0,90	0,51

Merk op dat FL9 nu ook het label "minder betrouwbaar" heeft. Dit omdat er bij harde aanlandige wind en hoge waterstanden dikwijls golven over de top van het meetinstrument heensloegen (zie par. 6.1.4 en 6.4.3).

De resultaten voor lage waterstanden zijn in Tabel 7.3 gegeven.

Tabel 7.3 Gemiddelde van golfhoogte H_{m0} als functie van de windrichting bij een windsnelheid (FL2 voor IJsselmeerlocaties, SL29 voor Slotermeer) van 15-17 m/s en bij relatief lage waterstanden.

	FL2	FL5	FL9	FL25	FL26	SL29
betrouwbaarheid	+	+	+	+	+	(+)
windrichting (°)						
180	0,84	1,00	1,11	0,38	1,03	
210	0,88<	1,00	1,24>	0,30	0,90>	0,52
240	0,97<	0,98	1,15	0,32	0,87>	0,53
270	0,90	0,86	1,09	0,32>	0,95	0,49
300	0,91	0,61	0,91	0,35>	0,88	0,46

⁴⁰ De gemiddelde waterstand binnen de categorie hoog was ca. NAP + 30 cm voor het IJsselmeer en NAP – 35 cm voor het Slotermeer. Binnen de categorie laag lagen de waterstanden op 0 cm resp. 45 cm onder NAP.

De betrouwbaarheid van Tabel 7.2 en 7.3 is wat minder dan die van Tabel 7.1 door de relatief geringe hoeveelheid data (in totaal ca. 200 datablokken). Dat bemoeilijkt de vergelijking met de harde-wind-data van het vorige seizoen, waarvan overigens nog minder data beschikbaar waren. Wel blijkt dat bij hoge waterstanden de golfhoogtes bij FL5 en FL9 ca. 20% resp. 10% hoger waren dan de (over alle waterstanden gemiddelde) waarden van het vorige seizoen. Een verklaring ligt voor de hand en volgt ook direct uit vergelijking van Tabel 7.2 en 7.3: hoge waterstanden lieten in ieder geval bij FL2, FL5 en FL9 hogere golven toe. Dat was zeker zo bij FL5 waar zowel de golfhoogtes van Tabel 7.2 en 7.3 als de bijbehorende waterdieptes ca. 15% verschilden. In Tabel 7.2 en 7.3 valt verder op dat – gegeven de windsnelheid bij FL2 – de golven dit seizoen relatief laag waren bij FL2 en relatief hoog bij FL25 en FL26. Voor de relatief hoge golven bij FL25 en FL26 is al een verklaring geopperd. Voor de lage golven bij FL2 is nog geen verklaring beschikbaar, al zal uit de resultaten van par. 7.3 blijken dat het bij FL2 inderdaad om te lage golven gaat (en niet om een overschatte windsnelheid aldaar).

Bovenstaande tabellen bieden ook de mogelijkheid de golfhoogtes op verschillende locaties te vergelijken, en per windrichting een golfhoogte-rangorde van locaties vast te stellen. In grote lijnen blijken deze rangordes van golfhoogtes overeen te komen met de rangordes van effectieve strijklengtes uit Figuur 6.4. Deze 'regel' kent een paar uitzonderingen:

- bij wind uit noordelijke richtingen vallen de golven op FL25 ook dit seizoen relatief laag uit ten opzichte van FL2 en vooral FL9.
- bij zuidelijke tot westelijke winden zijn de golven bij FL5 relatief laag ten opzichte van FL9, waarschijnlijk door golfbreking.
- bij west- tot noordwestenwind zijn de golven bij FL2 relatief laag vergeleken met FL9 ⁴¹, terwijl ze bij FL26 juist relatief hoog zijn; bij harde wind lijkt dit ook te gelden voor zuidwestenwinden.

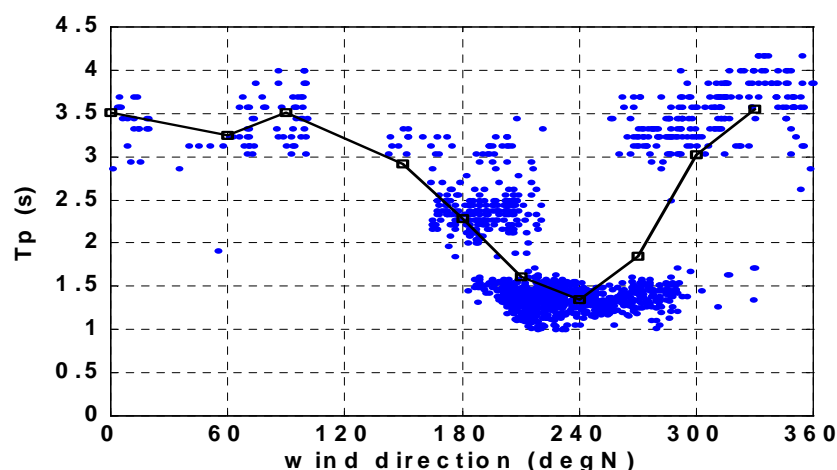
Al met al geven bovenstaande tabelgegevens geen aanleiding voor verdere twijfels over de betrouwbaarheid van de metingen; de resultaten uit het vorige hoofdstuk geven dus meestal een goed beeld van de betrouwbaarheid. Overigens hoeven de hierboven genoemde 'uitzonderingen' niet alleen op meetfouten te wijzen. De uitzonderingen kunnen ook een aanwijzing zijn voor interessante meet- en modelleersituaties waar het concept van effectieve strijklengte niet goed werkt.

7.2 Golfperiodeklimatologie

Op een zelfde manier als hierboven is ook een klimatologie voor de piekperiode T_p bepaald. Het is echter de moeite nog heel even bij de puntenwolkgrafieken stil te staan, bijvoorbeeld die van FL25 (Figuur 7.2).

.....
 Figuur 7.2 FL25: Piekperiode T_p (20-minuten-waarden) als functie van de windrichting, bij een windsnelheid tussen 9 en 11 m/s. Gemiddelde waarden: vierkantjes verbonden door zwarte lijn.

⁴¹ In vorige jaren was dit vooral het geval bij 210°/ZZW-wind; zie Bottema (2002)



Voor windrichtingen tussen 195° en 290° (ZZW-WNW) komen lage piekperiodes van 1.0 à 1.6 seconde veelvuldig voor; de strijklengte (Figuur 6.4) is dan minder dan een kilometer. Aan de randen van de beschutte sector, tussen 195° en 220° en tussen 260° en 290°, komen veel hogere piekperiodes ook regelmatig voor. Bijgevolg is er aan de randen van beschutte sectoren een grote onzekerheid in de gemiddelde piekperiodes. Daarnaast is de kans op gemengde golfvelden en op bimodale spectra in dergelijke randgebieden relatief groot. Uiteraard is het de moeite na te gaan of numerieke (golf-) modellen dergelijke complexe gevallen goed kunnen reproduceren. Vanwege het hierboven beschreven gedrag van de piekperiode kan de relatieve spreiding (in losse 2-minuten-waarden) aan de rand van beschutte sectoren erg groot zijn: bij FL2, FL5 en FL25 kan deze oplopen tot 20-40%. Buiten de beschutte sectoren is de relatieve spreiding 5-12%. Net als bij H_{m0} (par. 7.1) is de onzekerheid in de gemiddelde T_p -waarden aanzienlijk lager dan de spreiding van de in Figuur 7.2 geplote losse 20-minuten-data. Die gemiddelde waarden zijn weergegeven in Tabel 7.4 en Tabel 7.5, waarbij Tabel 7.4 de resultaten bij een windsnelheid van 10 m/s geeft.

Tabel 7.4 Gemiddelde piekperiode T_p als functie van de windrichting bij een windsnelheid (FL2 voor IJsselmeerlocaties, SL29 voor Slotermeer) van 9-11 m/s.

	FL2	FL5	FL9	FL25	FL26	SL29
betrouwbaarheid	+	+	+	+	+	+
windrichting						
0	2,75	(1,38)	2,31	3,51	(3,45)	1,71
30	2,76					
60	2,62	1,71>		3,25	3,30	1,65
90	(2,09)>			3,52	3,40	1,66
120						1,60
150	2,92	3,31	3,29	2,91	3,08	
180	3,16	3,35	3,29	2,28<	2,77	1,9
210	3,21	3,34	3,27	1,61	2,44	2,02
240	3,29	3,27	3,28	1,35	2,42	2,13
270	3,34	2,97	3,13	(1,85)	3,19	2,09
300	3,29	2,70	2,87	(3,02)<	3,55	1,96
330	3,11	(2,30)	2,69	3,54	3,87	1,82

Net als in eerdere tabellen geven de (), <, en > aanduidingen aan of er sprake is van onzekere gegevens of van meer dan 10% afname resp. toename ten opzichte van het vorige seizoen. De resultaten voor 16 m/s zijn in Tabel 7.5 gegeven. Merk op dat bij de golfperiodes een uitsplitsing naar waterstand zoals

Tabel 7.5 Gemiddelde piekperiode T_p als functie van de windrichting bij een windsnelheid (FL2 voor IJsselmeerlocaties, SL29 voor Slotermeer) van 15-17 m/s.

in de vorige paragraaf niet of nauwelijks nodig was. Dat geldt met name voor de piekperiode T_p .

	FL2	FL5	FL9	FL25	FL26	SL29
betrouwbaarheid	+	+	+	+	+	+
windrichting						
180	4,15	4,27	4,22	(2,31)		
210	4,04	4,25	4,25	1,71	3,08	2,64
240	4,35	4,42	4,33	1,76	3,12	2,82
270	4,46	3,99	4,34	1,80>	3,70	2,73
300	4,25	3,19	3,43	ca. 3,5>	(4,06)	2,54

Bij analyse van Tabel 7.4 en 7.5 valt op dat grote verschillen (> 10%) ten opzichte van het vorige seizoen eigenlijk alleen optreden aan de rand van beschutte windrichtingssectoren, waar de onzekerheid in de data toch al groot is. Het is de moeite ook de golfhoogtedata (en met name Tabel 7.1 en 7.2) in de analyse te betrekken. Dan valt namelijk op dat de gevallen met een (ten opzichte van het vorige seizoen) sterk veranderde golfhoogte vaak maar een licht (bijv. ca. 3%) veranderde golfperiode hebben. Dit is minder vreemd dan het lijkt want de golfhoogte blijkt relatief veel sterker op windsnelheidsveranderingen te reageren dan de golfperiode. Uit vergelijking van Tabel 7.1/7.2 resp. Tabel 7.4/7.5 blijkt bijvoorbeeld dat 60% toename in de windsnelheid (van 10 naar 16 m/s) een golfhoogtetoeename in de orde van 80% met zich meebrengt, en slechts 30% toename in de piekperiode T_p . Dit hangt onder andere samen met het feit dat zeer kleine golven (van bijv. 10 cm) vaak toch nog een relatief grote periode hebben; bij SL29 hebben 6 cm golven bijvoorbeeld al een periode van ca. 1.2 seconde.

Al met al komen uit de analyse van de golfperiodedata geen zaken naar voren waardoor aan de kwaliteit van de metingen getwijfeld moet worden. Daarbij moet wel worden opgemerkt dat vergeleken met de golfhoogte, de golfperiode vaak minder gevoelig voor meetfouten blijkt te zijn. Dat kwam ook naar voren uit analyse van de data van FL9 en SL29. Daarom hebben de golfperiode-gegevens van die meetpalen in Tabel 7.4 en 7.5 de aanduiding "betrouwbaar" gekregen.

7.3 Golfsteilheid

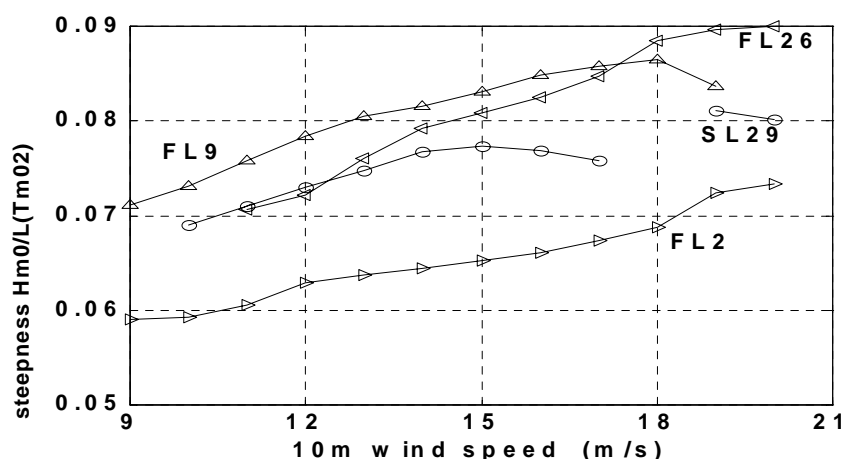
Bij het extrapoleren van de huidige meetgegevens naar extreme condities bestaat het risico dat de golfhoogte en golfperiode "uit de pas gaan lopen". Anders gezegd, het risico bestaat dat de relatie tussen golfhoogte en golfperiode onjuist geëxtrapoleerd wordt. Een soortgelijk risico is denkbaar als numerieke modellen zijn ontworpen en getoetst voor gewone windcondities, en worden toegepast in extreme (zware-storm-)condities. Door informatie over bijvoorbeeld de golfsteilheid H_{m0}/L expliciet mee te nemen kunnen dergelijke extrapolatiefouten beperkt worden. Daarbij is L een karakteristieke golflengte. Helaas kunnen golflengtes met de huidige meetopstelling niet direct gemeten worden. De golflengte L zal daarom uit een golfperiodemaat T moeten worden bepaald, en wel met behulp van de lineaire dispersierelatie:

$$(7.1) \quad L = (g T^2 / (2\pi)) * \tanh(2\pi d / L)$$

waarbij d de waterdiepte is. De vraag is nu welke golfperiodemaat gebruikt moet worden voor de bepaling van de golflengte L : T_p , T_{m-10} , T_{m01} of T_{m02} ? Uiteindelijk is ervoor gekozen de golflengte L te baseren op de periodemaat T_{m02} , een spectrale golfperiode die vrijwel gelijk is aan de gemiddelde nuldoorgangperiode van de golven. Dit omdat uit analyse van de uitvoer van het golfmodel SWAN bleek dat de default SWAN-golflengte L_{SWAN} het beste overeenkomt met een golflengte L_{Tm02} die is gebaseerd op de golfperiode T_{m02} . Helaas kwamen L_{SWAN} en L_{Tm02} niet exact overeen maar bleken er verschillen van maximaal 2% tussen L_{SWAN} en L_{Tm02} te bestaan. De reden voor het verschil is nog onduidelijk, maar het verschil is klein genoeg om L_{SWAN} en L_{Tm02} te kunnen vergelijken zonder grote fouten te maken. Helaas heeft het gebruik van L_{Tm02} ook een nadeel. L_{Tm02} hangt namelijk kwadratisch van de golfperiode T_{m02} af, en T_{m02} is weer zeer gevoelig voor de keus van het spectrale integratiebereik (par. 6.1.5). Al met al komt het er op neer dat de golfhoogte bij FL2, FL5, FL9 en FL26 minimaal 0.5 m moet zijn om de fout in T_{m02} kleiner dan ca. 7% te houden. Bij FL25 en SL29 wordt tot hogere frequenties (1.5 Hz) doorgeïntegreerd zodat daar golfhoogtes vanaf 0.3 m al voldoende zijn om de fout in T_{m02} binnen 7% te houden. In beide gevallen is de maximale systematische fout in de golfsteilheid H_{m0}/L_{Tm02} dan ca. 15% waarbij de golfsteilheid vooral bij jonge (lage en korte) golven onderschat zal worden.

Figuur 7.3 toont enkele voorlopige golfsteilheidsdata als functie van de windsnelheid, voor WZW-wind (220° - 260°). De term voorlopig wordt gebezigd omdat vooral aan de linkerzijde van de grafiek de steilheden tot 15% te laag kunnen zijn vanwege de hierboven besproken problemen met het spectrale integratiebereik.

Figuur 7.3 Golfsteilheid H_{m0}/L_{Tm02} voor FL2 (>), FL9 (^), FL26 (<) en SL29 (O) als functie van de windsnelheid bij FL2 resp. SL29, voor WZW-windrichtingen (220° - 260°)

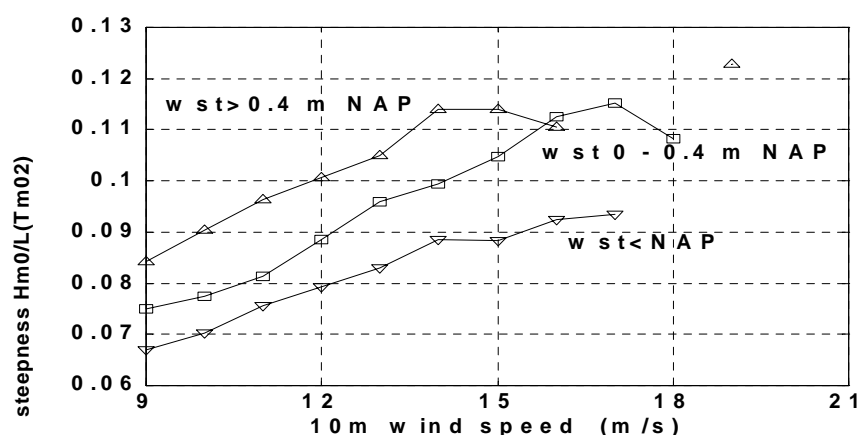


Op alle locaties blijkt de golfsteilheid toe te nemen met de windsnelheid, al kan een deel van de toename (maximaal 15%) samenhangen met de hierboven genoemde problemen met het spectrale integratiebereik. Bij zeer hoge windsnelheden zal de steilheid overigens moeten afvlakken omdat te steile golven breken. Verder valt op dat niet alleen de golfhoogtes (zie par. 7.1) maar ook de golfsteilheden op FL2 (>) nogal laag kunnen uitvallen ten opzichte van FL26 (<) en FL9 (^). De golfsteilheden op SL29 (O) liggen tussen deze extremen in. Overigens blijken alle steilheden – na verrekening van definitieverschillen – redelijk in dezelfde orde van grootte te liggen als de in het kader van het golfgroeilimietproject vastgestelde steilheden (Waal, 2002). Ook bleken de huidige steilheden goed te sporen met de alsnog vastgestelde steilheden van het seizoen 2000-2001. Een verklaring voor de per locatie verschillende golfsteilheden is bij deze eerste presentatie van golfsteilheidsdata nog niet voorhanden; hiervoor is nader onderzoek nodig.

Wat de spreiding in de 20-minuten-golfsteilheidsdata betreft:: deze ligt in de orde van 5% en valt daarmee erg mee ten opzichte van de spreiding in H_{m0} en T_p (par. 7.1 en 7.2). De toevallige fout (1σ) van de in Figuur 7.3 getoonde gemiddelde spreiding is nog kleiner: in de orde van 1 à 2% (relatieve fout).

Figuur 7.4 (volgende pagina) toont de golfsteilheid van FL5 als functie van de windsnelheid. Bij FL5 vertoont de golfsteilheid, anders dan bij de andere locaties, een duidelijke correlatie met de waterstand. In figuur 7.4 is gebruik gemaakt van drie waterstandsklassen: van –45 cm tot NAP (v), van NAP tot 40 cm daarboven (O) en tot slot de waterstanden hoger dan 40 cm boven NAP (^). Opvallend genoeg vallen de hoogste waterstanden samen met de grootste golfsteilheden. Een verklaring hiervoor is nog niet voorhanden. Ook valt op dat bij windsnelheden boven 12 m/s de golfsteilheid van FL5 systematisch hoger is dan de steilheid bij FL9, ongeacht de waterstand. Dit hangt waarschijnlijk samen met het feit dat de golven bij FL5 ineens in ondiep water komen, en daarbij steiler worden.

Figuur 7.4 Golfsteilheid H_{m0}/L_{Tm02} voor FL5 als functie van de windsnelheid bij FL2 voor WZW-windrichtingen (220°-260°) en drie waterstandsbereiken: [-0.5,0 m NAP] (v), [0,0.4 m NAP] (O) en [0.4,1 m NAP] (^)



Al met al lijken de huidige golfsteilheidsdata plausibel en – mede vanwege de relatief kleine spreiding in de golfsteilheidsdata – bruikbaar voor toekomstige toepassingen, waaronder ook de validatie van nieuwe meetgegevens. Wel is nader onderzoek nodig om de hierboven besproken trends te verklaren. Verdere conclusies en aanbevelingen volgen in paragraaf 7.8.

7.4 Golfgroeilimiet

Gedurende ontwerpcondities – met windsnelheden in de orde van 35 m/s – is het te verwachten dat de golven in het IJsselmeer sterk diepte-gelimiteerd zijn (Bottema, et al., 2002). In feite zijn de golven naar verwachting zo sterk diepte-gelimiteerd dat ze vanaf een zekere afstand tot de oever niet meer zullen groeien: de ondiep-water-golfgroeilimiet (kortweg golfgroeilimiet) is dan bereikt (Waal, 2002). Voor dijkontwerp (Rijkswaterstaat, 2002) en voor de toetsing van de daarbij gebruikte golfmodellen (bijv. SWAN) is het onder andere belangrijk om te weten welke relatieve golfhoogtes H_{m0}/d (d is de waterdiepte) onder dergelijke ontwerp-omstandigheden maximaal haalbaar zijn. Op het IJsselmeer is zo'n maximale H_{m0}/d in de praktijk moeilijk vast te stellen omdat deze naar verwachting pas optreedt bij zeer hoge, en daardoor zeldzame windsnelheden. Het Slotermeer is veel ondieper dan het IJsselmeer, zodat de maximale H_{m0}/d daar wellicht al bij een “gewone” zware storm optreedt, die elke paar jaar wel voorkomt. Dit is de reden dat ook op het Slotermeer golfmetingen worden gedaan.

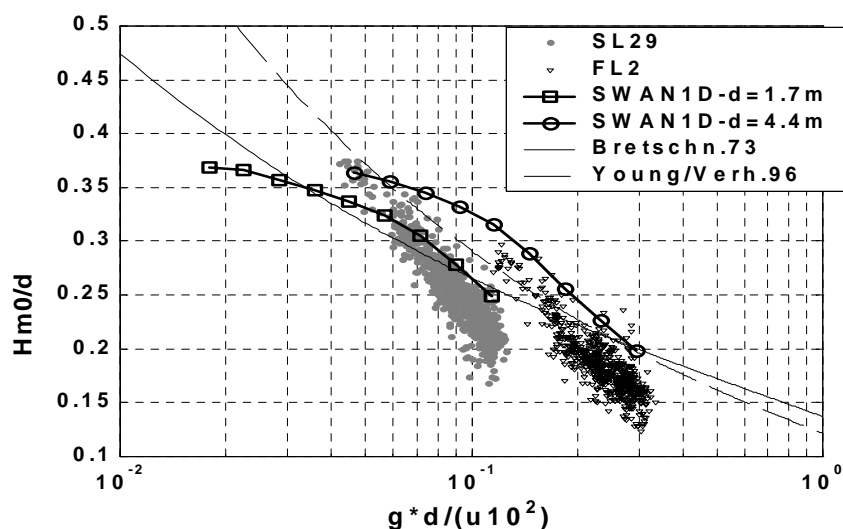
In het vervolg van deze paragraaf zal niet in detail op het golfgroeilimietproject worden ingegaan; hiervoor wordt verwezen naar (Waal, 2002). Hier wordt volstaan met een bespreking van een voorbeeldgrafiek met voorlopige data ⁴², waarbij ook de toegevoegde waarde van de data van dit meetseizoen zal worden aangegeven.

Figuur 7.5 toont de golfgroeilimiet in een notendop; een soortgelijke grafiek is getoond in (Waal, 2002) en in (Bottema et al, 2002).

Op de y-as is de relatieve golfhoogte H_{m0}/d aangegeven, de variabele waar we uiteindelijk in geïnteresseerd zijn. De variabele op de x-as is een dimensieloze diepte gd/u_{10}^2 waarbij g de gravitatieversnelling is en u_{10} de 10-meter-windsnelheid op de betreffende meetlocatie (SL29 of FL2). Hoe hoger de windsnelheid en hoe kleiner de bodemdiepte, hoe kleiner ook de x-waarde is. De golfgroeilimiet (harde wind op ondiep water) wordt derhalve aan de linkerkant van de grafiek bereikt.

De puntenwolken stellen data van SL29 en FL2 voor (links resp. rechts). Alleen de data met windsnelheden groter dan 12 m/s en windrichtingen tussen 220° en 260° (WZW-wind) zijn weergegeven. De vetgedrukte lijnen met vierkantjes en cirkels stellen eendimensionale simulaties met het golfmodel SWAN voor (Waal, 2002); de linkerlijn komt overeen met de SL29-data (diepte 1.7 m), de rechterlijn met de FL2-data (diepte 4.4 m). In beide gevallen is een zeer grote (quasi-oneindige) strijklengte gebruikt. De twee dingedrukte lijnen geven berekeningen met golfgroeirommes weer. Links (doorgetrokken lijn) is de kromme van Bretschneider (CERC, 1973) gegeven, rechts (gestreepte lijn) de kromme van Young en Verhagen (1996).

Figuur 7.5 Relatieve golfhoogte H_{m0}/d als functie van de dimensieloze diepte gd/u_{10}^2 . Weergegeven zijn de gemeten data (SL29 en FL2 links resp. rechts; met minimaal 12 m/s wind uit richtingen tussen 220° en 260°), de bijbehorende SWAN-data (dikke lijnen), en twee golfgroeirommes (dunne lijnen)



Voor de interpretatie van de grafiek worden allereerst de SWAN-lijnen belicht. De strijklengte is zoals gezegd quasi-oneindig; het windsnelheidsbereik van beide lijnen is 12 (rechts) tot 31 m/s. (links). Uit de grafiek blijkt dat de golfgroeilimiet (in termen van H_{m0}/d) stijgt naarmate de windsnelheid toeneemt, en dat die stijging bij hoge windsnelheden afvlakt. Uiteindelijk lijkt er bij zeer hoge windsnelheden een maximale H_{m0}/d van ca. 0.38 in te zitten. Van de metingen zijn alleen de data met windsnelheden boven 12 m/s getoond; de laagste windsnelheden zitten rechtsonder in de puntenwolken. De

⁴² Hier zijn bijv. geen stationariteitscriteria toegepast, in de uiteindelijke analyse (zoals in Waal, 2002) gebeurt dat wel

metingen vallen daar lager uit dan de SWAN-resultaten, hoogstwaarschijnlijk als gevolg van de eindige strijklengte (zie Waal, 2002). Bij hogere windsnelheden nemen deze effecten af. Vandaar dat de puntenwolken steiler zijn dan de onderzijde van de SWAN-krommes. De SWAN-krommes vertonen overigens een knik rond $H_{m0}/d = 0.3$; bij hogere H_{m0}/d is sprake van een afvlakking. Bij FL2 kan dit gedrag nog niet geverifieerd worden. Bij SL29 vertoont de puntenwolk een knik, maar deze lijkt minder sterk te zijn dan in SWAN.

Tot slot zijn twee golfgroeikrommes in de grafiek geplot. Beide krommes suggereren dat er in extreme condities geen vaste H_{m0}/d -limiet is, maar dat H_{m0}/d kan blijven doorgroeien naarmate de wind sterker wordt (of de bodem ondieper).

In hoeverre hebben de metingen van dit seizoen nu meer kennis over de golfgroeilimiet opgeleverd?

Bij SL29 is het databereik dit seizoen duidelijk vergroot. Zo zijn nu H_{m0}/d -waarden van 0.375 gehaald tegen 0.335 vorig seizoen. Ook de dimensieloze diepte gd/u_{10}^2 haalde dit seizoen lagere waarden: 0.43 tegen 0.52 vorig jaar. Deze extra data doen vermoeden dat de H_{m0}/d - limiet van SWAN (maximaal ca. 0.38) te laag zou kunnen zijn; een indicatie die nog niet uit de data van vorig jaar was af te leiden. Het is niet verstandig hier meer dan een vermoeden van te maken omdat de hierboven genoemde extra data voor een groot deel op slechts één storm zijn terug te voeren, die van 26/2/2002. Van de andere stormen (26/1, 28/1, 11/2 en 9/3) waren er slechts een paar 20-minuten-datablokken die bijdroegen aan een kleine uitbreiding van het meetbereik (van $H_{m0}/d = 0.33$ naar 0.35).

Bij FL2 is er helemaal geen sprake van een uitbreiding van het databereik. Waarschijnlijk hangt dit samen met de relatief lage windsnelheden bij FL2 (Hoofdstuk 4), en met de hoge meerpeilen van dit seizoen. Metingen tijdens een zware storm – die normaal toch eens per ca. 5 jaar te verwachten is – zouden het huidige databereik aanzienlijk vergroten. De dimensieloze diepte gd/u_{10}^2 zou bij SL29 dan op ca. 0.03 uitkomen en bij FL2 rond de 0.075. Dit zou zeer veel informatie opleveren over de bruikbaarheid van alle theoretische krommes in Figuur 7.5 (golfgroeikrommes en SWAN), en over de werkelijk te verwachten golfgroeilimiet tijdens ontwerpcondities op het IJsselmeer.

Samengevat:

Het huidige seizoen heeft het golfgroeilimiet-databereik bij SL29 duidelijk uitgebreid. Door de extra data werd het mogelijk een mogelijk te lage golfgroeilimiet in het model SWAN te signaleren. Vooral bij FL2 zouden extra data zeer wenselijk zijn, zeker als deze corresponderen met de eens in de ca. 5 jaar te verwachten zware-storm-condities (10 Beaufort).

7.5 Validatie van het golfmodel SWAN

In eerdere publicaties (Bottema en Beyer, 2002; Bottema et al, 2002) is het SWAN-golfmodel al uitgebreid vergeleken met metingen. Daarbij is geprobeerd aan te geven welke parameters onder welke omstandigheden al dan niet goed voorspeld worden, en welke (fysische) processen in SWAN mogelijk verbetering behoeven. Bij de modelvalidatie is tot nu toe een tweesporenaanpak gehanteerd:

- een globale validatie op basis van een grote dataset voor één of meer locaties
- een aanvullende detailvalidatie op basis van case-studies.

In het onderstaande worden van beide sporen enkele voorbeelden getoond. Het blijft daarbij grotendeels bij het tonen van voorbeelden. Voor conclusies

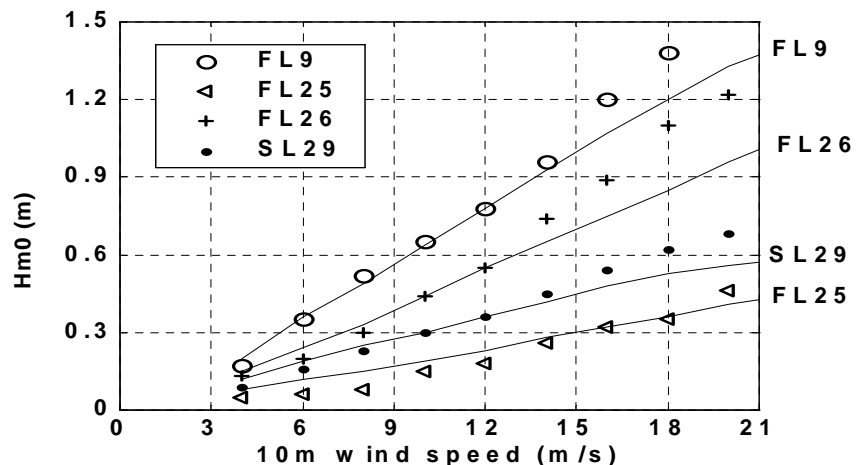
m.b.t. het golfmodel SWAN wordt doorverwezen naar eerdere publicaties (Bottema en Beyer, 2002; Bottema et al., 2002).

Een globale validatie van het golfmodel SWAN kan op diverse manieren plaatsvinden. Bottema en Beyer (2002) gebruikten bijvoorbeeld:

- statistische analyse van scatterplots van SWAN-golfhoogtes, -periodes, etc. als functie van gemeten waarden
- directe vergelijking van scatterplots als Figuur 7.1 en 7.2 met SWAN-data

Later (Bottema et al, 2002) zijn ook meerdere meetpalen tegelijk getoetst, door bijvoorbeeld bij gegeven windrichting voor meerdere meetpalen tegelijk de gemeten en berekende golfhoogte als functie van de windsnelheid te plotten. Figuur 7.6 geeft een voorbeeld van een dergelijke grafiek:

Figuur 7.6 Golfhoogte H_{m0} als functie van de windsnelheid U_{10} bij FL2 en SL29 (voor IJsselmeer en Sloterveer) bij WZW-wind (220° - 260°). Losse punten: meetdata gemiddeld over okt.2001-apr.2002; lijnen: SWAN



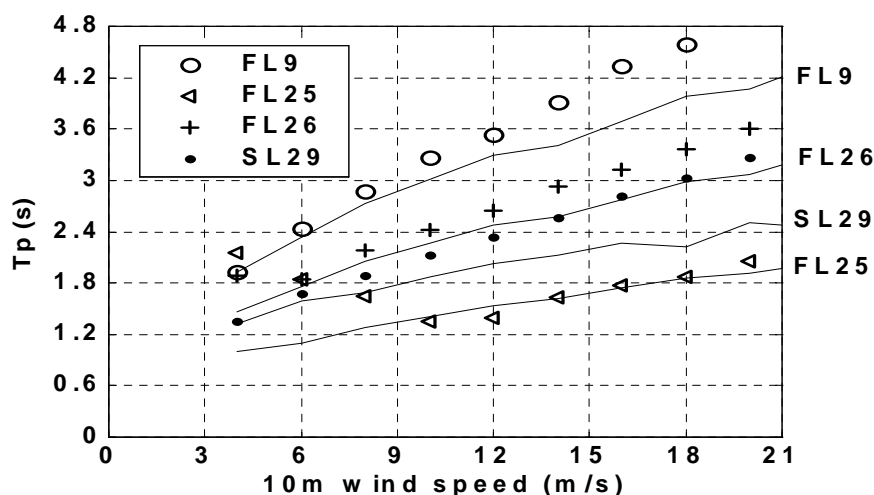
De doorgetrokken lijnen in de grafiek stellen resultaten van medio 2001 uitgevoerde SWAN-simulaties voor (voor dit rapport is dus niet speciaal een nieuwe set simulaties opgestart). Voor het IJsselmeer zijn tweedimensionale simulaties met een resolutie van 160 m en een windrichting van 240° (WZW) uitgevoerd. Voor het Sloterveer zijn 1D-simulaties met een constante diepte (1.7 m) uitgevoerd omdat geen rooster met bodemdieptes beschikbaar was. Alle simulaties zijn uitgevoerd in stationaire modus met een strikt convergentiecriteria, met een constante windsnelheid (bij gebrek aan windveldinformatie) en met een constante waterdiepte. De gehanteerde waterdiepte varieert van NAP -20cm bij zwakke wind tot NAP + 20 cm bij storm, waarmee de opwaaiing op de meest kritische locatie (FL5) nagebootst is. Voor verdere informatie over de modelaanpak wordt verwezen naar eerdere publicaties (Bottema, 2001; Bottema en Beyer, 2002).

Vorig seizoen was bij FL2, FL9, FL26 en SL29 nog sprake van een uitstekende overeenkomst tussen de SWAN-golfhoogtes en de gemeten waarden (zie Bottema et al., 2002). Dit jaar gaat dat niet altijd meer op. Bij FL9 en SL29 hangen de hoge golfhoogtes vanaf 16 m/s vermoedelijk samen met verhoogde meerpeilen. Ook FL26 heeft relatief hoge golven. Hier lijkt het windveld een duit in het zakje te doen. Bij FL26 en andere noordwestelijk gelegen locaties zoals Stavoren-Haven was dit seizoen namelijk sprake van relatief sterke WZW-winden; dit seizoen waren ze ca. 4% sterker dan bij FL2 (Tabel 4.4), vorig seizoen (Bottema, 2002) tot 5% zwakker. Bij FL25 valt op dat SWAN het concave verloop van de golfgroeikromme niet reproduceert. De resultaten van FL2 en FL5 zijn niet in de grafiek getoond. Bij FL5 komen de SWAN-golfhoogtes nogal laag uit ten opzichte van de gemeten golfhoogtes (bij 18 m/s: 0.87 resp. 1.10 m). Deels kan dit worden toegeschreven aan de systematisch hogere waterstanden van dit seizoen, deels aan het feit dat

SWAN op dergelijke locaties de golfbreking lijkt te overschatten (Bottema en Beyer, 2002). De FL2-data zouden volgens SWAN bijna moeten samenvallen met de FL9-data. Bij de gemeten data was dat vorig seizoen wel het geval; dit seizoen zijn veel FL2-data echter ruim 5% lager uitgekomen.

De piekperiodes zijn gegeven in Figuur 7.7. Het blijkt dat de piekperiode in zeer veel gevallen fors wordt onderschat door SWAN, met name bij hoge windsnelheden, lange strijklengtes (onderschatting neemt toe van FL25 via FL26 naar FL2) en relatief ondiep water (SL29 vs. de rest). Bij FL25 hangt de onderschatting bij lage windsnelheden ook samen met het feit dat bij zwakke wind er vaak sprake is van (eerder en/of elders opgewekte langere) golven die het gebied bij FL25 binnenlopen. De resultaten van FL2 en FL5 zijn niet getoond in de grafiek; zowel de SWAN-data als de meetdata vallen samen met die van FL9.

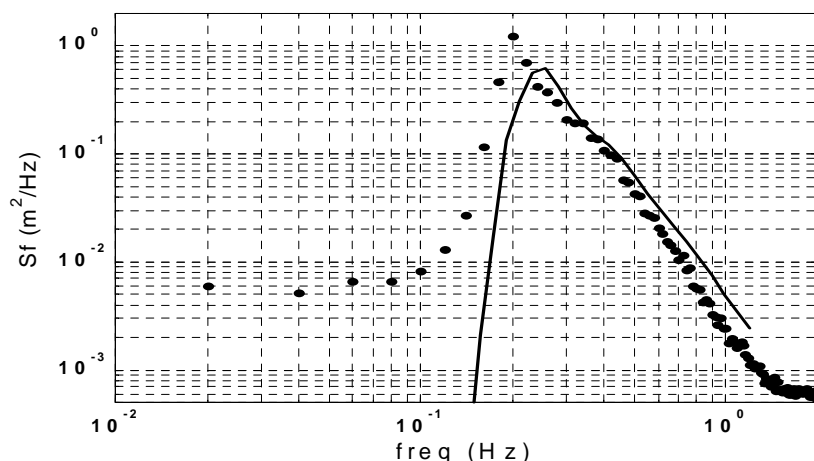
Figuur 7.7 Piekperiode T_p als functie van de windsnelheid U_{10} bij FL2 en SL29 (voor IJsselmeer en Slotermeer) bij WZW-wind (220° - 260°). Losse punten: meetdata gemiddeld over okt.2001-apr.2002; lijnen: SWAN



Van de andere golfperiodematen worden geen grafieken getoond. Wel kan worden vermeld dat SWAN de andere golfperiodematen – met name T_{m01} en T_{m02} – vaak nog sterker onderschat dan de hier getoonde piekperiode T_p (Bottema en Beyer, 2002).

Case studies zijn een uitstekende aanvulling op bovenstaande globale validatie, en kunnen worden gebruikt om een verklaring te zoeken voor trends die naar voren komen uit grafieken zoals Figuur 7.6 en 7.7. Case studies zijn ook zeer geschikt voor detailstudies, waarbij ook de golfspectra aan bod komen.

Figuur 7.8 Golfspectrum FL9 voor 28/12/2001. Losse punten: meetdata (13h-16h MET); vetgedrukte lijn: SWAN-data (wind 17.5 m/s / 268° ; waterstand NAP + 15 cm)



Figuur 7.8 (vorige pagina) geeft een voorbeeld van een golfspectrum voor de locatie FL9. De case is die van 28/12/2001. Bij de SWAN-data (vetgedrukte lijn) is uitgegaan van een constante wind van 17.5 m/s en 268°, en van een constante waterstand van 15 cm boven NAP. In het spectrum valt op dat de vorm van het spectrum redelijk door SWAN wordt voorspeld maar dat er een paar belangrijke verschillen zijn:

- de gemeten spectrale piek is hoger dan de SWAN-piek en ligt verder naar links
- de gemeten staart van het spectrum valt sneller af dan de SWAN-staart
- boven 1.5 Hz vlakt de gemeten staart ineens af

Het laatste punt is toe te schrijven aan aliasing. Voor de eerste twee punten moet de verklaring vermoedelijk in SWAN gezocht worden (zie Bottema en Beyer, 2002 en Bottema et al., 2002); het gaat overigens om punten die zeer vaak terugkomen bij een vergelijking tussen SWAN-spectra en metingen. Wat betekent de afwijkende vorm van het SWAN-spectrum nu voor de integrale golfparameters H_{m0} , T_p , T_{m-10} , T_{m01} en T_{m02} ? Allereerst moet opgemerkt worden dat SWAN deze maten op basis van het hele spectrum bepaalt, en dat in metingen alleen het bereik van 0.03 tot 1 Hz is gebruikt. Een groter frequentiebereik zal gezien de bevindingen van par. 6.1.5 overigens weinig invloed op de resultaten hebben. De gemeten waarden van H_{m0} , T_p , T_{m-10} , T_{m01} en T_{m02} zijn resp. 1.29 m, 4.97 s, 4.08 s, 3.58 s en 3.27 s. De SWAN-waarden liggen resp. 7%, 21%, 19%, 22% en 29% lager. De hogere spectrale staart in SWAN weegt dus niet helemaal op tegen de lagere spectrale piek. Bij de periodematen weegt de spectrale staart het zwaarste mee bij T_{m02} . De te hoge spectrale energie die SWAN aan de spectrale staart toekent komt dan ook vooral terug in de sterke onderschatting van T_{m02} .

Naast stationaire case studies van het bovenstaande type zouden ook niet-stationaire case studies uitgevoerd moeten worden. Tot nu toe is hier echter weinig van gekomen omdat de SWAN-resultaten zeer gevoelig bleken voor de keuze van de tijdstap en van aanverwante numerieke parameters. Enkele details hierover zijn gerapporteerd door Claessens et al. (2002), waar ook blijkt dat het moeten werken met zeer kleine tijdstappen zeer lange rekentijden (meerdere dagen per case) tot gevolg heeft.

7.6 Ruwheid van het wateroppervlak

De aërodynamische ruwheid van het (golvende) wateroppervlak heeft een grote invloed op de uitwisseling van impuls (hoeveelheid beweging) tussen lucht en water. Deze lucht-water-impulsuitwisseling is een cruciale factor in de modellering van zowel de wind, de golven, de opwaaiing en windgedreven stromingen, en heeft daarmee in potentie een grote invloed op de benodigde dijkhoogtes in het IJsselmeergebied. Uit gevoeligheidsonderzoek (Waal, 2002b; figuur 10.18) blijkt dat het gebruik van verschillende – nu gangbare – ruwheidsformuleringen bij ontwerpcondities kan leiden tot 1.5 meter (ruim 30%) verschil ⁴³ in het 2% oplooppniveau tegen een dijk.

Alleen al het bovenstaande is voldoende reden om het huidige meetinstrumentarium zo in te richten dat bovengenoemde impulsuitwisseling en ruwheid betrouwbaar gemeten kunnen worden. Daarnaast zijn er actuele ontwikkelingen die het meten van ruwheid juist nu opportuun maken. Bij het

⁴³ Dit is een *bruto* indicatie. Door een juiste afregeling van de voor dijkontwerp en -toetsing gebruikte wind-, waterstands- en golfmodellen kunnen de verschillen verkleind worden.

KNMI en het RIKZ zijn namelijk twee qua grondslag sterk verschillende theorieën ontwikkeld (Makin, 2002; Radder, 2001) die de waterruwheid beschrijven. Vergelijking met metingen zal moeten uitwijzen welke theorie het meest bruikbaar zal zijn voor IJsselmeer-omstandigheden.

Allereerst wordt kort ingegaan op de beschikbare theorie en de bijbehorende meet- en analysemethoden ⁴⁴.

Voor de beschrijving van de ruwheid zijn twee parameters in omloop, de weerstands- of dragcoëfficiënt C_D en de ruwheidslengte z_o . In de meteorologie wordt meestal z_o gehanteerd omdat de waarde van C_D onder andere afhangt van de gehanteerde referentiehoogte. Het theoretisch kader van de ruwheidslengte z_o bestaat uit het logaritmisch windprofiel in een thermisch neutrale atmosfeer.

$$(7.2) \quad U(z) = (u_*/\kappa) * \ln(z/z_o)$$

waarbij z de hoogte is, U de tijdsgemiddelde windsnelheid, κ de Von Karman-constante (0.4) en u_* de zogenaamde wrijvingssnelheid, een maat voor de turbulente schuifspanning. Het geldigheidsbereik en de aannames, afleiding en theoretische onderbouwing zijn o.a. beschreven door Tennekes (1973) en Tennekes en Lumley (1972). Vooral bij relatief zwakke wind is er vaak sprake van een niet-neutrale atmosfeer (thermiek!). In dat geval moet verg. 7.1 worden uitgebreid met een stabiliteitscorrectie Ψ ⁴⁵:

$$(7.3) \quad U(z) = (u_*/\kappa) * (\ln(z/z_o) - \Psi)$$

De drag-coëfficiënt C_D is per definitie gelijk aan $(u_*/U)^2$. Op basis van verg. 7.3 leidt dat tot:

$$(7.4) \quad C_D = \kappa^2 / (\ln(z/z_o) - \Psi)^2$$

Met de huidige instrumentatie kunnen de stabiliteitscorrecties Ψ nog niet bepaald worden. Voor de bepaling van Ψ moeten namelijk op meerdere hoogtes windsnelheden en temperaturen bekend zijn, óf de warmte- en impulsflux moeten apart worden gemeten (bijv. met een ander type windsnelheidsmeter: een sonic anemometer in plaats van de huidige cup-anemometers). Bij zeer harde wind zouden stabiliteitseffecten verwaarloosbaar moeten worden: mechanisch opgewekte turbulentie wordt dan dominant over thermisch opgewekte turbulentie. De resultaten van par. 8.6 suggereren echter dat ook bij windsnelheden van 12 m/s nog forse stabiliteitseffecten kunnen optreden. Dit alles maakt dat de later in deze paragraaf gepresenteerde resultaten een zeer voorlopig karakter hebben.

⁴⁴ In deze paragraaf en in paragraaf 7.7 zal volstaan worden met een ietwat summiere uitleg en een klein aantal literatuurverwijzingen. Het is namelijk onmogelijk om in de beperkte hoeveelheid beschikbare tijd een significant deel van het hele vakgebied “grenslaagmeteorologie” uit te leggen.

⁴⁵ De stabiliteitscorrectie Ψ is positief voor een stabiele atmosfeer (warme lucht over koud water) en negatief in een onstabiele atmosfeer (met thermiek). De turbulentie en u_* zullen, gegeven de windsnelheid op 10 meter, relatief hoog zijn in een onstabiele atmosfeer en relatief laag in een stabiele atmosfeer. In de regel zijn stabiliteitseffecten het sterkst bij zwakke tot matige wind.

Allereerst nog iets over de experimentele bepaling van de ruwheidslengte z_0 . Deze kan als volgt bepaald worden (voor formules, zie o.a. Wieringa en Rijkoort, 1983):

- 1) uit een regressie van het windsnelheidsprofiel
- 2) met resultaten van één meethoogte
- 3) uit de turbulentie-intensiteit
- 4) uit analyse van de vlagfactor

Ad 1) Met de huidige twee meetniveaus op 3 en 10 meter en een karakteristieke open-water- z_0 van 0.0002 m (Wieringa en Rijkoort, 1983) leidt 1% fout in de windsnelheden U_3 en/of U_{10} al tot een factor 2.2 fout in z_0 . Daarbij is de kans op forse systematische fouten groot.: Op 3 meter ligt de verstoring van de wind door de meetpaalconstructie zeker in de orde van 10% (Bottema, 2002; par. 4.7). Stabiliteitseffecten kunnen even grote fouten geven (zie par. 8.6 en Bottema, 2002), zelfs bij krachtige wind (12 m/s). Feitelijk komt dit alles er op neer dat een betrouwbare ruwheid niet uit een tweepunts-windprofiel kan worden afgeleid.

Ad 2) Eén procent fout in u_* of U_{10} leidt hier tot slechts 11% fout in z_0 . Deze methode lijkt dus geschikt, mits u_* voldoende nauwkeurig bepaald kan worden (dat kan door de impulsflux gedurende verscheidene uren te meten) en mits stabiliteitseffecten (Ψ uit verg. 7.4) bekend zijn. Dat is niet mogelijk met de huidige apparatuur maar wel als de wind wordt gemeten met een sonic anemometer (die ook warmte- en impulsflux meet; de laatste is op 10 meter hoogte nagenoeg gelijk aan u_*^2).

Ad 3) De windsnelheids-standaarddeviatie σ_u en de daarop gebaseerde turbulentie-intensiteit $T_u = \sigma_u/U$ wordt mede bepaald door grote wervels ('large eddies') die de gehele atmosferische grenslaag beslaan (zie bijv. Panofsky en Dutton, 1984) en meerdere kilometers strijklengte nodig hebben om zich volledig aan een nieuw terreintype aan te passen. De volgens deze methode afgeleide z_0 is dus representatief voor een vrij groot bovenstrooms gebied wat analyses bij aflandige wind en bij SL29 bemoeilijkt. Stabiliteitscorrecties zijn lastig uit te voeren omdat daarvoor in dit geval ook de grenslaaghoogte bekend moet zijn. Uit enkele testen met deze methode bleek dat de resultaten nogal gevoelig waren voor de gehanteerde middelingstijd (bij gebruik van 10-minuten- in plaats van uurgemiddeldes is σ_u af en toe te laag omdat niet alle grote wervels goed worden meegenomen; dit levert dan ook te lage z_0 -waarden op)

Ad 4) De methode is goed beschreven in Wieringa en Rijkoort (1983), die aangeven dat ook deze ruwheid een niet-lokale maat is die representatief is voor enkele kilometers bovenstrooms gebied. Daarmee is de methode minder geschikt voor analyse van de SL29-data. Wel is de methode geschikt voor zowel 10-minuten- als uurgemiddelden. Daarentegen is de methode gevoelig voor fouten (1% fout in de vlagfactor levert een factor 1.7 fout in z_0). Dat komt slecht uit want de methode houdt geen rekening met stabiliteitseffecten.

Uiteindelijk is er voor dit rapport voor gekozen de ruwheden met de vlagmethode van Wieringa en Rijkoort (1983). Deze methode is gekozen om drie redenen:

- de profielmethode bleek sowieso ongeschikt (zie Ad 1)
- het is de best gedocumenteerde methode
- de analyse kan worden herhaald voor eerdere seizoenen zonder de gehele verwerking te moeten overdoen (het maken van tabellen wel)

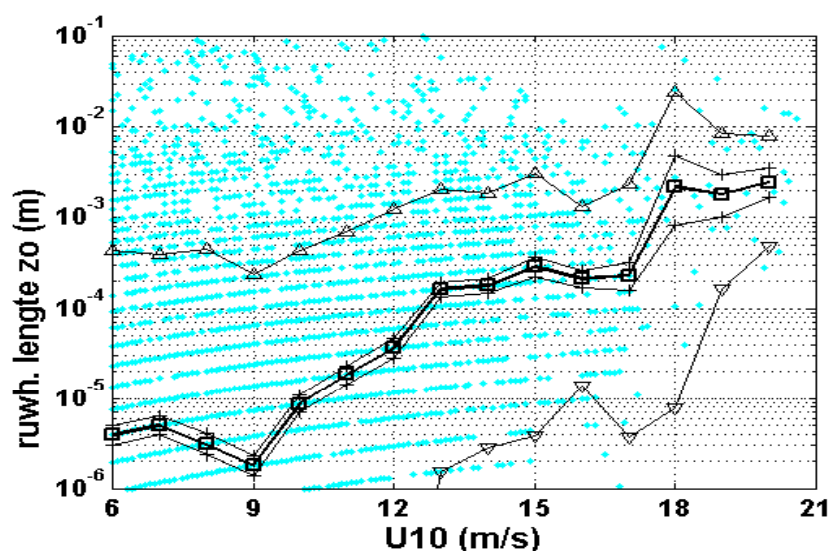
De afleiding van de vlagmethode wordt niet besproken, wel wordt de formule gegeven:

$$(7.6) \quad U_{\max} / U_{10} = A * \{ 1 + [1.42 + 0.3 * \ln(1000/U_{10}t) - 4] / \ln(z/z_0) \}$$

Daarbij is U_{\max} de maximale vlag met duur t (1 sec), U_{10} de gemiddelde wind, z de meethoogte (10 meter), z_0 de ruwheidslengte en A een constante die afhangt van de middelingstijd. Bij 10-minuten-gemiddelden is A gelijk aan 1.0; bij de hier gebruikte uurwaarden is A gelijk aan 1.1. De vlaganalyse is alleen zinvol bij FL2, elders is de kans te groot dat de gemeten ruwheden worden beïnvloed door bovenstroomse landoppervlakken. Als windrichtingsbereik is het bereik 210° - 280° gekozen: breed genoeg om de voornaamste stormen mee te pikken, smal genoeg om geen last te hebben van landinvloeden.

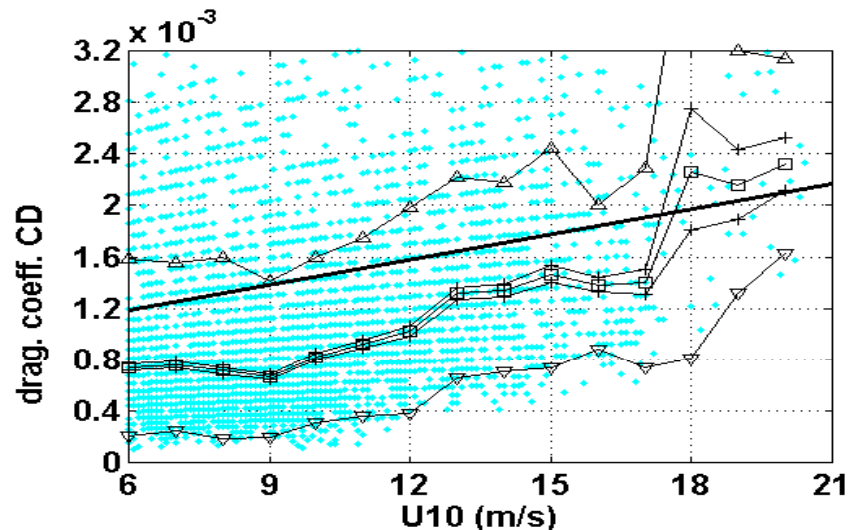
Figuur 7.9 (volgende pag.) toont de uit verg. 7.6 afgeleide ruwheidslengtes z_0 . De dikke lijn met de vierkantjes toont de gemiddelde ruwheid; de lijn met de +- symbolen toont de 1σ -onzekerheidsband in het gemiddelde; de lijnen met driehoekjes tonen de 1σ -spreidingsmaat van de losse uurdata. Losse uurwaarden vertonen veel te veel spreiding voor een bruikbare z_0 -bepaling. Zelfs bij een compleet jaar met data is de onzekerheid in de gemiddelde z_0 nog 30-50%. Bij dit alles is gebruik gemaakt van de gemeten vlagfactoren U_{\max}/U_{10} (op uurbasis). Gemiddeld varieerde de vlagfactor van 1.7 bij zeer zwakke ZW-wind tot gemiddeld 1.31 bij matige ZW-wind en 1.44 bij 20 m/s (zie ook par. 4.7). De spreiding in de losse uurlijkse vlagfactoren is circa 10%. De onzekerheid (1σ) in de jaargemiddelde waarden van U_{\max}/U_{10} is ca. 1% voor matige wind tot maximaal 2 à 3% bij stormachtige wind. De resulterende onzekerheden in de ruwheidslengte z_0 zijn getoond in Figuur 7.9.

Figuur 7.9 Met vlagmethode Wieringa / Rijkoort (1983) afgeleide ruwheidslengte z_0 als functie van windsnelheid U_{10} . Locatie FL2, windrichting 210° - 280° .



Uit verdere analyse van Figuur 7.9 blijkt dat de gemiddelde z_0 -waarden rond 15 m/s goed overeenkomen met de aanbevolen open-water- z_0 van 0.0002 meter uit Wieringa en Rijkoort (1983), die vermoedelijk bij soortgelijke windsnelheden is bepaald. Bij windkracht 8 (18-20 m/s) zijn de gemeten ruwheden duidelijk hoger, namelijk ca. 0.002 meter. Bij matige wind (6-9 m/s) zijn de ruwheden erg laag. In feite ligt de gemeten z_0 dan dicht bij de laagst haalbare z_0 -waarde, die van een volkomen glad oppervlak ($z_0 \sim 5 \cdot 10^{-6}$ m). Vermoedelijk leiden stabiliteitseffecten hier tot een onderschatting van de vlagfactor en van z_0 . Een stabiele atmosfeer onderdrukt namelijk de turbulentie zodat de vlagfactor kleiner wordt. Daarnaast is de kans op een stabiele atmosfeer (klimatologisch gezien) groter bij een kleine U_{10} dan bij een grote U_{10} . Voor zwakke wind zijn geen ruwheden getoond. De wind is hier vaak variabel (niet goed gedefinieerd) wat kan leiden tot erg hoge vlagfactoren.

Figuur 7.10 Met vlaagmethode Wieringa / Rijkoort (1983) en verg. 7.4 afgeleide dragcoëfficiënt C_D als functie van windsnelheid U_{10} . Locatie FL2, windrichting 210°-280°. Dikke rechte lijn: (Wu, 1982)



De ruwheden kunnen ook worden omgerekend naar weerstandscoefficienten C_D (verg. 7.4). Zie Figuur 7.10.

De opzet van de figuur is het zelfde als die van Figuur 7.9. De dikke rechte lijn is de uitdrukking van Wu (1982): $C_D = 0.8 + 0.065 \cdot U_{10}$. Alleen bij stormachtige wind komen de huidige resultaten goed overeen met Wu (1982). Bij lagere windsnelheden liggen de windsnelheden duidelijk lager. Metingen boven de 20 m/s zouden overigens zeer waardevol zijn. Uitdrukkingen zoals die van Wu (1982) zijn namelijk voor open zee afgeleid en ondiep-water-effecten op de golven (grotere steilheid, golfbreking) zouden op het IJsselmeer heel goed kunnen leiden tot een afwijkend gedrag van C_D .

Al met al is het nog niet duidelijk hoe de ruwheidslengte (z_o) en de weerstandscoefficient (C_D) van het wateroppervlak zich bij zeer hoge windsnelheden zullen gedragen. Daarbij zijn er nog de nodige meetproblemen op te lossen: windprofielanalyse is niet goed mogelijk met de huidige meetopstelling (zie Ad 1) en het beste alternatief – vlaaganalyse volgens Wieringa en Rijkoort (1983) – blijkt eveneens erg gevoelig voor meetfouten. Voor een verdere uitwerking van de conclusies en aanbeveling wordt doorverwezen naar paragraaf 7.8.

7.7 Interpretatie van de windsnelheidsverhoudingen

Bij de windsnelheidsverhoudingen in Hoofdstuk 4 (Tabel 4.4) is het tot nu toe gebleven bij kwalitatieve verklaringen. Met deze paragraaf wil de auteur ook voorzien in een kwantitatieve analyse. Dat is nodig, want ook op het gebied van ruimtelijke windmodellering heeft een keuze voor het ene resp. het andere gangbare windmodel grote consequenties voor dijkontwerp. Uit gevoeligheidsonderzoek (Waal, 2002b; figuur 10.19 en 10.20) blijkt dat het gebruik van verschillende windmodellen onder ontwerpomstandigheden kan leiden tot 1.5 à 2 meter (ruim 30%) verschil in het 2%-golfoplooppniveau tegen een dijk.

Een kwantitatieve analyse ontbreekt nog. Deze paragraaf beoogt in deze leemte te voorzien. Er zullen twee conceptuele modellen worden gebruikt voor de interpretatie van de windgegevens:

- weerstandswetten die de wind in de atmosferische grenslaag koppelen aan de (wrijvingsloze) wind daarboven
- modellen voor ruwheidsovergangen (interne-grenslaag-modellen)

Daarnaast zal aan het eind van de paragraaf nog worden ingegaan op de open-water-transformatie van Bak en Vlag.

Allereerst de weerstandswetten. Dit zijn formules om de wind binnen de invloedszone van het aardoppervlak (in de atmosferische grenslaag) te koppelen aan de wind daarboven; zie bijv. Tennekes en Lumley (1972), Wieringa en Rijkoort (1983) en Jensen et al. (1984). De formules hebben dezelfde theoretische grondslag als het logaritmisch windprofiel. Een nadeel is dat ze impliciet zijn door een lichte windsnelheidsafhankelijkheid. Daarom kan het handig zijn de volgende benaderingsformule voor een neutrale atmosfeer te gebruiken (Simiu en Scanlan, 1986):

$$(7.7) \quad u_{*1}/u_{*2} = (z_{o1}/z_{o2})^{0.0706}$$

waarbij u_{*1} en z_{o1} de wrijvingssnelheid en ruwheidslengte (zie verg. 7.2) voor een eerste voldoende groot uniform gebied (> 20 km) zijn, en u_{*2} en z_{o2} die voor een tweede (groot, uniform) gebied.

Ruwheidsovergangen worden vaak beschreven door interne-grenslaagmodellen die een scheidingsvlak tussen een gestoord deel (onder) en een ongestoord deel (boven) van de grenslaag beschrijven. Onder het grensvlak hebben de windprofielen (verg. 7.3) de z_o van het nieuwe oppervlak, erboven die van het bovenstroomse oppervlak. Kudryavtsev en Makin (1996) hebben recentelijk een volledig maar zeer complex (en impliciet) model ontwikkeld. Een eerder model van Jensen et al. (1984) is veel eenvoudiger en voor de onderste ca. 200 meter van een neutrale grenslaag consistent met het eerstgenoemde model. Jensen et al. (1984) geven de volgende benaderingsformule voor de hoogte h_{IBL} van het grensvlak van de interne grenslaag (bij thermisch neutrale atmosfeer):

$$(7.8) \quad h_{IBL} / z_o^+ = 0.3 * (x/z_o^+)^{0.8}$$

Daarbij is x de strijklengte, en z_o^+ de ruwheid van het ruwste oppervlak (het ruwste oppervlak bepaalt de hoeveelheid turbulentie). Uit de formule volgt dat de helling h_{IBL}/x van het interne-grenslaagvlak ruwweg in de orde van 1:20 ligt.

In Tabel 7.6 worden de gemeten windsnelheidsverhoudingen voor 8 ruwheidsovergangen (7 x land-water en 1x water-land) vergeleken met de uitkomsten van verg. 7.7. De gemeten windsnelheidsverhoudingen zijn gebaseerd op Tabel 4.4, waarbij zowel RDII- als KNMI-locaties zijn gebruikt.

.....
Tabel 7.6 Gemiddeld gemeten
windsnelheidsverhoudingen en vergelijking
met de resultaten van verg. 7.7

windrichtingen		LOCATIES		Ruwheden z_o (m)		windsnelheids- verhoudingen U10(2)/U10(1) meting verg. 7.7	
		1e	2e	1e	2e		
260°-280°	Wijdenes	FL2		0.4	0.0002	1.49	1.96
260°-280°	Wijdenes	FL26		0.4	0.0002	1.47	1.96
260°-280°	Wijdenes	Stav.-Haven		0.4	0.0002	1.54	1.96
80°-140°	Stav.-Haven	FL26		0.2	0.0002	1.49	1.69
80°-140°	Stav.-Haven	Wijdenes		0.2	0.0002	1.43	1.69
80°-140°	Stavoren	FL26		0.03	0.0002	1.30	1.32
80°-140°	Stavoren	Wijdenes		0.03	0.0002	1.23	1.32
300°-340°	Stav.-Haven	Stavoren		0.0002	0.015	0.92	0.81

De eerste 7 gevallen zijn land-water-overgangen, waarbij de strijklengte over water ca. 20 km is op één uitzondering na: FL26 bij westenwind (5 km). De uitkomsten van verg. 7.7 zijn systematisch hoger dan de gemeten windsnelheidsverhoudingen. Dit wijst er op dat de windsnelheid op het IJsselmeer nog altijd iets lager is dan de windsnelheid over een oneindig groot wateroppervlak. De atmosferische grenslaag boven het IJsselmeer heeft zich blijkbaar nog niet helemaal aan het nieuwe (water- i.p.v. land-) oppervlak aangepast. Verder valt op dat verg. 7.7 de windsnelheden in de eerste 3 cases (Wijdenes als referentie) sterk overschat, en bij de 6^e en 7^e case slechts enigszins. Dat kan er op wijzen dat de ruwheden uit Tabel 7.6 niet helemaal representatie zijn voor het volledige strijklengtebereik tot 20 km⁴⁶.

Blijkens bovenstaande resultaten kunnen de gemeten windsnelheidsverhoudingen niet worden verklaard met een theorie voor uniform terrein. Vandaar dat de metingen nu worden vergeleken met een theorie die expliciet rekening houdt met inhomogeen terrein, interne-grenslaag-theorie (zie verg. 7.8). Tabel 7.8 geeft de resultaten van enkele representatieve berekeningen met verg. 7.8, het interne-grenslaag-model van Jensen et al. (1984).

.....
Tabel 7.7 Windsnelheidsverhoudingen
zoals berekend met verg. 7.8 en verg. 7.2
(het interne-grenslaag-model van Jensen et
al., 1984)

cases uit Tabel 7.6	Ruwheden z_0 (m)		Dikte interne grenslaag h_{IBL} (m)		windsnelheids- verhoudingen $U_{10(2)}/U_{10(1)}$	
	1e	2e	na 1 km	na 5 km	na 1 km	na 5 km
1 ^e - 3 ^e (ruw-glad)	0.4	0.0002	63	227	1.35	1.54
4 ^e , 5 ^e (ruw-glad)	0.2	0.0002	55	198	1.23	1.39
6 ^e , 7 ^e (ruw-glad)	0.03	0.0002	37	135	1.10	1.16
8 ^e (glad-ruw)	0.0002	0.015	33	118	0.93	0.89

Tabel 7.7 laat zien dat de windsnelheden na één kilometer open water (of land) al fors veranderd zijn. Daarna gaat de verandering van de windsnelheid veel langzamer. Op veel IJsselmeerlocaties is de strijklengte rond 20 km. Bij deze strijklengtes beslaat de interne grenslaag een zo groot deel van de totale grenslaag dat de eenvoudige benadering van verg. 7.8 en 7.2 volgens Jensen et al. (1984) al lang niet meer geldig is. Daarom is de maximale strijklengte in Tabel 7.7 vijf km wat ook echt wel aan de rand van het geldigheidsbereik van de benadering van Jensen et al. (1984) ligt.

Vergelijking van de berekende windsnelheidsverhoudingen uit Tabel 7.6 (verg. 7.7) en Tabel 7.7 (verg. 7.8 en 7.2) suggereert dat de windsnelheid na 5 km strijklengte nog lang niet is aangepast aan het nieuwe oppervlak. Bij vergelijking met de gemeten snelheidsverhoudingen in Tabel 7.6 blijkt het volgende:

- de gemeten windsnelheidsverhouding van Tabel 7.6/case 8 komt uitstekend overeen met de berekende waarde (Tabel 7.7) voor 1 km. Bij case 8 is er ook in werkelijkheid sprake van een ruwheidsovergang met een strijklengte van ruim 1 km, zodat deze case de bruikbaarheid van verg. 7.8 en de methode van Jensen et al (1984) bevestigt.
- Bij case 4-7 zijn de gemeten verhoudingen duidelijk lager dan de 5km-verhoudingen uit Tabel 7.7. Het strijklengtebereik (ca. 20 km) is zodanig dat zowel de weerstandswetbenadering (verg. 7.7) als de interne-grenslaag-benadering (verg. 7.8) niet goed voldoen.

⁴⁶ De KNMI-vlaagruwheden (Verkaik, 2001) uit Figuur 4.1 en Tabel 7.6 zijn representatief voor enkele kilometers bovenwinds gebied (Wieringa en Rijkoort, 1983). Daarentegen gaat vergelijking 7.7 uit van (de ruwheid van) een uniform terrein van enkele tientallen kilometers doorsnede.

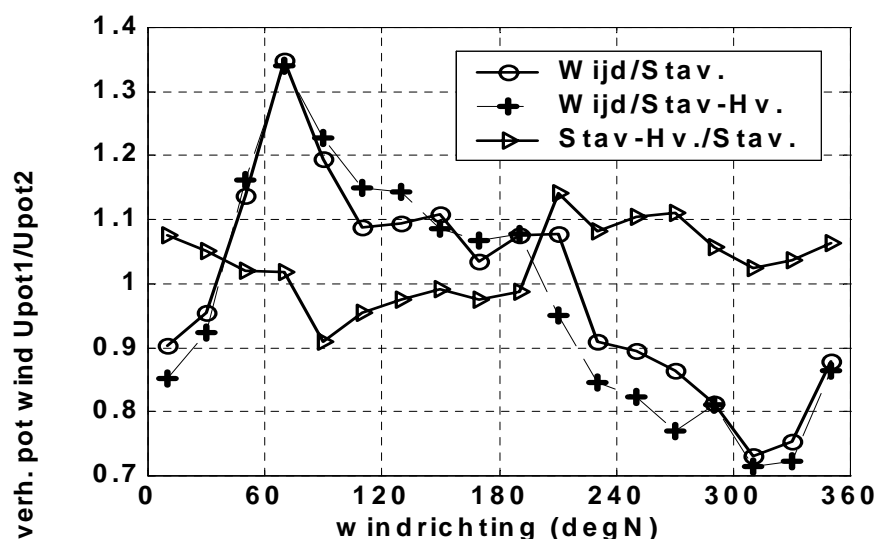
- Bij case 2 zou de gemeten verhouding moeten overeenkomen met de 5km-verhouding uit Tabel 7.7 (0.65). De gemeten verhouding (0.68) ligt echter hoger wat er op kan wijzen dat de voor case 1-3 gehanteerde ruwheid (0.4 m) te groot is geweest.

Tot slot wordt nog ingegaan op de door RIZA en marktpartijen veel gebruikte open-water-transformatie van Bak en Vlag (1999). Een belangrijke aanname bij de methode is de veronderstelling dat de wind op 60 meter hoogte (de mesowind in Wieringa en Rijkoort, 1983) niet meer door de ruwheid van het onderliggende oppervlak wordt beïnvloed. Dit heeft twee gevolgen:

- de mesowind op 60 meter hoogte, U_{meso} , is ruimtelijk gezien constant, afgezien van (grootschalige) variaties die niet met het aardoppervlak maar met de ligging van weersystemen hebben te maken
- hetzelfde geldt voor de potentiële wind U_{pot} omdat U_{pot} gedefinieerd is als $0.764 \cdot U_{meso}$ (Wieringa en Rijkoort, 1983; p. 79)

Met behulp van de KNMI-HYDRA-bestanden is eenvoudig te verifiëren of de ruimtelijke variaties in U_{pot} klein zijn; de HYDRA-bestanden bevatten immers al potentiële winden. Figuur 7.11 toont de resultaten van een vergelijking van de potentiële windsnelheid op de KNMI-stations Wijdenes, Stavoren-Haven en Stavoren. Om stabiliteitseffecten en de kans op variabele wind te beperken zijn alleen gevallen met minimaal 6 m/s wind meegenomen.

Figuur 7.11 Uit KNMI-HYDRA-bestanden bepaalde verhoudingen van de potentiële windsnelheid U_{pot} op enkele KNMI-stations; Periode: juli 2001 – juni 2002; windsnelheden vanaf 6 m/s.



Uit Figuur 7.11 blijkt duidelijk dat de aanname van constante potentiële en mesowind niet altijd opgaat ⁴⁷, zelfs niet na middeling van een heel jaar (harde-wind-)data. Gezien de beperkte afstand tussen Stavoren en Stavoren-Haven (2 km) is het verschil in potentiële wind tussen deze stations erg groot te noemen: maximaal 10 à 13%. Bij Wijdenes is U_{pot} relatief groot bij aanlandige (oosten-) wind en relatief klein bij aflandige (westen-) wind. Het verschil met Stavoren kan oplopen tot rond 30%. Deze variaties over nog altijd korte afstand zijn zo groot dat ze niet zijn te verklaren zonder de invloeden van het aardoppervlak bij de verklaring te betrekken. Ook de kaart van de jaargemiddelde potentiële wind van Wieringa en Rijkoort (1983; pag. 84) vertoont diverse variaties (Veluwe, Utrechtse Heuvelrug, Amsterdam, Rotterdam, Den Haag) die te kleinschalig zijn om anders te verklaren dan uit de eigenschappen (ruwheid) van het onderliggende aardoppervlak. Dat zou betekenen ook de potentiële

⁴⁷ Ook Wieringa en Rijkoort (1983; onderaan pag. 79) gaan uit van een ruimtelijk variabele want door de zgn. mesoruwheid bepaalde mesowind.

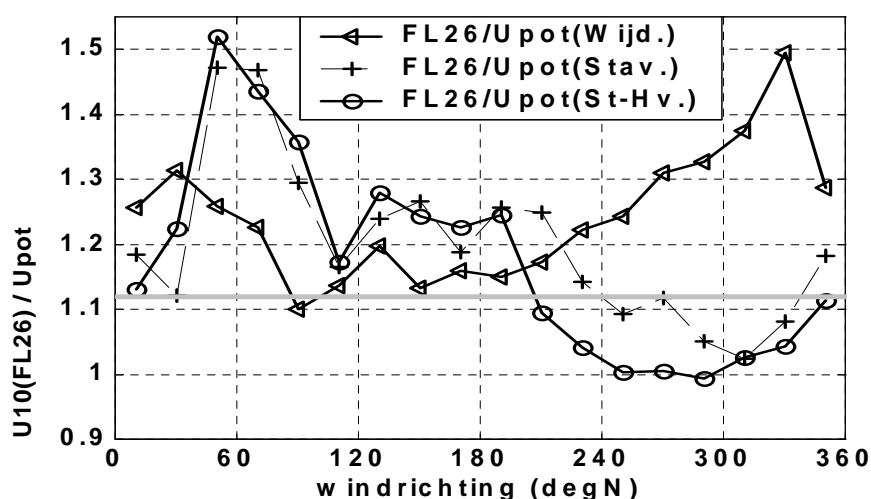
wind gevoelig is voor ruimtelijke variaties in de ruwheid van het aardoppervlak, zij het minder dan de gemeten 10-meter-wind U_{10} . Slechts de macrowind aan de top van de atmosferische grenslaag (op ca. 1 km hoogte) ondervindt deze invloed niet.

Tot zover de veronderstellingen van de open-water-transformatie van Bak en Vlag (1999), nu de resultaten. Bij niet al te sterke wind kan de verhouding U_{pot}/U_{ow} bepaald worden door de potentiële wind met verg. 7.2 en een z_o van 0.03 m (Wieringa en Rijkoort, 1983) omhoog te transformeren naar 60 meter (de mesowind), en deze mesowind met een open-water- z_o en verg. 7.2 terug te transformeren naar 10 meter. In formule:

$$(7.9) \quad U_{ow}/U_{pot} = (\ln(10/0.002)/\ln(60/0.002)) * (\ln(60/0.03/\ln(10/0.03))) = 1.12$$

Het is de moeite verg. 7.9 te interpreteren in het kader van het eerder besproken model van Jensen et al. (1984). Dat model maakt gebruik van een soortgelijke vergelijking, al is de vaste hoogte van 60 meter daar vervangen door een van de strijklengte afhankelijke interne-grenslaaghoogte h_{IBL} . Het model van Bak en Vlag (1999) kan in feite geïnterpreteerd worden als een interne-grenslaag-model met een vaste interne-grenslaag-hoogte: $h_{IBL} = 60$ m. Dit komt overeen met een strijklengte in de orde van 1 à 2 km (zie Tabel 7.7). Het is dus te verwachten dat verg. 7.9 feitelijk een land-water-transformatie met een *beperkte* strijklengte beschrijft.

.....
Figuur 7.12 Verhouding tussen open water wind op FL26 en potentiële wind op 3 KNMI-stations als functie van windrichting, voor windsnelheden > 6 m/s. De grijze lijn is de 'theoretische' verhouding uit verg. 7.9.



In de methode van Bak en Vlag (1999) wordt verg. 7.9 overigens alleen bij zwakke en matige wind gebruikt. Bij harde wind overschrijdt de ruwheid van het water de in verg. 7.9 gebruikte 0.0002 m. Vanwege de windsnelheids-afhankelijke z_o moet U_{pot}/U_{ow} dan iteratief worden bepaald (zie Bak en Vlag, 1999). Het resultaat is dat $U_{pot}/U_{ow} = 1.12$ tot ca. 10 m/s en daarboven langzaam afneemt; bij 20 m/s wind is U_{pot}/U_{ow} ca. 1.09.

De gemeten open-water-transformatie U_{pot}/U_{ow} is weergegeven in Figuur 7.12. Uit de grafiek is evident dat in sommige gevallen de gemeten open-water-transformatie U_{pot}/U_{ow} veel (tot meer dan 30%) hoger is dan de uit verg. 7.9 berekende waarde die is weergegeven met de grijze lijn in de grafiek. Als Wijdenes als referentiestation wordt gebruikt doen de afwijkingen zich vooral voor bij westen- en noordenwind. Bij Stavoren (en -Haven) doen de grootste afwijkingen zich vooral voor bij oostenwind. In beide gevallen gaat het om *aflandige* wind bij het KNMI-referentiestation. Bij aanlandige wind op het

KNMI-station (ZO-wind bij Wijdenes, W-en NW-wind bij Stavoren) zijn de verschillen veel minder groot. De gemeten verhoudingen bij westenwind (rond 270°) zijn overigens aan de lage kant door de ietwat beperkte strijklengte bij FL26 (5 km). Het is daarom niet ernstig als de uitkomsten van verg. 7.9 bij westenwind wat hoger liggen dan de gemeten waarden.

De meetresultaten van verg. 7.9 bevestigen de al bij RIZA aanwezige vermoedens dat het hierboven beschreven windmodel op basis van een (vrijwel) constante U_{pot} en U_{meso} niet altijd adequaat is en daarom op deskundige wijze gebruikt dient te worden. In feite zijn nu al diverse acties in gang gezet om te komen tot een betere windmodellering met het KNMI-model X-HIRLAM en een daarbij te ontwikkelen downscalingsmodule (zie bijv. Claessens et al, 2002).

7.8 Golfklimatologie en toepassingen; conclusies en aanbevelingen

In deze paragraaf worden de belangrijkste resultaten uit dit hoofdstuk nog een keer op een rijtje gezet.

Allereerst de golfhoogte- en golfperiodeklimatologie, zoals die is besproken in paragraaf 7.1 en 7.2:

- Over het algemeen komen de per windrichting en windsnelheid gemiddelde golfhoogtes en golfperiodes (H_{m0} en T_p ; Tabel 7.1-7.5) goed overeen met de voor het vorige seizoen (2000-2001; Bottema, 2002) vastgestelde waarden
- Met name bij de golfhoogte H_{m0} zijn er af en toe toch nog vrij forse verschillen (>10%) ten opzichte van het seizoen 2000-2001. Zo hebben FL25 en FL26 vaak hogere golven dan in het seizoen 2000-2001, terwijl FL2 vaak juist lagere golven heeft. Veel verschillen kunnen worden toegeschreven aan het beperkte aantal data (bij oostelijke windrichtingen), de relatief hoge waterstanden en meerpeilen van dit seizoen (bij harde wind) en waarschijnlijk ook aan de eigenschappen van het windveld (dit seizoen kennelijk relatief veel wind in het NW-deel van het IJsselmeer; zie ook par. 4.4 en 6.4)
- De piekperiode T_p blijkt relatief weinig jaar-op-jaar-verschillen te vertonen. Dit hangt samen met het feit dat T_p – vergeleken met de golfhoogte H_{m0} – relatief ongevoelig is voor meetfouten en voor veranderingen in waterstand en/of windsnelheid.
- De spreiding in 20-minuten-data van H_{m0} ligt in de orde van 15%. Langere middelingstijden (60 min.) en een drastische verkleining van de gebruikte windsnelheidsintervallen (van 9-11 naar 9.8-10.2 m/s) leiden slechts tot een marginale reductie in de spreiding. Vermoedelijk ligt de oorzaak van de spreiding vooral in fysische factoren: waterstand, luchtdichtheid, vlagerigheid van de wind, thermische stabiliteit van de atmosfeer, ruimtelijke variaties in het windveld, etc.
- De spreiding in 20-minuten-data van de piekperiode T_p is meestal relatief klein: O(8%). Langs de randen van beschutte windrichtingssectoren kan de spreiding sterk oplopen (tot ca. 30%). Vaak is hier sprake van gemengde golfvelden en bimodale golfspectra.

Dit seizoen zijn voor het eerst ook golfsteilheidsdata gepresenteerd; zie paragraaf 7.3. De voornaamste resultaten uit deze paragraaf waren:

- In zijn algemeenheid lijkt de golfsteilheid een zeer bruikbare parameter om de kwaliteit van gemeten of voorspelde golfdata te toetsen, vooral in extreme condities waar nog geen andere data beschikbaar zijn.
- De huidige golfsteilheidsdata ogen op het eerste gezicht plausibel
- Het is de moeite vaker gebruik te maken van golfsteilheidsdata omdat de spreiding in de data ca. 5% is, duidelijk kleiner dan bij H_{m0} of T_p .
- Uit analyse van de steilheidsdata kwamen de volgende consistente trends naar voren:
 - de steilheid neemt overal toe met de windsnelheid; een met golfbreking samenhangend maximum is nog niet bereikt.
 - alleen bij FL5 (alleen op hellende bodems?) blijkt de steilheid duidelijk te correleren met de waterdiepte
 - bij WZW-wind is de steilheid van FL2 erg aan de lage kant ten opzichte van bijvoorbeeld FL9, iets dat ook voor de golfhoogte geldt (zie par. 7.1). *Mogelijk zijn de FL2-data van dit seizoen toch niet helemaal betrouwbaar en worden golfhoogte en golfsteilheid onderschat.*
- Nader onderzoek is nodig om alle waargenomen trends afdoende te verklaren.

- Om aansluiting te hebben met het golfmodel SWAN zijn de huidige steilheidsmaten gebaseerd op de periode T_{m02} . T_{m02} is echter bijzonder gevoelig voor fouten door een eindig spectraal integratiebereik (par. 6.1.5) met als gevolg dat de golfsteilheidsdata pas redelijk betrouwbaar worden bij windsnelheden vanaf ca. 10 m/s (5 à 6 Beaufort). Het moet daarom onderzocht worden of T_{m01} , T_{m-10} en T_p betere bouwstenen voor golfsteilheidsdata zijn.

Op ondiep water zullen de golven bij voldoende lange strijklengte niet meer verder groeien: er is dan een evenwicht tussen energie-input (door wind) en energiedissipatie (door golfbreking en bodemwrijving). Deze situatie wordt aangeduid met "golfgroeilimiet"; in paragraaf 7.4 worden enkele resultaten van deze toepassing gepresenteerd. De voornaamste conclusies zijn:

- bij SL29 is het databereik duidelijk vergroot. Vorig seizoen was de maximale golfhoogte-bodemdiepte-verhouding H_{m0}/d gelijk aan 0.335, dit seizoen 0.375.
- de hoogst gemeten H_{m0}/d bij SL29 (0.375) ligt dicht bij de maximaal haalbare H_{m0}/d met de golfmodellen HISWA en SWAN ($H_{m0}/d = 0.38$; uitgaande van de default-modelinstellingen)
- De trendlijn door de metingen van SL29 (Figuur 7.5) toont geen duidelijke afvlakking zodat de gemeten H_{m0}/d naar verwachting hoger zou kunnen uitvallen dan de hierboven genoemde maximale modelwaarde van 0.38.
- Bij FL2 is het databereik niet groter dan in het vorige meetseizoen.
- Metingen tijdens een zware storm (10 Beaufort; eens in de ca. 5 jaar te verwachten) zouden het huidige databereik aanzienlijk kunnen vergroten.

In paragraaf 7.5 wordt ingegaan op de validatie van het golfmodel SWAN. De validatie blijft in dit rapport beperkt tot suggesties voor de procedure en een bespreking van enkele voorbeeldgrafieken. Uitgebreide validatieresultaten zijn al elders gepubliceerd (Bottema, 2000b; Bottema et al, 2002). Voor details en verklaringen wordt dan ook verwezen naar deze publicaties; hieronder worden alleen de meest in het oog springende resultaten genoemd:

- golfhoogtes (H_{m0}) worden meestal goed (seizoen 2000-2001; Bottema et al, 2002) tot redelijk (dit seizoen) voorspeld
- de golfperiodes worden systematisch en vaak ook fors onderschat
- in de golfspectra worden de sterkte en positie van de spectrale piek niet altijd goed voorspeld door SWAN, terwijl de hoogfrequente flank van het SWAN-spectrum vaak niet steil genoeg afloopt.

Kennis van de ruwheid (ruwheidslengte z_0 en/of weerstandscoefficiënt C_D) van het wateroppervlak is cruciaal voor de modellering van wind, golven, waterstanden en stromingen, en daarmee ook voor de toetsing van dijken (zie het gevoeligheidsonderzoek van De Waal, 2002b; figuur 10.18). Recentelijk zijn twee totaal verschillende ruwheidstheorieën gepubliceerd (Makin, 2002; Radder, 2001); daarom zijn metingen juist nu opportuun. In paragraaf 7.6 is een inventarisatie van mogelijke bepalingsmethodieken voor z_0 en C_D gegeven, alsmede een aantal (zeer) voorlopige resultaten. De conclusies zijn als volgt.

- Windprofielanalyse blijkt ongeschikt als bepalingsmethodiek vanwege de sterk verstoorde 3-meter-windmetingen (Bottema, 2002) en vanwege ongunstig foutvoortplantingsgedrag.
- De vlaagfactormethode van Wieringa en Rijkoort (1983) is eveneens zeer gevoelig voor (systematische) meetfouten. De methode levert bij matige wind zeer lage (nauwelijks plausibele) ruwheden, mogelijk doordat de methode thermische stabiliteits-effecten in de atmosfeer

-
- verwaarloost. Tot slot vereist de methode zeker 5-10 kilometer open-water-strijklengte wat de methode ongeschikt maakt voor SL29.
 - De beste resultaten zijn te verwachten als gebruik wordt gemaakt van de 10-meter-wind, in combinatie met de gemeten (dus niet indirect afgeleide) impuls- en warmtefluxen. De huidige apparatuur voorziet hier niet in; één akoestische windmeter (sonic anemometer) zou wel al deze gegevens kunnen leveren
 - De ruwheidslengte z_0 en de weerstandscoefficiënt C_D zijn gevoelig voor diverse fysische effecten en aannames en eigenschappen van de bepalingsmethodiek. Het is zeker geen werk dat er binnen het huidige project 'eventjes' bijgedaan kan worden; in feite is het bij uitstek werk voor een ervaren onderzoeker op het gebied van meteorologie en oceanografie.

In paragraaf 7.7 worden de in paragraaf 4.4 bepaalde windsnelheids-verhoudingen geïnterpreteerd aan de hand van drie (conceptuele) modellen. De resultaten zijn als volgt:

- De atmosferische grenslaag boven het IJsselmeer heeft zich vermoedelijk nog niet helemaal aangepast aan de oppervlaktecondities aldaar. Zie Tabel 7.6 waarin de gemeten windsnelheidsverhoudingen uit par. 4.4 worden vergeleken met zogenaamde weerstandswetten voor uniform terrein (zie par. 7.7 voor uitleg).
- Eenvoudige modellen voor land-water-overgangen vv. (interne-grenslaagmodellen; bijv. Jensen et al., 1984) voldoen evenmin; zie Tabel 7.7. Dit type modellen houdt weliswaar rekening met de strijklengte maar de modelaannames en-formules zijn alleen geldig voor de eerste kilometers na een terreinovergang. De strijklengte ligt op het IJsselmeer echter vaak rond de 20 km.
- De open-water-transformatie-methode van Bak en Vlag (1999) lijkt conceptueel sterk op het laatstbesproken modeltype. Het verschil is dat de methode van Bak en Vlag veronderstelt dat alleen (en exact) de onderste 60 meter van de atmosfeer aan het onderliggende wateroppervlak is aangepast. In het theoretische kader van interne-grenslaagmodellen (zoals Jensen et al., 1984) komt dit overeen met een beperkt en min of meer vast strijklengtebereik van 1-2 km).
- De methode van Bak en Vlag (1999) lijkt bruikbaar als er op het gebruikte windmeetstation sprake is van *aanlandige* wind. Bij aflandige wind op het referentiestation kunnen de gemeten en berekende windsnelheidsverhoudingen echter tientallen procenten verschillen (Figuur 7.12). Het probleem lijkt hier te liggen in het feit dat Bak en Vlag (1999) veronderstellen dat de door hen gebruikte potentiële wind U_{pot} niet door de ruwheid van het onderliggende bodemoppervlak wordt beïnvloed. Analyse van Figuur 4.8 van Wieringa en Rijkoort (1983) en van Figuur 7.11 van het huidige rapport wijst op forse variaties van U_{pot} over slechts enkele kilometers afstand, wat alleen maar te verklaren is door aan te nemen dat U_{pot} wel door de ruwheid van het onderliggende (bodem)oppervlak wordt beïnvloed.
- Al met al kan geconcludeerd worden dat het windveld boven het IJsselmeer kennelijk alleen adequaat gemodelleerd kan worden met complexe analytische modellen (Kudryavtsev en Makin, 1996) of met numerieke stromings- of weersvoorspellingsmodellen. Een voorbeeld van het laatste modeltype is X-HIRLAM van het KNMI met een nog daarbij te ontwikkelen downscaling. Op dit laatste spoor lopen nu ook acties van het RIZA (Claessens et al., 2002).

8 Beschrijving stormperiodes

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van de stormperiodes in het seizoen 2001-2002, en van andere interessante meetsituaties. Eerst volgt een algemene beschrijving van het stormseizoen. Het aantal interessante situaties was dit seizoen zo groot dat een selectie van stormperiodes moest worden gemaakt; de volgende vier stormperiodes komen hierna aan bod⁴⁸:

- 8 en 9 november 2001 (par. 8.2 ; grafieken in Bijlage C)
- 28 december 2001 (par. 8.3 ; grafieken in Bijlage D)
- 19-26 februari 2002 (par. 8.4 ; grafieken in Bijlage E)
- 6-19 maart 2002 (par. 8.5 ; grafieken in Bijlage F)

Daarna volgt een beschrijving van enkele losse metingen (par. 8.6/Bijlage G). In elke paragraaf worden de grafieken uit de bijbehorende bijlage (C-G) besproken, waarbij de volgende zaken meestal aan bod komen:

- meetcondities
- overzicht van de metingen
- in het oog vallende meetresultaten
- meetproblemen

Tot slot worden de belangrijkste resultaten en conclusies nog eens samengevat in paragraaf 8.7.

8.1 Algemene beschrijving stormseizoen 2001-2002

Het seizoen 2001-2002 telde twee dagen met een volle windkracht 9 (wind > 21 m/s) en 46 dagen waarop het op of rond het IJsselmeer tenminste 15 m/s woei (zie ook Hoofdstuk 3). Deze paragraaf gaat wat verder in op de algemene weers- en windcondities van het seizoen 2001-2002. In de daaropvolgende paragrafen in dit hoofdstuk zullen een aantal interessante cases apart belicht worden. Gezien het grote aantal dagen met harde wind zal ditmaal een selectie moeten worden gemaakt van de meest interessante gevallen.

Juli 2001 was zeer warm en zonnig maar de 2^e en 3^e week waren koel, wisselvallig en vrij winderig. Met name de 11^e juli viel op met vrijwel de hele dag windkracht 7, en een fors deel van de middag windkracht 8. Ook augustus 2001 was zeer warm met in de 4^e week erg weinig wind en een hittegolf. De eerste twee weken waren echter erg onweersachtig en nat. Qua wind viel alleen de 8^e op toen er enige tijd windkracht 7 stond. September 2001 was koel, somber en net niet recordnat. De enige nazomerdag was de 28^e. In tegenstelling tot de vorige maanden had de wind een duidelijke voorkeursrichting: het noordwesten. Op de 4^e, 7^e, 8^e, 9^e en 10^e stond een harde noordwestenwind (7 Beaufort); op de 8^e werd zelfs even stormachtige wind gehaald (8 Beaufort). De 4^e week was daarentegen relatief rustig. Oktober 2001 was droog, zonnig en recordzacht. De wind had een voorkeur voor ZZW-richtingen. De eerste 10 dagen en het eind van de maand waren vrij winderig met op de 1^e, 8^e, 9^e en 31^e enige tijd harde wind (7 Beaufort). De 3^e en 4^e week waren daarentegen vrij rustig.

⁴⁸ Interessante situaties met stormachtige wind (8 Beaufort) die niet aan bod konden komen: 11/7/01 (doorstaande WZW 8), 8/9/01 (buiige NW 7 à 8), 26/1/02 en 28/1/02 (kortdurende resp. doorstaande WZW 8), 11/2/02 (ZW 8), 29/4/02 (buiige WZW 8) en 14/5/02 (slechts 1 à 2 uur, Z 8, snel ruimend naar ZW 8).

November 2001 was een vrij zachte en relatief rustige maand waarbij opviel dat oostenwinden nauwelijks voorkwamen. Veruit de meest interessante dag was 8 november toen de wind in zeer korte tijd van zwak ZW toenam tot stormachtig NNO. De buiige 9^e viel op door een niet zeer sterke maar wel extreem vlagerige wind. Tot slot zijn de 21^e en 22^e de moeite van het vermelden waard: op deze dagen stond een harde ZW- resp. NW-wind.

December 2001 kende twee gezichten. Van de 6^e tot de 18^e overheerste rustig hogedrukweer. Daarna ontstond een noordwestelijke stroming met op tal van dagen sneeuw(buien). Op kerstavond en vooral op de 28^e stond er veel wind: op de 28^e stond er geruime tijd een stormachtige westenwind (8 Beaufort). Ook januari 2002 kende twee gezichten. De eerste helft was rustig, droog en vrij koud met vrij veel zuid(oost)enwind. De laatste elf dagen van de maand waren recordzacht (9°C i.p.v. 2 à 3 °C) en nat, met zeer veel (ZW-) wind. Op de 20^e, 24^e, 26^e, 28^e, 29^e en 31^e woei het hard (7 Beaufort), op de 26^e en 28^e zelfs stormachtig (8 Beaufort).

Februari 2002 was zonnig, extreem nat en extreem zacht. De eerste tien dagen waren recordzacht, met temperaturen die normaal zijn voor eind april. Ook stond er bijzonder veel wind. Slechts op de 13^e, 15^e, 16^e en 17^e stond er niet minimaal een krachtige wind (6 Beaufort). Op 11, 19, 21, 22, en 23 februari stond er een stormachtige wind, op 26 februari een volle storm (uit WZW). Naast 26 februari zijn vooral 21 en 23 februari interessant, de 21^e vanwege de windrichting (N), de 23^e vanwege de vlagerigheid van de wind. Tot slot zijn de meerpeilen het vermelden waard: een groot deel van de maand kende erg hoge meerpeilen door een combinatie van veel neerslag en geringe spuiomogelijkheden.

Maart 2002 was zacht en vooral in de laatste week ook rustig, droog en zonnig. Op 9 maart veroorzaakte de passage van een klein lagedrukgebied korte tijd een volle westerstorm. Daarnaast was op 6, 7, 10, 14, 15 en 19 maart sprake van harde (tot stormachtige) wind. Vooral de nacht van 14 op 15 maart was interessant omdat er sprake was van harde tot stormachtige wind uit een zeldzame richting: het oosten.

April 2002 was zacht en begon extreem droog en zonnig, vaak met een stevige (noord)oostenwind. Later werd de maand wisselvalliger. Op 26, 27, 28 en 29 april was er sprake van zeer wisselvallig weer met elke dag harde wind (7 Beaufort) uit westelijke richtingen; op de buiige 29^e werd zelfs windkracht 8 gehaald.

Mei 2002 was vrij warm en droog. Op 5 mei was er een krachtige tot harde noordenwind, op 14 mei een harde tot stormachtige ZW-wind en op de 24^e stond er een harde ZZW-wind.

Juni 2002 tenslotte was warm, vooral dankzij de tropische 16^e en 17^e. Verder was de maand weinig opvallend. Harde wind kwam alleen voor op de 28^e en in de avond van de 30^e.

8.2 Stormperiode 8-9 november 2001

De 8^e en 9^e november 2001 kenmerkten zich door sterk wisselende wind-, waterstands- en golfcondities, waarbij er de 8^e 's middags enige tijd een stormachtige noordenwind (8 Beaufort) stond. Vanwege de zeer plotselinge veranderingen in wind- en golfcondities is dit ook een zeer geschikte case om de bruikbaarheid van waterbewegings- en golfmodellen in tijdsafhankelijke of instationaire modus te testen⁴⁹.

⁴⁹ Bij testen met het golfmodel SWAN bleek dat de grootte van de tijdstap forse invloed had op de rekenresultaten zolang de tijdstap groter was dan 5 minuten. Derhalve zijn zeer kleine tijdstappen vereist. Dat maakt weer dat instationair rekenen met SWAN zeer rekenintensief is (Claessens et al., 2002).

De windcondities voor de meetpalen en Stavoren-Haven zijn weergegeven in de figuren C1 en C2 in Bijlage C. De metingen van FL26 en een deel van de metingen van FL2 (zie de x-symbolen) zijn onbetrouwbaar vanwege het in Hoofdstuk 4 besproken “overflow”-probleem; de overige metingen zijn wel bruikbaar. Het gaat daarbij overigens om ruwe data waarop nog geen windrichtingscorrecties etc. zijn uitgevoerd. Uit figuur C1 blijkt dat de dag begon met een (vrij) krachtige zuidwestenwind, later in de ochtend viel de wind grotendeels weg. Aan het eind van de ochtend stak in zeer korte tijd (10-20 minuten) een krachtige tot harde NNO-wind op. Halverwege de middag stond er bij Stavoren een stormachtige wind die langzaam kromp naar NNW. Elders (FL2, SL29) stond iets minder wind al was de wind erg vlagerig. Dit alles hing samen met een lagedrukgebied dat over Noord-Nederland langstrok en de passage van het bijbehorende koufront. Achter het front traden sterke luchtdrukstijgingen op en kwamen in de aangevoerde arctische lucht actieve buien voor. Ook op de 9^e kwamen nog diverse winterse buien voor. De wind was daarbij extreem variabel: windstiltes werden afgewisseld met korte periodes met krachtige tot harde wind.

Een overzicht van de golfcondities op 8 en 9 november 2001 is gegeven in Figuur C3 en C4. Allereerst valt op dat de plotselinge windtoename rond 11h MET direct gevolgd wordt door een al even snelle toename van de golfhoogte: op diverse locaties liggen de golfhoogtes al na 20 à 40 minuten (ruim) boven de 0.5 meter. Bij FL25 en FL26 valt ook op dat de toename in golfhoogte en waterstand bijna gelijktijdig plaatsvindt, wat in deze situatie *niet* aan bodem-invloeden kan worden toegeschreven. Verder is er rond 14h een korte inzinking in de golfhoogte en golfperiode bij FL9 waar te nemen; de wind is dan NNO, de richting waarbij de strijklengte het kleinste is. Na 16h is er tevens een sprong in de piekperiode bij FL5. De wind is dan NNW. Kennelijk bereiken langere, niet lokaal opgewekte, golven dan de FL5-locatie. Op de 9^e november (Figuur C4) is het golfbeeld – net als de wind – sterk variabel: het golfbeeld op de zes meetlocaties vertoont een weinig coherent beeld. De enige uitzonderingen zijn de periodes rond 7h MET (passage buienlijn?) en na 19h MET (wegvallen wind en golven door een rug van hoge luchtdruk). Voorbeelden van golfspectra (8/11/01; 14-16h MET) zijn getoond in Figuur C5. FL5 en FL9 vertonen bimodale spectra; de rechterpiek valt toe te schrijven aan lokaal opgewekte jonge golven (met korte strijklengte), de linkerpiek met een frequentie van ruim 0.2 Hz aan langere golven die van elders komen binnenlopen. Bij FL2, FL25 en FL26 valt op dat er vrij veel energie zit bij lage frequenties. Bij FL2 hangt dat mogelijk samen met waterstandsschommelingen; bij FL25 mogelijk met golfbreking. Bij FL26 is geen verklaring voorhanden. Tot slot valt op dat FL25 de enige locatie is waar de staart van het spectrum minder snel afvalt dan f^{-4} (de zwarte lijn); het spectrum van FL25 heeft dus relatief veel hoogfrequente energie.

In Figuur C6 is een voorbeeld van gecombineerde golven- en windregistraties getoond voor FL25. In de middag van de 8^e valt op dat $H_{1/3}$ relatief hoog is ten opzichte van H_{m0} , mogelijk een teken van steile golven die nog net niet breken (zie ook Otta en van der Meer, 2000). Ook valt op dat T_{m01} die middag duidelijk lager is dan $T_{H1/3}$. De lage T_{m01} hangt vermoedelijk samen met de relatief grote hoeveelheid hoogfrequente energie in het golfspectrum (zie Figuur C5 en tekst hierboven).

Tijdens de verwerking van de golfdata verschijnen telkens plaatjes op het beeldscherm met de belangrijkste informatie, zie het voorbeeld van Figuur C7. De bovenste twee subplots tonen het meetsignaal. Daaronder worden de golfhoogteverdeling (links; op een Rayleigh-schaal), de golfperiodeverdeling (rechts) en het golfspectrum (onder) getoond. De golfhoogteverdeling vertoont bovenin een lichte afvlakking ten opzichte van de (als rechte lijn getoonde) Rayleighverdeling: een teken dat de golven de bodem beginnen te voelen. In het ruwe golfsignaal lijkt ook alsof de golven licht niet-lineair zijn (spitse

kammen, vlakke dalen); daarnaast zijn de golfgroepen goed te herkennen. Figuur C8 toont een histogram van de momentane waterstand (boven) en van de 'staggers'⁵⁰ daarin (onder). De verdeling is mogelijk iets scheefgetrokken door de niet-lineariteit van de golven maar de verstoringen in het histogram rond 142 cm en 187 cm overheersen. Ter plekke van de verstoringen komt ook een relatief groot aantal staggers voor; de verstoringen bleken samen te vallen met de steunen van de gebruikte capstaven (zie discussie voorkeurswaarden-probleem in par. 6.1.1).

In Figuur C9 t/m C11 zijn tot slot enkele registraties van het ruwe meetsignaal weergegeven: in blauw de relatieve momentane waterstand in cm (vóór omrekening naar waterstanden naar NAP), in zwart het 15-seconden lopend gemiddelde. Figuur C9 laat zien op 8 november 2001, rond 11h MET, een snelle waterstandstoename: in 300 seconden (5 minuten) neemt de waterstand toe van 130 naar 145 cm. De golfhoogte neemt zo mogelijk nog sneller toe, namelijk in een tijdsbestek van amper drie minuten (tussen 1150 en 1300 sec.). Figuur 10 toont een bijzondere registratie voor SL29: op de 8^e was er tussen 8h20 en 17h voortdurend sprake van waterstandsschommelingen met een periode van ca. 33 minuten. De schommelingen zijn het sterkst na de plotselinge windtoename van 11h MET (de wind blijft dan erg vlagerig). Opvallend genoeg zijn er ook al waterstandsschommelingen in de periode 4h-8h MET, toen er tijdelijk weinig wind was. Het is de moeite waard om na te gaan of hier sprake is geweest van seiches, ook al valt het thema "seiches" eigenlijk buiten het kader van het huidige project. Op de 9^e was er ook op het IJsselmeer sprake van waterstandsschommelingen, zie de registratie van FL9 in Figuur C11. De periode van de schommelingen is ruim een uur (ca. 70 minuten). De top-dal amplitude is met 5-15 cm relatief laag maar hierbij moet worden aangetekend dat FL9 dicht bij het zwaartepunt van het IJsselmeer en dat de oscillaties bij de randen sterker kunnen zijn⁵¹. De tijdelijke waterstandsval naar 130 cm hangt overigens samen met een onderhoudstocht, en de daarbij uitgevoerde capstaaftest (capstaaf 25 cm verplaatst; zie par. 6.1.3). De omstandigheden waren de 9^e niet ideaal voor het uitvoeren van een capstaaftest. De testen zijn namelijk alleen bruikbaar als de waterstandsverschillen een onnauwkeurigheid van minder dan 1 cm hebben; met de sterke waterstandsfluctuaties van de 9^e is zo'n fout snel gemaakt.

8.3 De storm van 28 december 2001

De periode 8-9 november was zeer geschikt voor het testen van tijdsafhankelijke golf- en waterstandsmodellen. Tijdens de 28^e december 2001 waren de condities juist lange tijd constant zodat deze case zeer geschikt is voor het testen van stationaire modellen (zoals de stationaire versie van het golfmodel SWAN).

De windcondities van de 28^e zijn getoond in Figuur D1. Rond 10h MET (zie de sprong in de windrichting) passeerde een actief koufront met lokaal onweer en zeer zware windstoten. Daarna klaarde het tijdelijk op en kwam er geruime tijd een windkracht 8 te staan met windsnelheden van meest 18-19 m/s. Daarbij ruimde de wind geleidelijk door het westen heen (260° op 12h MET, 280° op 20h). De bijbehorende golfcondities zijn getoond in Figuur D2. FL26 was uit de lucht door een aanvaring en FL9 was maar een deel van de tijd beschikbaar. Tijdens de storm zijn H_{m0} en T_{m01} bij FL5 duidelijk lager dan bij FL9. Vermoedelijk hangt dit samen met golfbreking bij FL5, al valt dit vermoeden niet hard te maken omdat de data van FL9 niet de hele dag beschikbaar zijn.

⁵⁰ Geval waar de waterstand minder dan 1 mm verschilt van de vorige meting (meestal 0.25 sec. eerder)

⁵¹ Iets soortgelijks geldt voor SL29 en het Slotermeer.

Verder valt op dat ook de meer beschutte locaties goed meedoen: SL29 haalt golfhoogtes van 0.6 m, FL25 golfhoogtes van 0.4 à 0.5 m. Uit de lage piekperiodes blijkt dat bij FL25 de lokaal opgewekte golven overheersen. Dat blijkt ook uit de golfspectra van FL25 (Figuur D3): de laagfrequente piek bij 0.25 Hz is slechts zwak ontwikkeld. Bij zwakkere westenwind is er vaak een meer uitgesproken bimodale vorm van het spectrum bij FL25. Bij FL5 is er ook sprake van een zwak nevenmaximum, en wel bij 0.4 à 0.5 Hz. SWAN-modelberekeningen suggereren dat dergelijke nevenmaxima op twee keer de piekfrequentie samenhangen met de invloed van driegolfwisselwerkingen (triads), die vaak actief zijn in de brandingszone. Bij FL2 en FL9 vertonen de spectra de gangbare JONSWAP-vorm: een spectrale piek die er iets uitspringt, iets rechts van de piek een deukje, en bij nog hogere frequenties een rechte spectrale staart. Opvallend genoeg werd deze JONSWAP-vorm niet waargenomen tijdens de sterk variabele condities van de 8^e november (zie par. 8.2 en Figuur C5).

Figuur D4 toont de gecombineerde golven- en windregistraties voor SL29. Deze wordt even later in meer detail besproken. Eerst gaan we nu in op de golfoploop. Na ruim een jaar uitval was de 28^e december 2001 een van de eerste dagen met analyseerbare golfoploop. Het $Z_{2\%}$ -oplooppniveau was tussen 13h en 20h MET gemiddeld 1.3 à 1.4 m, een kleine 20% hoger dan de golfhoogte H_{m0} . Figuur D5 toont een voorbeeld van een 20-minuten-golfoploopregistratie. De hoogste golven kwamen tot 1.92 m boven NAP. Dat is juist tot aan de middenberm met de beheersweg, waarvan de onderkant op 1.87 m boven NAP ligt.

Een voorbeeld van een 20-minuten golvenregistratie is getoond in Figuur D7, voor de locatie FL5. Het golfsignaal (bovenste twee subplots) vertoont duidelijk niet-lineaire trekken: spitse kammen en ondiepe dalen. De verdeling van individuele golfhoogtes (links daaronder) vlak duidelijk af boven de 1.2 meter, een teken dat de golven dieptegelimiteerd zijn. Het golfspectrum (onder) vertoont twee hoofdpieken rond 0.25 Hz en een heel zwak 2^e maximum rond 0.45 Hz. De dubbele hoofdpiek berust vermoedelijk op toeval. Het zwakke 2^e maximum hangt waarschijnlijk samen met golfbreking en de eerder genoemde driegolfwisselwerkingen.

Tot slot wordt nog wat verder ingegaan op de registraties van SL29. Uit figuur D4 blijkt dat tijdens de storm de capstaafwaterstanden ("WL") ca. 15 cm toenemen maar de druksensorwaterstanden ("Wst") niet. Voor en na de storm komen beide waterstandsmetingen wel goed overeen. Figuur D8 toont een 20-minutenregistratie van SL29. De golven lijken enigszins niet-lineair te zijn (spitse kammen, vlakke dalen) maar de golfhoogteverdeling suggereert dat de golven niet dieptegelimiteerd zijn (ondanks het feit dat de golfhoogte/waterdiepte-verhouding H_{m0}/d ongeveer 0.35 was). De niet-lineariteit van de golven wordt bevestigd in Figuur D9, waar de scheefheid van het histogram van de momentane waterstand wederom duidt op vlakke golfdalen en spitse golfkammen. Wellicht onderschat de druksensor van SL29 de waterstand als er sprake is van dergelijke niet-lineaire (asymmetrische) golven, hoewel het mechanisme hierachter nog niet duidelijk is.

8.4 Stormperiode 19-26 februari 2002

De 60-daagse periode van 20 januari tot 21 maart was bijzonder winderig: op bijna de helft van de dagen werd rond het IJsselmeer de windkracht 7 gehaald. Van 19 tot 26 februari 2002 werd zelfs bijna elke dag windkracht 8 gehaald; op de 26^e stond er een volle WZW-storm. Daarnaast kenmerkte de periode zich door sterk stijgende meerpeilen: het meerpeil steeg van NAP -10 cm naar NAP + 40 cm.

Figuur E1 geeft een overzicht van de windcondities gedurende de gehele stormperiode. In figuur E2 en E3 wordt nog wat verder op enkele deelperiodes ingezoomd. De windcondities in de periode waren sterk afwisselend: de 19^e een stormachtige NW-wind (NW-8) bij de passage van een buienlijn, de 20^e W-7 à 8 bij de passage van een front, in de ochtend van de 21^e een zeer vlagerige N-7 na de passage van een trog, vervolgens een halve dag rustig weer door een rug van hoge druk, de ochtend van de 22^e ZZW-8 bij een naderend warmtefront, de 23^e een zeer vlagerige W-7 à 8 en tenslotte op de 26^e een volle WZW-storm. De storm van 26/2/2002 was een 'nette' constant doorstaande storm, net als die van 28/12/2001; de bijbehorende depressie trok ca. 200 km ten Noorden van de Wadden langs. Wel viel op dat het bij FL2 wat minder hard heeft gewaaid dan bij FL26 en Stavoren (Figuur E3); helemaal homogeen was het windveld niet. Verder was er rond 6h MET sprake van een merkwaardig gedrag van de wind bij Stavoren-Haven. Mogelijk is hier sprake van beschutting-effecten, zie ook de hoge windsnelheidsverhouding $U_{10}(FL2)/U_{10}(SH)$ in Tabel 4.4 (bij 190°). Bij de andere stormdagen viel op dat de gemiddelde wind bij SL29 relatief laag was als de wind erg vlagerig was, zoals op de 21^e en 23^e (Figuur E2). Op de 21^e gold dat ook voor FL2 (zie ook de golven in Figuur E5); op de 23^e zijn de data voor FL2 niet getoond omdat de winddata van FL2 onbetrouwbaar zijn door "overflow"-problemen (zie Figuur 4.4).

In de figuren E4-E8 is een overzicht van de golfcondities op de 20^e, 21^e, 22^e, 23^e en 26^e februari gegeven. Op de 20^e (Figuur E4) valt vooral op dat FL25 en FL26 's avonds ineens grotere golfhoogtes en -periodes hebben dan de andere meetpalen. Dit komt door de naar Noord gedraaide wind en de langere strijklengte bij FL25 en FL26. Op de 21^e (Figuur E5) is het effect van winddraaiing wederom goed te zien, in de vroege ochtend – bij Noordenwind – geven FL25 en FL26 de hoogste golven, in de avond – bij ZZW-wind – FL5 en FL9. De golfhoogte, golfperiode en waterstand van FL5 vertonen overigens vreemde afwijkingen op de 21^e; dit hangt samen met een onderhoudstocht. In de ochtend van de 22^e (Figuur E6) heeft FL9 ineens een aantal vreemde meetwaarden (hoge H_{m0} ; lage T_{m01}). Dit hangt samen met het voorkomen van diverse uitzonderingswaarden (-6999) in de databestanden; in enkele bijzondere gevallen worden deze bij de verwerking niet uitgefilterd. De uitzonderingswaarden doen zich overigens vrijwel alleen voor als de golven bij FL9 over de top van de capstaaf aldaar heenslaan. Deze problemen doen zich ook op de 23^e voor (Figuur E7). Verder voldoet het golfbeeld op de 23^e redelijk aan de verwachtingen. Wel is de sterke vlagerigheid van de wind duidelijk terug te zien in de variabiliteit van de golfcondities⁵². De metingen van de 26^e zijn weergegeven in Figuur E8. Bij FL26 worden tijdens de storm golfhoogtes (H_{m0}) van ruim 1 meter gehaald; bij FL2, FL5 en FL9 golfhoogtes van bijna 1.5 m. Bij FL9 zijn er diverse verdachte meetpunten (H_{m0} buiten het schaalbereik, te lage T_{m01}). Bij FL5 zien de golfparameters er goed uit maar wordt de waterstand sterk overschat doordat de capstaaf tijdens de storm lekslaat. Ook bij SL29 is een waterstandstoename tijdens de storm te zien, ditmaal echter door opwaaiingseffecten.

Verder zijn enkele combinatieplots van wind en golven gemaakt. Figuur E9 toont de resultaten voor FL5. In een aantal gevallen is $T_{H1/3}$ veel groter dan T_{m01} ; dit kan duiden op (bijna) brekende golven op ondiep water. Verder zijn er enkele losse uitschieters in de grafiek; deze hangen samen met de onderhoudstocht op de 21^e. Tot slot valt op dat de golfhoogtes voor FL5 erg hoog zijn: H_{m0} haalt meermalen de 1.5 m; de hoogste (individuele) golf reikt

⁵² Mogelijk zorgt de vlagerigheid daarnaast voor een kleine verhoging van de gemiddelde H_{m0} en T_p . Op 23/2/2002 waren H_{m0} en T_p tussen 4h en 9h MET namelijk ca. 5% hoger dan verwacht op grond van de windcondities (snelheid ca. 15.5 m/s, richting ca. 275°) en de resultaten uit de Tabellen 7.2-7.4.

zelfs tot 2.4 m (zie H_{\max} op de 26^e). Deze hoge waarden hangen samen met de hoge meerpeilen tijdens de stormperiode. Figuur E10 toont de resultaten voor FL25. Hier vallen vooral de hoge golven van de 21^e op. De piekperiodes T_p zijn soms veel hoger dan de andere periodematen; dit hangt samen met elders opgewekte (langere) golven die FL25 soms bereiken, vooral bij relatief rustig weer. Tot slot vallen de sterk wisselende waterstanden op. Dit hangt samen met op- en afwaaiingseffecten die bij FL25 relatief sterk zijn (vergeleken met de andere meetlocaties). In Figuur E11 worden de resultaten van SL29 getoond. Golfhoogtes (H_{m0}) van 50 cm worden op vrijwel alle meetdagen gehaald; daarnaast kan geconstateerd worden dat ditmaal ook tijdens harde wind de capstaaf- en druksensorwaterstanden ("WL" resp. "Wst") goed overeen komen. Dit in tegenstelling tot de situatie op 28/12/2002 (par. 8.3). Voorbeelden van golfspectra zijn getoond in Figuur E12-E14. De spectra tijdens de harde noordenwind op de 21^e februari vertonen weinig bijzonderheden⁵³. Wel valt op dat FL2 alweer relatief veel laagfrequente energie heeft. Na de 21^e komt dit nog op talloze dagen voor. Het teveel aan laagfrequente energie doet zich daarbij onder zeer diverse omstandigheden voor, zodat gedacht moet worden aan een probleem met de gebruikte capstaaf (effect voorkeurswaarden?) en/of de bijbehorende oscillator-unit. Op de 23^e vallen de spectra van FL9 en SL29 uit de toon. Het afwijkende spectrum van FL9 hangt samen met de hierboven genoemde verdachte meetpunten. Bij SL29 is er veel laagfrequente energie door een 20 sec. durende elektronische storing waarbij de gemeten waterstand ineens 50 cm inzakte. Het is toevallig dat de storing hier juist opduikt want dergelijke storingen zijn kortdurend en zeldzaam, en worden daardoor zelden opgemerkt. Bij FL25 tenslotte is er een gemengd golfveld met een relatief zwakke inkomende 'deining' en een relatief sterke bijdrage van lokaal opgewekte golven. De spectra van de storm van 26 februari zijn getoond in Figuur E14. Het spectrum van FL9 wordt nu volledig gedomineerd door storingen. Het spectrum van FL5 oogt goed, ondanks het feit dat de gemiddelde waterstand sterk overschat werd (Figuur E9). Bij 0.36 Hz is er een zwak secundair maximum dat vermoedelijk samenhangt met driegolfwisselwerkingen. De golfoplooplegevens van de 26^e zijn getoond in Figuur E15 en E16; daarnaast geven Foto 13-15 in Bijlage B (en de voorplaat van dit rapport) een impressie van de condities aldaar. Tijdens de storm was $Z_{2\%}$ wederom een kleine 20% hoger dan H_{m0} . Uit de 20-minuten-registraties (Figuur E16) blijkt dat middenberm soms meer dan een minuut lang onder water blijft. Daarbij komen de hoogste golven tot ca. 2.7 m boven NAP. Dat is ca. 80 cm boven de middenberm en krap 2 meter onder de kruin van de dijk. Enkele 20-minuten-golfregistraties tijdens de storm van de 26^e zijn getoond in Figuur E17-E19. Bij FL9 (Figuur E17) vallen vooral afgevlakte golfhoogteverdeling op, en de afgekapte golven in de tijdregistratie. De laatste hangen samen met het feit dat uitzonderingswaarden (-6999) zijn vervangen door het voorgaande meetpunt. Ook FL5 (Figuur E18) heeft een afgevlakte golfhoogteverdeling. Bij FL5 moet dit echter worden toegeschreven aan golfbreking, zoals blijkt uit de niet-lineaire (U-vormige) golven en uit het spectrum dat onder andere neigt tot een zwakke secundaire piek rond 0.38 Hz. Overigens valt op dat alle golfkenmerken bij FL5 er normaal uitzien terwijl de gemeten waterstand een onwaarschijnlijke 1.48 m boven NAP bedraagt. De te hoge waterstand hangt samen met een lekgeraakte en volgelopen massabuis van de capstaaf. Over de registratie van SL29 (Figuur E19) zijn relatief weinig bijzonderheden te melden. De golven lijken de bodem wat te voelen want de golfhoogteverdeling vlakkt iets af. Daarnaast bevat het spectrum relatief veel energie rond 0.5 Hz, zie ook Figuur E9.

⁵³ Bij FL5 en FL9 hangt het kleine spectrale piekje/hobbeltje waarschijnlijk samen met eerder/elders opgewekte golven die het gebied (met een omweg) binnenlopen.

Een voorbeeld van een histogram (van FL9) is getoond in Figuur E20. De niet verwijderde capstaafsteunen (die normaal droog staan) rond 205 en 270 cm komen duidelijk terug in de registratie. Daarnaast geeft het zeer grote aantal staggers boven 260 cm een indicatie van het aantal keren dat golven over de top van de capstaaf heensloegen. Feitelijk gaat het hier om (weggecorrigeerde) uitzonderingswaarden in de metingen; uitzonderingswaarden die nauw samenhangen met situaties waarbij golven over de top van de capstaaf heensloegen.

Tot slot zijn er ook in deze stormperiode seiche-achtige verschijnselen waargenomen. Figuur E21 toont langzaam uitdempende waterstandsschomme-lingen bij SL29, tijdens de ochtend van de 21^e februari. De periode van de schommelingen is ca. 35 minuten, vergelijkbaar met de schommelingen op 8/11/2001. Figuur 22 toont enkele op de 23^e februari bij FL25 waargenomen waterstandsschommelingen. De periode is ditmaal ca. 90 minuten (tegen 70 min. bij FL9, op 9/11/2001); de top-dal-amplitude ligt in de orde van 25 cm wat vrij groot genoemd kan worden voor een relatief vrijliggende locatie.

8.5 Stormperiode 6-19 maart 2002

De periode 6-19 maart telde nog drie gevallen met harde tot stormachtige wind, en één volle storm. De nadruk zal in deze paragraaf liggen op de storm van de 9^e. Daarnaast zal kort worden ingegaan op de 14^e en 15^e maart toen er een bijzonder harde oostenwind stond: bij vlagen nèt windkracht 8 (stormachtig). Door deze ongebruikelijke richting en door de hoge meerpeilen ontstond forse wateroverlast bij enkele buitendijkse gebieden aan het Markermeer (Schardam e.o.).

De storm op de 9^e maart hing samen met een klein lagedrukgebied dat in de avond ca. 100 km Noord van de Wadden langstrok. De windcondities zijn weergegeven in Figuur F1 (Bijlage F). De storm telde twee pieken, één rond 20h en één rond 22h. De kleinschaligheid van het systeem bleek ook uit de windrichting die tijdens de storm vrij snel van WZW naar WNW ruimde. De storm was niet helemaal ideaal omdat windrichting en windsnelheid niet constant waren; het was op het IJsselmeer echter wel een van de hevigste stormen van de laatste paar jaar.

Figuur F2 geeft een overzicht van de golfcondities. Net als tijdens de stormen van 30/10/2000 (Bottema, 2002) en 26/2/2002 werden bij FL2 en FL9 – en in mindere mate bij FL5 en FL26 – golfhoogtes (H_{m0}) van ca. 1.4 meter en golfperiodes (T_p) tot ca. 5.5 seconde gehaald. Deze piekperiodes zijn niet veel lager dan de voor dijkontwerp maatgevende piekperiode in grote delen van het IJsselmeer, die ca. 6 seconden is (Rijkswaterstaat, 2002). Een overzicht van de golfspectra is gegeven in Figuur F3. De spectra van FL9 zijn weggelaten omdat de data teveel uitzonderingswaarden bevatten (-6999). De overige spectra ogen normaal; er valt weinig te melden dat niet al in eerdere paragrafen is besproken.

Figuur F4 toont een combinatieplot van wind en golven van de 9^e en 10^e maart, voor de locatie FL2. Naast de golven valt vooral de forse opwaaiing (ruim 50 cm) tijdens de storm op. De combinatie van hoge meerpeilen, opwaaiing en forse golven gaf uiteraard weer aanleiding tot flinke golfoploop, zie Figuur F5. Uit Figuur F5 en uit de detailregistratie van de golfoploop (Figuur F6) blijkt echter dat de golfoploop net iets minder sterk was dan op de 26^e februari.

Figuur F7 toont nog een golvenregistratie bij FL2 op het hoogtepunt van de storm. Het golfsignaal vertoont duidelijke golfgroepen; daarnaast lijken de golven ietwat niet-lineair (scherpe kammen en vlakke dalen). De hoogste golven lijken enige bodeminvloed te ondervinden, blijktens de ietwat

afvlakkende golfhoogteverdeling. Figuur F8 toont nog een histogram van de momentane waterstand bij FL2. Het histogram vertoont duidelijke voorkeurswaarden, die samenhangen met capstaafsteunen rond 320, 265, 410 en 455 cm. Daarnaast is er ook een kleine voorkeurswaarde rond 505 cm (zie ook de staggers in de onderste subplot). Dit is de maximale waarde van het meetsignaal; als deze gehaald wordt komen de golven aan of over de top van het meetinstrument.

Behalve de storm van 9 maart is ook de situatie van de 14^e en 15^e maart het bespreken waard. Op de nadering van een W-O geörienteerd warmtefront nam de oostenwind in de middag van de 14^e toe. Aan de westzijde van het IJsselmeer werd in de avond bijna een windkracht 8 gehaald (Figuur F9). Bij FL2 en SL29 was de strijklengte over water met ca. 1 km aanzienlijk korter dan bij FL26 en Wijdenes. De windsnelheden op FL2 en SL29 waren dan ook duidelijk kleiner, maar nog altijd een dikke windkracht 6. In de ochtend van de 15^e nam de wind langzaam af terwijl deze geleidelijk iets ruimde.

Figuur F10 geeft een overzicht van de golfcondities op de 14^e maart. Bij FL25 en FL26 werden golfhoogtes (H_{m0}) van ruim 0.9 resp. ruim 1.2 meter gehaald. Opvallend genoeg blijft de golfhoogte bij FL25 de hele 14^e en 15^e maart lager dan bij FL26, ook bij relatief lage windsnelheden. Het laatste was op het eerste gezicht verrassend. Nader onderzoek wees echter uit dat bij oostenwind ook het golfmodel SWAN voorspelt dat H_{m0} bij FL25 lager is dan FL26, ook bij relatief lage snelheden van ca. 8 m/s (4 à 5 Beaufort). Kennelijk spelen golfbreking en bodemwrijving daar zelfs bij matige aanlandige wind al een rol. In Figuur F10 valt verder nog op dat bij FL2 de piekperiode gedurende de middag van de 14^e maart heen en weer springt tussen ca. 1.8 en 2.8 sec. Ook de spectrale piek van FL2 (Figuur F11) oogt nogal breed; feitelijk heeft FL2 bijna een bimodaal spectrum. De lokaal opgewekte golven vermengen zich bij FL2 kennelijk met elders opgewekte golven, die vermoedelijk uit het NNO komen. De andere spectra vertonen weinig bijzonderheden, of het moet een aanzet tot een zwak secundair piekje in het spectrum van FL25 zijn. Helaas zijn er de 14^e en 15^e vrijwel geen data van FL5 en FL9 beschikbaar: juist op deze dagen heeft iemand de stroom op het walstation FRIGOL onderbroken. Figuur F11 en Figuur F12 tonen tenslotte nog een tweedaags wind-/golvenoverzicht voor FL25 resp. een 20-minuten-registratie van FL25. De golven hebben wel vrij scherpe kammen en vlakke dalen maar de golfhoogteverdeling vertoont nauwelijks ondiep-water-invloeden (in de vorm van een afvlakking bij hoge golfhoogtes), ook al is de golfhoogte/waterdiepte-verhouding H_{m0}/d ruim 0.35.

8.6 Dagelijkse gang, algenaangroei en capstaaftesten

Deze paragraaf is een vergaarbak voor interessante metingen die niet elders konden worden ondergebracht.

Allereerst het thema “dagelijkse gang”. Zowel in veel golfmodellen (HISWA, SWAN) als bij de analyse van een deel van de meetresultaten is uitgegaan van een thermisch neutrale atmosfeer, d.w.z. een atmosfeer waar de warmte-uitwisseling in de lucht en tussen lucht en water (of bodem) geen invloed heeft op de turbulentie (en de wind) in de atmosfeer. Met atmosfeer wordt hier overigens dat deel van de atmosfeer bedoeld dat wordt beïnvloed door het aardoppervlak, de atmosferische grenslaag. In het vorige rapport (Bottema, 2002) is plausibel gemaakt dat er in diverse gevallen duidelijk sprake is van een niet-neutrale atmosfeer. De huidige instrumentatie liet echter niet toe om de afwijkingen van de neutrale situatie (de zgn. “stabiliteitseffecten”) te kwantificeren. Er is echter wel een mogelijkheid om indirect na te gaan of

sprake is van significante stabiliteitseffecten. De dagelijkse gang van de wind nabij het aardoppervlak wordt namelijk voor een zeer groot deel bepaald door stabiliteitseffecten: boven land is er 's nachts in de regel een stabiele atmosfeer en weinig wind en overdag een onstabiele atmosfeer (thermiek!) met relatief veel wind, ook al vertoont de wind boven de atmosferische grenslaag (bijv. op 1 km hoogte) geen dagelijkse gang.

De vraag die we nu willen beantwoorden is: *hoe veel wind is er nodig om er veilig van uit te kunnen gaan dat we stabiliteitseffecten – en de bijbehorende dagelijkse gang in de wind – verwaarloosbaar zijn?* We zoeken dus dagen met relatief veel wind én een ongestoorde dagelijkse gang. Dat is lastig want veel wind gaat vaak gepaard met wisselvallig (lagedruk-)weer waar de dagelijkse gang verstoord wordt door de passage van fronten, buienlijnen, etc. Op 3 april 2002 was er echter sprake van een fraaie situatie met weinig bewolking, waarbij lagedruk en fronten bovendien ruim op afstand waren (Engelse en Franse westkust). Daarbij lag de luchttemperatuur tussen 10°C en 19°C en de watertemperatuur rond 8°C. De windrichting (Figuur G1) liep daarbij heel langzaam van ONO naar O terwijl er bovendien maar weinig verschillen tussen de verschillende meetstations waren. Het eerste duidt op weinig verandering in de algemene weersituatie, het tweede op de afwezigheid van verstoringen op regionale schaal (zeewind-effecten etc.). Uit de windsnelheidsgrafiek komen diverse interessante zaken naar voren. Bij Stavoren-Haven – bij oostenwind een echt landstation – is er sprake van een duidelijke dagelijkse gang in de windsnelheid: 's nachts ca. 5 m/s wind, overdag 8 à 9 m/s wind. FL2 en SL29 vertonen een soortgelijke dagelijkse gang, maar de windsnelheden overdag zijn hoger: tot 12 m/s. Bij de stations met een lange strijklengte over water is de dagelijkse gang duidelijk zwakker: 7-10 m/s bij Wijdenes; 8-11 m/s bij FL26. Het meest interessant is echter de windsnelheidsverhouding $U_{10}(FL2)/U_{10}(FL26)$. 's Nachts ligt $U_{10}(FL2)/U_{10}(FL26)$ op een waarde rond 0.7, overdag rond 1.1. Twee zaken zijn hier het vermelden waard.

Allereerst blijkt dat locaties met een korte strijklengte over water (FL2, SL29) hogere windsnelheden kunnen hebben dan locaties met een lange strijklengte (FL26, Wijdenes). Op het eerste gezicht is dit een nogal onverwacht resultaat. Het lokale windmaximum nabij FL2 en SL29 is echter te verklaren uit het feit dat als lucht van een warm en ruw landoppervlak een koud en glad wateroppervlak bereikt, de wind in de eerste kilometer(s) vooral op de verminderde ruwheid reageert, en in tweede instantie ook op de veranderde stabiliteitscondities. Berekingen van Van Vledder (1999; fig. 3.8) op basis van het atmosferische model van Kudryavtsev en Makin (1996) produceren voor soortgelijke condities een vergelijkbaar windverloop, met een lokaal windmaximum op een strijklengte van ca. 2 km.

Ten tweede blijkt dat er grote dag-nacht-verschillen voor kunnen komen in windsnelheidsverhoudingen zoals $U_{10}(FL2)/U_{10}(FL26)$, wat tenminste een deel van de spreiding in Figuur 4.4 verklaart. De grote dag-nacht-verschillen duiden op forse stabiliteitseffecten. Blijkens Figuur G1 zijn zulke stabiliteitseffecten ook nog mogelijk als de boven land resp. open water gemeten windsnelheden 9 m/s en 12 m/s bedragen (windkracht 5 resp. windkracht 6). Dit is een bevestiging van de bevindingen uit het vorige meetrapport (Bottema, 2002) maar het weersprekt Wieringa en Rijkoort (1983) die stellen dat stabiliteitseffecten al vanaf 6 m/s te verwaarlozen zijn.

Tot nu toe zijn vooral stabiliteitseffecten op de gemiddelde wind besproken. Over de turbulentie-condities op de 3^e april kan wellicht een compleet wetenschappelijk artikel geschreven worden, zeker als ook de spectra van de turbulente windfluctuaties geanalyseerd worden. Dit valt echter buiten het bereik van het huidige onderzoek. Hier volstaan we met de opmerking dat de turbulentie-intensiteit T_u bij FL26 op de 3^e april tussen 5% en 8% schommelde. Dat is ruim tot ver onder de gebruikelijke waarde van ca. 10% (zie par. 4.7).

Een tweede vraag die nog niet in (Bottema, 2002) beantwoord kon worden is: *In hoeverre is er – gegeven de windsnelheid en windrichting – sprake van stabiliteitseffecten op de golfgroei?* Figuur G2 geeft een overzicht van de golfcondities van de 3^e april 2002. Uit verdere analyses bleek dat in de middag van de 3^e april de golfhoogtes bij FL26 door het koude IJsselmeerwater (en de bijbehorende sterk stabiele condities) ca. 20% lager waren dan verwacht op grond van de resultaten van Hoofdstuk 6 en 7, *mits* FL2 als referentielocatie voor de wind werd gekozen en niet FL26. Al met al zijn er dus aanwijzingen dat stabiliteitseffecten niet alleen invloed hebben op de wind maar dat stabiliteits-effecten – gegeven de wind – ook invloed kunnen hebben de golven. Er zijn nu dus – in tegenstelling tot het vorige seizoen – aanwijzingen gevonden voor golfgroei die direct door stabiliteitseffecten wordt beïnvloed; een hard bewijs is er overigens nog niet. De relevantie van directe stabiliteitseffecten op golfgroei is overigens dat in zo'n geval niet alleen windmodellen maar ook *golf*modellen rekening zouden moeten houden met stabiliteitseffecten.

Een tweede aandachtspunt is “algenaangroei”. Figuur G3 geeft een wind- en golvenregistratie rond een onderhoudstocht en bijbehorende schoonmaakbeurt (op 17/7/01 rond 13h; uur 37 op de tijd-as). Direct na de schoonmaak springt de gemeten golfhoogte van ca 5cm naar ca. 25 cm, bij nagenoeg constante wind. De golfperiodematen blijven gelijk of worden na de schoonmaak kleiner. Dat geldt in het bijzonder voor $T_{H1/3}$ die voor de schoonmaak veel te hoog was ten opzichte van de andere golfperiodematen (het algendetectiecriterium in par. 6.1.2 is op dergelijke waarnemingen gebaseerd). Tenslotte blijft de gemeten waterstand na de schoonmaak niet meer op NAP – 14 cm hangen, maar varieert tussen 16 en 22 cm onder NAP.

Figuur G4 geeft een voorbeeld van een 20-minuten-registratie tijdens een periode met sterke algenvervuiling. Uit het signaal blijkt dat de waterstand grote moeite heeft van de nul-lijn los te komen en dat slechts af en toe enkele – meestal wat grotere – golven worden gemeten. Dat alles blijkt ook uit de duidelijk concave vorm van de golfhoogteverdeling. Wellicht biedt het laatste punt ook een aanknopingspunt voor een verbeterd algendetectiecriterium.

De in paragraaf 6.1.3 besproken “capstaaf testen” (veldcalibraties) vormen een laatste punt van aandacht. Figuur G5, G6 en G7 geven voorbeeldregistraties van enkele veel voorkomende gevallen. De lichtblauwe lijnen komen daarbij overeen met de momentane waterstand; deze lijnen geven een indruk van het gemeten golfsignaal. De dikke zwarte lijnen komen overeen met een 15-seconde lopend gemiddelde; zij geven een indruk van de waterstand nadat het golfsignaal is uitgefilterd.

Figuur G5 geeft een voorbeeld van een bijna perfecte capstaaf test (SL29; 27/11/2001; golfhoogte in de orde van 15 cm). Volgens het uitvoeringsverslag is de capstaaf 25 cm (omlaag) verplaatst. Blijkens de registratie is dit gedurende bijna een uur gebeurd; de gemeten waterstands-verschillen voor en na verplaatsing zijn 25 cm of een fractie meer. Na het weer omhoogzetten van de capstaaf – aan het eind van de test – blijkt de gemeten waterstand gedurende enkele minuten nog een fractie door te zakken. Straks komen we nog terug op dergelijk verloop.

Figuur G6 (FL25; 29/11/2001) is een voorbeeld van een éézijdige capstaaf test. De capstaaf is hier eerst op het dek gehesen en schoongemaakt, en daarna direct in de verhoogde positie geplaatst. Dit betekent dat de calibratie slechts aan de hand van één meting (capstaaf uit verhoogde stand terug naar uitgangspositie) kan worden gecontroleerd. Het wordt dan erg lastig conclusies te trekken uit de resultaten omdat er al gauw rond 2 cm onzekerheid in de gemeten waterstandsverschillen zit, bijvoorbeeld door verloop in de waterstanden waarvan ook in Figuur G6 sprake is.

Figuur G7 toont een moeilijk interpreteerbare capstaaftest (FL26; 18/12/2001). Ondanks rustig weer (windkracht 3) zijn er allerlei waterstandsschommelingen en –sprongen. Bovendien lijkt op zeker moment (tijd = 12000 sec.) een niet-gedocumenteerde tweede test te zijn uitgevoerd. Ook de eerste test is niet ideaal. Voor de capstaafverplaatsing stijgt de gemeten waterstand geleidelijk; erna slaat de stijging ineens om in een daling. Aan de capstaaf kan dit niet liggen: die is ca. 50 cm omhoog verplaatst en kan moeilijk nog een paar centimeter omhoog kruipen. Vermoedelijk hangt de waterstands daling toch samen met de capstaafverplaatsing; de gemeten waterstand daalt direct na de capstaafverplaatsing immers relatief sterk, om enige tijd later af te vlakken. Bovendien wordt een dergelijk verloop zeer vaak waargenomen na een opwaartse capstaafverplaatsing, in zeer zwakke vorm bijvoorbeeld ook in het rechterdeel van Figuur G5. Mogelijk heeft het dalende verloop van de gemeten waterstand te maken met het geleidelijk opdrogen van (een deel) van de capstaaf; zie ook Hoofdstuk 6.

8.7 Samenvatting en conclusies

Het seizoen 2001-2002 kende veel voor analyse geschikte stormperiodes. Er waren bijna 50 dagen met windkracht 7 op of rond het IJsselmeer, ca. 18 dagen met windkracht 8 en 2 dagen met windkracht 9 (26/2/2002 en 9/3/2002). Vergeleken met eerdere seizoenen was het aantal dagen met windkracht 7 of 8 bijzonder hoog. Daarom is er voor gekozen een deel van de gegevens uitgebreid te belichten aan de hand van grafieken en bijbehorende toelichting (zie de bijlagen C-G resp. paragraaf 8.2-8.6), en een ander deel niet apart te bespreken. In deze paragraaf zullen alle details uit de vorige paragrafen niet herhaald worden. Wel zullen een aantal opvallende resultaten hier nog eens apart genoemd worden, zeker als ze niet al elders in het rapport aan bod zijn gekomen. Zie de onderstaande opsomming:

- 1) Op 8/11/2001 viel dat de wind binnen 20 minuten van windstille naar krachtig (6 Beaufort) kan toenemen en dat golven en waterstand daar (ruim) binnen het uur op kunnen reageren. Er zijn zelfs aanwijzingen voor het bestaan van *golffronten*: bij FL25 voltrok de waterstands- en golfhoogtetoeename zich binnen 5 minuten.
- 2) Op 8 en 9 nov. alsmede 23 feb. zijn op het Slotermeer en IJsselmeer seiche-achtige verschijnselen (bui-oscillaties) met een periode van ca. 35 resp. 70-90 minuten en een top-dal amplitude van 10-30 cm.
- 3) Tijdens de stormen van 26/2/2002 en 9/3/2002 zijn piekperiodes T_p waargenomen tot 5.5 sec, niet veel lager dan de maatgevende T_p 's voor dijkontwerp (ca. 6 sec; Rijkswaterstaat, 2002).
- 4) Stavoren-Haven heeft bij ZZW-wind mogelijk last van beschuttingseffecten (nabije obstakels?)
- 5) Uit de metingen van 3/4/2002 (par. 8.6) blijkt dat bij windsnelheden van 12 m/s (over open water) de atmosferische (thermische) stabiliteit grote invloed kan hebben op wind, turbulentie en mogelijk ook golf-groei. Dit is in tegenspraak met Wieringa en Rijkoort (1983) die stellen dat stabiliteitseffecten (op wind) al vanaf 6 m/s verwaarloosbaar zijn.
- 6) Enkele meetproblemen zijn nader geïllustreerd:
 - a. gevolgen van algenaangroei (par. 8.7/bijlage G)
 - b. problemen bij de interpretatie van capstaaftesten (idem)
 - c. golven die over de top van het meetinstrument heenslaan (en de daarmee samenhangende uitzonderingswaarden bij FL9)
 - d. verschillen tussen de capstaaf- en druksensorwaterstand bij SL29 (par. 8.3/Bijlage E)

-
- e. laagfrequente bijdragen aan het golfspectrum van FL2, mogelijk door voorkeurswaarden en/of een niet goed functionerende (oscillator-unit van een) capstaaf

9 Conclusies en aanbevelingen

Allereerst worden in paragraaf 9.1 de belangrijkste resultaten en conclusies nog eens op een rijtje gezet. Aanbevelingen worden gegeven in paragraaf 9.2. Er is in dit rapport geen aparte paragraaf meer gewijd aan de aanbevelingen van het vorige meetseizoen. Het laatste rapport (seizoen 2000-2001; Bottema, 2002) is namelijk amper een half jaar geleden uitgekomen, zodat er nog erg weinig tijd is geweest om iets te doen met de daarin opgenomen aanbevelingen.

9.1 Conclusies

Hieronder worden per hoofdstuk de voornaamste resultaten en conclusies belicht. Eerst echter een impressie van dit seizoen in een notendop:

Dit seizoen kenmerkte zich door hoge meerpeilen, zeer veel dagen met harde of stormachtige wind, en uitzonderlijk veel golfoploopdata. Zware stormen bleven ook dit seizoen uit, maar de storm van 26/2/2002 zorgde toch voor een waardevolle uitbreiding van het databereik van de golfgroeilimietstudie. Qua kwantiteit waren de metingen dit seizoen zonder meer goed (< 20% uitval). De betrouwbaarheid van de data is duidelijk beter dan in voorgaande seizoenen al liggen er nog diverse verbeterpunten.

In Hoofdstuk 1 wordt het belang en het doel van de metingen belicht, alsmede de projectorganisatie. Ook de doelen van dit verslag komen aan bod:

- documentatie bij de metingen (inwinning en verwerking)
- validatie van gemeten golf- en windgegevens
- beschrijving van stormsituaties
- beschrijving van golfklimatologie (alsmede enkele toepassingen)

Hoofdstuk 2 is sterk documenterend van karakter. Achtereenvolgens komen aan bod: de meetlocaties (FL2, RDH/DIJK, FL5, FL9, FL25, FL26, SL29; zie Figuur 2.1) en meetopstellingen, de instrumentatie, de inwinning, het onderhoud van de meetopstellingen, de gegevensbestanden en de verwerking van de gegevens. De onderhoudsverslagen (par. 2.4) zijn een belangrijke bron van informatie. Ook in paragraaf 2.6 wordt het belang van documentatie onderstreept. Zie ook de aanbevelingen in paragraaf 9.2.

In Hoofdstuk 3 wordt via tabellen en balkenschema's een overzicht gegeven van de beschikbaarheid en de betrouwbaarheid van de meetdata. Een en ander is uitgesplitst naar golven, wind en (bij SL29) waterstanden.

- 3.1) Globaal is bij alle palen minimaal 80% van de data beschikbaar, bij FL2 zelfs 97%. Het uitvalpercentage is daarmee aanzienlijk kleiner dan in alle voorgaande meetseizoenen.
- 3.2) Belangrijke bronnen van uitval zijn
 - defecte oploopbaak (tot eind nov. 2001)
 - aanvaring FL26 (ca. 4 weken uitval)
 - te klein geheugen datalogger en een opgeblazen datalogger (FL25: 8 weken lang incomplete databestanden resp. 1 week uitval)
 - modemproblemen (2 à 3 weken uitval bij FL25 en FL26)
 - problemen bij / verplaatsing van walstation: 3 wkn uitval bij FL5/FL9)
 - defecte capstaaf (FL9, 2 weken uitval)
 - zenderproblemen (FL9, ruim 1 week uitval)

-
- ijsgang (SL29, 1 week uitval)

Verder zorgden communicatieproblemen en PC-/netwerkproblemen op RDIJ-kantoor voor incidentele uitval bij alle GSM-palen. Problemen met de energievoorziening deden zich dit seizoen niet meer voor. Dat gold ook voor het schedulerprobleem (inwinning afgebroken na ophalen data en/of controle op inwinning).

- 3.3) In een aantal gevallen kregen de golfmetingen het label onbetrouwbaar. Dit hing vooral samen met:
 - algenaangroei (in het zomerhalfjaar; vooral bij FL25, het minst bij FL5)
 - voorkeurswaarden van de capstaaf (bij FL2 het hele seizoen; bij FL25, FL26 en SL29 tot oktober 2001)
 - golven die over de top van de capstaaf heensloegen (FL2, FL5, soms FL26, maar vooral FL9)
 - lichte aanvriezing bij FL5/FL25; ijsschade bij SL29 (2^e helft januari verbogen capstaaf; feb.-juni: provisorisch gerepareerde capstaaf)
- 3.4) De betrouwbaarheid van de windmetingen is dit seizoen vooral bepaald door "kritische" elektronica in de meetversterker van de windset die soms tot extreme (100-200%) overschatting van de windsnelheid leidde. In het vorige rapport (Bottema, 2002) is dit aangeduid als "het overflowprobleem". Daarnaast is enkele malen sprake geweest van uitval door gesprongen zekeringen (bliksemschade?) en is één keer een windvaan defect geraakt (SL29).
- 3.5) Correcties zijn dit seizoen alleen toegepast op de windrichting; meestal betrof het correcties van 10° of kleiner.

Ook dit seizoen zijn de windmetingen gevalideerd met behulp van KNMI-gegevens. De methode en resultaten worden besproken in Hoofdstuk 4. Voor conclusies ten aanzien van de bruikbaarheid van de validatiemethodiek wordt verwezen naar het vorige meetrapport (Bottema, 2002). De voornaamste resultaten en conclusies voor dit seizoen (zie ook par. 4.8) zijn:

- 4.1) Zonder goede windgegevens is interpretatie van de golfdata nauwelijks mogelijk. De minimaal gewenste nauwkeurigheid is 6° in de windrichting en 10% in de windsnelheid (par. 4.1).
- 4.2) Windrichtingscorrecties zijn nodig zolang de windvane niet exact op het Noorden kunnen worden uitgericht. De per meetpaal toe te passen windrichtingscorrecties (Tabel 4.2) volgen uit analyse van windrichtingsverschillen tussen de meetpalen en KNMI-stations. Voor het vaststellen van de correcties zijn enkele maanden data nodig omdat de uur-op-uur en dag-op-dag variabiliteit te groot is (Figuur 4.2).
- 4.3) In één geval (SL29) lijkt sprake te zijn van een niet-gedocumenteerde softwarematige windrichtingscorrectie. Dergelijke incidenten moeten voortaan voorkomen worden.
- 4.4) De windrichting op de golfmeetlocaties wordt niet beïnvloed door de meetpaalconstructie. De windrichting op het KNMI-referentiestation (Stavoren) is mogelijk wel licht (tot 3°) verstoord.
- 4.5) Kritische elektronica in de meetversterkers van de windset zorgde tot maart 2002 herhaaldelijk voor onbetrouwbare windsnelheidsmetingen bij FL2 en FL26 (snelheid 'ineens' uren- of dagenlang 2x-3x te hoog).
- 4.6) Bij de vergelijking van de windsnelheid van twee locaties moet de windsnelheidsverhouding bij voldoende harde wind worden bepaald. Hier is een ondergrens van 6 m/s gebruikt. Waar mogelijk dient een hogere grens te worden gebruikt. Een te lage ondergrens leidt namelijk tot grotere toevallige en systematische fouten (Figuur 4.5).
- 4.7) De hierboven genoemde windsnelheidsverhoudingen kunnen van dag tot dag significant (tot 15%) variëren, maar ook over langere periodes (zie Figuur 4.6). Het feit dat deze variaties consistent bleken met

-
- variaties in de golfcondities (zie par. 6.4.4) suggereert dat de variaties niet aan meetproblemen moeten worden toegeschreven maar aan systematische variaties in het ruimtelijke windveld. Deze variaties maken het lastig om eventuele kleine, geleidelijk toenemende, meetfouten te detecteren.
- 4.8) Vergelijking van de 10-meter-wind en de 3-meter-wind op FL2 suggereert dat de anemometer op 10 meter hoogte in de loop van het seizoen *mogelijk* iets is gaan aanlopen. Het effect treedt overigens alleen op bij lage windsnelheden (tot 4 à 5 m/s).
 - 4.9) Voor de eerste maal zijn twee turbulentie-parameters in de analyse meegenomen, de vlagfactor GF en de turbulentie-intensiteit T_u (par. 4.7). De gemiddeld gemeten turbulentie-intensiteit bleek goed te sporen met de richtwaarden van Wieringa en Rijkooft (1983).

In Hoofdstuk 5 komen de overige hulpgegevens aan bod. Referentiemetingen van de waterstand zijn cruciaal om de gemeten waterstanden te kunnen relateren aan het NAP-referentiepeil (Tabel 5.1 en 5.2). Sinds 2000 worden ook temperaturen gemeten omdat de literatuur (bijv. Young, 1998) aangeeft dat lucht-water-temperatuurverschillen de golfgroei fors kunnen beïnvloeden. De belangrijkste resultaten en aanbevelingen uit Hoofdstuk 5 zijn:

- 5.1) Op diverse locaties was sprake van *verloop* in de offset die nodig is om de ruwe capstaafwaterstanden om te rekenen naar waterstanden ten opzichte van NAP. Het wordt aanbevolen de meetinstrumenten op een vaste hoogte aan de meetpaal te bevestigen zodat dergelijk verloop tijdig gedetecteerd kan worden.
- 5.2) Op het IJsselmeer waren de meerpeilvariaties dit seizoen relatief sterk. Bij de analyse van golfdata moet hiermee rekening worden gehouden.
- 5.3) Na omrekening naar waterstanden ten opzichte van NAP komen de capstaafwaterstanden van SL29 meestal goed overeen met de druksensorwaterstanden aldaar. Uitzonderingen onder andere samen met algenaangroei, aanvriezing en ijsschade.
- 5.4) Omdat vorig seizoen de lucht- en watertemperatuurmetingen te onnauwkeurig werden bevonden (Bottema, 2002) zijn dit seizoen geen temperatuurgegevens geanalyseerd; wel zijn de voornaamste data gepresenteerd in Figuur 5.3.

De validatie van de gemeten golfparameters komt aan bod in Hoofdstuk 6. Allereerst wordt ingegaan op enkele meetproblemen bij golfmetingen (uitgebreid; par. 6.1) en golfploopmetingen (kort; par. 6.2). Validatiemethodieken voor tussentijdse controles en stormseizoenverslagen, komen aan bod in paragraaf 6.3. Paragraaf 6.4 geeft per meetpaal een overzicht van de validatieresultaten; een samenvatting van alle resultaten volgt in paragraaf 6.5. Allereerst enkele conclusies met betrekking tot veel voorkomende meetfouten:

- 6.1) *Capstaven* bestaan uit een staaf, massabuis en circa 6 verbindingsstukken of 'steunen'. De calibratiefunctie vertoont kleine 'hikjes' (Figuur 6.2) ter plekke van de capstaafsteunen. In het golfsignaal leiden deze hikjes tot uitgesproken *voorkeurswaarden* (Figuur 6.1).
- 6.2) Bij golfhoogtes tot 30 cm kunnen de voorkeurswaarden tot (forse) onderschatting van H_{m0} leiden. FL2 was hier het hele seizoen gevoelig voor. Bij FL26, SL29 en FL25 werd in augustus, september resp. oktober 2001 een capstaafsteun verwijderd. Tot die tijd waren deze locaties zeer gevoelig voor voorkeurswaarden, daarna in het geheel niet meer. Elders (FL5/FL9) bleven problemen het hele seizoen uit.
- 6.3) Bij *algenaangroei* kan de gemeten golfhoogte tientallen procenten onderschat worden (Figuur G3 in Bijlage G). Poetsbeurten bij onderhoudstochten geven zichtbare verbetering, zij het gedurende

-
- beperkte tijd (enkele dagen tot weken). Dit seizoen bleken FL25 en SL29 het meest gevoelig voor algenaangroei, FL5 en FL9 het minst.
- 6.4) Vorig jaar (Bottema, 2002) is een voorlopig *algendetectiecriterium* op basis van de golfperiodematen $T_{H1/3}$, T_{m01} en T_p ontwikkeld. Het criterium is vermoedelijk te soepel, wat blijkt uit de opmerkingen over 'niet gedetecteerde algen' in dit rapport en in (Bottema, 2002). Een beter alternatief is echter nog niet voorhanden. Voorlopig zit er daarom weinig anders op dan het algenseizoen (mei-sept.) niet mee te nemen bij de bepaling van een golvenklimatologie (Hoofdstuk 7).
- 6.5) De meeste capstaven vertonen een geleidelijk *verloop* (ca. 5% toename in waterstanden per jaar). Bij FL25 kunnen de golfhoogtes (later in) dit seizoen ca. 5% onderschat zijn, bij FL9 ca. 5% overschat.
- 6.6) De huidige tussentijdse controles via 'capstaaftesten' (periodieke veldcalibraties) zijn te onnauwkeurig om kleine meetfouten (tot ca. 7%) op te kunnen sporen.
- 6.7) Ook te korte of te laag opgehangen capstaven kunnen meetfouten veroorzaken. Op vrijwel elke IJsselmeerlocatie is het voorgekomen dat golven (bijna) over de top van de capstaaf heensloegen, bij FL9 zelfs op ca. 35 dagen. Gelukkig bleef het effect van deze foutenbron vooral beperkt tot extreme golfhoogtes als H_{max} en $H_{1/50}$; het effect op de significante golfhoogte H_{m0} was meestal klein.
- 6.8) De meetresultaten worden ook beïnvloed door de keuze van het frequentiebereik dat wordt gebruikt om spectrale golfhoogte- en golfperiodeparameters als H_{m0} , T_{m-10} , T_{m01} en T_{m02} te bepalen. Met de huidige instellingen (Tabel 2.5) kunnen T_{m01} en T_{m02} alleen bij goed ontwikkelde golven ($H_{m0} > 0.3$ m) nauwkeurig bepaald worden. Verder kunnen laagfrequente waterstandsschommelingen de golfperiode T_{m-10} wat te hoog doen uitvallen.

Vervolgens worden hieronder heel in het kort de validatieresultaten van paragraaf 6.4 weergegeven:

- 6.9) Bij FL2 zijn – gegeven de wind – de golfhoogtes in het zomerhalfjaar laag ten opzichte van de data uit het winterhalfjaar. Vermoedelijk zijn niet goed gedetecteerde algen de oorzaak. De metingen uit het winter-halfjaar zijn goed in overeenstemming met die van 2000-2001. Nadere analyses (vergelijking met data van andere locaties; zie Hoofdstuk 7) suggereren echter dat bij FL2 de golfhoogte en de golfsteilheid ook in het winterhalfjaar 2001-2002 15% lager waren dan "verwacht" (mogelijk tot 15% te laag; Figuur 7.3), en dat er bij FL2 daadwerkelijk sprake was van afwijkende golven of verdachte golfmetingen⁵⁴.
- 6.10) Bij FL9 ogen de data uit het winterhalfjaar betrouwbaar; 's zomers kan sprake zijn van meetfouten door algen. Bij harde-wind-condities zijn niet alle data betrouwbaar omdat de golven op ca. 35 dagen over de op van de capstaaf heensloegen.
- 6.11) FL5 komt goed door de validatie heen.
- 6.12) FL25 kwam goed door de validatie maar bleek in het zomerhalfjaar erg gevoelig voor algenaangroei. Een punt van aandacht is het merkwaardig concave verloop van de golfgroeikromme (Figuur 6.8) dat mogelijk samenhangt met het windveld rond FL25.

⁵⁴ In deze redenering speelt de dit seizoen voor het eerst bepaalde golfsteilheid een cruciale rol. De golfhoogteresultaten in Hoofdstuk 6 en par. 7.1 zijn namelijk sterk afhankelijk van de windsnelheid. Een "te lage" golfhoogte kan dan toegeschreven worden aan een relatief hoge windsnelheid rond FL2. De golfsteilheid (par. 7.3) is echter veel minder gevoelig voor de windsnelheid. Als ook de steilheid te laag is moet er dus wel iets aan de hand zijn met de golfmetingen of met de golven zelf.

-
- 6.13) In de zomer van 2001 bleken de FL26-data gevoelig voor algenaangroei. De data van het winterhalfjaar ogen betrouwbaar; de aanvaring rond de kerst lijkt geen trendbreuk te hebben opgeleverd.
 - 6.14) De SL29-data van het winterhalfjaar zijn min of meer betrouwbaar, ondanks ijsschade. Deze ijsschade kan tussen januari en juni tot een overschatting van de golfhoogte hebben geleid ⁵⁵ (maximaal 10%). Door vergelijking met de huidige data kon een deel (okt.-dec. 2000) van de golfhoogtedata van het seizoen 2000-2001 alsnog het label "betrouwbaar" krijgen. Daarentegen leek de golfperiodemaat T_{m-10} in laatstgenoemde periode juist tot 20% te hoog te zijn.
- Tot slot enkele algemene conclusies:
- 6.15) Het blijkt dat de golfdata van de winterhalfjaren 2000-2001 en 2001-2002 goed overeenkomen, maar dat dat niet geldt voor de zomerhalfjaren 2000 en 2001. Verder kan de gemeten golfhoogte in het zomerhalfjaar op sommige locaties en tijdens sommige periodes tientallen procenten lager liggen dan tijdens dezelfde condities 's winters, ondanks toepassing van het algendetectiecriterium. Dit alles wijst er op dat het huidige algendetectiecriterium te soepel is en dat een beter alternatief vereist is.
 - 6.16) Uit de conclusies van dit hoofdstuk blijkt dat er nog tal van haken en ogen zitten aan de huidige meetinstrumenten en meettechniek; er zal gewerkt moeten worden aan betere alternatieven (zie par. 9.2).
 - 6.17) In dit hoofdstuk zijn diverse controles beschreven om meetfouten aan te tonen; zie voor resultaten met name par. 6.1.3 en par. 6.4. Uit de controleresultaten blijkt dat meetfouten kleiner dan 10% nauwelijks zijn aan te tonen. Controles achteraf zijn dus onvoldoende om de uiteindelijke meetfouten tot minder dan 10% te beperken. Daarom moet er niet alleen aandacht zijn voor controles achteraf, maar ook voor een waterdichte kwaliteitsborging (incl. documentatie) vooraf.

Hoofdstuk 7 is fors uitgebreid ten opzichte van de vorige rapportage over 2000-2001. Ditmaal wordt niet alleen een aanzet tot golfklimatologie voor de meetlocaties gegeven, maar komen ook een diverse toepassingen aan bod. Het aantal conclusies is daardoor ook zeer groot. Een samenvatting is hieronder gegeven; voor details wordt verwezen naar paragraaf 7.8.

Allereerst de conclusies met betrekking tot golfhoogte- en golfperiodeklimatologie:

- 7.1) Over het algemeen komen de golfhoogte- en golfperiodeklimatologie (gegeven de wind; zie Tabel 7.1-7.5) goed overeen met de waarden van het seizoen 2000-2001 (Bottema, 2002). Uitzonderingen treden voornamelijk op bij de golfhoogte H_{m0} en kunnen vooral worden toegeschreven aan te weinig data (bij oostenwind), afwijkende windvelden (zie paragraaf 4.4 en 6.4.4) en afwijkende waterstanden.
- 7.2) De spreiding (één standaard-deviatie) in de losse 20-minuten-golfhoogtedata (H_{m0}) ligt rond 15%. Langere middelingstijden (60 min.) en nauwkeuriger gedefinieerde referentiecondities (de wind) gaven slechts een marginale reductie in de spreiding. Kennelijk ligt de oorzaak van de spreiding vooral in fysische factoren: waterstand, luchtdichtheid, vlagerigheid van de wind, thermische stabiliteit van de atmosfeer, ruimtelijke variaties in het windveld, etc.
- 7.3) De spreiding in de piekperiode T_p is met 8% relatief klein, behalve aan de randen van beschutte windrichtingssectoren waar vaak gemengde golfvelden met bimodale golfspectra optreden.

⁵⁵ Dankzij de huidige validatiemethodiek kunnen de data alsnog het label "min of meer betrouwbaar"; anders had de ijsschade geleid tot het afkeuren van bijna 5 maanden data, waaronder zeer veel harde-wind-data en twee volle stormen.

Dit seizoen zijn voor het eerst golfsteilheidsdata gepresenteerd. De conclusies zijn:

- 7.4) De golfsteilheid is vergeleken met de golfhoogte en golfperiode relatief ongevoelig voor de windcondities. Ook de spreiding (ca. 5%) in de golfsteilheidsdata is relatief klein. Dat maakt de golfsteilheid een geschikte parameter voor de validatie van golfmetingen⁵⁶.
- 7.5) De huidige golfsteilheden zijn gebaseerd op de golfperiode T_{m02} , en zijn daarmee consistent met het SWAN-model. T_{m02} is echter uitsluitend bruikbaar bij goed ontwikkelde golven (zie conclusie 6.9 en par. 7.8). Het wordt aanbevolen de golfsteilheid op een breder inzetbare golfperiodemaat te baseren. Ook is nader onderzoek nodig om een aantal in par. 7.3 gerapporteerde trends te verklaren.

De conclusies uit paragraaf 7.4 (golfgroeilimiet; maximaal haalbare golfhoogte etc. op ondiep water) zijn:

- 7.6) Op de Slotermeerlocatie (SL29) is het golfgroeilimiet-databereik dit seizoen duidelijk vergroot. Vorig seizoen was de golfhoogte H_{m0} maximaal 33.5% van de waterdiepte d , dit seizoen maximaal 37.5%.
- 7.7) De maximaal gemeten H_{m0}/d van dit seizoen (0.375) ligt dicht bij de maximaal haalbare H_{m0}/d van de golfmodellen SWAN en HISWA ($H_{m0}/d \sim 0.38$, uitgaande van default-modelinstellingen). Trends in de metingen (Figuur 7.4) suggereren dat laatstgenoemde waarde ($H_{m0}/d = 0.38$) bij zware stormen zelfs overschreden zou kunnen worden.

In paragraaf 7.5 is beschreven hoe de validatie van het golvenmodel SWAN aangepakt zou kunnen worden. Een uitgebreide beschrijving van de validatieresultaten is te vinden in eerdere publicaties (Bottema en Beyer, 2002; Bottema et al., 2002). De resultaten in een notendop zijn:

- 7.8) De golfhoogtes worden meestal redelijk tot goed voorspeld door SWAN. Daarentegen zijn de golfperiodes systematisch te laag. Ook de vorm van de golfspectra wijkt op sommige punten af.

Kennis van de ruwheid (ruwheidslengte z_0 en/of weerstandscoefficiënt C_D) van het wateroppervlak is *cruciaal*, en wel voor de modellering van wind, golven, waterstanden en stromingen. Enkele voorlopige resultaten zijn in paragraaf 7.6 gepresenteerd; de voornaamste resultaten zijn:

- 7.9) Windprofielanalyse blijkt ongeschikt als bepalingsmethodiek vanwege de sterk verstoorde windmetingen op 3 meter hoogte (Bottema, 2002) en vanwege ongunstig foutevoortplantingsgedrag.
- 7.10) Ook de vlaagfactormethode van Wieringa en Rijkooft (1983) is zeer gevoelig voor (systematische) meetfouten. De methode levert bij matige wind veel lagere C_D -waarden dan aanbevolen door Wu (1982) en Bak en Vlag (1999). Nadere analyse wees uit dat de geschatte ruwheidslengtes z_0 bij matige wind zo laag uitvielen dat ze fysisch nauwelijks plausibel waren; mogelijk een gevolg van het feit dat de vlaagfactormethode thermische stabiliteitseffecten in de atmosfeer verwaarloost. Tot slot vereist de vlaagfactormethode zeker 5-10 kilometer open-water-strijklengte wat de methode ongeschikt maakt voor gebruik op de Slotermeer-meetlocatie (SL29).
- 7.11) De ruwheidslengte z_0 en de weerstandscoefficiënt C_D zijn gevoelig voor diverse fysische effecten, en vooral voor de aannames en eigenschappen van de gebruikte bepalingsmethodiek. Het is geen werk dat er 'eventjes' bijgedaan kan worden. In feite is het bij uitstek werk voor een ervaren onderzoekers in de meteorologie en oceanografie.

⁵⁶ Pas na analyse van de golfsteilheidsdata (Figuur 7.3) werd duidelijk dat de golfhoogtes bij FL2 waarschijnlijk aan de lage kant zijn, zie conclusie 6.9.

In paragraaf 7.7 wordt op de interpretatie van de huidige windmetingen ingegaan. Hieronder volgt een samenvatting van de belangrijkste conclusies (zie par. 7.7 en 7.8 voor details).

- 7.12) De metingen suggereren dat atmosferische grenslaag boven het IJsselmeer nog niet volledig in evenwicht is, en dat de wind zich zelfs na 20 kilometer strijklengte zich nog niet volledig heeft aangepast aan de open-water-condities.
- 7.13) Geen van de beschikbare *eenvoudige* (analytische) windmodellen kan het windveld boven het IJsselmeer adequaat beschrijven. Dat geldt vooral voor modellen die geen rekening houden met de strijklengte⁵⁷ maar ook voor modellen die wel rekening houden met de strijklengte (het zgn. interne-grenslaag-model van Jensen et al., 1984). Kennelijk kan het windveld boven het IJsselmeer alleen goed voorspeld worden met complexe analytische modellen (bijv. van Kudryavtsev en Makin, 1996) of met numerieke (voorspellings-) modellen zoals X-HIRLAM met de daarbij door KNMI te ontwikkelen downscalingsmodule (waar ook RIZA overigens bij betrokken is).
- 7.14) Er is geconstateerd dat de potentiële 10-meter-wind (zie Wieringa en Rijkoort, 1983) over korte afstand sterk kan veranderen. Deze kleinschalige veranderingen wijzen er op dat naast de gemeten 10-meter-wind ook de potentiële wind door de ruwheid van het aardoppervlak wordt beïnvloed (de laatste door de zgn. macroruwheid in Wieringa en Rijkoort, 1983).

In Hoofdstuk 8 is een viertal stormperiodes uitgebreid besproken aan de hand van de grafieken in Bijlage C-F. In Bijlage G en par. 8.5 zijn meetproblemen en andere interessante cases belicht. Het hoofdstuk leverde onverwacht veel interessante resultaten; een beperkte selectie is hieronder gegeven:

- 8.1) De wind blijkt binnen 20 minuten van windstilte naar krachtig te kunnen toenemen, en golven en waterstanden kunnen daar binnen het uur op reageren (par. 8.2). Zelfs *golffronten* lijken te kunnen voorkomen.
- 8.2) Op enkele dagen (par. 8.2 en 8.4) zijn seiches en/of bui-oscillaties waargenomen met op IJsselmeer en Slotermeer periodes van resp. 35 en 70-90 minuten en top-dal-amplitudes tot 10 resp. 10-30 cm.
- 8.3) Tijdens de stormen van 26/2/2002 en 9/3/2002 zijn piekperiodes T_p waargenomen tot 5.5 sec, niet veel lager dan de maatgevende T_p 's voor dijkontwerp (ca. 6 sec; Rijkswaterstaat, 2002).
- 8.4) Uit de metingen van 3/4/2002 (par. 8.6) blijkt dat bij open-water-windsnelheden van 12 m/s 'stabiliteitseffecten' (invloeden van de thermische opbouw van de atmosfeer) grote invloed (>20%) kunnen hebben op wind, turbulentie en *mogelijk ook op de golfgroei*. Dit is in tegenspraak met Wieringa en Rijkoort (1983) die stellen dat stabiliteitseffecten op wind al vanaf 6 m/s verwaarloosbaar zijn.

9.2 Overwegingen en aanbevelingen

Hieronder volgt een serie overwegingen en aanbevelingen. Belangrijke zaken zijn cursief gedrukt. Voor het overige zijn de zaken naar thema gerangschikt:

⁵⁷ Bedoeld zijn (a) zgn. weerstandswetten (Wieringa en Rijkoort, 1983) die in evenwichtssituaties over uniform terrein de 10-meter-wind koppelen aan de wrijvingsloze wind op ca. 1 kilometer hoogte en (b) de open-water-transformatie van Bak en Vlag (1999) waarbij is aangenomen dat de wind op 60 meter hoogte niet wordt beïnvloed door de ruwheid van het onderliggende aard-/wateroppervlak.

meetdoel, meetlocatie, instrumentatie, beschikbaarheid / onderhoud, monitoring / verwerking / analyse, toepassing en, last but not least, documentatie. Achter elk kopje staat ook aangegeven of het om bestaande aanbevelingen (B) uit het vorige rapport (Bottema, 2002) gaat, om aangepaste aanbevelingen (A), of om nieuwe aanbevelingen (N).

Meetdoelen (N)

Het huidige meetdoel is het meten en analyseren van kwalitatief goede en goed gedocumenteerde golf- en windmetingen onder diverse (storm-)condities op het IJsselmeer en – voor het bestuderen van de ondiep-water-golfgroeilimiet – op het Slotermeer. In grote lijnen voldoet dit meetdoel nog. Er kunnen echter wel enige *kanttekeningen bij het meetdoel* worden geplaatst. Allereerst het *accent op stormcondities*. Dit accent is volkomen terecht want van alle meetcondities liggen stormcondities het dichtst bij de hydraulische randvoorwaarden waarop dijken ontworpen en getoetst worden. Juist onder stormcondities moeten de metingen dus compleet en betrouwbaar zijn. Voor de validatie van (golf)modellen is het echter niet voldoende om alleen stormcondities te beschouwen: het parameterbereik is dan veel te klein. In lekentaal gezegd: de stormen lijken te veel op elkaar. Juist een groot parameterbereik (*diversiteit in meetcondities*) kan helpen te begrijpen waarom modellen het wel of niet goed doen.

Een tweede kanttekening ligt bij het *gebruik van de meetdata voor modelvalidatie*. Tot nu toe is vooral gebruik gemaakt van gemiddelde grootheden (gemiddelde wind, significante golfhoogte, gemiddelde golfperiode, etc.). Deze parameters zijn geschikt om na te gaan of de uitkomsten van een (golf)model goed zijn, maar ze zijn minder geschikt om te toetsen of de onderliggende fysische processen (de sleutel tot modelverbeteringen) ook juist gemodelleerd zijn.

De derde kanttekening ligt in het verlengde van de tweede en gaat over het *gebruik van meetdata (en maatwerk) voor modelontwikkeling*. Het is belangrijk na te gaan welke gemeten variabelen modelleers (van golven, waterstanden, wind, etc.) nodig hebben om hun modellen te verbeteren. Een specifiek voorbeeld is het *meten van de ruwheidslengte z_0 (of de weerstandscoefficiënt C_D) van het wateroppervlak*. Deze ruwheid is belangrijk bij de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden op meren (zie Waal, 2002b; figuur 10.18) en is cruciaal voor de modellering van veel onderliggende processen: golven, stromingen, opwaaiing, wind. Juist *nú* zijn ruwheidsmetingen opportuun: recentelijk zijn namelijk twee theorieën op totaal verschillende grondslag ontwikkeld (Makin, 2002 resp. Radder, 2001), die de ruwheid moeten beschrijven. Met de huidige instrumentatie is het nog niet mogelijk de ruwheid voldoende nauwkeurig te bepalen om de theorieën te toetsen; met enkele kleine ingrepen (zie instrumentatie – wind) zou dit wel mogelijk moeten zijn.

Afstemming – algemeen (N)

Bij RIKZ wordt nu een overall golfmeetplan “Meten voor Veiligheid” ontwikkeld. Om dubbel werk en lacunes te voorkomen is het cruciaal dat afstemming plaatsvindt tussen het huidige project en het RIKZ-meetplan, ook op het gebied van meet- en analysemethoden.

Meetlocaties – algemeen (N)

Het huidige golfmetingenproject kenmerkt zich door voortdurende innovaties. Om die reden is het sterk aan te bevelen een testmeetpaal op Lelystad-Haven te plaatsen waarop nieuwe apparatuur en/of procedures enige tijd getest kunnen worden zonder de continuïteit of de kwaliteit van de overige metingen in gevaar te brengen.

Voor de overige meetlocaties geldt uiteraard dat ze een diversiteit aan meetcondities moeten garanderen, en dat ook aan de overige meetdoelen wordt beantwoord.

Meetlocaties – golven (A)

De huidige golfmeetlocaties voldoen goed (diverse strijklengtes en dieptes, goede ruimtelijke spreiding). Dit mede door twee 'duo-locaties' (FL25/26; FL5/FL9) die de analyse vergemakkelijken. Bij evt. *extra meetlocaties* kan gedacht worden aan een *tweede golfgroeilimietlocatie* op een nóg ondiepere locatie dan SL29, zodat het golfgroeilimiet-databereik vergroot kan worden. Daarnaast is een meetpaal (met wind) op de *randmeren* de moeite. Kahma en Petterson (1994) geven namelijk aan dat eenvoudige golfmodellen niet goed (kunnen) werken bij wind evenwijdig aan dergelijke langgerekte meren. Het is aan te bevelen nog enige tijd door te meten op de huidige meetlocaties, zodat overal een paar jaar betrouwbare metingen beschikbaar komt. Wel moet alvast bepaald worden welke alternatieve locaties in aanmerking komen, zodat na een ijsperiode één of meer meetpalen verplaatst kunnen worden. FL5 zou dan noordoostwaarts kunnen worden verplaatst naar een locatie met vlakke en ondiepere bodem (minder ruimtelijke gradiënten leidt tot nauwkeuriger modeltoetsing). FL25 lijkt nu op een erg beschutte locatie te staan. Herplaatsing (met FL26) kan daarom een optie zijn. Tot slot kan overwogen worden FL2 verder van de dijk te plaatsen, dit in verband met evt. reflecties van golven.

Meetlocaties – wind (A)

De wind voor (middel)lange strijklengte is vrij goed bekend door metingen bij FL2 en FL26. De 10-meter-windsets voldoen maar *de 3-meter-wind op FL2 is sterk gestoord door de meetpaalconstructie. Aanbevolen wordt deze windset op een andere meetpaal te monteren, op 10 meter hoogte*. Hiervoor komt in de eerste plaats de locatie FL25 in aanmerking. De golfdata zijn daar (en op andere locaties zonder windset in situaties met korte strijklengte) namelijk moeilijk interpreteerbaar. Deels komt dat door de aanwezigheid van gemengde golfvelden waar golfmodellen als SWAN moeilijk mee om kunnen gaan (deining-zeegang-interactie; Holthuijsen en Booij, 2000). Daarnaast zijn er twijfels over de beschikbare windmodellen. SWAN-golfberekeningen met inhomogene windvelden (bepaald vlg. Jensen et al., 1984; zie Bottema, 2001 en Bottema en Beyer, 2002) overschatten de bij FL25 gemeten golfhoogtes namelijk fors. Ook de metingen bij FL25 roepen vragen op over het windveld aldaar (zie de discussie over de nogal concave golfgroeikromme in par. 6.4.4). *Tot slot wordt het gebruik van één of meer akoestische windsnelheidsmeters (sonics) sterk aanbevolen; zie ook de aanbevelingen onder "instrumentatie"*.

Meetlocaties – temperatuur (A)

Zolang nog niet gebruik gemaakt wordt van de hierboven genoemde sonics (akoestische windmeters; zie ook de aanbevelingen onder "instrumentatie") en de watertemperatuurmetingen onvoldoende betrouwbaar zijn moet de watertemperatuur in elk geval op twee locaties gemeten worden (bijv. FL2 en FL26). Als sonics ingezet worden lijkt FL2 de locatie die het eerst in aanmerking komt. Daarnaast kan het ook de moeite zijn een sonic in te zetten op SL29 (t.b.v. golfgroeilimietstudies; brontermen in golfmodellen).

Keuze van golfmeetinstrumenten (N)

In de jaren 1999-2001 is om diverse redenen de overstap van stappenbaken naar capstaven gemaakt. Ook capstaven blijken echter gevoelig te zijn voor diverse meetfouten, zie par. 6.1 en recent werk van Hoekstra en Hoitink (2002) die aan capstaafmetingen geen hogere nauwkeurigheid dan 10-15% toekennen. De laatste jaren lagen de ontwikkelingen op het gebied van instru-

mentatie niet stil, en zijn o.a. druksensoren, radarniveaumeters, snelle boeien en acoustic doppler current profilers (ADCP's) beschikbaar gekomen. Daarom is *het sterk aan te bevelen opnieuw vast te stellen welk type meetinstrument het meest geschikt is voor IJsselmeer- en Sloterveercondities*, en wel in samenspraak met RIKZ en de Regionale Directie Noord-Holland. Bij het beoordelen van instrumenten kunnen onder andere de volgende criteria worden gebruikt:

- betrouwbaarheid (weinig uitval) en robuustheid
- afgestemd op energievoorziening (zonnepanelen+accu, ook s'winters)
- ontbreken van meetfouten (bijv. door resolutie of voorkeurswaarden)
- ongevoelig voor vervuiling / algenaan groei
- ongevoelig voor instrumentverloop
- geschikt voor een golven-/waterstandsbereik van 0.05 tot 4 meter
- geschikt om golven en waterstanden tot 5-8 Hz betrouwbaar te meten
- geschikt voor dagelijkse inwinning en opslag van tenminste 1 dag *ruwe data*
- geen of nauwelijks aannames of tussenstappen (zoals dispersierelaties, correcties voor instrumentrespons, etc.)

Soms is – voor de validatie van modellen – ook golfrichtingsinformatie nuttig (gemengde golfvelden FL25/FL26; strijkgolven en evt. reflecties FL2).

Golf- en waterstandsmetingen – bestaande instrumentatie (A)

De hoogst gemeten golven bij FL2, FL9 en – in iets mindere mate – FL26 en FL5 komen vrijwel elk jaar hoger dan ca. 2.3 meter. Samen met de meerpeilvariaties gedurende een jaar (gemiddeld ca. 60 cm) is dat een waterstandsbereik van bijna 3 meter. Het werkelijke waterstandsbereik is *groter* doordat de golven soms asymmetrisch zijn (hoge kammen, vlakke dalen), en doordat de lokale waterstandsvariaties groter zijn dan de meerpeilvariaties (niet elke storm geeft evenveel opwaaiing). Dit betekent dat op een aantal locaties de huidige *3-meter-capstaven te kort* zijn, zelfs in de tot nu gemeten toe omstandigheden (windkracht 8 à 9). In de zware-storm-omstandigheden die we willen meten (windkracht 10 à 11) zijn 3-meter-capstaven dan zeker te kort. Daarom, en vanwege het kennelijk grotere schaderisico bij te korte capstaven (lekslaan FL5 en uitval FL9 in maart 2002), is het noodzakelijk *om in elk geval bij FL9 de huidige 3-meter-capstaaf te vervangen door een beter alternatief*. Dat kan een 4 of 5 meter lange capstaaf zijn maar ook (vanwege de hieronder beschreven problemen) een ander type meetinstrument. FL2 beschikt al sinds maart 2001 over een 5-meter-capstaaf. Tijdens een recente storm (27/10/2002) werd een maximale golfhoogte van 2.8 meter gehaald wat bevestigt dat een 3-meter-capstaaf op deze locatie te kort is. Toch wordt *aanbevolen de 5-meter-capstaaf van FL2 op korte termijn te vervangen, of op zijn minst te hercalibreren*. De voornaamste redenen zijn het vrij sterke verloop (par. 6.1.3), de zeer uitgesproken voorkeurswaarden in de waterstandshistogrammen (Bijlage F, Figuur F8) de verdacht lage golfhoogte en golfsteilheid (par. 7.3) en de telkens optredende laagfrequente storingen (par. 8.4). De laatste twee zaken zouden overigens ook samen kunnen hangen met eventuele golfreflecties vanaf de dijk. Dit seizoen zijn ook capstaven met een verhoogde oscillatorfrequentie getest (in het laboratorium). De verhoogde oscillatorfrequentie zou algengroei moeten tegengaan maar leidde met name bij de 5-meter-capstaaf tot een zwabberende calibratielij (met voorkeurswaarden/voorkeurszones als gevolg). Daarom *moet vòòr het installeren van nieuwe 5-meter-capstaven grote zorg worden besteed aan (gedetailleerde) calibraties en aanvullende testen*.

Plaatsing en uitrichting van instrumenten (A)

Het wordt sterk aanbevolen de *golfmeetinstrumenten op een gegarandeerde vaste meethoogte* op te hangen, zodat eventueel instrumentverloop tijdig gedetecteerd kan worden. *Daarbij zou RIZA geen (willekeurige) relatieve*

waterstanden maar absolute waterstanden t.o.v. NAP aangeleverd moeten krijgen. Het aantal verwerkingsslagen kan op deze wijze beperkt worden. Bovendien hoeven er zo minder gegevens in/bij de verwerkingsprogrammatuur bijgehouden te worden.

Problemen door te korte meetinstrumenten worden bij een optimale ophanghoogte niet voorkomen maar wel verminderd. Het midden van het instrument kan bij de IJsselmeerlocaties het beste óp of iets boven NAP worden gehangen; bij de Slotermeerlocaties op NAP – 50 cm. Het midden van de FL9-capstaaf hing begin 2001 op NAP – 25 cm wat duidelijk te laag bleek. Om fouten door voorkeurswaarden te voorkomen dienen 'capstaafsteunen' tussen NAP + 15 cm en NAP – 55 cm (IJsselmeer) en tussen NAP - 20 cm en NAP - 80 cm (SL29) verwijderd te worden.

Instrumentatie – windmetingen (A)

De windmeetinstrumentatie zou het niet alleen mogelijk moeten maken om de gemiddelde wind te bepalen, maar ook de ruwheid van het wateroppervlak (zie "meetdoelen"), een cruciale invoerparameter voor wind-, golf-, stromings- en waterstandsmodellen. De uit metingen afgeleide ruwheid is echter extreem gevoelig voor meetfouten, verwaarlozingen en aannames (par. 7.6). Op basis van de huidige instrumentatie levert geen van de beschikbare analysemethoden betrouwbare (eenduidige en biasvrije) en nauwkeurige ruwheden (zie par. 7.6). Directe aanvullende metingen van de warmte- en impulsflux maken het wél mogelijk betrouwbare ruwheden af te leiden, mede doordat daarmee de thermische stabiliteit van de atmosfeer verrekend kan worden. Akoestische windmeters ('sonics' ofwel sonic anemometers) leveren in één keer alle gewenste informatie (gemiddelde windsnelheid en -richting plus fluctuaties, luchttemperatuur, warmteflux, impulsflux). Daarom wordt het *sterk aanbevolen op tenminste één locatie (FL2, daarnaast SL29) gebruik te maken van een akoestische windmeter* (een 'sonic', zie aanbevelingen wind/temperatuur). Bij gebruik van sonics' worden de 3-meter-windset (waarvoor toch al een veel langere uithouder nodig was) en de temperatuurmetingen nagenoeg overbodig. Zoals bij alle nieuwe apparatuur wordt aanbevolen de sonics enige tijd te testen voordat deze de huidige windmeetapparatuur vervangen.

Tot slot zouden de *windvanen* (en ook de hierboven aanbevolen sonics) ten opzichte van een vaste *Noordrichting* uitgericht moeten worden; een groot aantal windrichtingscorrecties wordt zo vermeden.

Instrumentatie – temperatuurmetingen (A)

De thermische stabiliteit (verticale temperatuuropbouw) van de atmosfeer kan juist op meren forse invloed hebben op de golfgroei (Young, 1998), zelfs bij krachtige wind (par. 8.6). Daarnaast kunnen verwaarloosde stabiliteitseffecten grote meetfouten in de ruwheid van het wateroppervlak veroorzaken (par. 7.6). Gebruik van een akoestische windmeter (sonic) lijkt veruit de meest geschikte manier om stabiliteitseffecten te kwantificeren omdat analyse van wind- en temperatuurprofielen boven gladde oppervlakken als open water extreem gevoelig is voor meetfouten (par. 7.6). De huidige lucht- en water-temperatuurmetingen zijn echter zeer waardevol voor een *indicatie* van stabiliteitseffecten zolang de 'sonics' nog niet beschikbaar zijn. De meetfouten (incl. verloop) mogen dan niet veel hoger dan 0.1 K zijn en bij gebrek aan referentiegegevens zou dit geverifieerd moeten worden door op *twee* locaties te meten. De luchttemperaturen moeten niet in de meetkast worden gemeten maar, goed afgeschermd voor straling, daarbuiten.

Instrumentatie – slijtage / vervanging (A)

Het is absoluut noodzakelijk een *ruime(re) voorraad reserve-instrumenten* aan te houden zodat het mogelijk is bij een storing een instrument (én elektronica)

tijdig te vervangen. Dit seizoen was daar bij SL29 in het geheel geen sprake van: er is daar bijna *vijf (5!)* maanden lang met een provisorisch rechtgebogen capstaaf gemeten. Het is slechts aan toeval én aan de huidige validatiemethodieken te danken dat hierdoor niet een groot aantal zeer waardevolle metingen verloren is gegaan.

Daarnaast is het zaak *slijtage voor te blijven, instrumentverloop beperkt te houden, en instrumenten tijdig te vervangen*. Slijtage was dit seizoen minder belangrijk dan in eerdere seizoenen. Toch was er dit seizoen sprake van defect geraakte capstaven en modems. Ook raakte de S29-windvaan defect voor het einde van de calibratietermijn.

Tot slot is het noodzakelijk *alle capstaven in de zomermaanden uitgebreid te hercalibreren* in Lelystad-Haven. Normaal gesproken is een meetonderbreking in de zomermaanden onwenselijk (zwarte stormen komen ook in april/mei en aug./sept. voor). Het consistent waargenomen verloop in de capstaafmetingen en de twijfels over de juistheid van de FL2-golfhoogtes en -steilheden (zie boven) maken jaarlijkse hercalibraties tóch noodzakelijk. Ook bij een tussentijdse capstaafverwijdering is hercalibratie overigens een must. Bij alle (her)calibraties moet ook gemeten worden rond de capstaafsteunen (daar max. 1 cm afstand tussen meetpunten t.b.v. foutschattingen voorkeurswaarden; elders max. ca. 5 cm).

Inwinning (N)

Het valt te overwegen om in ieder geval bij FL2 op GSM-inwinning over te gaan. Wekelijks monitoren is bij GSM-meetpalen namelijk aanzienlijk makkelijker: met één kopieeractie kan Ed van der Goes alle GSM-bestanden op de uitwisselingsschijf zetten. Bij walstations moet elk afzonderlijk bestand per modem worden opgehaald, met telkens 20 minuten wachttijd.

De uitval bij GSM-meetpalen lijkt ondanks incidentele communicatieproblemen niet wezenlijk groter dan bij de walstations. Bij walstations is er daarentegen een kleine kans op zeer veel verlies van data, mede doordat backups daar veel minder vaak plaatsvinden. Zo gingen in 1999/2000 ruim 3 maanden data van FL5/FL9 verloren door een gecrashte harde schijf.

Aanvullende (bodem-)informatie (N)

De bodemdiepte-informatie bij SL29 berust na 3 jaar meten nog altijd op een oude bodemkaart en op welgeteld één loding op de meetlocatie (in april 2001, door Cees Roozenburg). *Het verkrijgen van aanvullende bodeminformatie zou hier de allerhoogste prioriteit moeten krijgen omdat juist bij SL29 de bodemdiepte cruciaal is voor de interpretatie van de golfgegevens*. De bodeminformatie zou moeten bestaan uit een bodemrooster (voor de invoer in golfmodellen) en – zolang dit rooster niet beschikbaar is – uit losse lodingen rond de meetpaal.

Bij de IJsselmeerlocaties bestaat de bodeminformatie uit een bodemgrid uit 1999, en uit één loding per locatie ter controle. Dergelijke lodingen moeten vaker worden uitgevoerd, vooral omdat die ene controleloding bij FL5 ruim 30 cm (ruim 20%) verschilde van de bodemdiepte uit het bodemgrid van 1999.

Onderhoudstochten (A)

Het onderhoud aan de meetpalen verloopt meestal bevredigend. Ook onderhoudstochten in de zomer zijn belangrijk, met name in mei (de laatste jaren altijd wel een keer windkracht 8) en in augustus (om te zorgen dat alles begin september bij de start van het stormseizoen goed werkt). Een punt van aandacht is nog het maken van *foto's bij onderhoudstochten*. Er is dit seizoen weliswaar een ruime hoeveelheid beeldmateriaal beschikbaar gekomen, maar er zijn ook twee cruciale zaken waarvan géén beeldmateriaal beschikbaar is:

- schade door de aanvaring van FL26 (dec. 2002)
- de ijsschade aan de SL29-capstaaf (situatie voor en na reparatie)

De *uitvoeringsverslagen* zijn een waardevolle bron van informatie en de door RDIJ-gemaakte EXCEL-overzichten daarvan zijn zeer bruikbaar. Veldcalibraties of *capstaaftesten* zijn cruciaal om tussentijds te controleren of de calibratie nog geldig is, en zijn het *enige* controlemiddel als nadien het instrument defect raakt en hercalibratie onmogelijk is. De huidige resultaten (par. 6.1.3) suggereren echter dat de *uitvoering en documentatie van de capstaaftesten nadere aandacht behoeven* (accurater resp. beter moeten zijn).

Beschikbaarheid van gegevens (A)

De beschikbaarheid van gegevens was dit seizoen uitstekend. Dit niveau kan gehandhaafd worden door frequent monitoren, het vermijden van fouten (bij installatie van loggerprogrammatuur) en het snel verhelpen van storingen.

Algenprobleem (A)

Regelmatig schoonmaken, het beter monitoren van algen (visueel of bij analyse) en vooral het gebruik van meetinstrumenten die minder gevoelig zijn voor algen zouden het algenprobleem tenminste gedeeltelijk moeten oplossen. Niet meten tijdens het algenseizoen is nog steeds onwenselijk. Ten eerste kunnen ook in mei en september nog (zwarte) stormen optreden. Ten tweede wordt het aantal beschikbare data wel erg klein als langdurige meetproblemen en/of ijsperiodes optreden tijdens het meetseizoen (zie het seizoen 2000-2001).

Ijsperiodes (A)

Het Slotermeer kan na één nacht matige vorst al dichtliggen. Om SL29 ook 's winters operationeel te houden verdient het aanbeveling om bij een korte of onzekere vorstperiode de meetinstrumenten te laten hangen, na de vorstperiode de apparatuur snel op ijsschade te controleren, *en om één of twee reserve-instrumenten klaar te hebben liggen.*

Op het IJsselmeer maakt (kruierend) ijs verwijdering van de hele meetpaal noodzakelijk, wat al gauw leidt tot twee maanden uitval. Bij onzekere vorstverwachtingen is het aan te raden de meetpalen zo lang mogelijk te laten staan en desnoods op een beslissing tot verwijdering terug te komen.

Monitoren (B)

Frequent monitoren (zowel bij RDIJ als RIZA) draagt bij aan het snel constateren en oplossen van meetproblemen. *Het monitoren zou meer op de onderhoudsdagen afgestemd moeten worden* en zou zowel voor, tijdens als kort na het onderhoud moeten plaatsvinden. Daarvoor is het belangrijk dat RDIJ (evt. mondeling) terugmeldt welke dag welke meetpalen zijn bezocht en wat de voornaamste bevindingen van de storings-/onderhoudstochten waren. De keerzijde van frequent monitoren is de benodigde tijd voor het (schriftelijk) terugmelden van de analyseresultaten; de dataverwerking zelf gaat nu vrij snel.

Verwerking en analyse (A)

Bij de verwerking zou nog eens aandacht geschonken moeten worden aan:

- implementatie van technieken (smoothing, tapering) om een beter, *gladder spectrum* te bepalen, gevolgd door verificatie

Analyse en toepassing van de metingen hebben meer dan eens met elkaar te maken. Analyse van de metingen kan bijvoorbeeld gericht zijn op het in kaart brengen van het toepassingsbereik en de betrouwbaarheid van golfmodellen.

De volgende concrete zaken zijn de moeite om verder uit te diepen:

- bepaling van de aërodynamische ruwheid van het wateroppervlak
- gedrag van de golfsteilheid (stabiel; de moeite voor kwaliteitsborging)
- oorzaken van de spreiding in golfdata (de oorzaak lijkt meer in fysische oorzaken dan in statistische onzekerheden te zitten)
- onderzoeken/modelleren van de golfhoogteverdeling (vooral bij SL29)
- verifiëren of de huidige golfspectra met de TMA-vorm zijn te beschrijven (Bouws et al., 1985)
- invloed van de atmosferische stabiliteit (en/of de vlagerigheid van de wind) op golfgroei
- seiches en bui-oscillaties
- toetsing van (onderdelen van) bij RIZA gebruikte golfmodellen.
- onderzoeken van stationaire en/of kleinschalige situaties: insteltijd van een golfveld op het IJsselmeer; verschil t.o.v. evenwichtssituatie.

Interactie met modelontwikkeling (B)

Vergelijking van meetgegevens met golf- en windmodellen is cruciaal om vast te stellen welke meetgegevens nu precies gewenst zijn en om vast te stellen aan welke kwaliteitseisen de metingen moeten voldoen. De toetsing van SWAN door Bottema en Beyer (2002) en Bottema (2002b) was een stap in deze richting, maar er zouden nog meer van dergelijke stappen gemaakt kunnen en moeten worden. Eén zo'n gewenste stap is het gebruik van de huidige winddata voor de toetsing van de windvoorspel-lingen van het KNMI-XHIRLAM-model en de bijbehorende downscaling-module. Een tweede stap is het met metingen toetsen van recentelijk ontwikkelde drag-theorieën (Radder, 2001 resp. Makin, 2002) die de ruwheid van het wateroppervlak beschrijven. Een derde stap is het testen van nieuwe, nog uit te brengen versies van het golfmodel SWAN.

Toepassing / exploitatie van de metingen; PR (A)

Toepassing en exploitatie van de metingen zouden ruime aandacht moeten krijgen, zeker nu een substantieel aantal gevalideerde en betrouwbaar bevonden metingen beschikbaar komt. Dit rapport geeft een eerste aanzet tot toepassing en exploitatie (hoofdstuk 7). Deze aanzet zou verder moeten worden uitgebouwd, zowel in de jaarlijkse stormseizoenverslagen als in andere publicaties. PR is hoe dan ook een belangrijk aandachtspunt. In 2003 zijn er helaas geen geschikte internationale congressen. Dat betekent dat de PR in 2003 vooral binnen Nederland moet plaatsvinden, en daarna (2004/2005) vooral in het buitenland. Naast PR is het opnemen van gevalideerde golfdata in DONAR een aandachtspunt; tot nu toe heeft de tijd hiervoor onderbroken. Ook het on-line ter beschikking stellen van golfinformatie (bijv. t.b.v. scheepvaart) valt te overwegen. En laatste niet onbelangrijk punt is het beeldmateriaal: mooie golvenfoto's bij storm zijn zeer waardevol voor PR-acties.

Kwaliteitsborging (A)

Het intensiever monitoren lijkt zijn vruchten te hebben afgeworpen alsmede de grotere nadruk die bij het maken van het stormseizoenverslag is gelegd op validatie van wind- en golfgegevens. *Het verdient aanbeveling de huidige kwaliteitsborgingsmethodiek op dezelfde voet voort te zetten.* De huidige strenge kwaliteitsborging leidt soms wel tot enige twijfel over de metingen maar daar staat tegenover dat intussen bij een aantal meetpalen diverse maanden data 'gered' zijn doordat correctiefactoren alsnog geschat konden worden of doordat (dit seizoen bij SL29) beschadigde meetapparatuur toch nog goede meetresultaten bleek te geven. Tot slot verdient het aanbeveling de kwaliteitsborging mede te baseren op golfsteilheidsinformatie.

Rapportages (N)

De huidige rapportages zijn tijdrovend maar leveren ook zeer veel resultaten en inzichten op. Sommige zaken worden echter pas duidelijk na analyse van een aantal jaren data; soms ontstaan ook twijfels die later weer uit de weg worden geruimd. Om het overall-beeld te behouden en vanwege de PR is het daarom aan te bevelen als meerwerk periodiek een formeel RIZA-rapport te schrijven met een terugblik op de laatste vijf jaar metingen. De nadruk in een dergelijk rapport zou moeten liggen op de meetresultaten en toepassingen, maar er moet ook ruime aandacht worden gegeven aan de vraag wat we de laatste vijf jaar geleerd hebben over het uitvoeren van betrouwbare metingen.

Documentatie (A)

Er is duidelijk gewerkt aan het verbeteren van de documentatie maar *dit punt behoeft nog steeds aandacht.* Een meetnauwkeurigheid beter dan 10% is

alleen te garanderen met procedures voor documentatie, (her)calibraties, etc. die tot in de puntjes in orde zijn, en waar ook daadwerkelijk de hand aan wordt gehouden. Kleinere meetfouten zijn namelijk niet meer achteraf te detecteren (zie conclusie 6.17), zelfs niet met alle in dit rapport beschreven validatiemethodieken met controles achteraf.

In zijn algemeenheid is *documentatie belangrijk bij alle fases van inwinning en analyse maar in het bijzonder bij de stappen die vooraf gaan aan het samenstellen van de dagbestanden met ruwe gegevens*. Als analyse leidt tot twijfels over de kwaliteit van een ruwe-data-bestand dan kunnen twijfels over dat databestand (en in feite over *alle* data) alleen uit de weg worden geruimd als de documentatie zó volledig en toegankelijk is dat alle verwerkingsstappen in gedachten doorlopen en geverifieerd kunnen worden. De stappen voor de totstandkoming van een ruwe-data-bestand zijn: vaststellen calibratiefunctie, elektronische bewerking signaal, bewerkingen door loggersoftware, bewerkingen op inwin-PC. Een verdacht bestand met ruwe data moet al gauw worden weggegooid; bij verwerkte data is het vaak nog mogelijk de verwerking en analyse overnieuw te doen.

Ook documentatie bij het onderhoud is belangrijk: welk instrument heeft wanneer op welke paal gezeten, hoe zijn de instrumenten opgehangen, hoe zijn de capstaaf testen precies uitgevoerd, in hoeverre zijn de instrumenten vervuild, wat voor beschadigingen heeft een instrument of meetpaal opgelopen? Met name voor het 2^e, 4^e en 5^e punt zijn foto's cruciaal. Tot slot kan geconstateerd worden dat de laatste jaren door tijdgebrek de documentatie in dit project meermalen een sluitpost dreigde te worden, zowel bij RIZA als RDII. Het is daarom te overwegen om naast de huidige betrokkenen een voldoende ervaren en deskundig persoon een te trekken die speciaal met documentatie wordt belast. Daarnaast kunnen oplossingen worden gezocht in maatregelen op het gebied van geautomatiseerd versiebeheer (automatisch aanmaken van documentatiebestanden of identificatievlaggen als nieuwe/herziene logger- of verwerkingsprogrammatuur gebruikt wordt).

Opslag van data en software (B)

Dit jaar zijn erg veel verwerkte data geproduceerd (6 GB datablokken, rond 150 MB gs-bestanden, rond 40 MB overige bestanden). Op dit moment worden alle verwerkte data nog bewaard maar uiteindelijk moet beslist worden wát wordt opgeslagen, en hoe.

Inwinningssoftware (loggerscripts) zou een *unieke identificatie (ID)* moeten hebben die ook in de *(kopregel van de) ruwe-data-bestanden terugkomt*. Alle inwinningssoftware (incl. eerdere versies) zou ook bewaard moeten worden (helaas lijkt een deel van de vroegere loggersoftware verloren te zijn gegaan). Bovenstaande zaken zouden ook moeten gelden voor verwerkingssoftware en de configuratiebestanden van WAVES2002.

Automatisering (B)

Geautomatiseerde verwerking - het alternatief voor het 365 keer 7 keer moeten wijzigen van invoerscripts - is zeer goed bevallen en zou verder / blijvend moeten worden nagestreefd bij zowel inwinning als analyse.

Standaardisering (A)

Versiebeheer en documentatie zijn twee (mogelijke) zwakke punten van de huidige 'zelfbouwprogrammatuur'. RIKZ laat nu het standaardverwerkingspakket 'WAVES2002' ontwikkelen. Het voordeel is de betere documentatie en toegankelijkheid (zie ook "personeel") van de software. Ook zijn de software en (te actualiseren) invoer beter gescheiden dan nu. Een punt van aandacht is dat niet alle in par. 6.1 besproken meetfouten al bij eerstelijnsverwerking (met WAVES2002) gedetecteerd en/of gecorrigeerd kunnen worden. *Toch zouden*

RIZA en RDIJ moeten anticiperen op een migratie naar WAVES2002. Wel moet het dataformaat dan fors veranderen. Ook moet gewaarborgd zijn dat WAVES2002 grootschalige, geautomatiseerde verwerking aankan.

Referenties

- ALKYON & WL, 2002, SWAN Fysica Plus, Rapport 1 (tekst) en Rapport 2 (Figuren), Alkyon Hydraulic Consultancy, Emmeloord, NL en Wl | Delft Hydraulics, Delft, NL
- Bak, C.I., D.P. Vlag, 1999, Achtergronden Hydraulische Belastingen Dijken IJsselmeergebied, deelrapport 5, Modellerings waterbeweging (WAQUA), RIZA, Lelystad, NL, rapport 99.042
- Beyer, D., E.R.F. van der Goes, 2000, Golfmetingen IJsselmeergebied – verslag meetseizoen 1997-1998, RIZA, Lelystad, NL, werkdocument 2000.158X
- Blaakman, E.J., R. Lisman, 1999, Achtergronden Hydraulische Belastingen Dijken IJsselmeergebied, deelrapport 1, Gebruikershandleiding HYDRA_M, RIZA, Lelystad, NL, rapport 99.038
- Booij, N., R.C. Ris, en L.H. Holthuijsen, 1999, A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, *J. Geophys. Res.* 104, C4, 7649-7666
- Bottema, M., 2002, rapportage golfmetingen IJsselmeergebied 2001-2002, RIZA, Lelystad, NL, werkdocument 2001.063X
- Bottema, M., D. Beyer, 2002, Evaluation of the SWAN wave model for the Dutch IJsselmeer area, Proc. 4th Int. Conf. on Ocean Waves (WAVES2001), Ed. B.L. Edge, 2-6 sept. 2001, San Francisco, 560-569
- Bottema, M., J.P. de Waal, H.J. Regeling, 2002, Some applications of the Lake IJssel / Lake Sloten wave data set, Proc. 4th Int. Conf. Coastal Engineering, Ed. W. Allsop, 9-13 juli 2002, Cardiff, UK, in druk
- Bouws, E., H. Günther, W. Rosenthal, C.L. Vincent, 1985, Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water – part 1 Spectral form, *J. Geophys. Res.* 90, C1, 975-986
- CERC, 1973, Shore Protection Manual, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, Virginia, USA
- Claessens, E., J.P. de Waal, H.C. van Twuiver, M. Bottema, 2002, The application of a coupled wind, water level and wave model in a warning system against flooding, Proc. 7th Int. Conf on Wave Hindcasting and Forecasting, Banff, Canada, CA, 21025 Okt 2002, in druk
- Groeneweg, J., A.R. van Dongeren, 2002, Measuring Campaign Wadden Sea, Module What to measure, Report H4174, Wl | Delft Hydraulics, Delft, NL

-
- Hoekstra, P. , T. Hoitink, 2002, Design measuring campaign wave conditions Wadden Sea, Module Where to measure, IMAU Report R 02-01, Univ. Utrecht, Inst. for Marine and Atm. Research & Dept. of Physical Geography, 34.p.
- Holthuijsen, L.H., 1980, Methoden voor golfvoorspelling deel 1 / deel 2, Technische Adviescommissie Waterkeringen
- Holthuijsen, L.H., N. Booij en T.H.C. Herbers, 1989, A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents, *Coastal Engineering* 13, p. 23-54
- Holthuijsen, L.H., N. Booij, 2000, Oceanic and nearshore whitecapping effects in SWAN, Proc. 6th Int. Conf on Wave Hindcasting and Forecasting, Monterey, CA, 6-10 Nov. 2000, 362-368
- Jensen, N.O., E.L. Petersen, I. Troen, 1984, Extrapolation of mean wind statistics with special regard to wind energy applications, WMO, Geneve, CH, WMO Technical Note 15, 85 p.
- Kahma, K.K., C.J. Calkoen, 1992, Reconciling discrepancies in the observed growth rate of waves, *J. Phys. Oceanogr.* 22, p. 1271-1285
- Kahma, K.K., H. Petterson, 1994, Wave growth in a narrow fetch geometry, *The Global Atmosphere and Ocean System* 2, p. 253-263
- Kleine, R., 2000, Onderhoudsplan golfmeetopstellingen, Rijkswaterstaat Directie IJsselmeergebied, afdeling ANM, reg.nr. 09.5.09.001
- Koenjer, Ch., 2000, Aanbieding Regionaal Golvenmeetnet RGM 005, Rijkswaterstaat Directie IJsselmeergebied, afdeling ANM, reg.nr. 032.5.04.240
- Kudryavtsev V.N., V.K. Makin, 1996, Transformation of wind in the coastal zone, KNMI wetenschappelijk rapport WR 96-04
- Makin, V.K. , 2002, A note on the parameterization of the sea dag, ingdiend voor publicatie bij "Boundary-Layer Meteorology"; ook verschenen als KNMI-preprints no. 2002-12
- Mathworks, the, 1998, MATLAB, versie 5.3
- Meer, J.W. van der, 1997, Golfoploop en golfoverslag bij dijken, Delft Hydraulics, rapport H2458 I H3051
- Otta, A.K., J.W. van der Meer, 2000, Wave height distribution over a shallow fore-land from Boussinesq modelling, Proc. Int. Conf. Coastal Structures, Santander, Spanje, 7-10 June 1999, Ed. I.J. Losada, Balkema, Rotterdam, p. 47-55
- Panofsky, H.A., J.A. Dutton, 1984, Atmospheric Turbulence, John Wiley and Sons New York, 420 p.
- Radder, A.C., 2001, Wind stress induced by sea waves, RIKZ-werkdocument RIKZ/OS/2001.133X (i.k.v. Nautilus-project)

-
- Rijkswaterstaat, 2002, Hydraulische Randvoorwaarden 2001 voor het toetsen van primaire waterkeringen, DG Rijkswaterstaat
- Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), 2002, Kwaliteitsverbetering Golfrandvoorwaarden Primaire Waterkeringen, RIKZ, Den Haag, NL
- Simiu, E. , R.H. Scanlan, 1986, Wind effects on structures, John Wiley and Sons New York, 590 p.
- Tennekes, H., J.L. Lumley, 1972, A first course in turbulence, MIT Press, Cambridge, MA (USA), 300 p.
- Tennekes, H., 1973, The logarithmic wind profile, J. Atmos. Sci. 30, 234-238
- Verkaik, J.W., 2001, Parallelmetingen van wind op Wijdenes-Berkhout en Stavoren Haven – Stavoren AWS, intern rapport KNMI
- Vledder, G.Ph., 1999, Source term investigation SWAN, ALKYON Rapport A162 (i.o.v. RIKZ)
- Waal, J.P. de, 2002, Wave growth limit in shallow water, Proc. 4th Int. Conf. on Ocean Waves (WAVES2001), Ed. B.L. Edge, 2-6 sept. 2001, San Francisco, 580-589
- Waal, J.P. de, 2002b, Windmodellering voor bepaling waterstanden en golven, RIZA-rapport (concept)
- Westphal, R., J. Hartman, 1999, Achtergronden Hydraulische Belastingen Dijken IJsselmeergebied, deelrapport 1, Een ontwerpmethodiek, RIZA, Lelystad, NL, rapport 99.037
- Wieringa, J. en P.J. Rijkoort, 1983, Windklimaat van Nederland, Staatsuitgeverij Den Haag, Den Haag, NL, 264 p
- Wu, J., 1984, Wind stress coefficients over sea breeze to hurricane, J. Geophys. Res. 87 C12, 9704-9706
- Young, I.R., L.A. Verhagen, 1996, The growth of fetch limited waves in water of finite depth, Part I: Total energy and peak frequency, Coastal Engineering 29, 47-78
- Young, I.R., 1998, An experimental investigation of the role of atmospheric stability in wind wave growth, *Coastal Engineering* 34, p. 23-33

BIJLAGEN

.....