

De invloed van de wind op het jaargemiddelde hoogwater langs de Friese en Groninger waddenkust

J.H. Bossinade ¹⁾
J. van den Bergs ¹⁾
K.S. Dijkema ²⁾

569450

IBN-DLO
Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek
Afdeling B.A.
Postbus 23
6700 AA WAGENINGEN

¹⁾ Rijkswaterstaat, Directie Groningen, Nota Gran 1993-2009

²⁾ Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek, Texel, IBN-rapport 049

1993

IBN - DLO
Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek
Postbus 167
1790 AD DEN BURG - TEXEL



CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS

0000 0586 0164

IBN-RAPPORT **IT**

INHOUD

1. Samenvatting en conclusies.	1
2. Inleiding.	2
3. Methode.	4
3.1 Keuze van de parameters en herkomst van de gegevens.	5
3.2 Opzet onderzoek.	6
4. Relatie GHWJ met de jaargemiddelde windsnelheid en -richting.	6
5. Jaargemiddelde opzet berekend uit windwaarnemingen.	10
5.1 Theorie windopzet.	10
5.2 Modelopzet aan de hand van de theorie.	11
6. Berekeningen met het model.	14
7. Discussie.	16
9. Literatuur.	18
Appendix.	19

1. Samenvatting en conclusies.

Langs de Friese en Groninger waddenkust bedraagt de trendmatige verhoging van het jaargemiddeld hoogwater over de periode 1933 t/m 1980 ongeveer 0.25 cm/jaar (tabel 2.1). Bij het onderzoek in de vastelandskwelders is over het tijdvak 1961-1983 een trendmatige verhoging van het jaargemiddeld hoogwater van 0.44 cm per jaar berekend. Duitse onderzoekers komen tot dezelfde waarde. Deze trend is statistisch nauwelijks significant vanwege de grote spreiding in de hoogtes van het jaargemiddeld hoogwater, verder aangeduid met GHWJ, en de relatief geringe lengte van de tijdreeks. Toch moet niet uitgesloten worden geacht dat er een versnelde stijging van het GHWJ ten opzichte van de genoemde trend van 0.25 cm/jaar plaats vindt. Kennis betreffende de achtergrond(en) van deze verhoogde trendwaarde kan behulpzaam zijn bij het vaststellen van beleids- en beheersmaatregelen betreffende het kwelderareaal.

In de voorliggende nota wordt getracht de hogere trendwaarde te verklaren uit het windklimaat, de meest voor de hand liggende van een aantal mogelijke oorzaken. Om praktische redenen zijn de berekeningen voor het getijmeetstation Harlingen gemaakt.

Na vaststelling van de windinvloed op het GHWJ is met een eenvoudig model deze invloed rechtstreeks uit windwaarnemingen berekend in de vorm van een jaargemiddelde waarde voor de windopzet. Deze jaargemiddelde windopzet is als correctie toegepast op de GHWJ's tezamen met een correctie voor luchtdrukverschillen. Van de aldus gecorrigeerde GHWJ reeks is opnieuw een trendwaarde berekend.

Het verband tussen de GHWJ's en het windklimaat is aangetoond met behulp van variantie analyse van de jaargemiddelde windsnelheid en -richting en het GHWJ. 75% van de variantie van het GHWJ kon verklaard worden uit de variantie van de lengte van de windvector.

Met het model is de jaargemiddelde opzet rechtstreeks uit de uurwaarden van de windsnelheid en -richting berekend. Ongeveer 74% van de variantie van het GHWJ kan via het model uit het windklimaat verklaard worden.

Trendanalyse van de voor windopzet en luchtdruk gecorrigeerde GHWJ-reeks geeft als uitkomst een stijgende trend van ca 0.23 cm per jaar. Hoewel deze waarde goed aansluit bij de lange termijn trend van 0.27 cm/jaar voor Harlingen (tabel 2.1), moet aangetekend worden dat de statistische betrouwbaarheid niet groot is omdat in de gecorrigeerde GHWJ-reeks behalve een nog steeds grote spreiding, een trendbreuk optreedt.

Geconcludeerd is dat vooral voor relatief korte tijdreeksen berekende trends sterk beïnvloed worden door de van jaar tot jaar wisselende windinvloed. Een al dan niet toevallige toename van wind uit opwaairichtingen zal zeker gepaard gaan met een stijging van het gemiddeld hoogwater. De trend van 0.46 cm/jr (fig 6.2) voor het GHWJ te Harlingen in de onderzoeksperiode (1971-1989), voorzover groter dan 0.27 cm/jr, kan aan een toegenomen windopzet in de zelfde periode toegeschreven worden.

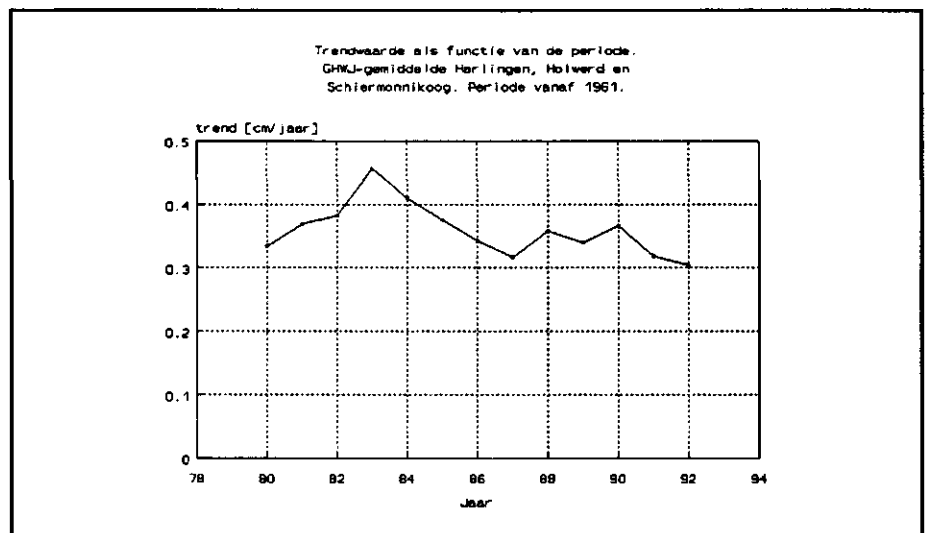
De vraag of een dergelijke toename van de wind in de toekomst te verwachten is kan niet beantwoord worden zolang niet precies bekend is welke invloed geleidelijke klimaatsveranderingen, zoals bijvoorbeeld veranderingen van lucht- en zeevatertemperatuur, op het windklimaat hebben. Het is daarom ook niet mogelijk met enige zekerheid voorspellingen te doen omtrent het gedrag van het GHWJ verloop in de toekomst.

2. Inleiding

De vastelandskwelders langs de Friese en Groninger kust zijn tot stand gekomen met behulp van landaanwinningswerken, tegenwoordig kwelderwerken genoemd. Kwelderwerken bestaan uit een systeem van door rijshoutdammen omgeven vakken met in de vakken gegraven sloten en greppels voor een betere afwatering. De bedoeling van het systeem is de reeds aanwezige kwelders tegen erosie te beschermen, het verbeteren van de opslibingscondities en het verbeteren van de condities voor de vestiging van kwelderplanten. Dit alles om te voldoen aan het beleid zoals vastgelegd in de Planologische Kernbeslissing Waddenzee waarin o.a. gesteld is dat het huidige kwelderareaal gehandhaafd - en waar mogelijk uitgebreid dient te worden.

In de periode 1960 tot ongeveer 1978 is het kwelderareaal behorende tot de kwelderwerken aanzienlijk toegenomen, maar daarna is op de meeste plaatsen de kwelderontwikkeling gestagneerd en in sommige gebieden is zelfs kwelder verloren gegaan. Als één van de mogelijke oorzaken van deze ongunstige ontwikkeling kwam de relatief grote stijging van het jaargemiddelde hoogwater (GHWJ) naar voren (lit.1 en een aantal onderzoeken in de Duitse Waddenzee, gepubliceerd in "Die Küste"). Over het tijdvak 1961-1983 bleek een trendmatige verhoging te zijn opgetreden van 0.44 cm/jaar, dat is meer dan de stijging die over een langere periode wordt gevonden. In de periode 1976-1983 bleek de totale stijging van het GHWJ zelfs 17 cm te bedragen. In die periode heeft het grootste verlies aan kwelder areaal plaats gevonden (ca 300 ha in Groningen). De berekende trendwaarde is vanwege het grillig verloop van de hoogtes van de GHWJ's behalve van de lengte ook tamelijk afhankelijk van begin- en eindjaar van de reeks. Ter illustratie van het voorgaande dient figuur 2.1, waarin het verloop van de trendwaarden van het GHWJ gemiddelde van de drie stations Harlingen, Schiermonnikoog en Holwerd geschetst is. Deze opeenvolgende trendwaarden werden berekend vanaf 1980 t/m 1992 met 1961 als beginpunt voor elke periode.

Figuur 2.1 Trendwaarden voor opeenvolgende periodes vanaf 1961 van het gemiddelde GHWJ van de stations Harlingen, Holwerd en Schiermonnikoog.



Ter vergelijking is in tabel 2.1 voor verschillende meetstations langs de Nederlandse kust de toename van het GHW over de periode 1900/1933 tot 1980 weergegeven. Deze varieert van 0.15 tot 0.33 cm/jaar. In het Waddengebiedgebied bedraagt deze toename ongeveer 0.25 cm/jaar.

Tabel 2.1 Gemiddelde relatieve niveau rijzing in cm per eeuw.
(bron: lit. 2)

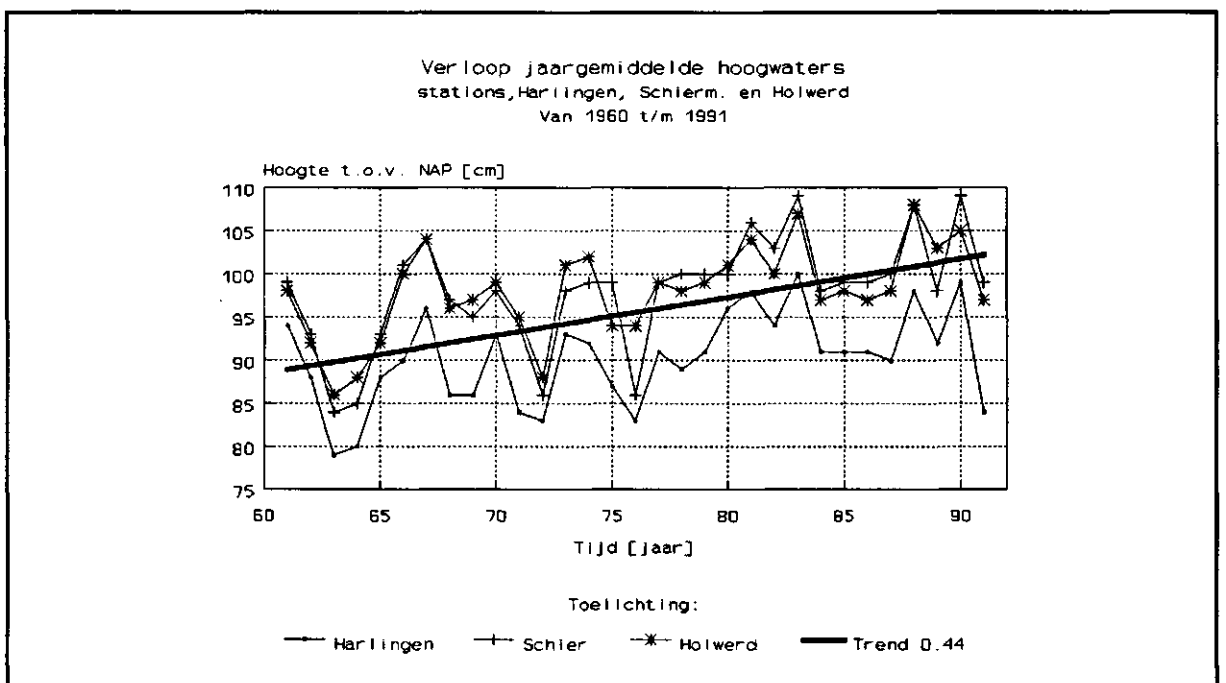
Plaats	gem. zeeniveau	gem. HW	gem. LW	gem. tijverschil	Berekenings periode
Vlissingen	22	33	19	14	1900 - 1980
H van Holland	19	22	16	6	1900 - 1980
IJmuiden	22	24	18	6	1900 - 1980
Den Helder	16	15	7	8	1933 - 1980
Harlingen	16	27	10	17	1933 - 1980
Delfzijl	15	17	16	1	1933 - 1980

Een verhoging van het GHWJ betekent voor de kwelderwerken een toename van de overvloedingsfrequentie van de rijzendammen. De belangrijkste functie van de rijzendammen is het beperken van de strijklengte van de wind. Als gevolg hiervan wordt de eroderende werking van de golfenergie van de lokaal opgewekte golven verminderd. Bij een toenemende overvloedingsfrequentie van de dammen zal de golfenergie tussen de dammen toenemen en als gevolg daarvan de kans op erosie. Bij de aanleg van rijzendammen, die ongeveer 30 jaar lang meegaan, wordt uitgegaan van een overvloedingsfrequentie van ongeveer 100 keer per jaar. Bij een versnelde toename van het GHWJ zal gedurende een periode van 30 jaar de overvloedingsfrequentie aanzienlijk worden verhoogd, waardoor de effectiviteit van de dammen achteruitgaat. Om dit te voorkomen zal de aanleghoogte van de nieuwe dammen verhoogd moeten worden met de verwachte stijging van het GHWJ. Echter, hogere dammen betekenen hogere kosten. Vandaar dat het voor de beheerder van de kwelderwerken van belang is te weten of de relatief grote stijging van het GHWJ te wijten is aan een min of meer toevallige korte termijn fluctuatie of dat er sprake is van een meer structureel versnelde toename. De bedoeling van dit onderzoek is om de oorzaak van de geconstateerde versnelde GHWJ stijging te verklaren. Het onderzoek is als volgt uitgevoerd. In eerste instantie is het verband aangetoond tussen de wind en het GHWJ (hoofdstuk 4). Daarna is een model geconstrueerd waarmee de windinvloed gekwantificeerd is (hoofdstuk 5). Vervolgens is in hoofdstuk 6 het GHWJ gecorrigeerd met behulp van voornoemd model, waarna de trendlijn voor de gecorrigeerde waarden is bepaald. Alvorens op de uitvoering van het onderzoek wordt ingegaan is in hoofdstuk 3 een overzicht gegeven van parameters en gegevensbronnen.

3. Methode.

Uit het verloop van het GWHJ blijkt dat deze aanzienlijk fluctueert (fig 3.1)., waarbij opvalt dat het patroon van de fluctuaties voor elk van de stations tamelijk synchroon verloopt. Het ligt voor de hand dat deze variatie grotendeels wordt veroorzaakt door de wind, omdat het windklimaat van jaar tot jaar verschilt als gevolg van toevallige drukverdelingen. Naast de wind kunnen ook nog andere factoren een invloed uitoefenen op het GWHJ, zoals baggerwerk, een verschuiving van amphidromische punten en een verhoging van de gemiddelde zeestand. De invloed van de laatste drie wordt gekenmerkt door een geleidelijke verandering van het GWHJ waarin geen sterke fluctuaties te verwachten zijn. Door nu het GWHJ te corrigeren voor de windinvloed kan een indruk worden verkregen of er sprake is van een meer structurele toename of niet. Mocht het namelijk zo zijn dat de trend van deze gecorrigeerde waarden nog steeds aanzienlijk positief afwijkt van de gemeten trend van 0.27 cm/jaar, dan is dit een aanwijzing dat er inderdaad sprake is van een structureel versnelde toename van het GWHJ. Is dit niet het geval is dan is de kans groot dat de toename gekoppeld is aan het windklimaat. Een versnelde trendmatige stijging van het GWHJ moet dan gepaard gaan met een eveneens trendmatige toename van de jaargemiddelde resulterende windsnelheden waarbij westelijke richtingen overheersend zijn.

Fig. 3.1 Verloop jaargemiddeld hoogwater van de stations Harlingen, Schiermonnikoog, Harlingen en de trend 0.44 cm/jr. geldend voor het tijdvak '61-'83



3.1 Keuze van de parameters en herkomst van de gegevens.

Voor het onderzoek zijn de hierna opgesomde parameters van belang:

1. windrichting en -snelheid.
2. opgetreden waterstand
3. berekende waterstand (astronomisch getij).
4. luchtdruk

Er is geen waarnemingsstation in het waddengebied waarvoor de gekozen gegevens simultaan beschikbaar zijn. Er is daarom gezocht naar stations waar één of meer van genoemde parameters gemeten worden en die op niet al te grote afstand van elkaar liggen, waarbij ook nog tijdreeksen van voldoende lengte gemeten zijn. Leeuwarden is het enige station in de omgeving waar luchtdruk gemeten is en Lauwersoog het enige station waar wind gemeten is met reeksen van voldoende lengte. Van de stations waarvan gemeten- en berekend getij bekend zijn is Harlingen het meest geschikt.

Aangenomen wordt dat behalve voor relatief kleine weersystemen zoals buien, die meestal ook nog van korte duur zijn, de in Leeuwarden gemeten luchtdruk en de in Lauwersoog gemeten wind representatief zijn voor het zeegebied dat bepalend is voor de waterstanden in Harlingen.

De wind- en waterstandsgegevens komen uit het gegevensbestand Dtbest (ICIM), de luchtdrukgegevens zijn afkomstig van het KNMI. De onderzoeksperiode is beperkt tot het tijdvak 1971 t/m 1989, omdat buiten deze periode (nog) geen windgegevens van het station Lauwersoog ingevoerd zijn.

De waterstandsgegevens zijn beschikbaar als reeksen met een interval van tien minuten. De windsnelheid en -richting worden in reeksen met gemiddelde uurwaarden gegeven, de luchtdrukgegevens tenslotte als jaargemiddelden met uitzondering van de jaren '88 en '89 waarvan de uurwaarden bekend zijn.

De tienminutenreeksen zijn getransformeerd naar uurreeksen, de uurwaarden zijn het gemiddelde van 6 tienminutenwaarden.

In tabel 3.1 is ter verduidelijking een overzicht gegeven van aard, meetpositie en herkomst van de gebruikte gegevens.

Tabel 3.1 Aard en herkomst onderzoeksgegevens.

Waarnemingssoort	Meetpositie	Dbase	Herkomst
Waterstand	Harlingen	Dtbest	ICIM
Luchtdruk	Leeuwarden	-	KNMI
Wind	Lauwersoog	Dtbest	ICIM

3.3. Opzet onderzoek.

Om de vraagstelling zoals vermeld in de inleiding te kunnen beantwoorden is het onderzoek opgesplitst in drie delen namelijk:

1. bepalen in welke mate de variatie in GHWJ verklaard kan worden door wind;
2. het uitwerken van een methode waarmee windopzet berekend kan worden uit windsnelheid en -richting;
3. bepalen van de trendlijn van de voor windopzet en luchtdruk gecorrigeerde GHWJ-waarden.

Het eerste deel is aangepakt door het verband te bepalen van het GHWJ met de gemiddelde windsnelheid en -richting. Hiervoor is een rekenprogramma opgesteld dat uit uurwaarnemingen van windsnelheid en -richting een jaargemiddelde vector berekend. Vervolgens is deze jaargemiddelde vector in verband gebracht met het GHWJ.

Bij het tweede deel is een model geconstrueerd aan de hand van theoretische beschouwingen uit lit.6. Met dit model is de jaargemiddelde windopzet berekend voor het station Harlingen.

Bij het derde deel werd het GHWJ gecorrigeerd voor luchtdruk en de met het model berekende windopzet. Op de aldus gecorrigeerde GHWJ reeks werd vervolgens een trendanalyse uitgevoerd.

4. Relatie GHWJ met de jaargemiddelde windsnelheid en -richting.

Wind heeft afhankelijk van snelheid en richting een effect op de waterstand, vooral in gebieden met een grote wateroppervlakte. Het verschijnsel wordt doorgaans aangeduid met op- c.q. afwaai, hier verder aangeduid met windopzet. Indien de gemiddelde windopzet van jaar tot jaar verschilt dan zal dit een verschil in de gemiddelde waterstand van de onderscheiden jaren veroorzaken. De gemiddelde hoogwaterstand wordt eveneens beïnvloed. Indien de waterstandsverschillen veroorzaakt door wind een overheersend karakter hebben ten opzichte van waterstandsverschillen door andere oorzaken, uitgezonderd getijwerking, dan moet dit aantoonbaar zijn.

De opgetreden wind in enig jaar kan goed tot uitdrukking gebracht worden in de som van de uurvectoren. Deze somvector kan gezien worden als het netto resultaat van de wind over het gehele jaar. Onderzocht is of de lengte en richting van deze somvectoren correleren met de GHWJ's. De GHWJ's werden gecorrigeerd voor luchtdruk. Immers, elke millibar drukverschil van de ene met de andere plaats resulteert in een waterstandsverschil van één cm. Daartoe is de gemiddelde luchtdruk berekend over de gehele onderzoeksperiode. Het verschil van dit gemiddelde met het jaargemiddelde is als correctie op het GHWJ toegepast. De verdeling van de windrichtingen in op- en afwaai-richtingen is overgenomen uit het Wadgidsenboek (lit.3). De opwaaisector is hier gedefinieerd als de sector van zuidzuidwest over noord tot noordnoordoost (225° - 045°).

Met een rekenprogramma zijn voor elk jaar de x- en y-waarden van de windvectoren berekend. De per jaar gesommeerde waarden zijn weer omgerekend naar een vector. Indien de lengte van deze vector uitgedrukt wordt in meters kan deze beschouwd worden als de netto verplaatsing van een luchtdeeltje door wind in het betreffende jaar. In tabel 4.1 zijn de resultaten van de berekeningen weergegeven.

Tabel 4.1 Somvectoren en gemiddelde wind per jaar uit uurwaarnemingen te Lauwersoog.

Jaar	Som X-Y vectoren		Somvec. [m/s]	Gemiddelde wind		Waarn. #
	X [m/s]	Y [m/s]		[m/s]	[gr.]	
71	-1757	867	1959	0.30	296	6552
72	-1541	-4201	4474	0.51	200	8784
73	-16711	706	16726	1.97	272	8496
74	-12720	-4651	13544	1.55	250	8758
75	-6967	-493	6983	0.80	266	8749
76	-702	1136	1336	0.15	328	8755
77	-10338	-6747	12345	1.41	237	8737
78	-9683	-2080	9904	1.29	258	7691
79	-10728	-10455	14979	1.72	226	8738
80	-9437	-2613	9792	1.12	255	8760
81	-15356	-121	15356	1.79	270	8612
82	-11325	-8557	14194	1.63	233	8739
83	-19732	-3702	20076	2.33	259	8612
84	-7259	-1068	7337	0.84	262	8773
85	-12134	-6569	13798	1.58	242	8731
86	-11717	-5315	12866	1.47	246	8747
87	-9052	-2168	9307	1.09	257	8583
88	-16509	-766	16527	1.88	267	8783
89	-11407	-2481	11673	1.33	258	8747

In de kolom 'Gemiddelde wind' is de vector van de gemiddelde wind in m/s opgenomen, deze is berekend door de lengte van de somvector te delen door het aantal uurwaarnemingen. Het aantal waarnemingen is maximaal 8760 per jaar (in een schrikkeljaar 8784), door storingen in de opneemapparatuur wordt dit aantal niet altijd bereikt (zie kolom Waarn). Het uitvalpercentage is in bijna alle gevallen zo gering dat de berekende somvector en het windgemiddelde voldoende betrouwbaar zijn. In tabel 4.2 zijn de GHWJ's van Harlingen voor de jaren 1971 t/m 1990 weergegeven. Kolom 5 bevat de voor luchtdruk gecorrigeerde GHWJ's. Met deze waarde en de berekende jaargemiddelde windsnelheid- en richting is een regressieberekening uitgevoerd waarbij het gecorrigeerde GHWJ als onafhankelijke variabele beschouwd wordt.

Tabel 4.2 Voor luchtdruk gecorrigeerd gemiddeld hoogwater te Harlingen. (1014.8 = 0) De correctie is toegepast t.o.v. de gemiddelde luchtdruk over de periode 1971-1991 die 1014.8 bedraagt.

Jaar	GHWJ	Luchtdr - 1000	Correctie	Gecorrig. GHWJ
71	84	16.0	1.2	85.2
72	83	15.3	0.5	83.5
73	93	16.1	1.3	94.3
74	92	12.6	-2.2	89.8
75	87	16.9	2.1	89.1
76	83	15.7	0.9	83.9
77	91	13.3	-1.5	89.5
78	89	13.4	-1.4	87.6
79	91	13.0	-1.8	89.2
80	96	14.1	-0.7	95.3
81	98	13.6	-1.2	96.8
82	94	15.0	0.2	94.2
83	100	15.2	0.4	100.4
84	91	14.2	-0.6	90.4
85	91	15.0	0.2	91.2
86	91	15.0	0.2	91.2
87	90	15.8	1.0	91.0
88	98	14.0	-0.8	97.2
89	92	16.5	1.7	93.7
90	99	15.2	0.4	99.4

De berekeningsresultaten, uitgevoerd met het statistische programmapakket 'SPSS', zijn opgenomen in appendix A.

Fig 4.1^a Hoogte GHWJ t.o.v. gemiddelde versus de jaargemiddelde windsnelheid.

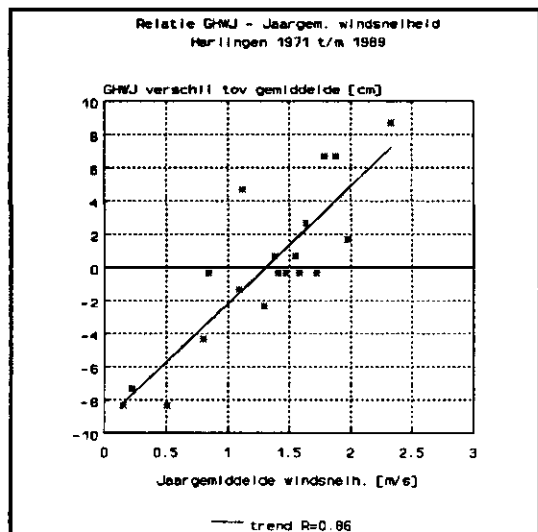
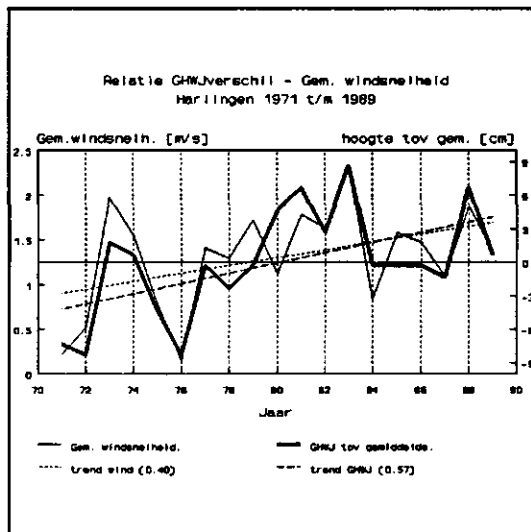


Fig 4.1^b Hoogteverloop GHWJ t.o.v. het gemiddelde en verloop gemiddelde wind in de tijd en hun regressielijnen.



Uit de berekeningen zijn de volgende conclusies getrokken:

- 74 % van de variantie van de afhankelijke variabele GHWJ wordt verklaard uit de variantie van de onafhankelijke variabele windsnelheid, dit percentage wordt slechts 3% hoger door toevoeging van de onafhankelijke variabele windrichting;
- de onafhankelijke variabele richting heeft geen significante bijdrage omdat
 1. de verklaarde kwadraatsom van de variantie nauwelijks toeneemt bij het betrekken van de richting van de gemiddelde wind in de analyse en
 2. de correlatiecoëfficiënt GHWJ-richting klein is;
- De F-toets geeft aan dat de regressie significant is.

Samenvattend betekent dit dat de variaties in hoogten van de jaargemiddelde hoogwaters sterk samenhangen met de lengte van de gemiddelde windvector. In de figuren 4.1^{a+b} wordt dit tot uitdrukking gebracht. De gestandaardiseerde regressiecoëfficiënten voor GHWJ en windsnelheid, respectievelijk 0.57 en 0.40, geven aan dat de trendmatige toename van het GHWJ in de onderzoeksperiode groter is dan de trendmatige toename van de windsnelheid. De richting van de gemiddelde windvectors is globaal zuidwest (tabel 4.1). Het onderlinge richtingsverschil, vooral voor de langste vectoren, is niet groot. Hierdoor is de invloed van de richting in bovenstaande berekening gering omdat op één na (1972) alle resulterende richtingen "opwaairichtingen" zijn.

5. Jaargemiddelde opzet berekend uit windwaarnemingen.

In de vorige paragraaf is de relatie beschreven tussen de jaargemiddelde windsnelheid en -richting en het GHWJ. De windsnelheid is bepalend in deze relatie omdat de jaargemiddelde windrichtingen onderling weinig verschillen.

In de volgende paragrafen is een methode beschreven waarbij de jaargemiddelde opzet rechtstreeks uit windsnelheid en -richting berekend wordt. Het GHWJ kan zodoende behalve voor luchtdruk ook gecorrigeerd worden voor windopzet. Eventuele trends die niet door wind veroorzaakt worden komen in de aldus gecorrigeerde reeks duidelijker naar voren. Met een regressieberekening voor de gecorrigeerde waarden wordt vervolgens een resterende trend berekend. Eerst zullen de theoretische aspecten van de opzet summier belicht worden. Aan de hand van de theorie is een vereenvoudigd model opgezet waarmee de jaargemiddelde opzet uit de wind berekend is.

5.1 Theorie windopzet.

Opzet wordt behalve door de wind ook veroorzaakt door luchtdrukverschillen. Er is een eenvoudige relatie waarbij een drukverschil, in ruimtelijke zin, van één millibar aan het wateroppervlak een waterstandsverschil van één cm veroorzaakt. Het is ingewikkelder gesteld met de opzet door de wind zelf. Deze opzet wordt veroorzaakt door de sleepkracht die de wind op het wateroppervlak uitoefent. De grip die de wind op het wateroppervlak heeft wordt tot stand gebracht door de ruwheid van het wateroppervlak die bepaald wordt door golven. Kleine golfjes die zich op de grotere golven bevinden zijn de belangrijkste elementen van deze ruwheid. De parameters die de opzet bepalen zijn:

1. windsnelheid
2. weerstand (coëfficiënt, afhankelijk van type water)
3. lengte vrije oppervlak (vaak aangeduid met 'fetch')
4. tijdsduur waarmee de wind waait
5. waterdiepte gekoppeld met de getijfase

In het geval van de Waddenzee is ook de waterstand in de Noordzee van belang.

De sleepkracht kan berekend worden met:

$$\tau = \rho_a U^2. \quad (1)$$

waarin U . de schuifspanningssnelheid aan het wateroppervlak en ρ_a de soortelijke massa van de lucht. Uitdrukking 1 kan herschreven worden als:

$$\tau = \rho_a C_h U_h^2 \quad (2)$$

waarin C_h de weerstandscoefficient behorende bij U_h is en U_h de windsnelheid is op h meter boven het wateroppervlak. De schuifspanningssnelheid U . wordt nu berekend als het product van de windsnelheid gemeten op hoogte h , meestal tien meter, en de weerstandscoefficiënt C_h op dezelfde hoogte.

$$U_* = C_b U_b^2 \quad (3)$$

De weerstandscoefficiënt is experimenteel bepaald. De uitkomsten voor grote vrije oppervlakken zoals oceanen en kleinere oppervlakken zoals van meren zijn verschillend, omdat beide soorten oppervlakken een verschillende ruwheid hebben. Kleinere oppervlakken hebben een grotere ruwheid omdat er relatief meer golven met een kleinere golfhoogte voorkomen die, zoals reeds eerder gesteld, de belangrijkste factor voor de oppervlakte-ruwheid zijn. Aangezien C afhankelijk is van het golfklimaat is C dus ook afhankelijk van de windsnelheid. Een algemeen aanvaarde waarde van C_{10} voor kleinere oppervlakken zoals de Waddenzee is $2.5 \cdot 10^{-3}$ (lit.6); deze waarde geldt voor windsnelheden groter dan 15 m/s.

Uitdrukking (1) kan nu herschreven worden tot:

$$\tau = \rho_a C_{10} U_{10}^2 \quad (4)$$

Bij grotere windsnelheden speelt de dichtheid van het water ook een rol. Dit wordt tot uitdrukking gebracht in:

$$\tau = k \rho_w U_{10}^2 \quad (5)$$

waarin ρ_w de dichtheid van water is. Met (4) in (5) gesubstitueerd is:

$$k_{10} = \rho_a C_{10} / \rho_w \quad (6)$$

Voor dichtheden van $1.293 \cdot 10^{-3}$ en 1.02 kg/l respectievelijk voor lucht en water is de k_{10} waarde voor de Waddenzee op $3.29 \cdot 10^{-6}$ berekend.

De opzet S wordt berekend met:

$$\frac{S}{d} = \frac{k_{10} U_{10}^2 F_x}{2gd^2} \quad (7)$$

waarin: U de windsnelheid op 10 m hoogte, d de diepte, g de zwaartekrachtversnelling en F_x de windrichting afhankelijke fetch. Deze uitdrukking geldt voor opgesloten wateroppervlakken zoals meren met een uniforme breedte. Hoewel de Waddenzee niet geheel aan deze voorwaarde voldoet, er zijn immers verbindingen met de Noordzee, wordt bij gebrek aan een beter alternatief het 'framework' van uitdrukking 7 gebruikt.

5.2 Modelopzet aan de hand van de theorie

Uitdrukking 7 geeft aan dat de opzet evenredig is met het kwadraat van de windsnelheid, met de lengte van het wateroppervlak in de windrichting en omgekeerd evenredig met de diepte. Hiervan uitgaande is een vereenvoudigd model opgezet waarbij voor de parameters d , de diepte en F_m , de maximale fetch (32 km), constanten worden ingevoerd. Omdat de fetch afhangt van de windrichting wordt in het model een windrichtingsafhankelijke fetch (F_x) berekend. Voor de diepte is de gemiddelde diepte, ongeveer 3m, van de

maximale fetch genomen. Deze benadering is gekozen omdat de gemiddelde fetchdiepte behalve van de getijfase en de opzet ook afhangt van de windrichting (andere fetch) en de waterstand in de Noordzee. Er is van afgezien deze ingewikkelde relaties verder uit te werken, er wordt van uitgegaan dat de invloed van deze ruwe benadering grotendeels 'uitgemiddeld' wordt vanwege het grote aantal waarnemingen. Genoemde vereenvoudiging reduceert het aantal variabelen waarmee gerekend wordt tot twee, namelijk windsnelheid en -richting. Uitdrukking (7) kan nu zodanig herschreven worden dat de constanten bijelkaar in één coëfficiënt (a) ondergebracht worden:

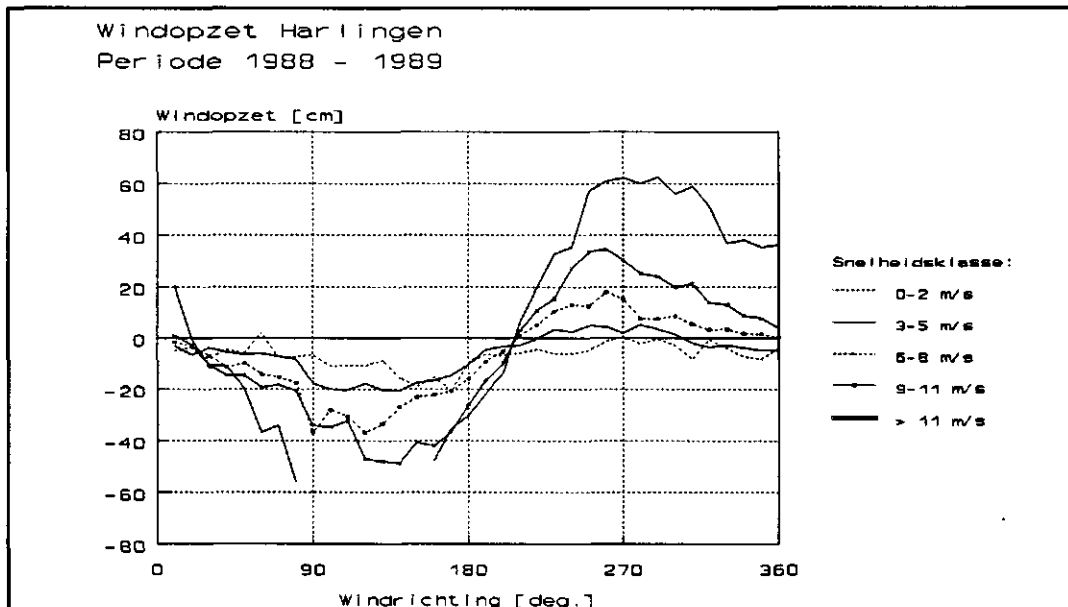
$$S = \frac{k_{10} U_{10}^2 F_r}{2gd} = a * \frac{U_{10}^2 F_r}{F_m} \quad (8)$$

waarin:

$$a = \frac{k_{10} F_m}{2gd} = \frac{3.29 * 10^{-6} * 32000}{2 * 10 * 9.8} = 1.75 * 10^{-3} \quad (9)$$

De relatie windrichting-fetch is bepaald door voor een tijdreeks met een lengte van twee jaar de gemeten windopzet (verschil waargenomen- en astronomisch getij) uit te zetten tegen de windrichting voor vijf klassen van de windsnelheid. In figuur 5.1 is deze relatie weergegeven.

Figuur 5.1 Windopzet Harlingen.



Uit de figuur blijkt dat:

- de omslagpunten opwaai naar afwaai v.v. (fetch 0) op een lijn met de richting 200-020 liggen. Dit komt goed overeen met de richting van de kustlijn ter plaatse.
- de invloed van de windrichting op de hoogte van de opzet verloopt ongeveer sinusvormig.
- voor windsnelheden < 3 m/s is er weliswaar een sinusvormig verloop van de opzet met de windrichting, maar het gemiddelde van de opzet is altijd negatief. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat het referentieniveau voor de berekening van het astronomisch getij te hoog gekozen is.

Uit het voorgaande is geconcludeerd dat de fetchlengte met redelijke nauwkeurigheid voor iedere richting berekend kan worden met:

$$F_r = -\sin(W_r - 20) * F_m \quad (10)$$

waarin:

- F_r richtingsafhankelijke fetch
- W_r windrichting in graden
- F_m maximale fetch (32 km)

De fetch voor de afwaairichtingen wordt negatief gerekend.

Uit testberekeningen met het model bleek dat de beste resultaten verkregen werden met verschillende coëfficiënten voor op- en afwaai. Deze coëfficiënten, waar ook een factor 100 inbegrepen is om de modeluitkomsten in cm te berekenen, zijn door 'trial and error' bepaald. De coëfficiënten voor op- en afwaai werden vastgesteld op respectievelijk -40 en -47. Deze coëfficiënten zijn in het model samen genomen met de eerder bepaalde coëfficiënt a , voor opwaairichtingen werd a herberekend op $-40 * 1.75 * 10^{-3} = -0.70$ en voor afwaairichtingen op $-47 * 1.75 * 10^{-3} = -0.82$. Met het voorgaande gesubstitueerd in uitdrukking 8 werd het volgende modelalgoritme opgesteld:

$$O_{jg} = \frac{\left(\sum_{kl=10}^{kl=200} -0.82 * V_{kl}^2 * \sin(R_{kl} - 20) \right) + \left(\sum_{kl=210}^{kl=360} -0.70 * V_{kl}^2 * \sin(R_{kl} - 20) \right)}{n}$$

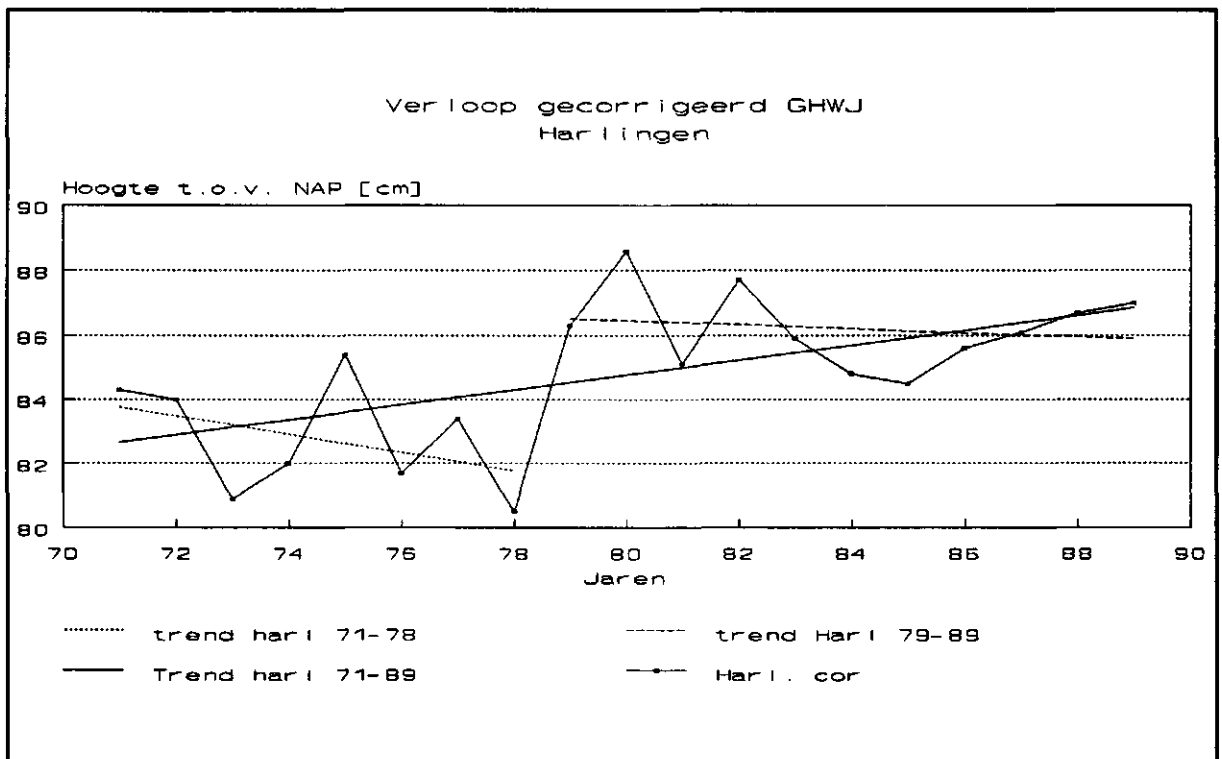
waarin:

- | | | |
|----------|---|--------|
| O_{jg} | de jaargemiddelde opzet | [cm] |
| kl | richtingsklasse (klassebreedte 10°) | [deg.] |
| R | windrichting | [deg.] |
| V | windsnelheid | [m/s] |
| n | totaal aantal waarnemingen (uur/jaar) | [-] |

6. Berekeningen met het model.

De jaargemiddelde opzet berekend met het model, de luchtdrukcorrectie, het berekende GHWJ en het voor luchtdruk en windopzet gecorrigeerde GHWJ zijn weergegeven in tabel 6.1. Uit analyse van de variantie van de berekende opzet en de variantie van het GHWJ blijkt dat 74% van de variantie van het GHWJ verklaard kan worden uit de variantie van de berekende opzet.

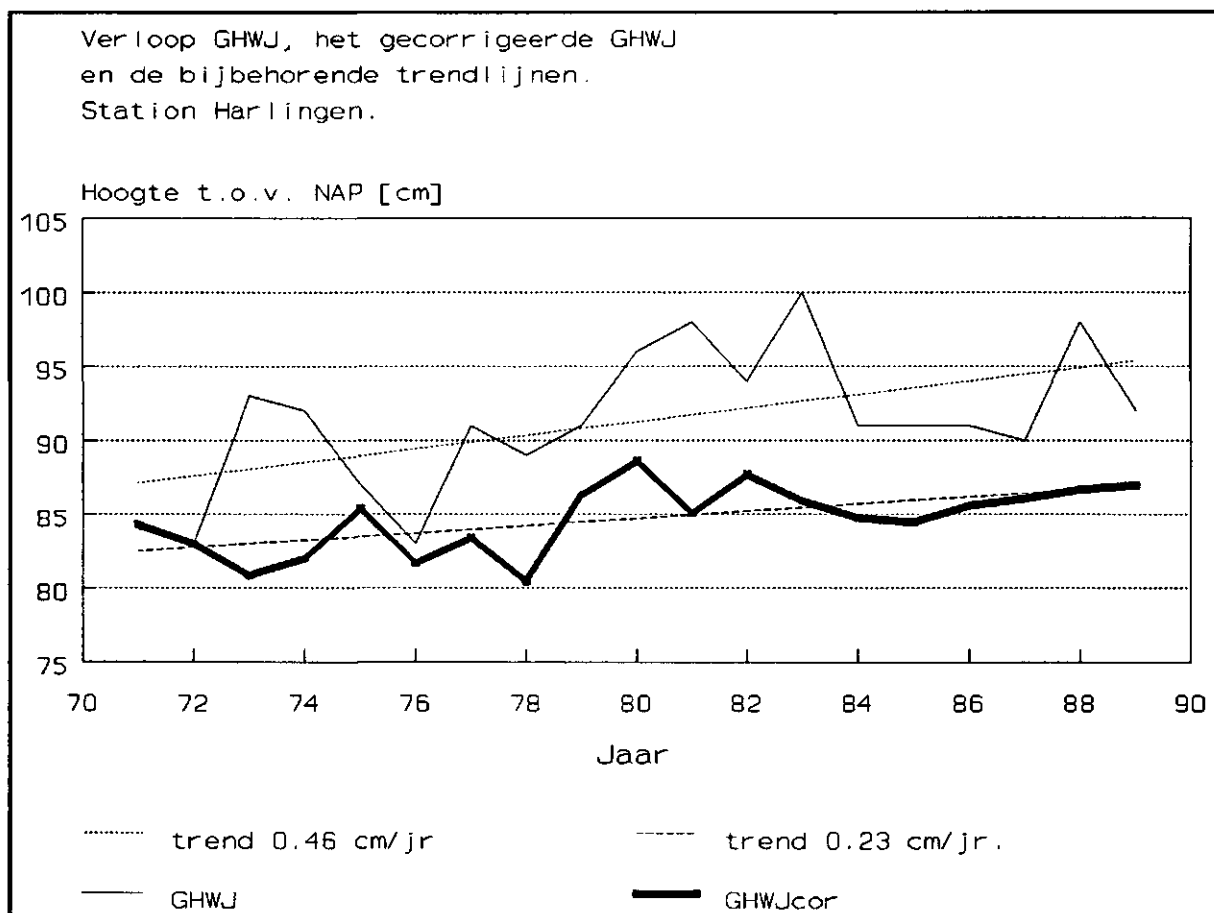
Figuur 6.1 Het verloop van het gecorrigeerde GHWJ in de tijd benevens de trendwaarde van de gehele- en twee deelperioden.



Hieruit blijkt duidelijk dat de schommelingen in de hoogten van de GHWJ's sterk gedomineerd worden door windinvloeden. Met behulp van regressieanalyse is het voor windopzet en luchtdruk gecorrigeerde GHWJ onderzocht op een aanwezige trend. Voor de berekenings-periode werd een trendmatige stijging, die voor de niet gecorrigeerde reeks 0.46 cm/jr bedraagt, van 0.23 cm/jr berekend (fig.6.2). Deze waarde komt overeen met de waarde die in tabel 2.1 voor het het Waddengebied gevonden wordt. Ondanks het feit dat het overgrote deel van de variantie van de GHWJ reeks verklaard kon worden vertoont de gecorrigeerde reeks nog aanzienlijke fluctuaties, zij het dat het interval

waarbinnen de fluctuaties plaats vinden teruggebracht is van 17 cm naar 8 cm. De F-toets geeft aan dat de kans dat de regressiecoëfficiënt nul is ongeveer 3% is. Een overzicht van deze trendanalyse is opgenomen in appendix A. Bij nadere beschouwing van het gecorrigeerde GHWJ verloop (fig.6.1) blijkt in '79 een trendbreuk in de reeks op te treden waardoor de regressiecoëfficiënt van 0.23 cm/jaar een geringe betrouwbaarheid heeft. De trends voor elk van de perioden voor- en na '79 hebben een negatieve waarde. De trendbreuk is vooralsnog niet verklaard. Het lag daarom voor de hand om te kijken of deze trendbreuk ook voor andere stations optreedt. Getracht is voor het station Holwerd op dezelfde manier als voor het station Harlingen de GHW's voor windopzet en luchtdruk te corrigeren. Dit is niet gelukt omdat de meetreeksen van de waterstanden van Holwerd veel hiaten vertonen en omdat de windopzet voor Holwerd niet goed op eenvoudige wijze gemodelleerd kon worden.

Figuur 6.2 Het verloop van het GHWJ, het gecorrigeerde GHWJ te Harlingen en de bijbehorende trendlijnen in de onderzoeksperiode (1971-1989)



Tabel 6.1 Het GHWJ te Harlingen, de berekende opzet, de luchtdrukcorrectie en het voor opzet en luchtdruk gecorrigeerde GHWJ te Harlingen.

Jaar	GHWJ	Opzet model	Delta P	GHWJ gecorrigeerd
71	84	0.9	1.2	84.3
72	83	-0.5	0.5	83.0
73	93	13.4	1.3	80.9
74	92	7.8	-2.2	82.0
75	87	3.7	2.1	85.4
76	83	2.2	0.9	81.7
77	91	6.1	-1.5	83.4
78	89	7.1	-1.4	80.5
79	91	2.9	-1.8	86.3
80	96	6.7	-0.7	88.6
81	98	11.7	-1.2	85.1
82	94	6.5	0.2	87.7
83	100	14.5	0.4	85.9
84	91	5.6	-0.6	84.8
85	91	6.7	0.2	84.5
86	91	5.6	0.2	85.6
87	90	4.9	1.0	86.1
88	98	10.5	-0.8	86.7
89	92	6.7	1.7	87.0

7. Discussie.

Bij het vergelijken van het GHWJ-verloop van de diverse stations in de Waddenzee valt op dat dit verloop tamelijk synchroon is. Het GHWJ-verloop van de stations Holwerd en Schiermonnikoog is nagenoeg identiek (fig. 3.1). Op grond van de ligging van beide stations zou wat betreft de windopzet een verschillend gedrag verwacht kunnen worden. Omdat dit kennelijk niet zo is wordt de windopzet in de Waddenzee minder bepaald door de plaats en meer bepaald door de waterstand in de aangrenzende Noordzee.

De goede resultaten van de windopzetberekeningen voor Harlingen zijn waarschijnlijk voor een deel te verklaren uit de omstandigheid dat de richting van de kustlijn ter plaatse, bepalend voor de op- en afwaaisectoren, overeenkomt met de op- en afwaaisectoren van de aangrenzende Noordzee. Het feit dat de berekende jaargemiddelde opzet voor het

station Holwerd (hier niet gepresenteerd) op grond van de lokale fetch-lengten een minder duidelijk verband met het GHWJ vertoont, versterkt dit vermoeden. Een model dat de plaatsafhankelijke opzet in de Waddenzee berekent zal, behalve de hier gebruikte, ook de parameters 'Waterstand Noordzee' en mogelijk de getijafhankelijke gemiddelde diepte van de fetch moeten bevatten.

Het onderzoek heeft duidelijk aangetoond dat de variaties in hoogte van de GHWJ's voornamelijk voor rekening van de windinvloed komen. Hiermee samenhangend zal een toenemende jaargemiddelde windsnelheid waarvan de richting globaal westelijk is een toename van de hoogte van het GHWJ veroorzaken. De vraag of een dergelijke toename van de wind te verwachten is in de toekomst kan niet beantwoord worden zolang niet precies bekend is welke invloed geleidelijke klimaatsveranderingen, zoals bijvoorbeeld veranderingen van lucht- en zeewatertemperatuur, op het windklimaat hebben. Het is daarom ook niet mogelijk met enige zekerheid voorspellingen te doen omtrent het gedrag van het GHWJ verloop in de toekomst.

9. Literatuur

1. Dijkema, K.S., J. van den Bergs, J.H. Bossinade, P. Bouwsema, R.J. de Glopper & J.W.Th.M. van Meegen 1988. Effecten van rijkendammen op de opslibbing en op de omvang van de vegetatiezones in de Friese en Groninger landaanwinningswerken. Rijkswaterstaat Directie Groningen, Nota GRAN 1988-2010; Rijksinstituut voor Natuurbeheer, RIN-rapport 88/66; Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, RIJP-rapport 1988-33 Cbw. 119 p.
2. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren 1989. Tienjarig Overzicht der waterhoogten, afvoeren en watertemperaturen 1971-1980, Den Haag. 536 p.
3. Bakker, N., K.S. Dijkema. Wadgidsen boek. Stichting Wadloopcentrum Pieterburen 1983. 95 p.
4. De Ronde, J.G. 1985. Wisselwerking tussen opzet en verticaal getij. Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren, nota GWIO 85.003 1985. 16 p.
5. Van Rijn, L.C. 1990. Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas, and oceans. University of Utrecht Department of Physical Geography, 1990 335 p.
6. Silvester, R. 1974. Coastal Engineering, II Sedimentation, estuaries, effluents, and modelling. Department of Civil Engineering, University of Western Australia, Nedlands, W.A., Australia, 1974. 338 p.

Appendix A

Berekeningen uitgevoerd met het statistisch programma SPSS.

Bepaling relatie somvector van de wind en het GHWJ

Regressieberekening met één onafhankelijke variabele (somvector):

N of Cases = 19

Correlation:

	GHWJ	SOMVEC
GHWJ	1.000	.863
SOMVEC	.863	1.000

Multiple R .86306
R Square .74487
 Adjusted R Square .72986
 Standard Error 2.49770

Analysis of Variance

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	309.62942	309.62942
Residual	17	106.05479	6.23852

F = 49.63190 Signif F = 0.0000

Regressieberekening met twee onafhankelijke variabelen (somvector en richting)

	GHWJ	SOMVEC	DIREC
GHWJ	1.000	.863	-.131
SOMVEC	.863	1.000	-.327
DIREC	-.131	-.327	1.000

Dependent Variable.. GHWJ

Variable(s) Entered on Step Number

- 1.. DIREC
- 2.. SOMVEC

Multiple R .87780
R Square .77054
 Adjusted R Square .74185
 Standard Error 2.44163

Analysis of Variance

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	2	320.29926	160.14963
Residual	16	95.38496	5.96156

F = 26.86371 Signif F = .0000

Bepaling relatie berekende opzet en het GHWJ

Listwise Deletion of Missing Data

	Mean	Std Dev	Label
OPZET	6.477	3.958	
GHWJ	91.263	4.806	

N of Cases = 19

Correlation:

	MODEL	GHWJ
OPZET	1.000	.860
GHWJ	.860	1.000

Equation Number 1 Dependent Variable.. GHWJ

Variable(s) Entered on Step Number
1.. OPZET

Multiple R .86042
R Square .74032
 Adjusted R Square .72504
 Standard Error 2.51988

Analysis of Variance

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	307.73727	307.73727
Residual	17	107.94694	6.34982

F = 48.46394 Signif F = .0000

Equation Number 1 Dependent Variable.. GHWJ

----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
OPZET	1.044689	.150064	.860416	6.962	.0000
(Constant)	84.496324	1.130941		74.713	.0000

Regressie-berekening GHWJ niet gecorrigeerd.

Mean Std Dev Label

JAAR	80.000	5.627
GHWJ	91.263	4.806

N of Cases = 19

Correlation:

	JAAR	GHWJ
JAAR	1.000	.536
GHWJ	.536	1.000

Equation Number 1 Dependent Variable.. GHWJ

Block Number 1. Method: Enter

Variable(s) Entered on Step Number

1.. JAAR

Multiple R	.53619
R Square	.28750
Adjusted R Square	.24559
Standard Error	4.17396

Analysis of Variance

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	119.51053	119.51053
Residual	17	296.17368	17.42198

F = 6.85976 Signif F = .0180

Equation Number 1 Dependent Variable.. GHWJ

----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
JAAR	<u>.457895</u>	.174828	.536193	2.619	<u>.0180</u>
(Constant)	54.631579	14.018993		3.897	.0012

End Block Number 1 All requested variables entered.

Regressieberekening gecorrigeerd GHWJ

	Mean	Std Dev	Label
JAAR	80.000	5.627	
GHWCOR	84.789	2.258	

N of Cases = 19

Correlation:

	JAAR	GHWCOR
JAAR	1.000	.579
GHWCOR	.579	1.000

Equation Number 1 Dependent Variable.. GHWCOR

Block Number 1. Method: Enter

Variable(s) Entered on Step Number

1.. JAAR

Multiple R	.57851
R Square	.33467
Adjusted R Square	.29553
Standard Error	1.89514

Analysis of Variance

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	30.71217	30.71217
Residual	17	61.05653	3.59156

F = 8.55120 Signif F = .0095

Equation Number 1 Dependent Variable.. GHWCOR

----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
JAAR	<u>.232123</u>	.079379	.578506	2.924	<u>.0095</u>
(Constant)	66.219649	6.365165		10.403	.0000

End Block Number 1 All requested variables entered.